RCMOS – Revista Científica Multidisciplinar O Saber.
ISSN: 2675-9128. São Paulo - SP.
Año VII, vol. 1 2026 | Envío: 27/06/2026 | Aceptado: 30/06/2026 | Publicación: 02/07/2026

Telemetría y estado de salud de baterías en flotas eléctricas: bases teóricas y un marco conceptual para la decisión técnico-operacional

Telemetria e estado de saúde de baterias em frotas elétricas: bases teóricas e um arcabouço conceitual para decisão técnico-operacional

Telemetry and battery state of health in electric fleets: theoretical foundations and a conceptual framework for technical-operational decision-making

Carlos Alberto Rocha Lopes – Pesquisador independente, Engenheiro Eletricista. Especialista em Engenharia Mecatrônica, Engenharia de Segurança do Trabalho e Gestão Empresarial. Pesquisador independente em mobilidade elétrica, telemetria veicular e gestão de baterias.

Resumen:
La electrificación de flotas utilitarias desplaza el eje de la gestión del abastecimiento hacia la gobernanza de la energía y de la degradación electroquímica. En este contexto, la evaluación del estado de salud de la batería (SOH, state of health) sustenta decisiones sobre confiabilidad, disponibilidad y costo total de propiedad. La estimación del SOH en operación es intrínsecamente más compleja que en laboratorio, pues el uso real está marcado por recargas parciales, variabilidad térmica, perfiles de potencia heterogéneos y limitaciones de sensorización y de algoritmos del sistema de gestión de baterías (BMS, battery management system). Se consolidan fundamentos del envejecimiento en baterías de iones de litio y se discute la relación entre mediciones, estados estimados e incertidumbre, con una revisión crítica de familias de métodos para SOH — técnicas experimentales, modelos adaptativos y enfoques orientados por datos — enfatizando la transferibilidad a entornos de flota. Con base en la literatura internacional sobre datos de campo y en contribuciones nacionales sobre infraestructura IoT vehicular, se estructura un marco teórico-operacional para convertir la telemetría en decisión: calificación de datos, diseño de indicadores de salud, validación bajo cambio de dominio y criterios de intervención preventiva, sin dependencia de estudio de caso.

Palabras clave:
baterías de iones de litio; flotas eléctricas; telemetría; BMS; SOH; pronóstico; diagnóstico.

Resumo:
A eletrificação de frotas utilitárias desloca o eixo de gestão de abastecimento para a governança de energia e de degradação eletroquímica. Nesse contexto, a avaliação do estado de saúde da bateria (SOH, state of health) sustenta decisões sobre confiabilidade, disponibilidade e custo total de propriedade. A estimação de SOH em operação é intrinsecamente mais complexa do que em laboratório, pois o uso real é marcado por recargas parciais, variabilidade térmica, perfis de potência heterogêneos e limitações de sensoriamento e de algoritmos do sistema de gerenciamento de bateria (BMS, battery management system). Consolidam-se fundamentos do envelhecimento em baterias de íons de lítio e discute-se a relação entre medições, estados estimados e incerteza, com revisão crítica de famílias de métodos para SOH — técnicas experimentais, modelos adaptativos e abordagens orientadas por dados — enfatizando a transferibilidade para ambientes de frota. Com base em literatura internacional sobre dados de campo e em contribuições nacionais sobre infraestrutura IoT veicular, estrutura-se um arcabouço teórico-operacional para converter telemetria em decisão: qualificação de dados, desenho de indicadores de saúde, validação sob mudança de domínio e critérios de intervenção preventiva, sem dependência de estudo de caso.

Palavras-chave:
baterias íons de lítio; frotas elétricas; telemetria; BMS; SOH; prognóstico; diagnóstico.

RCMOS – Revista Científica Multidisciplinar O Saber.
ISSN: 2675-9128. São Paulo - SP.
Año VII, vol. 1 2026 | Envío: 27/06/2026 | Aceptado: 30/06/2026 | Publicación: 02/07/2026

Abstract:
Fleet electrification shifts operational control from fueling logistics to energy governance and electrochemical degradation management. In this setting, battery state of health (SOH) underpins decisions related to reliability, uptime, and total cost of ownership. Estimating SOH in real operation is inherently more challenging than in laboratory conditions, because field usage is dominated by partial charging, thermal variability, heterogeneous power demands, and sensing and algorithmic constraints of the battery management system (BMS). Core lithium-ion aging mechanisms are consolidated and the relationship between measurements, estimated states, and uncertainty is clarified, followed by a critical review of major SOH estimation families—experimental techniques, adaptive models, and data-driven approaches—with emphasis on their transferability to fleet environments. Building on international evidence from real-world datasets and on national contributions regarding vehicle IoT monitoring infrastructure, a conceptual technical-operational framework is presented to convert telemetry into defensible decisions: data qualification, health-indicator design, domain-shift validation, and preventive-intervention criteria, without reliance on proprietary case studies.

Keywords:
lithium-ion batteries; electric fleets; telemetry; BMS; state of health; diagnostics; prognostics**.**

Introducción

La electrificación de flotas representa un cambio estructural en la disponibilidad y la gestión de riesgos. En los sistemas térmicos, la degradación suele interpretarse en función del kilometraje, los patrones de uso y el mantenimiento; en los sistemas basados en baterías de iones de litio, los cambios de rendimiento se deben a mecanismos electroquímicos y térmicos sensibles al historial operativo. Esto desplaza el enfoque de la toma de decisiones hacia la gobernanza energética, la recarga y el envejecimiento como variables directamente asociadas a la productividad.

Desde una perspectiva sistémica, una batería funciona como un activo cuyo comportamiento condiciona su funcionamiento. La capacidad útil, la potencia suministrada y la seguridad dependen de cómo se utilice y supervise el activo a lo largo del tiempo. Por ello, estimar su vida útil y estado no se limita a leer un valor: implica inferir estados en presencia de variabilidad operativa e incertidumbre, tanto en el entorno como en el propio proceso de estimación.

En este entorno, la telemetría permite la observación continua de variables eléctricas y térmicas, así como de eventos de carga, creando las condiciones necesarias para anticipar fallos, reducir ineficiencias y orientar las intervenciones. Sin embargo, la utilidad de estos datos depende de criterios explícitos para su recopilación, cualificación e interpretación, así como de hipótesis verificables que vinculen las señales con los mecanismos de degradación. Sin esta

vinculación, los indicadores tienden a variar debido al ruido, los cambios de régimen y las interrupciones en el registro, lo que reduce la comparabilidad y la transferibilidad entre vehículos, rutas y estaciones.

Por lo tanto, un marco conceptual para la toma de decisiones técnicas y operativas en flotas eléctricas requiere definir explícitamente los límites observables de los datos de campo y las condiciones para la validez de las inferencias sobre el estado de la batería. La estimación de las horas de funcionamiento estándar (SOH) debe considerar los mecanismos de degradación, las mediciones disponibles y las hipótesis del modelo; los métodos aplicados fuera del ámbito en el que fueron validados tienden a producir resultados inestables que no son muy útiles para la toma de decisiones operativas.

2. Conceptos fundamentales: qué se mide, qué se estima y qué se decide.

Antes de analizar los métodos, es necesario distinguir tres capas que, en la práctica, suelen confundirse. La primera es la capa de medición: corriente, voltaje, temperatura, potencia y registros de eventos (p. ej., inicio y fin de recargas). La segunda es la capa de estados estimados: valores inferidos por algoritmos a partir de mediciones, como el estado de carga y el estado de salud. La tercera es la capa de decisión: reglas y criterios que transforman los estados estimados en acciones de operación y mantenimiento.

El sistema responsable de gestionar estas capas a nivel del vehículo es el **BMS** (*sistema de gestión de baterías*), es decir, el conjunto de hardware y software que monitoriza la batería, impone límites de seguridad y estima estados relevantes. Según el diseño, el BMS mide parámetros a nivel del paquete y, en algunos casos, a nivel de módulo y celda. Este detalle es importante: la degradación es heterogénea. Aunque el usuario «vea» una sola batería, el paquete es un conjunto de celdas en serie/paralelo, con variaciones en la fabricación, la temperatura y el envejecimiento. Esta heterogeneidad tiende a manifestarse como variaciones de voltaje y resistencia interna entre las celdas, y puede anticipar fallos de maneras que no son evidentes en las métricas agregadas.

Dos estados estimados dominan el lenguaje operativo. El primero es el **SOC** (*estado)* . *Estado de carga* (SOC): una estimación de "cuánta carga utilizable queda disponible", generalmente expresada como un porcentaje. El SOC se estima, no se mide. Incluso en arquitecturas maduras, el SOC puede variar con el tiempo debido al ruido del sensor, errores de calibración y cambios en el propio paquete. El segundo es **SOH** (*estado de carga) . de Estado de salud de la batería (SOH*): una medida de degradación que, en términos prácticos, busca

responder a la pregunta de «cuánto ha envejecido la batería» y «cuánto le queda para alcanzar un límite operativo aceptable». Una definición común asocia el SOH con la relación entre la capacidad actual y la capacidad inicial; otra lo asocia con la evolución de la resistencia interna, relacionándola con la pérdida de potencia y el calentamiento. Ambas definiciones reflejan un hecho físico: el envejecimiento se manifiesta como una pérdida de capacidad y un aumento de las resistencias asociadas con el transporte de carga y las reacciones parásitas.

Para que SOC y SOH sean más que simples números, es útil introducir dos conceptos operacionales que vinculan señales con estados. El primero es el **voltaje de circuito abierto** , **OCV** (voltaje *de circuito abierto). Voltaje de circuito abierto (OCV*): el voltaje que presenta la celda después de un período de reposo suficiente para reducir los efectos de polarización. El OCV es valioso porque, en muchas químicas, existe una relación entre el OCV y el estado de carga (SOC); sin embargo, esta relación depende de la temperatura, el historial reciente y el envejecimiento. El segundo método es **el conteo** de Coulomb , es decir, la integración de la corriente a lo largo del tiempo para estimar la variación de carga. El conteo de Coulomb es intuitivo, pero acumula errores de deriva y requiere *un anclaje* (como correcciones de OCV en reposo) para mantener la consistencia.

Estas definiciones son más que meras formalidades. Determinan dónde surgen las debilidades en la práctica. Si el SOC se deriva de la calidad del SOC y el SOH depende, directa o indirectamente, de ella, entonces una parte sustancial del problema de la salud de la batería es, en realidad, un problema de gobernanza de la estimación: calibrar, auditar y validar los estados estimados en condiciones de funcionamiento reales, sin las condiciones controladas de un laboratorio.

3. Envejecimiento en baterías de iones de litio: mecanismos, variables dominantes e implicaciones para la telemetría.

La pérdida de rendimiento en las baterías de iones de litio es inevitable y resulta de la interacción entre la química, la temperatura y el perfil de uso. Dentro de la celda, los procesos parásitos compiten con las reacciones deseadas: la capa interfacial sólida se forma y se engrosa en el ánodo (SEI, *sólida). electrólito (interfase*), se produce un consumo de litio ciclado , degradación del electrolito y reducción del material activo; bajo condiciones específicas, puede producirse la deposición de litio metálico (*litio)* . *recubrimiento*). El efecto combinado se manifiesta como una disminución de la capacidad útil y un aumento de las resistencias internas

efectivas, con un impacto directo en la potencia disponible y el calentamiento bajo carga (VETTER et al., 2005; BARRÉ et al., 2013).

Desde un punto de vista operativo, una batería no se desgasta únicamente en función del kilometraje. Lo que acelera o ralentiza el envejecimiento es el historial de demandas eléctricas y térmicas, incluyendo los rangos de estado de carga (SOC), las tasas de corriente y los patrones de carga. Por lo tanto, la degradación rara vez es lineal: dos activos con la misma energía total procesada pueden envejecer de forma diferente si se exponen a distintas condiciones de temperatura y regímenes de carga/descarga (ECKER et al., 2014). La consecuencia práctica es que la "capacidad" y la "potencia" no siguen una única curva; varían a lo largo de la trayectoria recorrida, lo que exige precaución al extrapolar tendencias a corto plazo.

Una distinción clásica organiza este fenómeno sin empobrecer la realidad: envejecimiento por calendario y envejecimiento por ciclo. El primero ocurre incluso cuando el sistema está inactivo y es sensible al tiempo, la temperatura y el nivel de SOC; el segundo resulta del uso repetido, influenciado por la profundidad de descarga, las tasas de corriente (tasa C) y la dinámica térmica. Esta separación es útil porque ayuda a interpretar las señales: existe una pérdida asociada con permanecer en condiciones desfavorables y otra asociada con el trabajo electroquímico repetido. En aplicaciones reales, ambos componentes se superponen e interactúan, lo que requiere modelos y mediciones que traten las variables de forma acoplada, en lugar de asumir su independencia (BARRÉ et al., 2013; ECKER et al., 2014).

La temperatura, en particular, ocupa un lugar central, ya que es simultáneamente una condición límite y un resultado de la propia operación. Las altas corrientes aumentan la disipación resistiva y pueden elevar el gradiente térmico interno; a bajas temperaturas, aumentan las limitaciones cinéticas y el riesgo de recarga agresiva; a altas temperaturas, se aceleran las reacciones parásitas y la degradación del material. Los estudios post mortem y de escaneo térmico muestran que los mecanismos dominantes y las tasas de envejecimiento cambian con el régimen térmico, lo que convierte la lectura de temperatura en una señal estructurante para inferir el estado de salud, y no en un "metadato" secundario (WALDMANN et al., 2014).

Este conjunto de hechos impone una limitación importante a la telemetría: los mecanismos electroquímicos no son directamente observables durante el funcionamiento. Lo que llega al sistema de monitorización son los efectos: voltaje, corriente, temperatura, comportamiento durante la recarga e indicaciones indirectas de aumento de la resistencia. Por lo tanto, la robustez depende de cómo esta evidencia parcial se transforma en indicadores estables, sensibles y comparables entre vehículos y condiciones. La literatura de diagnóstico

enfatiza precisamente esta transición: en lugar de reducir el estado de salud a un solo número, el objetivo es descomponer los modos de degradación y reconocer firmas de curvas y comportamiento térmico que contengan información sobre el proceso interno (BIRKL et al., 2017; BERECIBAR et al., 2016). Para las flotas, la implicación es objetiva: la telemetría tiene valor cuando permite asociar patrones operativos con tendencias de envejecimiento y, a partir de ello, respaldar las decisiones de recarga, mantenimiento y operación con coherencia técnica.

4. Estimación de 50 ohmios: familias de métodos y lo que se pierde al salir del laboratorio.

La literatura ha establecido una taxonomía útil para la Obsesión Social por la Salud (OSS). Las revisiones críticas suelen señalar dos grupos principales: técnicas experimentales y modelos adaptativos (o basados en datos), cuyas intersecciones dan lugar a enfoques híbridos. El valor de esta taxonomía no es clasificatorio, sino epistemológico. Cada familia define el tipo de evidencia que justifica la inferencia sobre la salud.

Las técnicas experimentales incluyen métodos que dependen de condiciones de prueba específicas, como mediciones de capacidad de ciclo completo y espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS, espectroscopia de impedancia *electroquímica). impedancia La espectroscopia* y las pruebas de resistencia interna controlada son técnicas valiosas debido a su gran afinidad con los fenómenos físicos. Sin embargo, su coste y requisitos dificultan su aplicación continua en flotas, donde las interrupciones y las condiciones controladas son limitadas. El dilema, por lo tanto, reside en preservar los datos físicos sin necesidad de un laboratorio a bordo.

Un puente entre el laboratorio y el campo es el uso del análisis de curvas, como **el análisis** *de capacidad incremental* (ICA). *análisis de voltaje diferencial (DVA, análisis de voltaje diferencial*) y análisis de voltaje diferencial (DVA, análisis de voltaje *diferencial) Voltaje En términos sencillos, el análisis de componentes independientes (ICA) observa* la derivada de la capacitancia con respecto al voltaje durante la carga; los picos y las desviaciones contienen información sobre los cambios internos. En condiciones ideales, el ICA permite identificar patrones de degradación; en condiciones reales, el desafío radica en el ruido, el muestreo y, sobre todo, en que las recargas son parciales. Aun así, la literatura muestra esfuerzos para que el ICA sea aplicable a módulos y paquetes mediante el seguimiento de picos y adaptaciones para su implementación en sistemas embebidos.

Los modelos adaptativos abarcan desde modelos basados en la física hasta modelos basados en datos. Un conjunto particularmente influyente, debido a su impacto en los sistemas de gestión de baterías (BMS), es el uso de filtros y observadores, como el *filtro de Kalman extendido* **(** *EKF* **)** . En una serie clásica aplicada a los BMS, el EKF se utiliza para estimar el estado de carga (SOC) y, en extensiones, para inferir la pérdida de capacidad y potencia durante el envejecimiento, basándose en modelos equivalentes e identificación de parámetros. La fortaleza de esta familia reside en el equilibrio entre interpretabilidad y viabilidad computacional. La debilidad es estructural: el modelo debe representar el sistema con suficiente fidelidad y los parámetros deben ser identificables con los datos disponibles. En la práctica, con perfiles heterogéneos y datos faltantes, la identificabilidad puede degradarse.

Los modelos basados en datos, a su vez, cambian el enfoque: en lugar de modelar explícitamente la electroquímica, aprenden una relación entre las señales y el estado del sistema. Este enfoque ha ganado popularidad, en parte, gracias a estudios que demuestran capacidades predictivas utilizando datos de las primeras etapas de vida útil para anticipar la vida útil, lo que abre la puerta al mantenimiento y la garantía basados en pronósticos. Sin embargo, el riesgo reside en la generalización: los modelos entrenados en regímenes específicos pueden fallar cuando el entorno cambia, un fenómeno particularmente común en flotas, donde varían las rutas, el clima, los hábitos de carga y las versiones del hardware.

Entre estos extremos, proliferan los enfoques híbridos y las estrategias que exploran las "ventanas informativas" de uso en el mundo real. Existen estudios que analizan el ICA (Índice de Cuidado y Asistencia) bajo recarga parcial, utilizando índices de salud derivados de la curva segmentada, combinados con inferencia probabilística. Estas estrategias son prometedoras porque reconocen un hecho operativo: la flota no se adaptará al método; el método debe adaptarse a la flota, preservando los criterios de validez.

De este escenario surge una interpretación pragmática. En la gestión de flotas, el mejor método no es el más sofisticado, sino el más viable en las condiciones y el uso dados. "Válido" significa que la relación entre la señal, el indicador y la decisión es estable ante variaciones relevantes, y que la incertidumbre es conocida y manejable.

5. Telemática y datos de campo: cambio de dominio, calidad de la señal y gobernanza de la inferencia.

La principal diferencia entre el trabajo de laboratorio y el de campo no reside únicamente en el ruido, sino en la naturaleza del experimento. En el laboratorio, el investigador

define el protocolo; en el campo, este es consecuencia de la operación, la infraestructura y el comportamiento humano. Esto genera un problema de cambio de dominio: la distribución de los datos observados durante la operación difiere de aquella sobre la que se han validado muchos métodos. Por consiguiente, la validez externa de los indicadores se convierte en el aspecto central.

Estudios basados en datos reales demuestran que los indicadores considerados "buenos" pueden ser muy sensibles a factores incontrolados, como la estacionalidad térmica. El análisis de datos de campo de un sistema de carga para vehículos eléctricos revela que los indicadores de rendimiento se ven significativamente afectados por las variaciones estacionales de temperatura. Asimismo, se proponen lecturas a nivel de sistema de las curvas de voltaje diferencial como un indicador indirecto de la impedancia de carga, precisamente para reflejar el contexto real en el que la impedancia se manifiesta en los datos de carga. Este resultado tiene una implicación directa: si un indicador varía considerablemente con el clima, debe normalizarse, acondicionarse o, al menos, interpretarse dentro de un contexto térmico; de lo contrario, corre el riesgo de generar falsas alarmas y decisiones erróneas.

Otro aspecto importante es la capacidad del propio sistema de gestión de baterías (BMS) para estimar estados en condiciones reales. Trabajos recientes que analizan datos de cientos de vehículos a lo largo de los años abordan las discrepancias entre los datos de campo y los datos de pruebas de laboratorio, y cómo estas discrepancias afectan la estimación del estado de salud (SOH). Además, proponen un marco de estimación multimodal que aprovecha múltiples fuentes de señal para mitigar las limitaciones de un solo canal. La idea subyacente es simple y poderosa: en condiciones reales, ninguna variable es suficientemente estable; la robustez proviene de la redundancia de información y un preprocesamiento riguroso.

La telemática añade un componente de ingeniería de sistemas al problema electroquímico. Para obtener datos fiables se requiere una arquitectura de captura, transmisión y almacenamiento que preserve la integridad temporal, reduzca las pérdidas y permita la auditoría. En el contexto nacional, existen contribuciones relevantes centradas en la infraestructura de monitorización en tiempo real para autobuses eléctricos a batería, con aplicación en un laboratorio de movilidad viva, haciendo hincapié en la integración del IoT y la monitorización continua de las variables operativas. Estas contribuciones son importantes porque demuestran que «cómo recopilar» es parte de «cómo inferir»; sin una infraestructura mínimamente consistente, los métodos de evaluación de la salud se convierten en ejercicios a posteriori.

RCMOS – Revista Científica Multidisciplinar O Saber.
ISSN: 2675-9128. São Paulo - SP.
Año VII, vol. 1 2026 | Envío: 27/06/2026 | Aceptado: 30/06/2026 | Publicación: 02/07/2026

La dimensión de estimación de estado también tiene una larga tradición en la investigación nacional. Trabajos académicos en Brasil abordan la estimación del SOC basada en mediciones de corriente, voltaje y temperatura, utilizando variantes del filtro de Kalman, lo que refuerza la idea de que, incluso a nivel conceptual, el SOC debe tratarse como un estado estimado sujeto a incertidumbre, y no como una medición directa. Al incorporar esta perspectiva, la telemetría deja de ser simplemente "monitoreo" y se convierte en "inferencia gobernada": define qué es medible, qué es estimable, qué hipótesis respaldan la estimación y qué límites se aceptan para tomar una decisión.

Este cambio es crucial para las flotas. El valor no reside en tener muchos datos, sino en saber qué datos son comparables. La comparabilidad, en la práctica, depende de seleccionar ventanas operativas con condiciones suficientes para extraer información sobre el estado de salud. Un ejemplo es la recarga: bajo ciertas condiciones, los segmentos de recarga que abarcan rangos de voltaje pueden ser más informativos que los historiales extensos de uso mixto. La literatura reciente explora explícitamente esta lógica mediante la estructuración de flujos de trabajo para capturar el comportamiento de recarga, el preprocesamiento para eliminar segmentos de baja calidad y la extracción de indicadores de ventanas consistentes, con el objetivo de inferir el estado de salud a gran escala.

6. Un marco teórico y operativo para transformar la telemetría en toma de decisiones.

En entornos de flotas, la utilidad de la telemetría depende menos del volumen de datos y más de la capacidad de respaldar inferencias técnicamente defendibles en condiciones no controladas. Esto requiere tratar la inferencia como un producto de ingeniería, es decir, como una cadena verificable que conecta señales observables, estados estimados y decisiones operativas. La corriente, el voltaje y la temperatura son magnitudes medidas; el SOC y el SOH son estados inferidos a partir de estas mediciones; el mantenimiento, las restricciones de energía, los ajustes de recarga y la redistribución de misiones son acciones. Cuando estas capas se difuminan, las decisiones se toman como si un estado estimado fuera una medición directa, sin especificar explícitamente las suposiciones, el dominio de validez y la calidad de los datos que respaldan el valor.

Dentro de esta cadena, la cualificación de datos es fundamental. La telemetría debe incluir contexto y criterios mínimos de fiabilidad, especialmente en operaciones reales, donde las pérdidas, el ruido, la deriva de los sensores y las interrupciones en el registro son frecuentes. La integridad temporal, la coherencia física entre variables (por ejemplo, respuestas de voltaje plausibles a variaciones de corriente), la completitud y la consistencia térmica no son meros detalles estéticos; son condiciones para que el método aplicado sea compatible con el tipo de evidencia disponible. Sin esta cualificación, el sistema mezcla regímenes incompatibles y tiende a producir señales inestables con baja transferibilidad entre vehículos, rutas y estaciones.

En este contexto, los indicadores de salud funcionan mejor como objetos intermedios que como un intento de "resumir" la batería en un solo valor. Los indicadores intermedios capturan tendencias en condiciones comparables, lo que permite lecturas más sólidas incluso cuando no se presentan ciclos completos. Los segmentos de recarga en ventanas similares, los patrones térmicos persistentes en regímenes equivalentes y los indicadores indirectos de resistencia extraídos del comportamiento eléctrico son ejemplos de evidencia que, cuando están bien definidos, pueden validarse y monitorearse a lo largo del tiempo. La ventaja es doble: mejora la interpretabilidad (qué cambió exactamente) y crea un mecanismo práctico para detectar cuándo un modelo está extrapolando, es decir, operando fuera del dominio en el que fue calibrado.

Por lo tanto, la validación no debe limitarse al rendimiento promedio. Las flotas operan en entornos cambiantes: el clima, la carga, el perfil de potencia, el estilo de conducción y la infraestructura de carga modifican la distribución de datos y el comportamiento del sistema. La evaluación debe estratificarse según los regímenes térmicos y los perfiles operativos relevantes, y debe abordar explícitamente la incertidumbre. Las decisiones más seguras surgen de la evidencia convergente, no de un estado de cosas aislado. Cuando la incertidumbre aumenta debido a la falta de datos cualificados o a la incompatibilidad de regímenes, la confianza en el sistema debe disminuir y las recomendaciones de intervención deben requerir evidencia adicional. Este principio es coherente tanto con los observadores basados en filtros (donde la covarianza forma parte del estado) como con los enfoques probabilísticos, donde la estimación sin una medida de dispersión tiene poca relevancia operativa.

Finalmente, el marco debe integrar la gestión del ciclo de vida y la ingeniería de confiabilidad aplicadas al ámbito electroquímico. El pronóstico y el diagnóstico solo aportan valor cuando se vinculan de manera consistente y auditable con las decisiones de operación, recarga y mantenimiento. Desde esta perspectiva, la telemetría no es una capa de visualización, sino un mecanismo para reducir la variabilidad y aumentar la predictibilidad, con el objetivo de

preservar la disponibilidad, controlar el riesgo y estabilizar el rendimiento a lo largo del ciclo de vida del activo.

Referencias

BARRE, Anthony; DEGUILHEM, Benjamín; GROLLEAU, Sébastien; GÉRARD, Mathías; SUARD, Fabien; RÍE, Dominique. la revisión sobre iones de litio batería envejecimiento mecanismos y estimaciones para automóviles Revista de aplicaciones *de Fuentes de Energía* , vol. 241, págs. 680–689, 2013. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2013.05.040.

BERECÍBAR, Maitane ; GANDIAGA, Íñigo ; VILLARREAL, Ígor; OMAR, Noshin ; VAN MIERLO, Joeri . Revisión crítica de estado de salud estimación métodos de iones de litio Baterías para aplicaciones reales . *Renovables. y Sustainable Energy Reviews* , vol. 56, págs. 572–587, 2016. DOI: 10.1016/j.rser.2015.11.042.

BIRKL, Christoph R.; ROBERTS, Matthew R.; MCTURK, Euan ; BRUCE, Peter G.; HOWEY, David A. Degradación diagnóstico para litio ion células . *Revista de Fuentes de Energía* , vol. 341, págs. 373–386, 2017. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2016.12.011.

ECKER, Madeleine; NIETO, Nerea; KÄBITZ, Stefan; SCHMALSTIEG, Johannes; BLANKE, Holger; WARNECKE, Alejandro; SAUER, Dirk Uwe. Calendario y ciclo vida estudiar de Li(NiMnCo)O_2- ion de litio 18650 basado en Li(NiMnCo)O_2- Revista de baterías *de Fuentes de Energía* , vol. 248, págs. 839–851, 2014. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2013.09.143.

HU, Xiaosong ; Xu, Lu; LIN, Xiaodong ; PECHT, Michael. Duración de la batería pronósticos . *Joule* , vol. 4, núm. 2, pág. 310–346, 2020. DOI: 10.1016/j.joule.2019.11.018.

KLASS, Verena; BEHM, Marten ; LINDBERGH, Göran . Una máquina de vectores de soporte estado de salud estimación método para iones de litio baterías bajo eléctrico vehículo Diario de operaciones *de Fuentes de Energía* , vol. 270, págs. 262–272, 2014. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2014.07.116.

NUHIC, Adnan; TERZIMEHIC, Tarik; SOCZKA-GUTH, Thomas; BUCHHOLZ, Matías; DIETMAYER, Klaus. Diagnóstico de salud y restante útil vida pronósticos de iones de litio baterías utilizando datos basados en métodos . *Revista de Fuentes de Energía* , vol. 239, págs. 680–688, 2013. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2012.11.146.

PLETT, Gregory L. Filtrado de Kalman extendido para sistemas de gestión de baterías de Paquetes de baterías para vehículos híbridos eléctricos basados en LiPB : Parte 3. Estado y parámetro Estimación . *Revista de Power Sources* , vol. 134, n.º 2, págs. 277–292, 2004. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2004.02.033.

POZZATO, Gabriele; ALLAM, Anirudh ; PULVIRENTI, Luca; NEGOITA, Gianina Alina; PAXTON, Samuel O.; et al. Análisis y llave recomendaciones de la electricidad del mundo real vehículo Datos de campo . *Joule* , vol. 7, n.º 9, págs. 2035–2053, 2023. DOI: 10.1016/j.joule.2023.07.018.

RICHARDSON, Robert R.; OSBORNE, Michael A.; HOWEY, David A. Gaussian proceso regresión para pronósticos batería estado de Revista de Salud *de Fuentes de Energía* , vol. 357, págs. 209–219, 2017. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2017.05.004.

SANTOS, Angela Alves dos. Desarrollo de infraestructura IoT para monitoreo en tiempo real de autobuses eléctricos alimentados por batería: aplicación en el Laboratorio de Movilidad Viva de la UNICAMP. 2022. Disertación (Maestría en Ingeniería Eléctrica) — Universidad Estatal de Campinas, Campinas, 2022.

SEVERSON, Kristen A.; ATTIA, Peter M.; JIN, normando; PERKINS, Nicolás; JIANG, Benben ; et al. Basado en datos predicción de batería ciclo vida antes capacidad degradación . *Nature Energy* , vol. 4, n.º 5, págs. 383-391, 2019. DOI: 10.1038/s41560-019-0356-8.

TERTULIANO, Filippe José Gadelha. Estimación del estado de carga en baterías de iones de litio a partir de un filtro Kalman sin perfume . 2021. 104 págs. Disertación (Maestría en Ingeniería Eléctrica) — Universidad Federal de Paraíba, João Pessoa, 2021.

VETTER, J.; NOVÁK, P.; WAGNER, SEÑOR; VEIT, C.; MÖLLER, K.-C.; BESENHARD, JO; INVIERNO, M.; WOHLFAHRT-MEHRENS, M.; VOGLER, C.; HAMMOUCHE, A. Envejecimiento mecanismos en iones de litio Revista de baterías *de Power Sources* , vol. 147, núm. 1–2, págs. 269–281, 2005. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2005.01.006.

WALDMANN, Thomas; WILKA, Marcel; KASPER, Michael; FLEISCHHAMMER, Michael; WOHLFAHRT-MEHRENS, Margret . temperatura dependiente envejecimiento mecanismos en el ion litio Baterías : un estudio post mortem . *Revista de Fuentes de Energía* , vol. 262, págs. 129–135, 2014. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2014.03.112.

WEI, Zhongbao ; RUAN, Haokai ; LI, Yang; LI, Jianwei ; ZHANG, Caizhi ; ÉL, Hongwen . multietapa estado de salud estimación de iones de litio batería con alta tolerancia a fuertemente parcial carga . *Transacciones IEEE en Power Electronics* , vol. 37, n.º 6, págs. 7432–7442, 2022. DOI: 10.1109/TPEL.2022.3144504.

WENG, Caihao ; FENG, Xuning ; Sol, Jing; PENG, Huei . estado de salud escucha de iones de litio módulos y paquetes de baterías mediante capacidad incremental Seguimiento de picos . *Applied Energy* , vol. 180, págs. 360–368, 2016. DOI: 10.1016/j.apenergy.2016.07.126.