v7.n11.2026

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE BAIXO CUSTO PARA ESTIMATIVA DO ESTADO DE SAÚDE DE BATERIAS DE CHUMBO-ÁCIDO E ÍONS DE LÍTIO

DEVELOPMENT OF A LOW-COST SYSTEM FOR STATE-OF-HEALTH ESTIMATION OF LEAD-ACID AND LITHIUM-ION BATTERIES

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE BAJO COSTO PARA ESTIMAR EL ESTADO DE SALUD DE BATERÍAS DE PLOMO-ÁCIDO Y DE IONES DE LITIO

Henrique José Gonella Romano[1], Ronaldo Gomes Figueira[2]

e7119315
https://doi.org/10.47820/recima21.v7i11.9315

PUBLICADO: 11/2026

RESUMO

O crescimento da demanda por armazenamento de energia elétrica em setores críticos — como o automotivo, industrial e de supressão de falhas em sistemas ininterruptos (nobreaks) — torna a confiabilidade dos bancos de baterias um fator essencial para a continuidade operacional. Contudo, os modelos tradicionais de manutenção corretiva e preventiva programada frequentemente resultam em falhas inesperadas ou substituições prematuras de componentes. Este trabalho tem como objetivo desenvolver um protótipo de baixo custo para o monitoramento e estimativa do Estado de Saúde (SoH, State of Health) de baterias de íons de lítio (Li-Ion 18650) e chumbo-ácido reguladas por válvula (VRLA). A metodologia adota uma abordagem de ensaio não invasivo por descarga contínua. O experimento consiste na implementação de um sistema de aquisição de dados baseado na plataforma Arduino Uno integrada a dois sensores INA219, via comunicação I²C, monitorando simultaneamente parâmetros de tensão e corrente ao longo do tempo durante a descarga sob carga resistiva/indutiva controlada. Os dados armazenados em formato CSV foram processados com aplicação do Método Trapezoidal de integração numérica para cálculo da capacidade real entregue (Ah), e determinação do SoH percentual em relação à capacidade nominal de fábrica. Os resultados permitiram estimar a capacidade descarregada das amostras e classificá-las segundo o critério de SoH adotado, indicando potencial de aplicação do protótipo na avaliação preliminar de baterias (SoH ≥ 80%) e reprovando células degradadas (SoH < 80%). O protótipo apresentou viabilidade preliminar de implementação com componentes acessíveis, constituindo uma alternativa experimental para avaliação da capacidade de baterias, mitigando riscos de falha em equipamentos de alta criticidade e viabilizando a transição da manutenção convencional preventiva para a preditiva.

PALAVRAS-CHAVE: Estado de Saúde (SoH). Manutenção preditiva. Arduino. Baterias de íons de lítio. Baterias VRLA. Sistema de Gerenciamento de Baterias (BMS).

ABSTRACT

The growing demand for electrical energy storage in critical sectors, such as automotive, industrial, and backup power systems, makes the reliability of battery banks an essential factor for operational continuity. However, traditional corrective and scheduled preventive maintenance models often result in unexpected failures or premature replacement of components. This work aims to develop a low-cost prototype for monitoring and estimating the State of Health (SoH) of lithium-ion (Li-Ion 18650) and valve-regulated lead-acid (VRLA) batteries.

[1] Graduando em Engenharia Elétrica pela Universidade de Araraquara (UNIARA).
[2] Engenheiro Eletricista pela Universidade de Araraquara (UNIARA) e docente do curso de Engenharia Elétrica da UNIARA.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

The methodology adopts a non-invasive testing approach based on continuous discharge. The experiment consists of implementing a data acquisition system based on the Arduino Uno platform integrated with two INA219 sensors via I²C communication, simultaneously monitoring voltage and current parameters over time during discharge under a controlled resistive/inductive load. The data, stored in CSV format, were processed using the Trapezoidal Rule of numerical integration to calculate the actual delivered capacity (Ah) and to determine the percentage SoH relative to the factory nominal capacity. The results made it possible to estimate the discharged capacity of the samples and to classify them according to the adopted SoH criterion, indicating the prototype's potential for application in the preliminary evaluation of batteries (SoH ≥ 80%) and in rejecting degraded cells (SoH < 80%). The prototype showed preliminary implementation feasibility using affordable components, constituting an experimental alternative for evaluating battery capacity, mitigating failure risks in highly critical equipment, and enabling the transition from conventional preventive maintenance to predictive maintenance.

***KEYWORDS**: State of Health (SoH). Predictive maintenance. Arduino. Lithium-ion batteries. VRLA batteries. Battery Management System (BMS).*

RESUMEN

El crecimiento de la demanda de almacenamiento de energía eléctrica en sectores críticos, como el automotriz, el industrial y la supresión de fallas en sistemas de alimentación ininterrumpida (UPS/SAI), convierte la confiabilidad de los bancos de baterías en un factor esencial para la continuidad operativa. Sin embargo, los modelos tradicionales de mantenimiento correctivo y preventivo programado con frecuencia resultan en fallas inesperadas o en la sustitución prematura de componentes. Este trabajo tiene como objetivo desarrollar un prototipo de bajo costo para el monitoreo y la estimación del Estado de Salud (SoH, State of Health) de baterías de iones de litio (Li-Ion 18650) y de plomo-ácido reguladas por válvula (VRLA). La metodología adopta un enfoque de ensayo no invasivo mediante descarga continua. El experimento consiste en la implementación de un sistema de adquisición de datos basado en la plataforma Arduino Uno integrada con dos sensores INA219, mediante comunicación I²C, monitoreando simultáneamente los parámetros de tensión y corriente a lo largo del tiempo durante la descarga bajo una carga resistiva/inductiva controlada. Los datos almacenados en formato CSV se procesaron mediante el Método Trapezoidal de integración numérica para calcular la capacidad real entregada (Ah) y determinar el SoH porcentual en relación con la capacidad nominal de fábrica. Los resultados permitieron estimar la capacidad descargada de las muestras y clasificarlas según el criterio de SoH adoptado, indicando el potencial de aplicación del prototipo en la evaluación preliminar de baterías (SoH ≥ 80 %) y en la reprobación de celdas degradadas (SoH < 80 %). El prototipo presentó viabilidad preliminar de implementación con componentes accesibles, constituyendo una alternativa experimental para la evaluación de la capacidad de baterías, mitigando los riesgos de falla en equipos de alta criticidad y posibilitando la transición del mantenimiento preventivo convencional al predictivo.

***PALABRAS CLAVE:** Estado de Salud (SoH). Mantenimiento predictivo. Arduino. Baterías de iones de litio. Baterías VRLA. Sistema de Gestión de Baterías (BMS).*

INTRODUÇÃO

O crescimento da necessidade de armazenamento de energia elétrica em diversas áreas, como a automotiva (veículos elétricos), a geração própria e, principalmente, os sistemas

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

de energia de reserva, como nobreaks e geradores, torna a confiabilidade dos sistemas de armazenamento um fator essencial para o bom funcionamento de equipamentos críticos.

No entanto, os modelos tradicionais de manutenção frequentemente adotam abordagens reativas, realizadas somente após a ocorrência da falha (manutenção corretiva), ou baseadas em calendários fixos, independentes da condição real do componente (manutenção preventiva programada). Essas abordagens resultam, respectivamente, em falhas inesperadas ou em substituições prematuras, gerando custos desnecessários e riscos operacionais.

Uma bateria pode apresentar a tensão nominal correta em circuito aberto e ainda assim falhar no momento em que é exigida, como no acionamento de um gerador ou na sustentação de um nobreak. Como a integridade química de baterias seladas não pode ser avaliada por inspeção sem danificar o componente, é necessário recorrer a métodos de ensaio elétrico não invasivos para diagnosticar o estado do ativo em campo.

Nesse contexto, a engenharia de confiabilidade utiliza o conceito de Estado de Saúde (SoH, do inglês State of Health), definido como a razão percentual entre a capacidade atual da bateria e sua capacidade nominal de fábrica. Um dos indicadores não invasivos que permitem estimar esse parâmetro de forma acessível é a capacidade útil obtida em descarga controlada (em Ah), que reflete diretamente a quantidade de energia que a bateria é capaz de fornecer.

A estimativa do SoH contribui para identificar baterias com redução de capacidade, fornecendo informações relevantes para a avaliação do risco de indisponibilidade e para o planejamento da manutenção. Baterias com SoH inferior a 80% são usualmente consideradas próximas do fim de vida útil em aplicações estacionárias, e por isso esse valor é adotado neste trabalho como critério de aprovação. Contudo, o SoH baseado em capacidade é um indicador do grau de degradação, e não uma previsão determinística de falha: o desempenho da bateria em operação também depende de fatores como resistência interna, temperatura, corrente solicitada, estado de carga e características da aplicação.

Existem soluções comerciais para esse diagnóstico, como testadores de capacidade com carga programável e instrumentos de medição de impedância ou condutância, além de sistemas de monitoramento e BMS (Battery Management Systems) integrados a bancos de baterias. Em geral, essas soluções têm custo elevado, são fechadas ou específicas para uma química, o que limita seu uso em pequenas instalações e em contextos acadêmicos. Na literatura, também há trabalhos que empregam microcontroladores e sensores de baixo custo para medir tensão e corrente e estimar a capacidade ou o estado de carga de baterias. Em sua maioria, porém, concentram-se em uma única química ou não avaliam o procedimento como critério de aprovação baseado em SoH.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Diante disso, a medição de corrente e tensão e o cálculo da capacidade por integração temporal são procedimentos consolidados, e a contribuição deste trabalho não está em propô-los, mas na sua implementação em uma arquitetura de baixo custo e reproduzível, baseada em Arduino Uno e dois sensores INA219, aplicada de forma comparativa a duas químicas distintas (íon-lítio 18650 e chumbo-ácido VRLA), com registro em CSV, processamento pelo Método Trapezoidal e classificação das amostras segundo o critério de SoH de 80%.

As baterias escolhidas para esta pesquisa são as de chumbo-ácido VRLA (do inglês Valve-Regulated Lead-Acid, ou chumbo-ácido regulada por válvula) e as de íon-lítio 18650. A VRLA é uma evolução da bateria automotiva convencional, projetada para ser totalmente selada, livre de manutenção e à prova de vazamentos, utilizando uma válvula de segurança que alivia a pressão interna apenas quando necessário. Já a 18650 é uma célula cilíndrica recarregável de íon-lítio, com tensão nominal de 3,7 V, amplamente utilizada na eletrônica por sua alta densidade energética. O termo "18650" refere-se ao encapsulamento, isto é, às suas dimensões físicas: 18 mm de diâmetro e 65 mm de comprimento.

O objetivo deste trabalho é desenvolver um protótipo de baixo custo, voltado à estimativa do SoH de baterias de chumbo-ácido VRLA e de íon-lítio 18650, com base na capacidade entregue durante uma descarga controlada, utilizando a plataforma Arduino integrada ao sensor INA219. Busca-se, assim, fornecer subsídios para o acompanhamento da degradação das baterias e para a redução do risco de falhas em equipamentos de alta criticidade, como os sistemas de energia ininterrupta (nobreaks) usados em indústrias, hospitais, elevadores, alarmes e até em alguns sistemas residenciais, além de apoiar o planejamento financeiro na transição da manutenção preventiva para a preditiva.

1. REFERENCIAL TEÓRICO

1.1. Sistemas de armazenamento de energia

Bancos de baterias são elementos essenciais para assegurar a continuidade operacional de instalações críticas e de sistemas de energia ininterrupta (nobreaks). Dentre as tecnologias empregadas, destacam-se as baterias de chumbo-ácido reguladas por válvula (VRLA, do inglês Valve-Regulated Lead-Acid) e as células de íon-lítio (Li-Ion) (REDDY, 2011).

As baterias VRLA, nas variantes AGM e gel, apresentam menor custo inicial e tecnologia consolidada, com requisitos e métodos de ensaio de capacidade estabelecidos pelas normas ABNT NBR 16109 e NBR 16110 para aplicação em nobreaks (ABNT, 2012a, 2012b) e pela IEC 60896-21 (IEC, 2004). Em contrapartida, as células Li-Ion oferecem maior densidade energética, maior vida útil em ciclos e menor taxa de autodescarga (MICHELINI, [s.d.]; BECK, 2018), embora

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

demandem sistemas rigorosos de proteção e gerenciamento para evitar instabilidade térmica, conforme a IEC 62619 para aplicações industriais (IEC, 2022) e a IEC 62133-2 para células portáteis (IEC, 2021). A escolha entre as tecnologias envolve a avaliação do custo total de propriedade ao longo do ciclo de vida dos ativos (PAIXÃO, 2020).

1.2. Degradação e resistência interna

A degradação eletroquímica em baterias é um processo cumulativo. Em baterias VRLA, o envelhecimento manifesta-se por sulfatação das placas, corrosão das grades e perda de eletrólito por gaseificação. O acúmulo de sulfato de chumbo não convertido reduz a capacidade disponível e eleva a resistência interna ôhmica (PAVLOV, 2011; FREITAS, 2016). Em células Li-Ion, predominam o crescimento da camada SEI, a perda de lítio ciclável e a degradação dos materiais dos eletrodos, que também resultam em perda de capacidade e aumento de resistência (VETTER et al., 2005; BARRÉ et al., 2013).

Como a construção selada impede a inspeção interna, a medição da resistência interna e os ensaios de descarga controlada figuram entre os métodos não invasivos mais utilizados para avaliar a aproximação do fim da vida útil (EOL, End of Life) (IEEE, 2005). O aumento da resistência interna causa queda instantânea de tensão sob carga, o que pode comprometer a atuação do sistema de reserva quando solicitado. A perda de capacidade reduz a autonomia. Os dois efeitos têm origem comum, mas são grandezas distintas, e a medição de resistência não substitui o ensaio de capacidade (IEEE, 2005).

1.3. Estado de carga, estado de saúde e vida útil remanescente

Três indicadores são frequentemente confundidos na literatura e precisam ser distinguidos (PLETT, 2015; XIONG; LI; TIAN, 2018):

Estado de Carga (SoC, *State of Charge*): razão entre a carga disponível em um instante e a capacidade máxima atual da bateria.

Estado de Saúde (SoH, *State of Health*): razão entre a capacidade máxima atual e a capacidade nominal de fábrica (BERECIBAR *et al.*, 2016): SoH (%) = [(C_atual / C_nominal) × 100]

Vida Útil Remanescente (RUL, *Remaining Useful Life*): tempo ou número de ciclos até a bateria atingir o critério de fim de vida, o que exige projetar a evolução da degradação (HU *et al.*, 2020).

A capacidade obtida em um ensaio de descarga permite calcular o SoH naquele instante, mas não equivale a uma estimativa de RUL. Essa distinção corresponde à usada em

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

engenharia de manutenção: o diagnóstico determina a condição atual do ativo, e o prognóstico projeta sua evolução futura (ISO, 2015). A manutenção preditiva em sentido estrito exige o acompanhamento longitudinal da condição (KARDEC; NASCIF, 2009; LI *et al.*, 2019). O procedimento deste trabalho é diagnóstico e subsidia a manutenção baseada na condição.

1.4. Influência das condições de descarga sobre a capacidade medida

A capacidade medida depende das condições do ensaio, e o SoH só é comparável quando elas são controladas e declaradas:

Taxa de descarga: em baterias de chumbo-ácido, quanto maior a corrente, menor a capacidade extraível, comportamento descrito pela lei de Peukert (REDDY, 2011; FREITAS, 2016). A capacidade nominal é especificada para um regime definido (por exemplo, C_{10} ou C_{20}) (IEC, 2004).

Temperatura: temperaturas baixas reduzem a capacidade disponível, e temperaturas elevadas aceleram a degradação (PAVLOV, 2011). Os ensaios normalizados definem uma temperatura de referência, e ela deve ser registrada (IEC, 2004).

Tensão de corte: a capacidade entregue depende da tensão final adotada, que deve seguir a recomendação do fabricante (LANDPORT, [2026?]; PANASONIC, [s.d.]; SAMSUNG, [s.d.]).

Química: as curvas de descarga e os mecanismos de falha de chumbo-ácido e Li-Ion diferem, o que impede aplicar os mesmos parâmetros às duas tecnologias sem adaptação (REDDY, 2011).

1.5. Critério de fim de vida e limite de 80%

O limite de 80% da capacidade nominal é amplamente adotado como critério de fim de vida, mas sua aplicação depende da tecnologia e do contexto. Para baterias VRLA estacionárias, a prática recomendada IEEE 1188 adota a substituição quando a capacidade medida cai abaixo de 80% da nominal (IEEE, 2005). Em células Li-Ion, o mesmo valor é usado para definir a vida em ciclos em muitos catálogos e na literatura (LI *et al.*, 2019), mas cada fabricante especifica seu critério (PANASONIC, [s.d.]; SAMSUNG, [s.d.]).

1.6. Plataformas de prototipagem e instrumentação

A aquisição de dados baseia-se na plataforma Arduino Uno (microcontrolador ATmega328P) (ARDUINO, 2026), responsável por ler os sinais de tensão e corrente durante os ensaios de descarga.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

A medição é realizada pelo módulo INA219, circuito integrado com ADC de 12 bits que mede a tensão sobre um resistor shunt e a tensão do barramento, transmitindo os dados via I²C (TEXAS INSTRUMENTS, 2015). Nos módulos comerciais, o shunt é um resistor externo ao chip, montado na placa. Os dados são enviados por comunicação serial (UART/USB) para processamento e registro.

2. METODOLOGIA

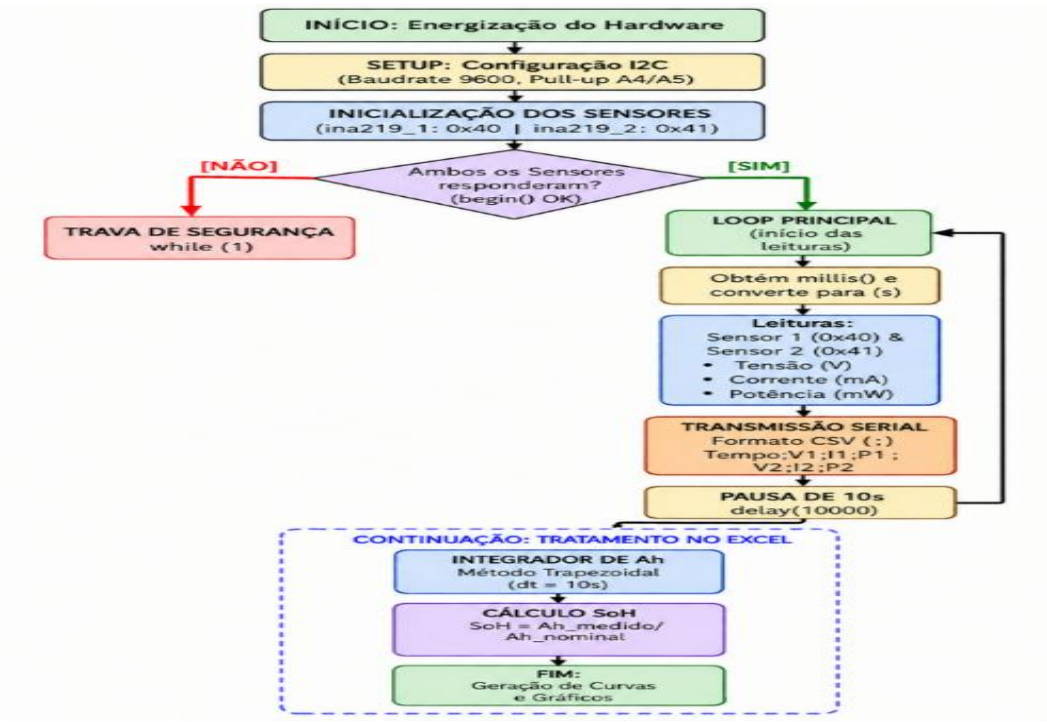
2.1. Arquitetura do sistema e descrição do *hardware*

A arquitetura do sistema foi representada por meio de um diagrama de blocos, complementado pelo esquema elétrico e pela descrição dos componentes utilizados. O circuito foi montado em um *software* de desenho de esquema elétrico, e cada componente foi listado com suas funções no sistema e suas limitações.

2.1.1. Diagrama de blocos do sistema

Diagrama mostrando o fluxo do processo de aquisição e tratamento de dados:

Figura 1. Fluxograma do projeto



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

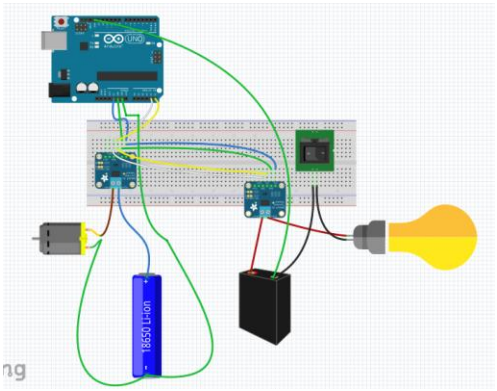
Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Na Figura 1, temos o fluxograma do processo de aquisição de dados pelo sensor INA219 via barramento I2C ao Arduino UNO (Hardware), amostragem periódica a cada 10 segundos e envio no formato CSV para a porta serial do Arduino ao computador e posteriormente traduzido para o formato .xlsx de planilha Excel para a determinação do estado de saúde (SoH).

2.1.2. Esquema do circuito elétrico

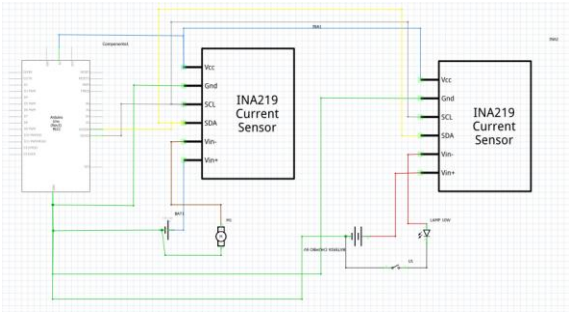
O circuito foi montado no software Fritzing para simular a montagem e detectar possíveis erros. No circuito da Figura 2, foram conectados dois sensores para a medição simultânea de duas cargas individuais, cujo esquema elétrico está representado na Figura 3. Essa montagem tem como objetivo testar as células de bateria Li-ion 18650 e de chumbo-ácido VRLA ao mesmo tempo.

Figura 2. Circuito 2 sensores



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Figura 3. Esquema elétrico com dois sensores



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

De acordo com o circuito e o esquema apresentados nas Figuras 2 e 3, respectivamente, cada sensor testa uma carga individual com uma bateria por vez, sendo a de Li-ion 18650 ligada ao motor e a de chumbo-ácido VRLA ligada à lâmpada.

2.1.3. Especificação dos componentes e materiais utilizados

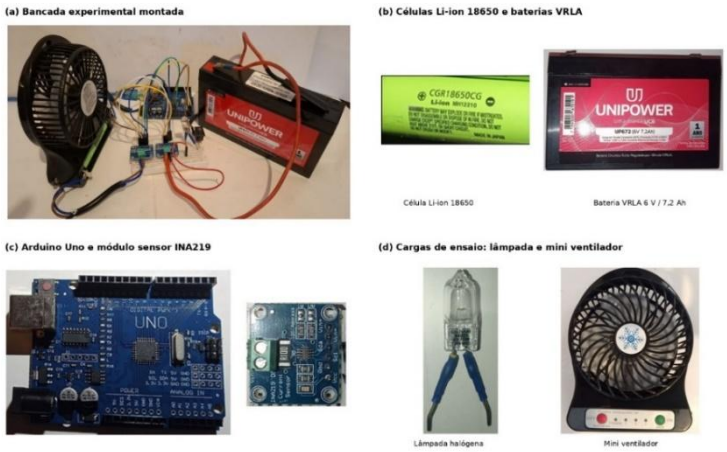
Abaixo no quadro 1 temos as especificações dos componentes usados, separados em sistema de processamento e sensoriamento, fonte de armazenamento, cargas e infraestrutura, bem como na figura 4 temos a imagem real dos componentes em suas respectivas categorias e a bancada de testes montada com todos eles para o experimento de descarga controlada.

Quadro 1. Especificações do sistema e bancada de testes

Categoria	Componente / Elemento	Especificação / Função Principal
Processamento e Sensoriamento	Arduino Uno (ATmega328P) + dois Módulos INA219	Unidade de controle e medição para aquisição de tensão e corrente ao longo do tempo.
Fontes de Armazenamento	Baterias Li-ion 18650 & Baterias VRLA	Elementos sob teste (acumuladores de energia química/elétrica).
Cargas Elétricas	Lâmpada Halógena + Mini Ventilador	Cargas de descarga controlada para simulação de consumo.
Infraestrutura	Protoboard, Cabos, Conectores interruptores, etc.	Meio físico de conexão e montagem da bancada experimental.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 4. Componentes do sistema



Fonte: Elaborado pelo autor.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

2.1.4. Especificação das cargas e suas características

Especificação das cargas e do comportamento da tensão e corrente ao longo do experimento na tabela 1:

Tabela 1. Cargas usadas

	Lâmpada Halógena	Mini Ventilador
Potência Nominal	10W	1,4W
Correntes de operação	1,67A	350-380mA
Tensão Nominal	6V	4,0-3,7V
Possíveis variações ao longo da descarga	Decréscimo gradual da corrente e da intensidade luminosa de forma proporcional à queda da tensão nos terminais da bateria.	Ligeira redução na velocidade de rotação, acompanhada pela diminuição sutil da corrente e da potência consumida conforme a tensão da célula decai ao longo do tempo.

Fonte: Elaborado pelo autor.

2.2. Características das baterias analisadas

Foram analisados dois tipos distintos de baterias, de íon-lítio 18650 e de chumbo-ácido VRLA; baterias novas foram usadas como grupo de controle e baterias usadas, como objeto efetivo de análise desta pesquisa.

2.2.1. Baterias de Íon-Lítio 18650

A célula 18650 é um formato padronizado de bateria de íons de lítio com 18 mm de diâmetro e 65 mm de comprimento, amplamente utilizado na indústria eletrônica por reunir alta densidade de energia; sua tensão nominal é de 3,6 a 3,7 V. Essas células são utilizadas em baterias de computadores portáteis, lanternas, ferramentas elétricas e determinados sistemas de armazenamento de energia, o que a torna uma das células mais conhecidas e usadas comercialmente, o que justifica sua escolha como objeto de estudo neste trabalho. Para nossos testes obtivemos 4 tipos de células distintas, sendo que das 12 células utilizadas nos experimentos, 10 foram extraídas de baterias de notebooks descartadas, representando unidades com histórico de uso real e graus variados de envelhecimento eletroquímico e 2 adquiridas novas (JJSD18650) para a avaliação e comparativo do SoH.

Na Tabela 2 constam as características desses 4 tipos de células, de acordo com os *datasheets* dos fabricantes (PANASONIC, 2012; SAMSUNG, [s. d.]; PANASONIC, [s. d.]):

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Tabela 2. Características células Íon-Lítio 18650

	NCR18650A	INR18650E	CGR18650CG	JJSD18650
V_inicial (V)	4,2V	4,20	4,20	4,20
V_corte (V)	2,5 V	3,65	3,00	3,00
Cap_Medida (mAh)	3100,00	2850,00	2250,00	800,00

Fonte: Elaborado pelo autor.

2.2.2. Baterias Chumbo-Ácido Seladas (VRLA)

As baterias de chumbo-ácido reguladas por válvula (VRLA) do tipo selado foram escolhidas para nosso teste por três motivos fundamentais:

1º Adequação ao circuito de medição: o sensor INA219 utilizado tem capacidade de medir até 26 V DC, o que se adequa perfeitamente à tensão da bateria, de no máximo 6,9 V.

2º Aplicabilidade industrial, pois essas baterias são empregadas em sistemas de supressão de queda de energia (*nobreaks*), iluminação de emergência e sistemas de alarme.

3º Representatividade do estado de degradação, pois as unidades que usamos foram obtidas de aparelhos industriais e já passaram por vários ciclos reais de operação, o que causou a degradação real do estado de saúde da bateria (SoH).

Para os nossos testes, foram obtidos dois modelos, sendo uma bateria já utilizada e degradada (LP6-7) e uma nova (UP672); seus dados estão listados na Tabela 3 (UNICOBA, 2020; LANDPORT, [2026?]).

Tabela 3. Características Baterias Chumbo-Ácido VRLA

	UP672	LP6-7
V_inicial (V)	6,00	6,00
V_corte (V)	5,10	5,25
Cap_Medida (Ah)	7,20	7,00

Fonte: Elaborado pelo autor.

2.3. Instrumentação e protocolo do ensaio experimental

Conforme citado anteriormente, foi usado o sensor INA219 para a medição dos parâmetros elétricos de tensão e corrente ao longo do tempo; o sensor utiliza o protocolo I²C para comunicação com o Arduino, que, por sua vez, se comunica com o computador para o registro dos dados.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

2.3.1. Condicionamento de sinais e comunicação I²C

A aquisição de tensão, corrente e potência é feita por dois módulos INA219, circuito integrado com conversor analógico-digital delta-sigma de 12 bits que mede a queda de tensão sobre um resistor shunt externo (Vshunt) e a tensão do barramento (Vbus), transmitindo os dados por I²C (TEXAS INSTRUMENTS, 2015). Nos módulos comerciais, o shunt é um resistor de 0,1 Ω (R100) montado na placa, externo ao circuito integrado. A corrente é obtida pela Lei de Ohm, I = Vshunt / Rshunt, e a potência por P = V · I, de modo que a tolerância do shunt se propaga para a corrente medida. A resolução de 12 bits define o menor passo de leitura, mas não equivale à exatidão, que depende de erro de ganho, offset, tolerância do shunt e calibração.

Os sensores não foram comparados com instrumento de referência calibrado, de modo que os erros de medição não foram determinados experimentalmente. Considera-se como referência a exatidão especificada pelo fabricante para o INA219 (TEXAS INSTRUMENTS, 2015), que não inclui a tolerância do shunt do módulo nem eventuais erros de calibração e de montagem. Os valores de capacidade e de SoH são, portanto, estimativas, e a comparação com instrumento calibrado é indicada como trabalho futuro.

2.3.2. Protocolo do ensaio experimental de descarga contínua

O ensaio tem como objetivo submeter a bateria a descarga sob monitoramento contínuo para extração da curva de características de descarga e posteriormente a determinação do estado de carga (SoC) e estado de saúde (SoH).

O procedimento experimental seguirá a seguinte rotina:

1. Condicionamento inicial de carga: A bateria é submetida a um ciclo completo de recarga através do carregador inteligente até atingir o estado de plena carga.
2. Inicialização da coleta: Após a conexão das baterias à bancada experimental, iniciou-se a aquisição dos sinais elétricos, posteriormente armazenados em planilha eletrônica para processamento e determinação do SoH.
3. Critério de Parada (Cut-off Voltage): O ensaio prossegue até atingir a tensão de parada, que marca o final do ensaio da(s) bateria(s).
4. Armazenamento para pós-processamento: Armazenamos os dados coletados em uma planilha Excel, formato .xlsx para processarmos e obtermos as curvas de V*t, I*t e a SoH em porcentagem.

Critério de parada e registro: a descarga é encerrada quando a carga deixa de operar, sem corte automático por tensão no firmware. A tensão final de cada ensaio é registrada e comparada com a tensão de corte de catálogo. A diferença entre as duas é tratada como fonte de incerteza na determinação do SoH.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

2.3.3. Implementação do Firmware no Microcontrolador

Código desenvolvido na linguagem C++ no Arduino IDE de acordo com o diagrama e com o circuito montado no *software* Fritzing representado na figura 5:

Figura 5. Código em C++ desenvolvido para o projeto



```
#include <Wire.h>
#include <Adafruit_INA219.h>

const int PINO_SDA = A4;
const int PINO_SCL = A5;

// Instancia dois objetos para os sensores com seus respectivos endereços
Adafruit_INA219 ina219_1(0x40); // Sensor 1 (Padrão: A0 e A1 abertos)
Adafruit_INA219 ina219_2(0x41); // Sensor 2 (Ponte A0 soldada)

void setup(void) {
  Serial.begin(9600);
  while (!Serial) { delay(1); }

  pinMode(PINO_SDA, INPUT_PULLUP);
  pinMode(PINO_SCL, INPUT_PULLUP);
  Wire.begin();

  // Inicializa o primeiro sensor
  if (!ina219_1.begin()) {
    while (1) { delay(10); } // Trava se o Sensor 1 não for encontrado
  }

  // Inicializa o segundo sensor
  if (!ina219_2.begin()) {
    while (1) { delay(10); } // Trava se o Sensor 2 não for encontrado
  }
}

void loop(void) {
  unsigned long tempoMillisegundos = millis();
  float tempoSegundos = tempoMillisegundos / 1000.0;

  // Leituras do Sensor 1
  float volt1 = ina219_1.getBusVoltage_V() + (ina219_1.getShuntVoltage_mV() / 1000.0);
  float curr1 = ina219_1.getCurrent_mA();
  float pow1  = ina219_1.getPower_mW();

  // Leituras do Sensor 2
  float volt2 = ina219_2.getBusVoltage_V() + (ina219_2.getShuntVoltage_mV() / 1000.0);
  float curr2 = ina219_2.getCurrent_mA();
  float pow2  = ina219_2.getPower_mW();

  // --- SAÍDA FORMATADA EM CSV PARA O EXCEL (Separado por ponto e vírgula) ---
  // Colunas: Tempo ; Tensao1 ; Corrente1 ; Potencia1 ; Tensao2 ; Corrente2 ; Potencia2
  Serial.print(tempoSegundos, 2); Serial.print(";");

  // Dados Sensor 1
  Serial.print(volt1, 2);         Serial.print(";");
  Serial.print(curr1, 2);         Serial.print(";");
  Serial.print(pow1, 2);          Serial.print(";");

  // Dados Sensor 2
  Serial.print(volt2, 2);         Serial.print(";");
  Serial.print(curr2, 2);         Serial.print(";");
  Serial.println(pow2, 2);        // Fim de linha para criar nova linha no Excel

  delay(10000);
}
```

Fonte: Elaborado pelo autor.

Nesse código temos três partes principais, a primeira é a declaração das bibliotecas e endereçamento dos hardwares, foram declaradas as bibliotecas “Wire.h” responsável pela gestão da comunicação no barramento I²C e a biblioteca “Adafruit_INA219.h”, que provê os métodos de leitura dos registradores internos dos sensores. Em seguida foi feito o mapeamento dos pinos de comunicação I²C, sendo o A4 como pino de dados “PINO_SDA” e o pino A5 como pino de clock “PINO_SCL”. Por fim, foi feita a indicação dos objetos para a comunicação I²C de

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

cada sensor individualmente, ina219 um associado ao endereço 0x40 e ina219 dois associado ao endereço 0x41.

Na segunda, após as declarações, é aberto o void setup que é executado uma vez após a inicialização do microcontrolador, nele fazemos as configurações e travas de segurança. Começamos com o “Serial.begin(9600);” que inicializa a interface serial com velocidade de 9600 bps e aguarda a estabilização da conexão USB. Em seguida, habilita os resistores de pull-up internos nos pinos de comunicação “INPUT_PULLUP” para mitigar ruídos e inicia o barramento via “Wire.begin()”. O algoritmo então executa o método “begin()” para ambos os sensores e, caso qualquer um dos módulos não responda (retornando false), o microcontrolador entra em um laço de repetição infinito (while (1) { delay(10); }), atuando como uma trava de segurança que impede o início do ensaio de descarga com a instrumentação incompleta. Nesse caso, o operador do teste retira as células para evitar descarga ou aquecimento das mesmas.

Na última parte, no laço principal loop, a função “millis()” captura o tempo decorrido desde a energização da placa a cada ciclo, convertendo-o em segundos (tempoSegundos). Sequencialmente, são requisitadas três variáveis elétricas de cada sensor: a Tensão Total (V), obtida somando a tensão do barramento (getBusVoltage_V()) à queda sobre o resistor *shunt* convertida para Volts (getShuntVoltage_mV() / 1000.0), a Corrente (I) em miliampères via getCurrent_mA(), e a Potência (P) em miliwatts via getPower_mW(). Os 7 parâmetros resultantes são transmitidos para a porta serial formatados com duas casas decimais e separados pelo caractere ponto e vírgula (;), finalizando com uma quebra de linha (Serial.println) para permitir que a planilha eletrônica interprete os dados em colunas estruturadas (Tempo; Volt1; Curr1; Pow1; Volt2; Curr2; Pow2). Por fim, a instrução “delay(10000)” insere uma pausa de aproximadamente 10 segundos ao término do ciclo, garantindo uma taxa de amostragem discreta e constante ($\Delta t \approx 10s$) ao longo de todo o ensaio.

2.4. Algoritmo de Processamento dos Dados e Métricas (SoH)

Para determinar o Estado de Saúde (SoH) das baterias é necessário o tratamento das séries temporais discretas de corrente e tensão ao longo do tempo coletadas. Como a amostragem ocorre a cada 10 segundos ($\Delta t = 10s$), a conversão desses registros contínuos em métricas é realizada via pós-processamento na planilha utilizando métodos descritos a seguir.

2.4.1. Integração Numérica pelo Método Trapezoidal para Cálculo de Capacidade (Ah)

A capacidade total de carga elétrica descarregada por uma bateria ao longo do tempo é definida matematicamente pela integral da corrente em relação ao tempo:

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

$$Q = \int_{t_0}^{t_f} I(t)\ dt$$

Como o sinal de corrente I(t) é obtido de forma discreta, a integral contínua é aproximada pelo Método Trapezoidal. Esse algoritmo calcula a área de cada intervalo entre duas amostras consecutivas k-1 e k, assumindo uma variação linear da corrente no intervalo $\Delta t_k = t_k - t_{k-1}$. A capacidade incremental ΔAh_k, expressa em Ampère-hora (Ah), para a k-ésima amostra é dada por:

$$\Delta Ah_k = \left(\frac{I_{k-1} + I_k}{2 \times 1000}\right) \times \left(\frac{\Delta t_k}{3600}\right)$$

Onde:

- I_{k-1} e I_k são as correntes lidas nos instantes anterior e atual, expressas em miliampères (mA);
- O fator 1000 converte a corrente de mA para ampères (A);
- Δt_k é o intervalo de tempo entre leituras, fixado em 10s no firmware;
- O fator 3600 converte o tempo de segundos para horas (h).

A capacidade total acumulada $Ah_{acumulado}(k)$ até o instante k é obtida pelo somatório iterativo das áreas trapezoidais:

$$\mathrm{Ah}_{\mathrm{acumulado}}(k) = \mathrm{Ah}_{\mathrm{acumulado}}(k-1) + \Delta \mathrm{Ah}_k$$

2.4.2. Determinação do Estado de Saúde (SoH) por Capacidade Residual

O Estado de Saúde (SoH) é o indicador quantitativo que mensura a degradação e o envelhecimento da bateria, refletindo a perda de sua capacidade de retenção de energia em comparação com a sua especificação nominal de fábrica.

A determinação do SoH ocorre ao final do ensaio de descarga. O critério de encerramento do teste é atingido no exato instante t_{corte} em que a tensão nos terminais da bateria atinge o limite inferior de corte. Nesse momento, encerra-se a integração e extrai-se a capacidade total descarregada $Ah_{total\ medido} = Ah_{acumulado}(t_{corte})$.

O SoH percentual é então calculado pela razão direta entre a capacidade real medida e a capacidade nominal de catálogo ($C_{nominal}$):

$$\mathrm{SoH}\% = \left(\frac{\mathrm{Ah}_{\mathrm{total\ medido}}}{C_{\mathrm{nominal}}}\right) \times 100$$

Com base na literatura técnica de manutenção preditiva, acumuladores que apresentam SoH≥80% são classificados como operacionais e aptos para o serviço. Valores de SoH<80% indicam severa sulfatação ou perda de material ativo, sinalizando o fim da vida útil do componente e a necessidade de substituição.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção, são apresentados e analisados os dados experimentais obtidos durante os ensaios de descarga contínua com as baterias chumbo ácido VRLA e Li-ion 18650. Os dados coletados pela bancada foram processados para a extração das curvas características, cálculo da capacidade real entregue (Ah) e determinação do Estado de Saúde (SoH) de cada bateria.

3.1. Determinação do Estado de Saúde (SoH) e diagnóstico

Na tabela 4 temos a determinação do SoH das baterias modelo NCR18650A número 1 a 4 e abaixo na figura 6 temos o gráfico da tensão e corrente ao longo do tempo. Observamos que as baterias já estão desgastadas e o comportamento dos gráficos apresenta decaimento linear, exceto o da célula 1 em azul que tem um comportamento mais retilíneo até a sua tensão de corte.

As amostras são classificadas como aprovada (SoH ≥ 85%), Inconclusiva (75% ≤ SoH < 85%) ou reprovada (SoH < 75%). A faixa inconclusiva, centrada no limite de 80%, considera que os ensaios não foram encerrados na tensão de corte de catálogo. Nas células Li-Ion, a descarga terminou acima desse corte, de modo que a capacidade medida é um limite inferior e o SoH tende a ser subestimado. Nas VRLA LP6-7 e UP672, a descarga terminou abaixo do corte, o que tende a superestimar o SoH. Os resultados fora da faixa não mudariam de classe com esse efeito, e os dentro dela exigem novo ensaio com corte controlado.

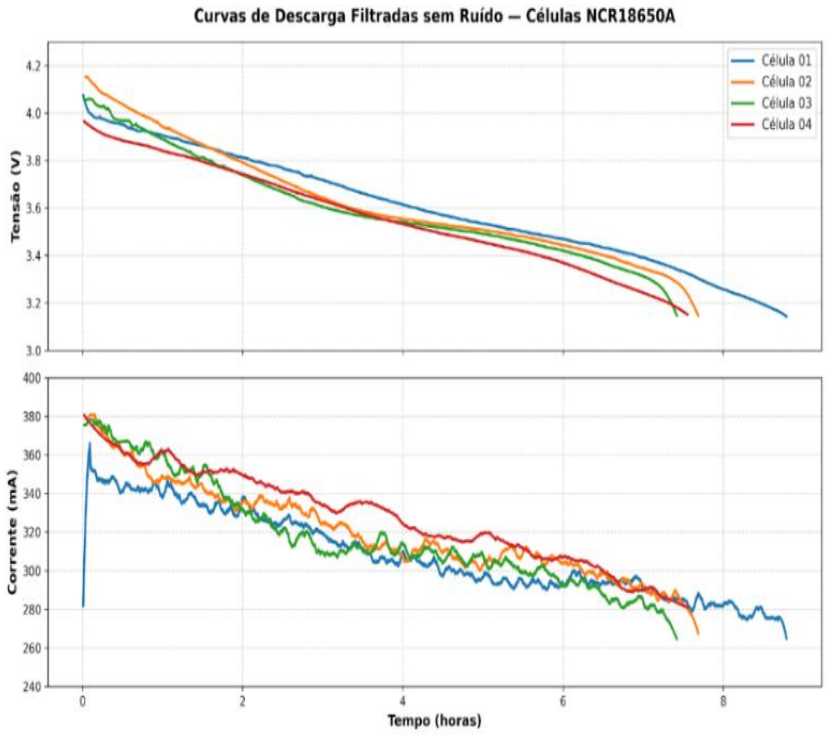
Tabela 4. Baterias NCR18650A

Amostra	V_inicial (V)	V_corte (V)	Tempo Total (min)	Cap_Medida (mAh)	SoH (%)	Status
Célula 01	4,24	3,13	526,39	2714,90	87,58%	Aprovada
Célula 02	4,23	3,14	457,92	2460,63	79,38%	Inconclusiva
Célula 03	4,20	3,15	442,44	2229,48	71,92%	Reprovada
Célula 04	4,20	3,15	452,09	2472,68	79,76%	Inconclusiva
Valores do datasheet	4,2V	2,5 V	-	3100,00	-	-

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Figura 6. Teste Baterias NCR18650A



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na tabela 5 temos a determinação do SoH das baterias modelo INR18650E número 1 e 2, na figura 7 temos o gráfico da tensão e corrente ao longo do tempo. Observamos que as baterias já estão desgastadas e o comportamento dos gráficos exibe uma queda acentuada de tensão.

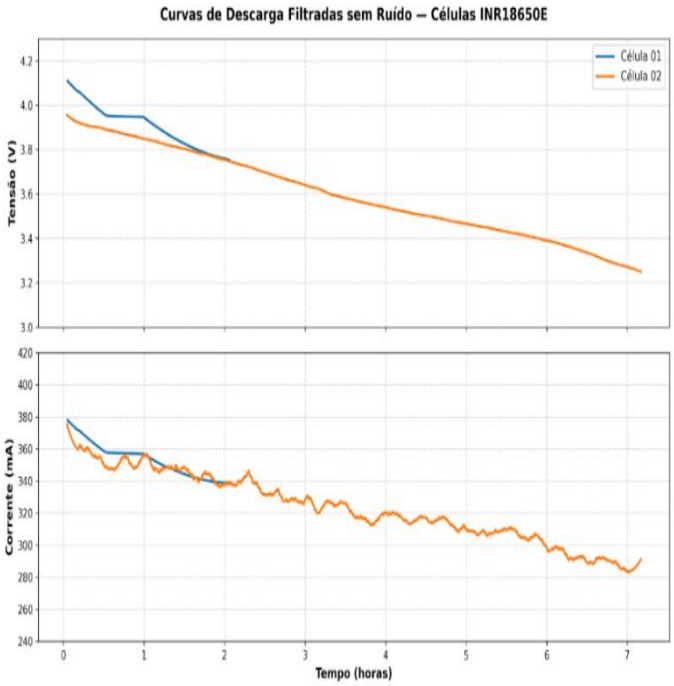
Tabela 5. Bateria INR18650E

Amostra	V_inicial (V)	V_corte (V)	Tempo Total (min)	Cap_Medida (mAh)	SoH (%)	Status
Célula 01	4,13	3,25	427,40	2296,42	80,58%	Inconclusiva
Célula 02	4,09	3,74	163,42	952,16	33,41%	Reprovada
Valores do datasheet	4,20	3,65	-	2850,00	-	-

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Figura 7. Teste Bateria INR18650E



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na tabela 6 temos a determinação do SoH das baterias modelo CGR18650CG número 1 a 4, na figura 8 temos o gráfico da tensão e corrente ao longo do tempo. Observamos que as baterias já estão desgastadas e o comportamento dos gráficos exibe uma queda acentuada de tensão.

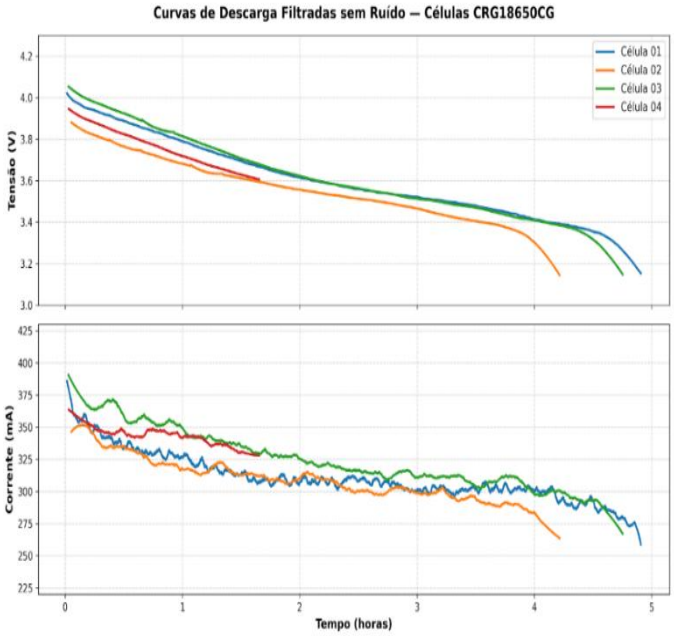
Tabela 6. Bateria CGR18650CG

Amostra	V_inicial (V)	V_corte (V)	Tempo Total (min)	Cap_Medida (mAh)	SoH (%)	Status
Célula 01	4,11	3,16	293,38	1520,95	67,60%	Reprovada
Célula 02	3,98	3,14	249,45	1357,28	60,32%	Reprovada
Célula 03	4,15	3,16	283,48	1477,51	65,67%	Reprovada
Célula 04	4,04	3,62	97,38	557,92	24,80%	Reprovada
Valores do datasheet	4,20	3,00	-	2250,00	-	-

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Figura 8. Teste CGR18650CG



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Na tabela 7 temos a determinação do SoH das baterias modelo JJSD18650 número 1 e 2, na figura 9 temos o gráfico da tensão e corrente ao longo do tempo. Observamos que as baterias são novas; portanto, o comportamento dos gráficos apresenta estabilidade na tensão nominal, só caindo quando atinge a tensão de corte da bateria.

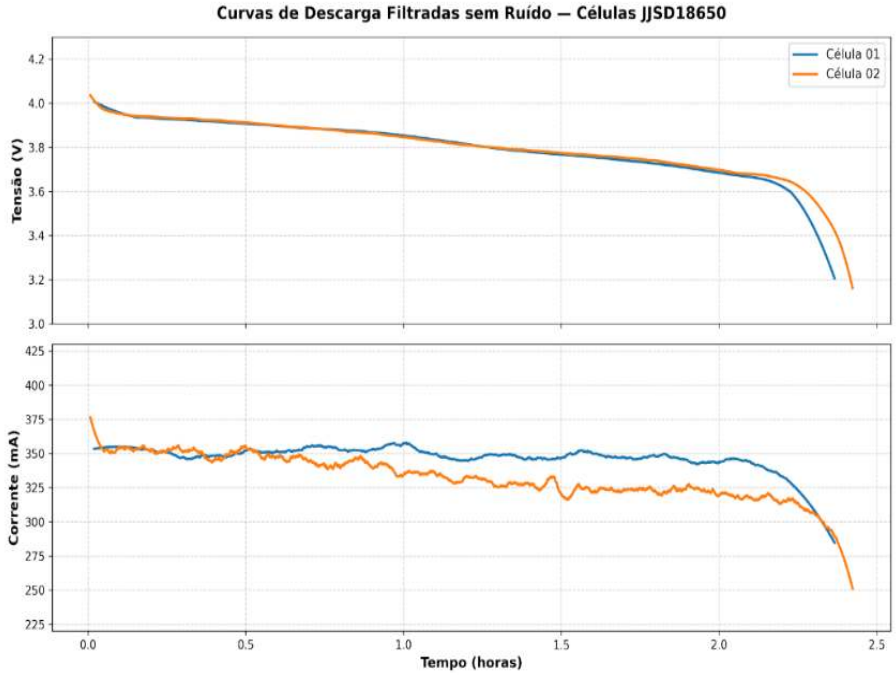
Tabela 7. Bateria JJSD18650

Amostra	V_inicial (V)	V_corte (V)	Tempo Total (min)	Cap_Medida (mAh)	SoH (%)	Status
Célula 01	4,17	3,14	170,80	814,20	101,78%	Aprovada
Célula 02	4,15	3,15	144,90	811,34	101,42%	Aprovada
Valores do datasheet	4,20	3,00	-	800,00	-	-

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Figura 9. Teste JJSD18650



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Na tabela 8 temos os resultados de três testes da determinação do SoH da bateria modelo UP672, na figura 10 temos o gráfico da tensão e corrente ao longo do tempo. Observamos que a bateria é nova, portanto, o comportamento dos gráficos apresenta estabilidade na tensão nominal, só caindo quando atinge a tensão de corte da bateria.

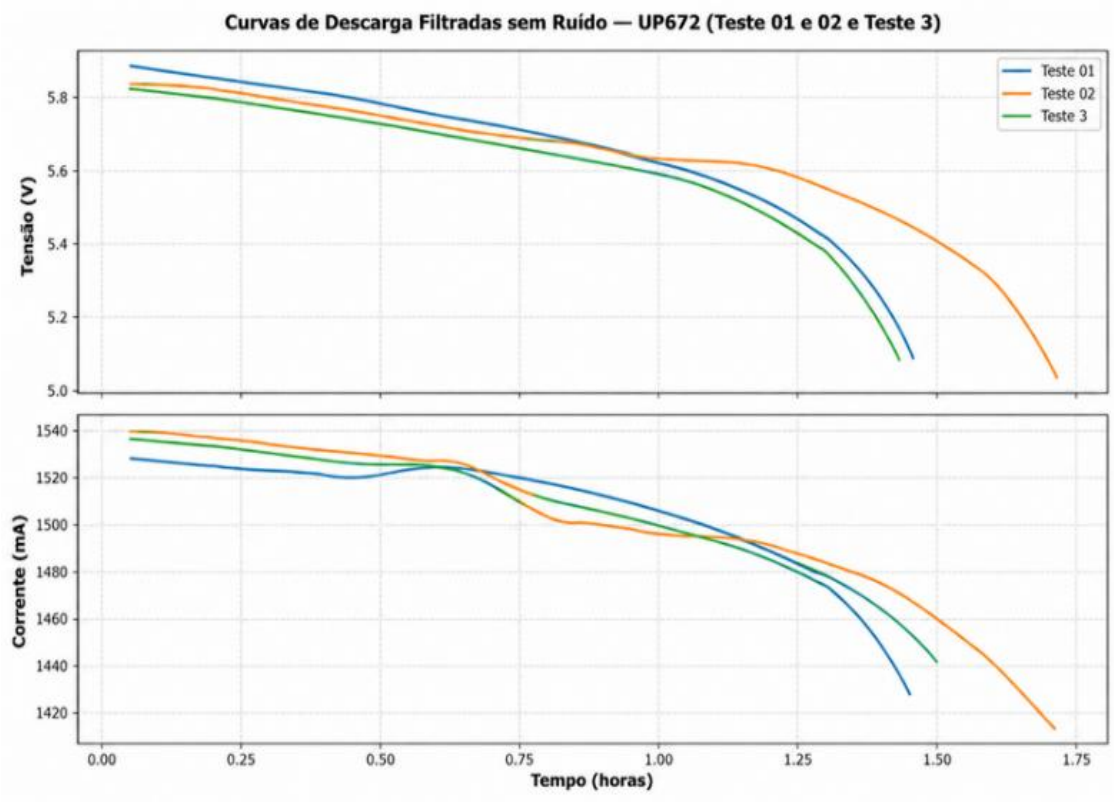
Tabela 8. Bateria UP672

Amostra	V_inicial (V)	V_corte (V)	Tempo Total (min)	Cap_Medida (Ah)	SoH (%)	Status
Teste 1	6,90	5,00	100,09	6,86	95,26%	Aprovada
Teste 2	6,10	5,11	98,91	6,73	93,51%	Aprovada
Teste 3	6,90	5,08	87,00	6,86	95,26%	Aprovada
Valores do datasheet	6,00	5,10	-	7,20	-	-

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Figura 10. Teste UP672



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Na tabela 9 temos os resultados de três testes da determinação do SoH da bateria modelo LP6-7, na figura 11 temos o gráfico da tensão e corrente ao longo do tempo. Observamos que a bateria já está desgastada e o comportamento dos gráficos apresenta decaimento linear.

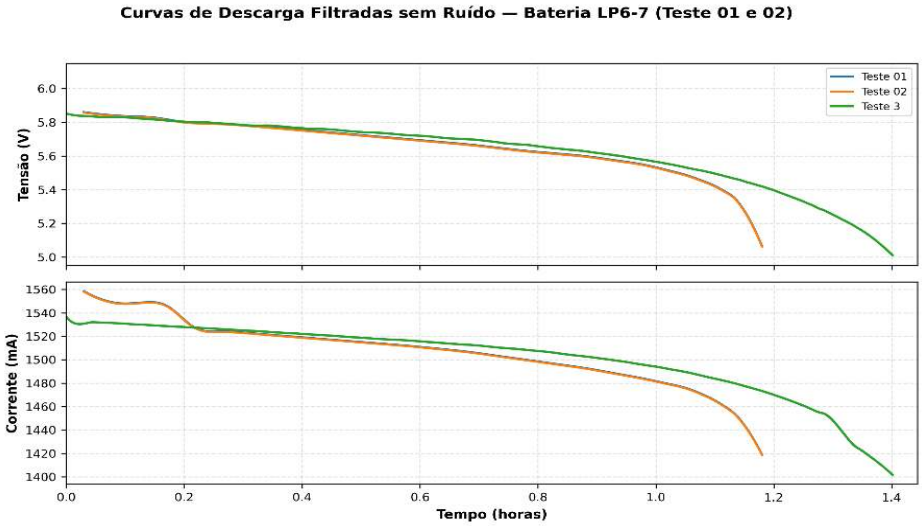
Tabela 9. Bateria LP6-7

Amostra	V_inicial (V)	V_corte (V)	Tempo Total (min)	Cap_Medida (Ah)	SoH (%)	Status
Teste 1	6,04	5,07	69,07	4,15	59,32%	Reprovada
Teste 2	6,10	5,00	68,90	4,05	57,80%	Reprovada
Teste 3	5,86	5,01	84,08	2,11	30,14%	Reprovada
Valores do datasheet	6,00	5,25	-	7,00	-	-

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Figura 11. Teste LP6-7



Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho apresentou o desenvolvimento e a avaliação experimental preliminar de um protótipo para aquisição de dados elétricos e estimativa da capacidade descarregada de baterias para o monitoramento preditivo e estimativa do Estado de Saúde (SoH) em baterias de Íon-Lítio (18650) e Chumbo-Ácido Seladas (VRLA). A arquitetura proposta, baseada na plataforma Arduino Uno R3 integrada a 2 sensores INA219 e processamento via integração numérica trapezoidal, demonstrou alta eficácia na aquisição contínua dos parâmetros de tensão e corrente durante ensaios de descarga sob carga resistiva e indutiva.

Os resultados obtidos comprovaram a capacidade do sistema em diferenciar células operacionais (SoH ≥ 80%) das em estado avançado de degradação (SoH < 80%). Baterias novas apresentaram curvas de descarga estáveis com estimativas de SoH superiores a 90%, enquanto células desgastadas exibiram quedas acentuadas de tensão e perdas substanciais de capacidade residual, validando o critério de corte operado pelo firmware e pelo pós-processamento.

Os resultados indicam potencial de aplicação do protótipo em procedimentos de diagnóstico e manutenção baseada na condição, sendo necessários estudos complementares para validar sua capacidade preditiva e viabilidade econômica para aplicações em sistemas de supressão de falha como *nobreaks* e sistemas de emergência. Como trabalhos futuros, podemos incluir um módulo de armazenamento local (como um cartão SD) ou conectividade sem fio para

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

monitoramento em tempo real sem a necessidade de um computador, bem como a implementação da medição automatizada da resistência interna por pulso de carga usando um MOSFET.

REFERÊNCIAS

ARDUINO. **Arduino Uno Rev3**: microcontroller board based on the ATmega328P. Somerville: Arduino, 2026. Documentação técnica. Disponível em: https://docs.arduino.cc/hardware/uno-rev3/. Acesso em: 24 maio 2026.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16109**: acumulador chumbo-ácido estacionário regulado por válvula para aplicação em sistemas ininterruptos de energia (UPS): especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2012a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16110**: acumulador chumbo-ácido estacionário regulado por válvula para aplicação em sistemas ininterruptos de energia (UPS): método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2012b.

BECK, R. F. **Baterias de lítio-íon (LiB)**: perspectivas e mercado. Campinas: Fundação CPqD, 2018. 43 slides. Palestra apresentada no Seminário sobre Acumuladores de Energia, Ministério da Defesa, DECTI, out. 2018. Disponível em: https://www.gov.br/defesa/pt-br/arquivos/ajuste-01/ciencia_tecnologia/acumuladores_energia/cpqd.pdf. Acesso em: 21 mar. 2026.

BERECIBAR, M. *et al.* Critical review of state of health estimation methods of Li-ion batteries for real applications. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Amsterdam, v. 56, p. 572-587, 2016.

FREITAS, D. C. C. **Contribuições à estimativa das características elétricas e ao tempo de vida útil de baterias de chumbo-ácido**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2016.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **IEEE Std 1188-2005**: IEEE recommended practice for maintenance, testing, and replacement of valve-regulated lead-acid (VRLA) batteries for stationary applications. New York: IEEE, 2005. Disponível em: https://standards.ieee.org/ieee/1188/1800/. Acesso em: 18 out. 2026.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 60896-21**: stationary lead-acid batteries – part 21: valve regulated types – methods of test. Ed. 1.0. Geneva: IEC, 2004. Disponível em: https://webstore.iec.ch/en/publication/3850. Acesso em: 18 out. 2026.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 62133-2:2017+AMD1:2021 CSV**: secondary cells and batteries containing alkaline or other non-acid electrolytes – safety requirements for portable sealed secondary cells, and for batteries made from them, for use in portable applications – part 2: lithium systems. Ed. 1.1. Geneva: IEC, 2021. Disponível em: https://webstore.iec.ch/en/publication/70017. Acesso em: 18 out. 2026.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 62619:2022**: secondary cells and batteries containing alkaline or other non-acid electrolytes – safety requirements for secondary

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

lithium cells and batteries, for use in industrial applications. Ed. 2.0. Geneva: IEC, 2022. Disponível em: https://webstore.iec.ch/en/publication/64073. Acesso em: 18 out. 2026.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 13381-1**: condition monitoring and diagnostics of machines – prognostics – part 1: general guidelines. Geneva: ISO, 2015.

KARDEC, A.; NASCIF, J. **Manutenção**: função estratégica. 3. ed. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2009.

LANDPORT. **LP6-7.0**: LP series – VRLA AGM battery – multi-purpose series. Raamsdonksveer: Landport Batteries, [2026?]. Datasheet. Disponível em: https://www.landportbv.com/media/pdfs/LP6-7.0_-_LP_SERIES_-_VRLA_AGM_Battery_-_multi-purpose_series.b1d2df.pdf. Acesso em: 29 set. 2026.

LI, Y. *et al.* Data-driven health estimation and lifetime prediction of lithium-ion batteries: a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Amsterdam, v. 113, art. 109254, 2019.

MICHELINI, A. **Baterias de lítio**. Cotia: S.T.A., [s. d.]. E-book. Disponível em: https://www.sta-eletronica.com.br/resources/downloads/ebookbateriasdelitio.pdf. Acesso em: 21 mar. 2026.

PAIXÃO, B. A. L. **Comparação de vida útil entre bancos de baterias de íon-lítio e chumbo-ácido no contexto da compensação de energia com geração distribuída fotovoltaica e tarifa branca**. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2020.

PANASONIC. **CGR18650CG**: lithium ion battery specification sheet. Osaka: Panasonic Corporation, [s. d.]. Datasheet. Disponível em: https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/1572172/PANASONIC/CGR18650CG.html. Acesso em: 24 maio 2026.

PANASONIC. **NCR18650A**: lithium ion. [S. l.]: Sanyo Energy (U.S.A.) Corporation, 2012. Datasheet. Disponível em: https://static6.arrow.com/aropdfconversion/88863ce316c4fcfdccf52de641ddbc2a1441ec9d/43ncr18650a.pdf. Acesso em: 18 out. 2026.

PAVLOV, D. **Lead-acid batteries**: science and technology. Amsterdam: Elsevier, 2011.

REDDY, T. B. (ed.). **Linden's handbook of batteries**. 4. ed. New York: McGraw-Hill, 2011.

SAMSUNG. **INR18650E**: lithium-ion rechargeable battery specification sheet. Suwon: Samsung SDI, [s. d.]. Datasheet. Disponível em: https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/1646253/SAMSUNG/INR18650E.html. Acesso em: 24 maio 2026.

TEXAS INSTRUMENTS. **INA219 Zerø-Drift, Bidirectional Current/Power Monitor With I²C Interface**. Rev. G. Dallas: Texas Instruments, 2015. Datasheet SBOS448G. Disponível em: https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ina219.pdf. Acesso em: 18 out. 2026.

UNICOBA. **Manual técnico série UP**: bateria chumbo-ácida selada regulada por válvula. Rev. 050920. [S. l.]: Unicoba, 2020. Disponível em: https://www.robocore.net/upload/ManualTecnicoBateriaUnipower.pdf. Acesso em: 18 out. 2026.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

VETTER, J. *et al.* Ageing mechanisms in lithium-ion batteries. **Journal of Power Sources**, Amsterdam, v. 147, n. 1-2, p. 269-281, 2005.

XIONG, R.; LI, L.; TIAN, J. Towards a smarter battery management system: a critical review on battery state of health monitoring methods. **Journal of Power Sources**, Amsterdam, v. 405, p. 18-29, 2018.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.