

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**

**VÍCTOR TRUCOLO RIBEIRO**

**DESENVOLVIMENTO DE UMA INFRAESTRUTURA DE TESTES PARA  
CLASSIFICAÇÃO DE BATERIAS DE SEGUNDA VIDA**

**PONTA GROSSA**

**2025**

**VÍCTOR TRUCOLO RIBEIRO**

**DESENVOLVIMENTO DE UMA INFRAESTRUTURA DE TESTES PARA  
CLASSIFICAÇÃO DE BATERIAS DE SEGUNDA VIDA**

**Development of a test infrastructure for second-life battery classification**

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador: Prof. Dr. Carlos Henrique Illa Font

**PONTA GROSSA**

**2025**



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

Esta licença permite download e compartilhamento do trabalho desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es), sem a possibilidade de alterá-lo ou utilizá-lo para fins comerciais. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

**VÍCTOR TRUCOLO RIBEIRO**

**DESENVOLVIMENTO DE UMA INFRAESTRUTURA DE TESTES PARA  
CLASSIFICAÇÃO DE BATERIAS DE SEGUNDA VIDA**

Trabalho de conclusão de curso de graduação  
apresentado como requisito para obtenção do título de  
Bacharel em Engenharia Elétrica da Universidade  
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 03/dezembro/2025

---

Carlos Henrique Illa Font  
Doutorado  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Mauricio dos Santos Kaster  
Doutorado  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Sergio Luiz Stevan Junior  
Doutorado  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

**PONTA GROSSA**

**2025**

Dedico este trabalho à minha família, pelo apoio incondicional e compreensão, e aos meus professores, cuja dedicação e ensinamentos foram fundamentais para minha formação acadêmica.

## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de expressar meus sinceros agradecimentos a todos que contribuíram para a realização deste trabalho. Em especial, ao Prof. Dr. Carlos Henrique Illa Font, que orientou, apoiou e incentivou com apreço. Agradeço profundamente à minha família e à minha namorada, Débora, por todo o apoio, paciência e incentivo. Também agradeço o apoio da equipe de pesquisa e colegas pela colaboração e compartilhamento de conhecimentos valiosos. Por fim, agradeço a UTFPR, CNPq (Processo 408053/2022-4) e ao Grupo Renault Brasil por viabilizarem o projeto.

"A mente que se abre a uma nova ideia jamais  
voltará ao seu tamanho original."  
(ALBERT EINSTEIN).

## RESUMO

A crescente popularização dos veículos elétricos (VEs), impulsionada pela busca por energia limpa e fontes renováveis, levanta a questão crucial sobre o destino das baterias de íons de lítio ao final de sua vida útil. O reaproveitamento dessas baterias em aplicações de "segunda vida" surge como uma solução alinhada à economia circular. Este trabalho insere-se no contexto de um projeto de pesquisa entre UTFPR, CNPq e Renault, que disponibilizou três packs de baterias do veículo elétrico Kangoo Z.E. para estudo. O objetivo principal foi o desenvolvimento de uma infraestrutura de testes para a classificação destes módulos de bateria de segunda vida, focando na determinação precisa do Estado de Saúde (SoH). Para isso, foi projetada uma placa de circuito impresso (PCI) dedicada à aquisição de dados, capaz de medir tensão, corrente e temperatura com precisão. Complementarmente, foi desenvolvido um algoritmo em MATLAB para aplicar o método de Contagem de Coulomb, realizar os ensaios de carga e descarga, processar os dados e calcular o SoH de cada módulo. A infraestrutura foi validada experimentalmente, caracterizando 114 módulos e revelando uma heterogeneidade significativa no lote, com 51,75% do total de módulos disponíveis apresentando SoH superior a 70%, condição considerada ótima para aplicações de segunda vida. Conclui-se, através dos resultados obtidos, que a infraestrutura desenvolvida é uma ferramenta eficaz para a triagem e classificação de baterias de segunda vida provenientes de veículos elétricos e híbridos.

Palavras-chave: Veículos elétricos; Baterias de Segunda Vida; Estado de Saúde de Baterias; Classificação de Baterias; Infraestrutura de Testes.

## **ABSTRACT**

The growing popularization of electric vehicles (EVs), driven by the search for clean energy and renewable sources, raises the crucial question regarding the fate of lithium-ion batteries at the end of their useful life. The repurposing of these batteries in "second-life" applications emerges as a solution aligned with the circular economy. This work is part of a research project between UTFPR, CNPq, and Renault, which provided three battery packs from the Kangoo Z.E. electric vehicle for study. The main objective was the development of a test infrastructure for the classification of these second-life battery modules, focusing on the precise determination of the State of Health (SoH). To achieve this, a printed circuit board (PCB) dedicated to data acquisition was designed, capable of accurately measuring voltage, current, and temperature. Complementarily, a MATLAB algorithm was developed to apply the Coulomb Counting method, perform charge and discharge tests, process the data, and calculate the SoH of each module. The infrastructure was experimentally validated by characterizing 114 modules, revealing significant heterogeneity in the batch, with 51.75% of the available modules presenting a SoH greater than 70%, a condition considered optimal for second-life applications. It is concluded, through the obtained results, that the developed infrastructure is an effective tool for the screening and classification of second-life batteries from electric and hybrid vehicles.

**Keywords:** Electric vehicles; Second-Life Batteries (SLB); State of Health of Batteries (SoH); Battery Classification; Test Infrastructure.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Gráfico da vida da bateria em função da capacidade.....	19
Figura 2 – Renault Kangoo Z.E. 2013 .....	26
Figura 3 – Módulo Renault Kangoo Z.E.....	26
Figura 4 – Diagrama da topologia 2s2p do módulo .....	27
Figura 5 – Bateria Renault Kangoo Z.E. ....	28
Figura 6 – Desmontagem Bateria Renault Kangoo Z.E.....	28
Figura 7 – Esquemático placa de aquisição de dados.....	32
Figura 8 – Layout placa de aquisição de dados .....	32
Figura 9 – Layout placa de aquisição de dados versão 1.....	34
Figura 10 – Placa de aquisição de dados versão 1 .....	34
Figura 11 – Setup teste tensão.....	35
Figura 12 – Carga resistiva utilizada para teste sensor de corrente .....	36
Figura 13 – Teste sensor LM35 protoboard .....	37
Figura 14 – Chicotes Sensores LM35 .....	37
Figura 15 – Posicionamento dos sensores LM35 no módulo .....	38
Figura 16 – Imagem termográfica para validação .....	38
Figura 17 – Placa de aquisição de dados versão final.....	39
Figura 18 – Base com proteção nos terminais .....	40
Figura 19 – Base com proteção nos terminais .....	41
Figura 20 – Bancada de testes Carga.....	41
Figura 21 – Bancada de testes Descarga.....	42
Figura 22 – Esquemático ligações bancada de testes Carga.....	42
Figura 23 – Esquemático ligações bancada de testes Descarga.....	43
Figura 24 – Fluxograma Código MATLAB.....	44
Figura 25 – Protocolo de ensaios .....	44
Figura 26 – Resultado final do ensaio de descarga gerado pelo MATLAB .....	50
Figura 27 – Módulos Bateria A classificados.....	52
Figura 28 – Módulos Bateria B classificados.....	52
Figura 29 – Módulos Bateria C classificados.....	53
Gráfico 1 – Corrente durante o ensaio de Carga CC-CV.....	47
Gráfico 2 – Tensões das Células durante o ensaio de Carga CC-CV .....	47
Gráfico 3 – Temperaturas durante o ensaio de Carga CC-CV .....	48
Gráfico 4 – Corrente durante o ensaio de Descarga CC.....	48
Gráfico 5 – Tensões das Células durante o ensaio de Descarga CC .....	49
Gráfico 6 – Temperaturas durante o ensaio de Descarga CC .....	49

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1 – Componentes de projeto.....</b>	<b>30</b>
<b>Tabela 2 – Classificação 114 módulos .....</b>	<b>51</b>
<b>Tabela 3 – Distribuição dos módulos por SOH.....</b>	<b>54</b>

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABVE	Associação Brasileira do Veículo Elétrico
ADC	Conversor Analógico-Digital (Analog-to-Digital Converter)
AGV	Veículo Autoguiado (Automated Guided Vehicle)
BESS	Sistema de Armazenamento de Energia em Bateria (Battery Energy Storage System)
CC	Corrente Constante
CC-CV	Corrente Constante-Tensão Constante
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
EKF	Filtro de Kalman Estendido (Extended Kalman Filter)
EPI	Equipamento de Proteção Individual
ESS	Sistema de Armazenamento de Energia Estacionário (Energy Storage System)
IEA	Agência Internacional de Energia (International Energy Agency)
LFP	Fosfato de Ferro-Lítio (Lithium Iron Phosphate)
LIB	Bateria de Íon-Lítio (Lithium-ion Battery)
NMC	Óxido de Níquel-Manganês-Cobalto
OCV	Tensão de Circuito Aberto (Open Circuit Voltage)
PCI	Placa de Circuito Impresso
RNA	Rede Neural Artificial
SENAI	Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial
SLB	Bateria de Segunda Vida (Second-Life Battery)
SoC	Estado de Carga (State of Charge)
SoH	Estado de Saúde (State of Health)
SSB	Bateria de Estado Sólido (Solid-State Battery)
USB	Universal Serial Bus
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
VE	Veículo Elétrico

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>13</b>
<b>1.1</b>	<b>Delimitação do tema</b> .....	<b>14</b>
<b>1.2</b>	<b>Problema</b> .....	<b>14</b>
<b>1.3</b>	<b>Relevância do tema</b> .....	<b>14</b>
<b>1.4</b>	<b>Objetivos geral e específicos</b> .....	<b>15</b>
<b>1.5</b>	<b>Metodologia</b> .....	<b>16</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>17</b>
<b>2.1</b>	<b>A tecnologia das baterias recarregáveis</b> .....	<b>17</b>
<b>2.2</b>	<b>O conceito de segunda vida de bateria (SLB)</b> .....	<b>18</b>
<b>2.3</b>	<b>Métricas fundamentais de desempenho e classificação</b> .....	<b>20</b>
2.3.1	O estado de carga (SoC) e estado de saúde (SoH) .....	20
<b>2.4</b>	<b>Métodos de caracterização e estimação de SoC e SoH</b> .....	<b>20</b>
2.4.1	Variáveis essenciais para caracterização .....	21
2.4.2	Protocolos padrões de teste .....	21
2.4.3	Método de contagem de Coulomb.....	22
2.4.4	Outros métodos de estimação de SoH.....	23
<b>3</b>	<b>INFRAESTRUTURA E METODOLOGIA DE TESTES</b> .....	<b>25</b>
<b>3.1</b>	<b>Bateria em estudo (Renault Kangoo Z.E.)</b> .....	<b>25</b>
<b>3.2</b>	<b>Desmontagem das baterias e preparação dos módulos</b> .....	<b>27</b>
<b>3.3</b>	<b>Projeto e desenvolvimento da placa de aquisição de dados</b> .....	<b>29</b>
3.3.1	Seleção de componentes e sensores.....	29
3.3.2	Arquitetura e comunicação com o Arduino Mega 2560 .....	30
3.3.3	Projeto do circuito e layout da placa de aquisição de dados .....	31
<b>3.4</b>	<b>Evolução, montagem e validação da PCI</b> .....	<b>33</b>
3.4.1	Protótipo versão 1: Projeto e validação .....	33
3.4.2	Testes de validação do sensor de temperatura.....	36
3.4.3	Montagem da placa final .....	39
<b>3.5</b>	<b>Montagem da bancada de testes</b> .....	<b>39</b>
3.5.1	Configuração detalhada do setup de carga e descarga .....	40
3.5.2	Diagrama de blocos do sistema experimental.....	42
<b>3.6</b>	<b>Metodologia e protocolo dos ensaios</b> .....	<b>43</b>
3.6.1	Algoritmo de controle (MATLAB) e método de cálculo .....	43
3.6.2	Protocolo de carga (CC-CV).....	44
3.6.3	Protocolo de descarga (CC).....	45

<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>46</b>
<b>4.1</b>	<b>Apresentação dos ensaios experimentais .....</b>	<b>46</b>
4.1.1	Ensaio de carga (CC-CV).....	46
4.1.2	Ensaio de descarga (CC) .....	48
<b>4.2</b>	<b>Resultados da classificação do estado de saúde (SoH).....</b>	<b>50</b>
<b>4.3</b>	<b>Análise e discussão dos resultados.....</b>	<b>53</b>
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>56</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>57</b>
	<b>APÊNDICE A - Memória de cálculo do projeto .....</b>	<b>59</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Atualmente o uso de baterias de íons de lítio está em constante crescimento, impulsionado pela popularização de veículos elétricos (VEs). No cenário mundial é notável a expansão, com aproximadamente 18% do total de veículos vendidos no mundo em 2023 sendo elétricos (IEA, 2024). No Brasil, essa tendência se confirma, de acordo com a Associação Brasileira do Veículo Elétrico (ABVE, 2025), o ano de 2024 encerrou com um recorde de 177.358 VEs leves emplacados, um aumento de 89% em relação aos 93.927 de 2023. Essa expansão desempenha um papel fundamental na transição energética, criando o potencial para reduzir o consumo de combustíveis fósseis e as emissões de gases de efeito estufa.

O avanço na produção e uso dessas baterias intensifica os desafios relacionados ao seu descarte e reaproveitamento. De acordo com Gu et al. (2023), as baterias de VEs são consideradas no fim de sua primeira vida quando perdem de 20% a 30% de sua capacidade original, o que ocorre tipicamente entre 8 e 10 anos de uso. Nesse ponto, elas deixam de ser satisfatórias para a aplicação automotiva primária.

Tal situação levanta questões ambientais e econômicas, mas também abre a oportunidade de seu reaproveitamento, prática conhecida como segunda vida de baterias (*Second Life Battery* - SLB). Apesar dessas baterias deixarem de ser úteis em suas aplicações primárias, as mesmas podem ser empregadas em novas aplicações. Esta solução é fundamental para promover uma gestão mais eficiente e sustentável dos recursos energéticos, possibilitando o reaproveitamento de baterias que não são mais adequadas para sua aplicação original, mas que ainda têm potencial para outros usos.

Para que esse aproveitamento seja seguro e tecnicamente viável, torna-se necessário desenvolver metodologias de caracterização e classificação que permitam avaliar o estado de carga (*State of Charge* - SoC) e o estado de saúde (*State of Health* - SoH) dos módulos de bateria, que permitam determinar a condição das baterias, garantindo a confiabilidade e a segurança para seu reaproveitamento em um novo ciclo de uso.

## 1.1 Delimitação do tema

Este trabalho está delimitado ao estudo da viabilidade de utilização de módulos de baterias de íon-lítio de segunda vida, provenientes de veículos elétricos, por meio do desenvolvimento de uma infraestrutura experimental de testes (*hardware* e *software*). A pesquisa concentra-se na avaliação do estado de carga (SoC) e do estado de saúde (SoH) desses módulos, empregando como método principal *Coulomb Counting*, sendo o SoH o principal indicador para a classificação de módulos para sua utilização em aplicações de segunda vida.

A abordagem é restrita ao nível experimental em bancada, contemplando a caracterização elétrica dos módulos e a implementação computacional dos algoritmos de estimativa. Não são abordados, portanto, aspectos relacionados à logística reversa das baterias, normas de descarte e questões econômicas da cadeia de reaproveitamento.

## 1.2 Problema

O maior desafio na reutilização de baterias de veículos elétricos é a avaliação precisa da sua condição atual. Embora os módulos de segunda vida mantenham uma capacidade energética residual significativa, sua heterogeneidade de degradação, causada por diferentes padrões de uso e fatores de estresse, seja térmico ou elétrico na primeira vida, exige uma caracterização individual rigorosa.

Dessa forma, o problema de pesquisa que este trabalho visa solucionar é como desenvolver e validar uma infraestrutura de testes baseada em uma placa de aquisição de dados com sensores dedicados e processamento computacional, que garanta a classificação precisa do estado de saúde de módulos de baterias de segunda vida, confirmando sua aptidão para o reaproveitamento em novas aplicações.

## 1.3 Relevância do tema

O tema de estudo possui relevância notável na área científica e tecnológica, econômica e ambiental, alinhando-se aos objetivos de desenvolvimento sustentável.

Do ponto de vista técnico, o projeto contribui com o desenvolvimento de metodologias de testes e classificação, incluindo a área de medidas e instrumentação eletrônica por meio do desenvolvimento de uma placa de circuito impresso (PCI)

dedicada para a aquisição de dados. Além disso, o trabalho aplica e valida um algoritmo de estimação de SoC e SoH, sendo fundamental para a consolidação da cadeia de reutilização de baterias, permitindo maior confiabilidade e segurança em seu uso.

Já em relação ao ponto de vista econômico e ambiental, a classificação e consequente reutilização das baterias, prolongam a vida útil dos módulos de bateria, adiando o descarte e a necessidade de reciclagem e contribuindo significativamente para a economia circular.

#### **1.4 Objetivos geral e específicos**

O objetivo geral é o de desenvolver e validar uma infraestrutura de testes completa para a classificação de estado de carga (SoC) e estado de saúde (SoH) dos módulos de baterias de segunda vida. Para este efeito, alguns objetivos específicos devem ser alcançados:

1. A partir da revisão bibliográfica, estabelecer a fundamentação sobre as tecnologias de baterias de íons de lítio, o contexto da SLB e os métodos de estimação de SoC e SoH mais aplicáveis, como a Contagem de Coulomb.
2. Realizar análise dos parâmetros dos módulos os quais serão utilizados no estudo, como capacidade de armazenamento de energia, tensão máxima de cada célula e temperatura a qual será submetido em bancada.
3. Definir qual a corrente será utilizada para as etapas de carga e descarga do módulo de bateria.
4. Definir os componentes necessários para construção de circuito de aquisição de dados.
5. Realizar cálculo das resistências empregadas na placa de aquisição.
6. Realizar o projeto da placa de aquisição.
7. Realizar montagem física da placa e devidos ensaios de validação da placa.
8. Realizar a montagem das bancadas de teste, utilizando fontes de alimentação controladas, carga eletrônica e placas de aquisição de dados para a realização dos ensaios.
9. Desenvolver código computacional, com o objetivo de coletar os dados (tensões, corrente e temperaturas) ao longo de cada teste, calcular a carga acumulada e, finalmente, determinar o estado de saúde de cada módulo de bateria.

10. Realizar ensaios experimentais em uma amostra de módulos de bateria para validar a precisão da infraestrutura e a metodologia de classificação.
11. Por fim, avaliar os resultados obtidos.

## 1.5 Metodologia

A metodologia deste trabalho baseia-se em uma abordagem experimental quantitativa, estruturada para o desenvolvimento e validação de um sistema instrumentação eletrônica funcional, dividida em fases de hardware e software.. O desenvolvimento do projeto foi dividido em quatro etapas sequenciais:

1. Concepção e dimensionamento do *hardware*: Esta etapa consistiu no estudo das tecnologias de baterias de íon-lítio e métodos de estimação de estado de saúde (SoH), seguido pela definição dos requisitos do sistema. Foram tomadas as decisões de projeto referentes à escolha dos sensores de efeito Hall para medição de tensão e corrente, sensores de temperatura e a plataforma microcontrolada, culminando no dimensionamento dos componentes e *layout* da placa de circuito impresso (PCI).
2. Implementação e montagem: Consistiu na confecção física da PCI, montagem das bancadas de testes com dispositivos de segurança e a integração com os instrumentos de potência (fontes e cargas eletrônicas). Paralelamente, foi desenvolvido o *software* de controle e processamento em ambiente MATLAB.
3. Validação metrológica: Antes da aplicação final, o sistema passou por uma fase de validação, onde as leituras dos sensores projetados foram comparadas com instrumentos padrão calibrados, garantindo a confiabilidade dos dados adquiridos.
4. Caracterização experimental: A etapa final consistiu na aplicação dos protocolos de carga (CC-CV) e descarga (CC) no lote de módulos de bateria do veículo Renault Kangoo Z.E., utilizando o método de Contagem de Coulomb para a classificação do Estado de Saúde (SoH) de cada unidade.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo tem como objetivo fundamental estabelecer o embasamento teórico necessário para o desenvolvimento e a compreensão da infraestrutura de testes proposta. São abordados os conceitos centrais da pesquisa, desde o princípio de funcionamento e o ciclo de vida das baterias de íons de lítio até as metodologias cruciais para a classificação do estado de carga (SoC) e estado de saúde (SoH).

### 2.1 A tecnologia das baterias recarregáveis

As baterias recarregáveis são uma tecnologia fundamental para a transição energética, sendo utilizadas desde eletrônicos portáteis, veículos elétricos até sistemas de armazenamento de energia (*Battery Energy Storage System - BESS*). De acordo com Grey e Hall (2020), essa relevância é impulsionada pela crescente demanda por aplicações cotidianas, incluindo veículos elétricos, dispositivos portáteis e soluções de armazenamento de energia que sejam eficientes, sustentáveis e de alto desempenho. A evolução dessas tecnologias demonstra um claro progresso na busca por maior densidade energética, segurança e redução das emissões de carbono.

As baterias de tecnologias mais antigas, como as de chumbo-ácido e as baseadas em níquel, foram fundamentais no passado, mas apresentavam limitações significativas, como baixa densidade de energia e alta taxa de autodescarga. De acordo com Hossain Lipu *et al.* (2020), as baterias de íons de lítio se consolidaram como a principal escolha para aplicações em veículos elétricos devido à sua alta densidade de energia, longa vida útil e elevada eficiência de carga e descarga. Grey e Hall (2020) corroboram, afirmando que atualmente, as baterias de íons de lítio (lithium íon batteries - LIBs) tornaram-se a tecnologia dominante.

Além disso, Illa Font *et al.* (2023) destacam que as LIBs têm alta densidade de energia, longa vida útil, baixa manutenção, alta capacidade de potência, baixa autodescarga e ausência de efeito memória, o que consolidou as LIBs como a escolha ideal para a indústria automotiva.

Contudo, a tecnologia não está isenta de desafios, incluindo o custo elevado e a disponibilidade limitada de matérias-primas, como o cobalto e o níquel. Grey e Hall (2020) ressaltam que a transição de materiais baseados em óxido de lítio-cobalto para composições ricas em níquel na indústria automotiva busca reduzir a dependência do cobalto, mas gera novas preocupações relacionadas ao fornecimento de níquel. Isso

também motivou a reavaliação de químicas como o fosfato de ferro-lítio, que oferecem maior estabilidade e segurança a custo reduzido.

A grande versatilidade das LIBs reside na variedade de químicas. Entre as mais comuns na indústria automotiva estão a LFP (Fosfato de Ferro-Lítio), conhecida pelo baixo custo e alta segurança e a NMC (Óxido de Níquel-Manganês-Cobalto). A química NMC é particularmente adaptável, pois o ajuste na proporção de seus metais permite otimizar a bateria para diferentes prioridades, seja maior densidade de energia ou menor custo. Neste trabalho a química utilizada no módulo de bateria em estudo será NMC.

A próxima fronteira tecnológica, indicado por Grey e Hall (2020), são as baterias de estado sólido (SSB), que substituem o eletrólito líquido por um sólido e prometem maior segurança e densidade de energia, representando um dos principais caminhos para o avanço das tecnologias de armazenamento de energia na próxima década.

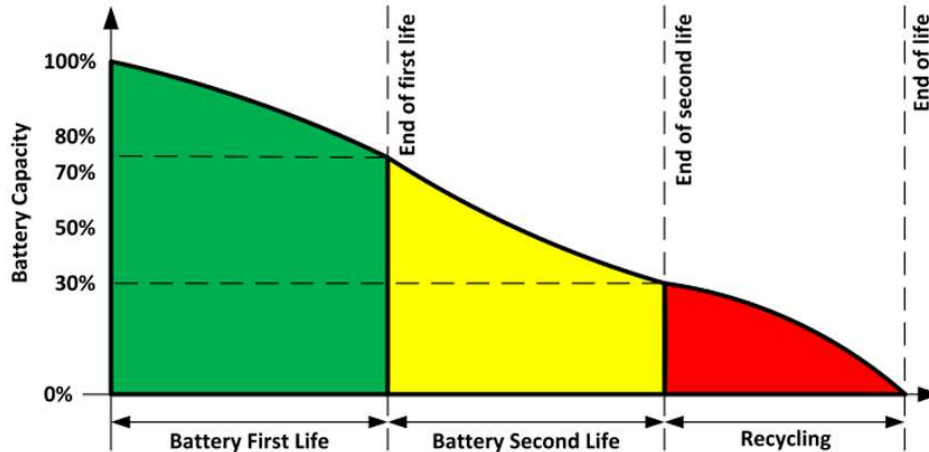
## **2.2 O conceito de segunda vida de bateria (SLB)**

Em aplicações automotivas, as baterias de íons de lítio operam sob condições exigentes, tipicamente suportando mais de 1000 ciclos de carga/descarga ao longo de 5 a 8 anos e expostas a amplas faixas de temperatura (ILLA FONT *et al.*, 2023).

Illa Font *et al.* (2023) destacam que a maioria dos fabricantes de veículos elétricos recomenda a substituição da bateria quando sua capacidade atinge um estado de saúde entre 70% e 80% do valor original, pois isso representa uma perda considerável na autonomia do veículo. Este ponto marca o fim da primeira vida automotiva da bateria.

Contudo, os autores destacam que mesmo após serem removidas do veículo, essas baterias ainda retêm uma capacidade residual significativa. Surge então, o conceito de segunda vida de baterias, em inglês *second-life batteries* (SLB), que propõe o reaproveitamento desses módulos em aplicações menos exigentes antes de seu descarte final. O conceito de SLB está alinhado com os princípios da economia circular, pois estende a vida útil do produto, adia a necessidade de reciclagem e reduz o consumo de matéria-prima. Ainda, de acordo com os autores, após atingir 30% de capacidade em relação a nominal, a bateria deve ser destinada à reciclagem. Na Figura 1 é possível visualizar o ciclo de vida completo de uma bateria de íons de lítio.

Figura 1 - Gráfico da vida da bateria em função da capacidade.



Fonte: ILLA FONT *et al.* (2023)

As aplicações mais promissoras para as SLBs são, de acordo com Illa Font *et al.* (2023), sistemas estacionários, onde os requisitos de densidade de energia e potência são menos críticos do que em VEs. Os autores citam que na Europa, vários fabricantes de veículos, em especial as empresas pioneiras no mercado de veículos elétricos, implementaram alternativas ao uso de baterias de segunda vida em diferentes sistemas de armazenamento de energia.

Um exemplo prático da aplicação de SLBs é a iniciativa da Nissan, que de acordo com o Portal de Notícias Nissan (2021), utiliza baterias de seus veículos LEAF de primeira geração para alimentar os Veículos Autoguiados (AGVs) que transportam peças em suas fábricas, como a de Oppama, no Japão. Em parceria com a empresa 4R Energy, a Nissan desenvolveu um método para recondicionar e instalar packs compostos por três módulos do LEAF (que originalmente possuíam 48 módulos) dentro de um AGV.

Esta aplicação de segunda vida demonstrou vantagens técnicas e ambientais significativas. A principal melhoria foi na durabilidade, enquanto as baterias de chumbo-ácido, anteriormente utilizadas nos AGVs, precisavam ser substituídas a cada um ou dois anos, estima-se que os módulos de SLB do LEAF tenham uma vida útil de sete a oito anos nessa função. Além disso, a tecnologia de íons de lítio permitiu otimizar a operação da fábrica, pois os AGVs não precisam mais ter suas baterias removidas para recarga, eles agora realizam paradas curtas em pontos de recarga automatizados ao longo de suas rotas, aumentando a eficiência e reduzindo o impacto ambiental.

## 2.3 Métricas fundamentais de desempenho e classificação

O principal desafio técnico para a implementação adequada da SLB é a heterogeneidade. Módulos retirados de diferentes veículos terão históricos de uso e níveis de degradação distintos. De acordo com Illa Font *et al.* (2023), com base na estimativa da saúde do módulo de bateria, é possível garantir a operação confiável da bateria e prever sua vida útil.

Portanto, para garantir a segurança, o desempenho e a longevidade do novo sistema de armazenamento, é essencial realizar um processo de caracterização individual de cada módulo. Esta caracterização permite a classificação adequada dos módulos antes de sua utilização em uma nova aplicação justificando a infraestrutura de testes desenvolvida neste trabalho.

Para realizar essa classificação de forma quantitativa, são utilizadas métricas padronizadas que descrevem a condição atual da bateria, sendo as mais importantes o estado de carga (SoC) e o estado de saúde (SoH).

### 2.3.1 O estado de carga (SoC) e o estado de saúde (SoH)

O estado de carga (SoC) representa, de acordo com Guedes *et al.* (2024), o nível de energia atualmente armazenado na bateria, expresso como uma porcentagem de sua capacidade máxima atual. Um SoC de 100% indica que a bateria está totalmente carregada, enquanto um de 0% indica que ela está totalmente descarregada. O monitoramento preciso do SoC é vital para a operação segura da bateria, pois evita condições de sobrecarga e descarga profunda, que podem causar danos irreversíveis às células.

Enquanto o SoC descreve, de acordo com Quinard *et al.* (2019), a carga instantânea, o estado de saúde (SoH) é a métrica fundamental que quantifica o envelhecimento e a degradação da bateria ao longo de sua vida útil. Portanto, o SoH é um indicador de longo prazo que reflete a capacidade remanescente da bateria em comparação com sua condição original.

## 2.4 Métodos de caracterização e estimação de SoC e SoH

Com as métricas fundamentais (SoC e SoH) definidas, esta seção aborda as metodologias utilizadas para a sua caracterização e estimação.

#### 2.4.1 Variáveis essenciais para caracterização

A caracterização precisa do estado de uma bateria depende fundamentalmente da medição de três variáveis, sendo elas tensão, corrente e temperatura.

A tensão nos terminais da bateria (ou de suas células individuais) é um indicador direto do estado eletroquímico interno. O monitoramento da tensão durante a carga e descarga é essencial para garantir que a bateria opere dentro de seus limites seguros (tensão mínima e máxima de célula).

A medição precisa da corrente que entra (carga) ou sai (descarga) da bateria é fundamental para a correta utilização de uma bateria dentro dos limites estabelecidos pelo fabricante.

A temperatura é um dos fatores que mais afeta o desempenho, a segurança e a vida útil de uma bateria de lítio-íon. De acordo com Haram et al. (2021), operar a bateria fora de sua faixa de temperatura ideal acelera a degradação e gera questões relacionadas à segurança. Portanto, o monitoramento preciso da temperatura durante os testes de caracterização é indispensável.

#### 2.4.2 Protocolos padrões de teste

Para a caracterização laboratorial de LIBs e a determinação de suas métricas (SoC e SoH), são empregados protocolos de carga e descarga padronizados. Os dois principais métodos, utilizados neste trabalho, são o CC-CV para carga e o CC para descarga.

O método de carga Corrente Constante - Tensão Constante (CC-CV) é o padrão da indústria para carregar baterias de lítio-íon de forma segura e completa. Conforme descrito por Wang et al. (2021), o processo se inicia com uma fase de Corrente Constante (CC), onde uma corrente pré-definida é aplicada à bateria. Durante esta fase, a tensão da bateria aumenta gradualmente. Quando a tensão atinge o limite máximo especificado pelo fabricante (por exemplo, 4,20 V por célula), o processo entra na segunda fase, a de Tensão Constante (CV). Nesta fase, a tensão é mantida constante no limite máximo, enquanto a corrente de carga diminui naturalmente à medida que a bateria se aproxima da carga total. O processo de carga é considerado finalizado quando a corrente na fase CV cai até um valor de corte pré-determinado (WANG et al., 2021).

Para a etapa de descarga, o protocolo padrão é a descarga em Corrente Constante (CC). Após a bateria estar totalmente carregada pelo método CC-CV, uma corrente de descarga constante é aplicada até que a tensão da bateria atinja o limite mínimo de descarga especificado pelo fabricante.

#### 2.4.3 Método de contagem de Coulomb

O método de contagem de Coulomb é amplamente reconhecido como uma das técnicas mais utilizadas para a estimativa do estado de carga em baterias recarregáveis. É importante distinguir este método da Lei de Coulomb da eletrostática, no contexto de baterias, o princípio fundamental consiste em integrar a corrente elétrica que entra e sai da bateria ao longo do tempo, determinando a variação de carga acumulada em relação à capacidade total. Para obtenção do SoC e SoH através do método de *Coulomb Counting* são utilizadas a equação (1) e equação (2), respectivamente.

$$SOC = SOC_{(t_0)} + \frac{1}{C_n} \int_{t_0}^t i(t) dt \quad (1)$$

$$SOH = \frac{C_{atual}}{C_{nominal}} \times 100 \quad (2)$$

Onde SOC(t<sub>0</sub>) é o estado inicial, C<sub>nominal</sub> a capacidade nominal, C<sub>atual</sub> a capacidade atual do módulo de bateria e i(t) a corrente medida. Embora modelos mais complexos incluam termos de perdas por autodescarga, estes foram desconsiderados neste trabalho. Para a determinação da capacidade atual em testes de bancada, o método é aplicado durante um ciclo completo de descarga. Aplica-se a integral no sinal de corrente durante todo o processo, desde o estado de carga total até a tensão mínima de corte. O resultado dessa integração representa a capacidade total em Ah que o módulo conseguiu fornecer naquele ciclo. Movassagh *et al.* (2021) destacam que o método é considerado preciso neste contexto, pois o estado de carga inicial é conhecido e a capacidade é justamente o valor a ser medido.

Apesar de sua simplicidade, a contagem de Coulomb está sujeita a erros que comprometem a precisão da estimativa do SoC. Movassagh *et al.* (2021) identifica quatro principais causas, sendo elas erro de medição de corrente, erro de aproximação na integração da corrente, incerteza na capacidade da bateria e erro de temporização. Esses fatores produzem dois tipos de desvios distintos, erros cumulativos no tempo e erros proporcionais ao estado de carga.

Para a determinação da capacidade através de um único ciclo de descarga completa em bancada, o impacto dos erros cumulativos de longo prazo é significativamente mitigado. A precisão do resultado torna-se primariamente dependente da precisão do sensor de corrente e da precisão da integração numérica realizada pelo *software* durante o ciclo, conforme análise de Movassagh *et al.* (2021).

Apesar das limitações intrínsecas para estimação de SoC, a Contagem de Coulomb permanece uma ferramenta essencial e adequada para a caracterização da capacidade (SoH) em ensaios de laboratório, devido à sua implementação direta e eficácia quando combinada com sensores precisos e um protocolo de teste bem definido.

#### 2.4.4 Outros métodos de estimação de SoH

Além da Contagem de Coulomb, a literatura apresenta diversas outras metodologias para a estimação do estado de saúde dos módulos de bateria, que podem ser agrupadas em três categorias principais, conforme classificado por Illa Font *et al.* (2023): métodos experimentais, métodos baseados em modelo e métodos baseados em aprendizado de máquina.

Métodos experimentais são métodos simples e diretos, mas, como apontam Illa Font *et al.* (2023), podem consumir tempo e exigir equipamentos específicos, não sendo recomendados para estimativa em tempo real. Um exemplo é o método de medição da resistência interna da bateria, na qual a resistência tende a aumentar à medida que a bateria envelhece, correlacionando-se com sua perda de capacidade.

Métodos baseados em modelo utilizam modelos matemáticos que descrevem o comportamento da bateria. São baseados em algoritmos e exigem esforço computacional. Um exemplo é o Filtro de Kalman e suas variações, como o Filtro de Kalman Estendido (EKF). Guedes *et al.* (2024) descrevem o EKF como um método que expande o escopo do filtro de Kalman para sistemas não lineares, utilizando linearização por meio de derivadas parciais e expansão em série de Taylor.

Métodos Baseados em Aprendizado de Máquina, de acordo com Illa Font *et al.* (2023), utilizam algoritmos como redes neurais artificiais e lógica fuzzy. Esses métodos combinam técnicas experimentais e abordagens baseadas em modelos, permitindo trabalhar com dados de forma robusta e precisa. Contudo, exigem capacidade de processamento e um banco de dados adequado para treinamento.

Considerando o objetivo principal deste trabalho o desenvolvimento de uma infraestrutura de testes para classificação de módulos de segunda vida através da determinação direta da capacidade em ensaios de bancada, o método de Contagem de Coulomb foi selecionado por sua simplicidade, eficácia comprovada para esta finalidade e adequação ao escopo do projeto, que visa a medição precisa da capacidade remanescente dos módulos de bateria de segunda vida.

### 3 INFRAESTRUTURA E METODOLOGIA DE TESTES

Este capítulo tem como objetivo fundamental detalhar a metodologia e a implementação técnica da infraestrutura de testes desenvolvida para a classificação de baterias de segunda vida. Inicia-se com a caracterização do objeto de estudo, o módulo de bateria proveniente do veículo elétrico Renault Kangoo Z.E. Na sequência é apresentado o projeto e desenvolvimento da placa de aquisição de dados, abordando a seleção de seus componentes, sensores e a arquitetura de comunicação. O capítulo descreve também a montagem completa da bancada de testes, incluindo a configuração do *setup* experimental com a fonte de alimentação e a carga eletrônica. Por fim, é detalhado o protocolo de ensaios, que define os procedimentos de carga e descarga utilizados para a coleta de dados. Este capítulo estabelece, portanto, toda a base da metodologia experimental para a classificação do Estado de Saúde (SoH) das baterias, cujos resultados serão discutidos no capítulo seguinte.

#### 3.1 Bateria em estudo (Renault Kangoo Z.E.)

Como objeto principal deste estudo foram utilizados módulos de baterias provenientes do veículo elétrico Renault Kangoo Z.E., uma van elétrica projetada para a mobilidade urbana sustentável.

A Renault começou a fabricar a versão elétrica da Kangoo em Maubeuge, França em 2011, dando início a uma revolução no mercado automotivo. Sendo o primeiro veículo totalmente elétrico a ganhar o cobiçado prêmio “International Van Of The Year” e inaugurou o segmento de vans elétricas no processo (Renault, 2023).

De acordo com o guia técnico do fabricante, Renault (2013), o veículo é equipado com um pack de bateria de íon-lítio com química NMC (óxido de lítio-níquel-manganês-cobalto) com tensão de operação de 400V, corrente máxima de 300A e capacidade de 24 kWh. A bateria tem massa de 265 kg e é composta por um total de 48 módulos, os quais contêm quatro células do tipo bolsa (*pouch*).

Pode-se visualizar na Figura 2, uma representação da disposição da bateria no veículo.

**Figura 2 – Renault Kangoo Z.E. 2013**

**Fonte: Renault (2017)**

Para a realização dos ensaios, utilizam-se módulos individuais provenientes do pack de baterias do Renault Kangoo Z.E., conforme ilustrado na Figura 3.

**Figura 3 – Módulo Renault Kangoo Z.E.**

**Fonte: Autoria própria (2025)**

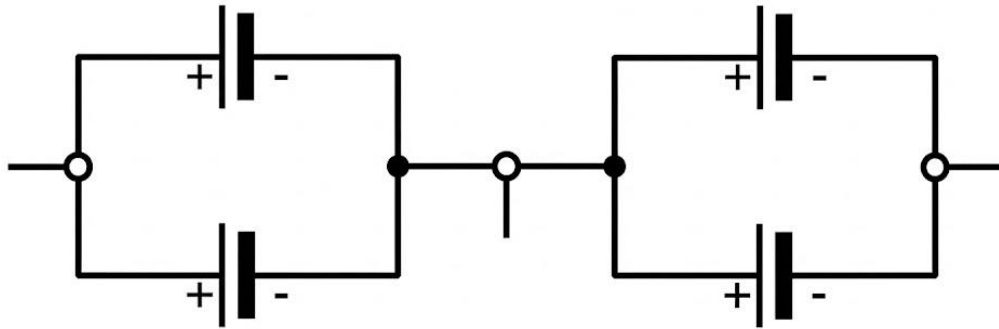
O módulo dispõe de três terminais de conexão, o que permite o monitoramento individual da tensão de cada par de células.

De acordo com Quinard et al. (2019), este componente possui arquitetura interna na configuração 2s2p, totalizando quatro células. Essa topologia, detalhada na

Figura 4, consiste em duas ramificações conectadas em série (2s), onde cada ramificação é composta por duas células em paralelo (2p).

Figura 4 – Diagrama da topologia 2s2p do módulo

## Meio módulo 1 Meio módulo 2



Fonte: Adaptado de Quinard et al. (2019)

Cada módulo possui 303 mm de comprimento, 223 mm de largura, 35 mm de espessura e 3,8 kg. A capacidade nominal do módulo de bateria é 66,2 Ah, resultado da topologia 2s2p, visto que cada célula possui capacidade nominal de 33,1 Ah, tensão mínima de descarga de célula de 2,5 V e máxima de 4,2 V, portanto, a tensão mínima de descarga do módulo é 5 V e máxima 8,4 V.

Este módulo é um componente padrão desenvolvido como parte da Aliança Renault-Nissan. De acordo com a Renault UK (2017), esta tecnologia de bateria foi desenvolvida em conjunto com a Nissan e equipou a primeira geração de veículos elétricos das empresas, incluindo o Nissan Leaf, o Renault Kangoo Z.E. e o Renault Fluence Z.E.

### 3.2 Desmontagem das baterias e preparação dos módulos

Para a realização do estudo e ensaios práticos foram utilizados módulos de bateria, descritos na seção anterior, oriundos de três baterias de Renault Kangoo Z.E.. Estas baterias foram cedidas pelo Grupo Renault Brasil à UTFPR Campus Ponta Grossa através de um acordo de comodato. A Figura 5, exposta a seguir, ilustra uma dessas baterias ainda lacrada, antes do processo de desmontagem.

**Figura 5 – Bateria Renault Kangoo Z.E.**



**Fonte: Autoria própria (2023)**

A extração desses módulos exigiu um processo de desmontagem metodológico, realizado em ambiente controlado. De acordo com Illa Font *et al.* (2023), a desmontagem começa com uma pesquisa da literatura disponibilizada pelo fabricante para analisar os riscos e descobrir o equipamento necessário. Em seguida, deve-se proceder à preparação do local de trabalho, sinalizando e delimitando a área de desmontagem. Além disso, durante todo o processo de desmontagem é necessário utilizar equipamentos de proteção individual (EPIs) para eletricidade.

Essa desmontagem ocorreu em parceria com profissionais capacitados do Instituto Senai de Inovação em Eletroquímica de Curitiba, seguindo rigorosos protocolos de segurança para alta tensão. O procedimento incluiu o uso de EPIs específicos, como calça e camisa de segurança Risco 2, botas de proteção para alta tensão, luvas e ferramentas isoladas. Uma etapa do processo de desmontagem pode ser visualizada na Figura 6.

**Figura 6 – Desmontagem Bateria Renault Kangoo Z.E.**



**Fonte: Autoria própria (2023)**

Como pode-se visualizar na Figura 6, cada bateria possui 48 módulos, como descrito anteriormente, portanto, a desmontagem dos três packs resultou em um total de 144 módulos. Deste total, 114 módulos foram destinados a esta pesquisa na UTFPR, enquanto os 30 módulos restantes foram destinados ao Instituto Senai de Inovação em Eletroquímica para seus próprios testes.

### **3.3 Projeto e desenvolvimento da placa de aquisição de dados**

Para o desenvolvimento da infraestrutura de testes para classificação dos 114 módulos de bateria de segunda vida se fez necessário, inicialmente, o desenvolvimento do projeto de uma placa de aquisição de dados. A finalidade deste sistema é medir as três variáveis fundamentais para a determinação do estado de saúde (SoH) pelo método de Contagem de Coulomb, sendo elas tensão, corrente e temperatura. O sistema foi materializado em uma placa de circuito impresso (PCI) dedicada, cujo desenvolvimento é detalhado na sequência.

#### **3.3.1 Seleção de componentes e sensores**

A seleção dos componentes para a PCI priorizou a precisão metrológica e a segurança operacional, optando-se por sensores com isolamento galvânico para as variáveis elétricas.

Partindo disso, ocorreu a escolha dos componentes principais necessários para viabilização da aquisição de dados pertinentes, sendo eles sensores de tensão LV20-P, sensor de corrente LAH50-P, sensores de temperatura LM35 e Arduino Mega 2560.

Para a medição da tensão de cada grupo de células (faixa de 2,5 V a 4,2 V), foi selecionado o sensor de tensão LEM LV20-P. Este componente opera baseado no princípio de efeito Hall e possui construção robusta com isolamento galvânico, garantindo a segurança do sistema de aquisição. Conforme a topologia “2s2p”, foram empregadas duas unidades para monitorar individualmente cada "meio-módulo". (LEM, [s.d.]).

Para a medição da corrente foi utilizado o sensor de corrente LEM LAH50-P. Similar ao sensor de tensão, ele também utiliza o efeito Hall, garantindo alta precisão na leitura da corrente de carga/descarga do módulo de bateria (LEM, 2023).

Para o monitoramento térmico do módulo, foi empregado o sensor de temperatura de precisão LM35 (TEXAS INSTRUMENTS, 2017). Este sensor é diretamente acoplado à superfície do módulo de bateria para fornecer uma leitura precisa da temperatura de operação. Para garantir um bom contato térmico, isolamento elétrico e uma fixação segura, o encapsulamento do sensor foi posicionado sobre o módulo e preso com fita Kapton. Posteriormente, os cabos do sensor foram presos com fita isolante comum para evitar movimentação durante os ensaios, garantindo que o sensor permanecesse na posição adequada.

A partir dessa escolha primária se fez possível a elaboração dos devidos cálculos de projeto para os demais componentes, como os resistores de precisão para o condicionamento de sinal dos sensores e os filtros. A memória de cálculo detalhada, desenvolvida encontra-se no Apêndice A. Os componentes empregados podem ser visualizados na Tabela 1, exposta a seguir.

**Tabela 1 – Componentes de projeto**

<b>Componente</b>	<b>Quantidade</b>
<b>Sensor Hall Corrente LAH50-P</b>	1
<b>Sensor Hall Tensão LV20-P</b>	2
<b>Sensor Temperatura LM35</b>	5
<b>Arduino Mega 2560</b>	1
<b>Resistor de precisão 100Ω</b>	3
<b>Resistor de precisão 150Ω</b>	2
<b>Resistor de precisão 22Ω</b>	3
<b>Capacitor 47nK63</b>	2
<b>Capacitor 100μF 50V</b>	2
<b>Conector Rebite Rosca</b>	2
<b>Conector Molex 2 pinos</b>	2
<b>Conector Molex 3 pinos</b>	6

**Fonte: Autoria própria (2025)**

### 3.3.2 Arquitetura e comunicação com o Arduino Mega 2560

Para o processamento e aquisição de dados, utilizou-se a plataforma de prototipagem Arduino Mega 2560, baseada no microcontrolador ATmega2560. A escolha deste modelo partiu pela sua grande quantidade de canais de entrada analógica, sendo 16 no total, de acordo com o fabricante (ARDUINO, 2017). Esta característica é suficiente para a conexão direta de todos os 8 sinais analógicos gerados pelos sensores empregados no projeto.

O ATmega2560 possui um conversor Analógico-Digital (ADC) de 10 bits do tipo aproximações sucessivas. É importante ressaltar que, embora o microcontrolador possua múltiplos canais de entrada, ele utiliza um multiplexador interno para direcionar os sinais ao único ADC. Portanto, a leitura dos sensores ocorre de forma sequencial e não simultânea. Contudo, a velocidade de amostragem é elevada o suficiente para desconsiderar atrasos na dinâmica dos ensaios.

As saídas de corrente dos sensores Hall (LV 20-P e LAH 50-P) passam por um estágio de condicionamento de sinal composto por resistores de precisão, que convertem os sinais de corrente em tensão compatível com a entrada do ADC do Arduino. Após a digitalização, o microcontrolador envia os pacotes de dados via comunicação serial (USB) para o computador, onde o algoritmo em MATLAB realiza o processamento final.

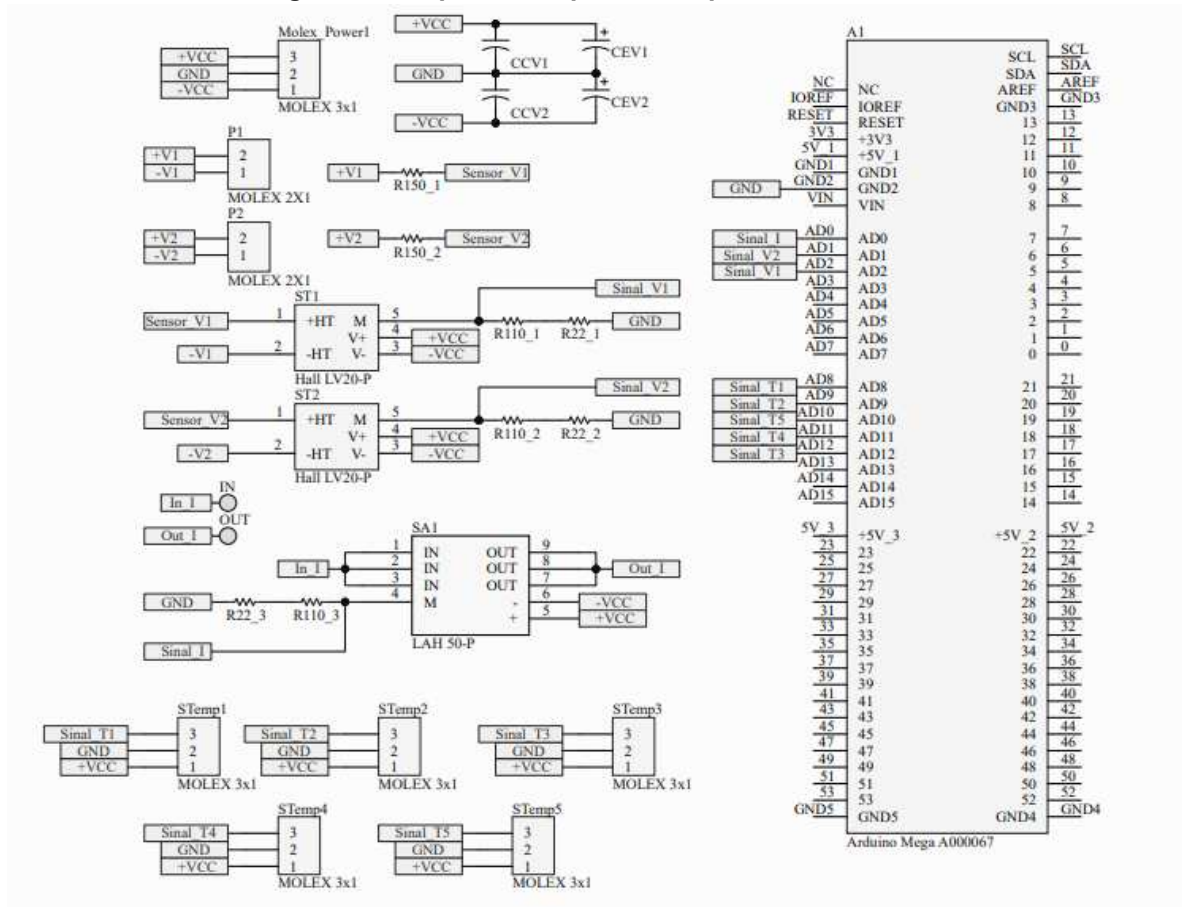
### 3.3.3 Projeto do circuito e layout da placa de aquisição de dados

Com todos os componentes necessários para realização do protótipo selecionados, listados anteriormente, na Tabela 1, e com a arquitetura de aquisição definida, o próximo passo foi o projeto do circuito eletrônico esquemático e o *layout* da placa de circuito impresso (PCI).

O diagrama esquemático, apresentado na Figura 7, detalha as conexões elétricas entre os sensores, o condicionamento de sinal e o microcontrolador. Após a validação lógica destas conexões, procedeu-se ao desenvolvimento do *layout* físico da placa.

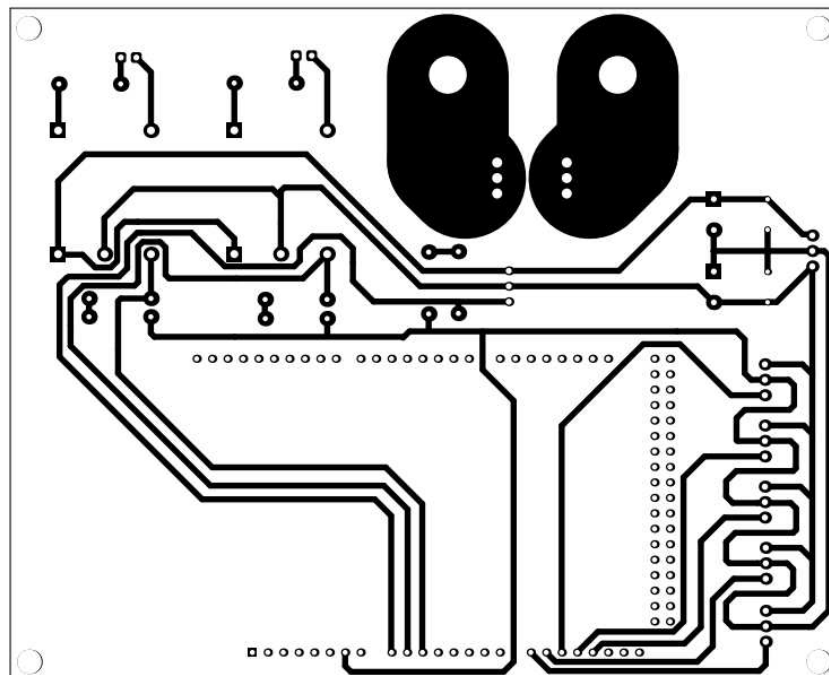
O roteamento das trilhas foi executado observando critérios rigorosos de projeto. Priorizou-se a separação física entre as trilhas de potência (por onde circulam as correntes de carga e descarga da bateria) e as trilhas de sinal (que carregam as leituras dos sensores para o ADC), visando mitigar interferências eletromagnéticas e ruídos. Além disso, a espessura das trilhas foi dimensionada conforme a corrente esperada em cada trecho do circuito. A Figura 8 apresenta o layout das trilhas da camada inferior (*bottom layer*), evidenciando a distribuição dos componentes e o roteamento final adotado.

Figura 7 – Esquemático placa de aquisição de dados



Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 8 – Layout placa de aquisição de dados



Fonte: Autoria própria (2025)

### 3.4 Evolução, montagem e validação da PCI

O projeto da placa de aquisição de dados, que foi detalhado na seção 3.3, corresponde à versão final e aprimorada do protótipo. O desenvolvimento desta placa foi realizado em duas etapas.

Inicialmente, um primeiro protótipo foi montado. Esta primeira versão foi pensada apenas para a aquisição de corrente e tensão, visando uma caracterização puramente elétrica do módulo. Por esta razão, o projeto utilizava somente os sensores de tensão (LV20-P) e corrente (LAH50-P).

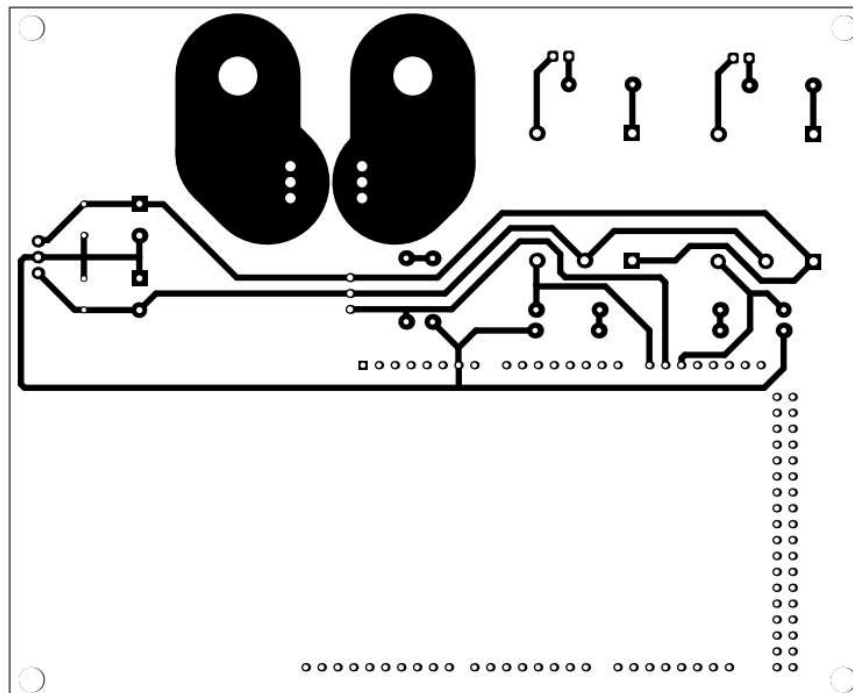
Contudo, durante os primeiros testes de validação, foi identificada a necessidade de aquisição de temperatura. Pois, a temperatura da célula é um parâmetro fundamental influenciando diretamente o desempenho e a capacidade medida da bateria. Esta constatação levou à necessidade do desenvolvimento de uma segunda versão do protótipo.

Esta seção descreve esse processo de evolução, da versão 1 até a validação da placa final utilizada nos ensaios.

#### 3.4.1 Protótipo versão 1: Projeto e validação

O primeiro protótipo da versão 1 foi projetado de modo análogo e com a mesma arquitetura da versão final, descrita anteriormente, utilizando os sensores de tensão (LV20-P) e corrente (LAH50-P). No entanto, como o foco era puramente elétrico, este *layout* não incluía os sensores de temperatura LM35, resultando em um *design* de placa mais simples. O *layout* da PCI desta primeira versão pode ser visualizado na Figura 9.

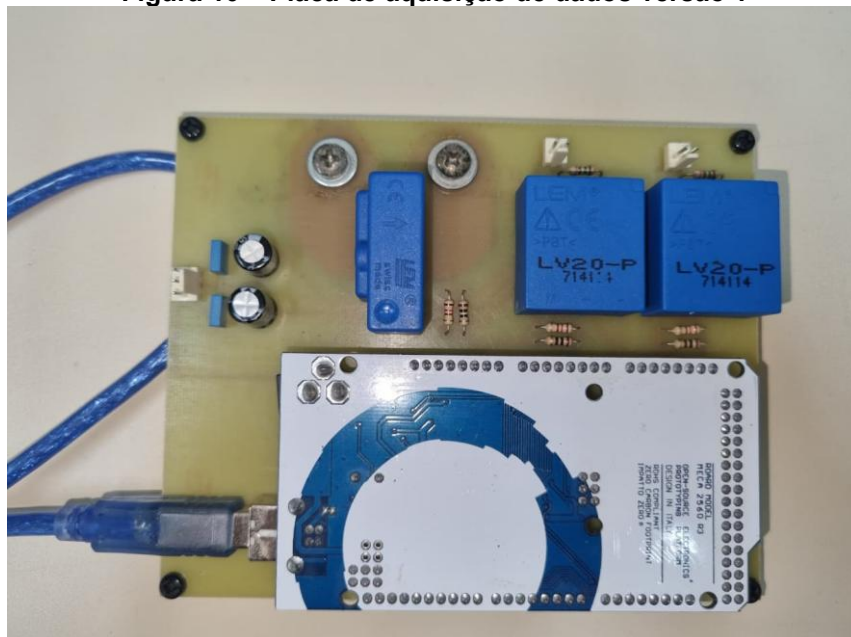
Figura 9 – Layout placa de aquisição de dados versão 1



Fonte: Autoria própria (2025)

Após a realização do *layout* da placa de circuito impresso, foi realizada a fabricação e montagem do protótipo físico, o mesmo poder ser visualizado na figura 10.

Figura 10 – Placa de aquisição de dados versão 1

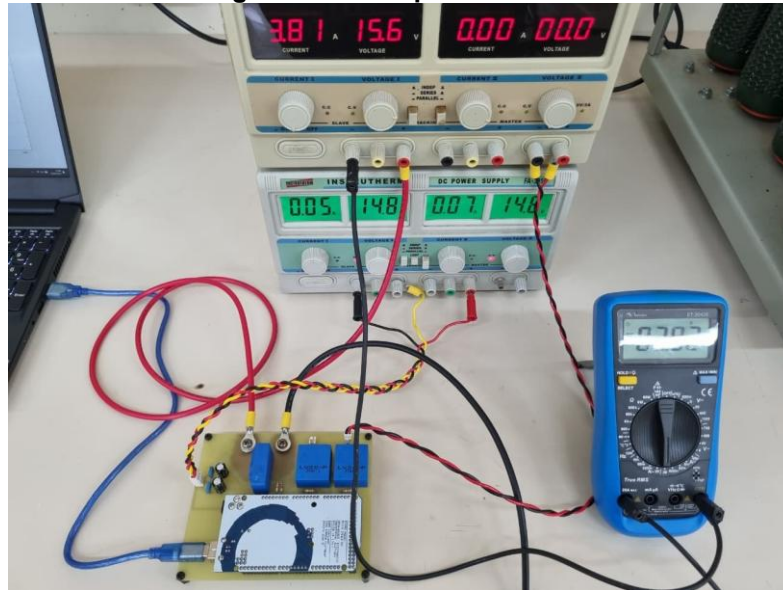


Fonte: Autoria própria (2025)

Com a placa montada, foi realizado um processo de validação dos seus sensores. Para validar os sensores LV20-P, foram utilizadas fontes de alimentação de

bancada para aplicar tensões CC conhecidas e Multímetro Digital ET-2042E Minipa. O *setup* de teste pode ser visualizado na Figura 11.

**Figura 11 – Setup teste tensão**



**Fonte: Autoria própria (2024)**

Nessa figura é possível observar que a fonte de abaixo está configurada para fornecer tensões +15 V e -15 V, as quais alimentam os 3 sensores empregados na placa. Portanto, a alimentação de potência para os sensores não é fornecida pelo Arduino. Ela é suprida por uma fonte de alimentação de bancada externa, configurada para fornecer as tensões simétricas de +15 V e -15 V. Esta alimentação é requerida para a operação dos sensores LEM (LV20-P e LAH50-P).

Para validar o sensor LAH50-P, foi utilizada uma carga resistiva de potência para drenar correntes constantes. Como pode ser visualizado na Figura 12.

**Figura 12 – Carga resistiva utilizada para teste sensor de corrente**



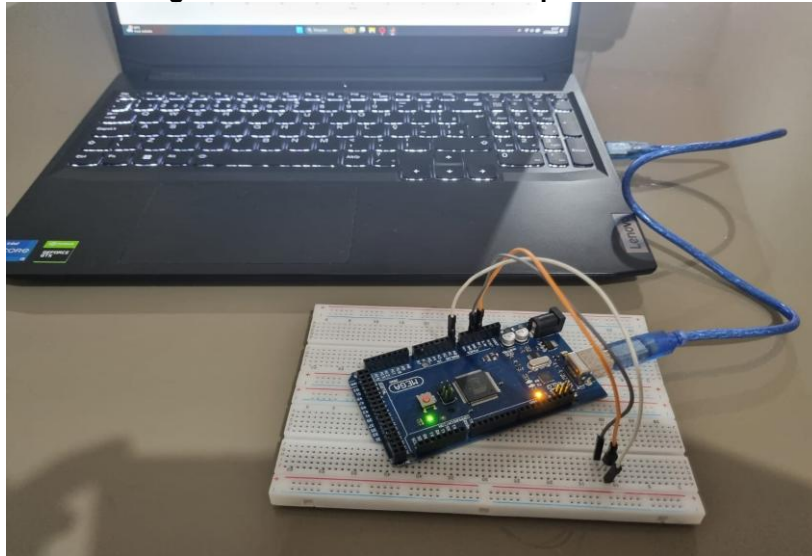
**Fonte: A autoria própria (2024)**

Além disso, foi empregado um computador para obtenção e validação dos sinais de aquisição via Arduino. Estes testes preliminares indicaram a funcionalidade adequada do circuito de condicionamento e a comunicação com o microcontrolador, validando a arquitetura elétrica para a próxima etapa do projeto.

#### 3.4.2 Testes de validação do sensor de temperatura

Após identificada a necessidade de monitoramento térmico, os sensores de temperatura LM35 foram validados em um teste separado. Os sensores foram montados em *protoboard* e conectados diretamente a um Arduino Mega, como pode ser visualizada na Figura 13. Para este teste preliminar, foi utilizada a alimentação de 5 V do próprio Arduino, porém na versão final da placa, que possui 5 sensores LM35, exposta anteriormente, a alimentação deles é realizada com +15 V através de fonte de bancada.

**Figura 13 – Teste sensor LM35 protoboard**



Fonte: Autoria própria (2025)

Para a conexão dos sensores de temperatura na placa, os chicotes foram confeccionados utilizando a técnica de par trançado, conforme visualizado na Figura 14. Esta técnica foi adotada para mitigar a interferência eletromagnética e garantir maior estabilidade no sinal analógico enviado ao microcontrolador.

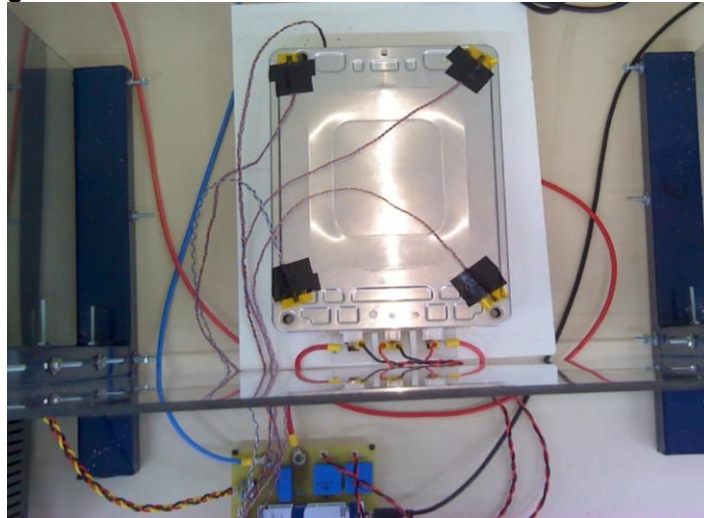
**Figura 14 – Chicotes Sensores LM35**



Fonte: Autoria própria (2025)

A disposição dos sensores no módulo foi definida estrategicamente, sendo quatro sensores foram posicionados na face superior do módulo e o quinto sensor foi instalado no ponto original de monitoramento do fabricante (parte traseira), servindo como referência de temperatura média, conforme ilustrado na Figura 15.

**Figura 15 – Posicionamento dos sensores LM35 no módulo**



**Fonte: Autoria própria (2025)**

Durante um ensaio de carga para gerar aquecimento no módulo, as leituras dos sensores LM35 foram comparadas com as imagens obtidas por uma câmera termográfica, como a exibida na Figura 16. Esta comparação permitiu verificar se os pontos medidos pelos LM35 correspondiam à distribuição de temperatura real na superfície do módulo, validando tanto o sensor quanto o método de posicionamento. Esta análise termográfica foi crucial, pois possibilitou a observação de que o ponto de maior aquecimento do módulo se concentra na região frontal/central, próxima aos terminais de contato.

**Figura 16 – Imagem termográfica para validação**



**Fonte: Autoria própria (2025)**

Esta observação influenciou diretamente a estratégia de posicionamento dos cinco sensores LM35 na versão final da placa, um sensor foi posicionado na parte

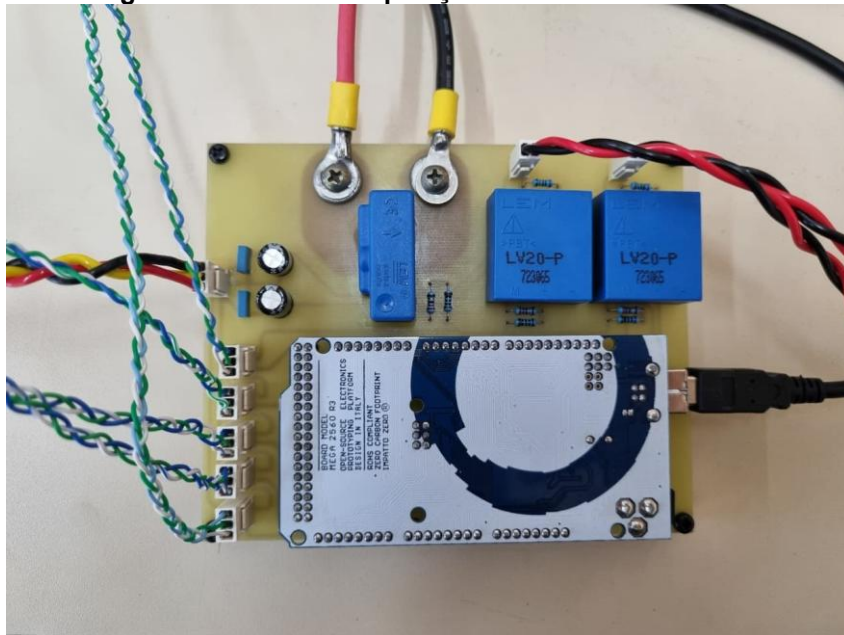
traseira do módulo, aproveitando o local original previsto pelo fabricante para monitoramento, enquanto os outros quatro sensores foram distribuídos sobre a superfície frontal, visando cobrir a região identificada como de maior aquecimento.

### 3.4.3 Montagem da placa final

Com todos os sensores devidamente validados nos testes preliminares, a etapa final do desenvolvimento foi a montagem física do protótipo da versão final da placa aquisição, exposta na seção 3.3.

Esta placa, cujo projeto foi apresentado anteriormente na Figura 8, integra todos os componentes de medição (tensão, corrente e temperatura) em uma única PCI. A Figura 17 exibe a placa finalizada, após a conclusão da soldagem manual de todos os componentes listados na Tabela 1 e dos conectores.

**Figura 17 – Placa de aquisição de dados versão final**



**Fonte: Autoria própria (2025)**

Esta foi a placa de aquisição de dados definitiva, utilizada na montagem da bancada principal de testes para a caracterização dos 114 módulos de bateria.

### 3.5 Montagem da bancada de testes

Com a placa de aquisição de dados validada e finalizada, foi realizada a sua duplicação. Esta duplicação permitiu a montagem de duas bancadas de teste independentes, uma dedicada à etapa de carga e outra à etapa de descarga dos módulos.

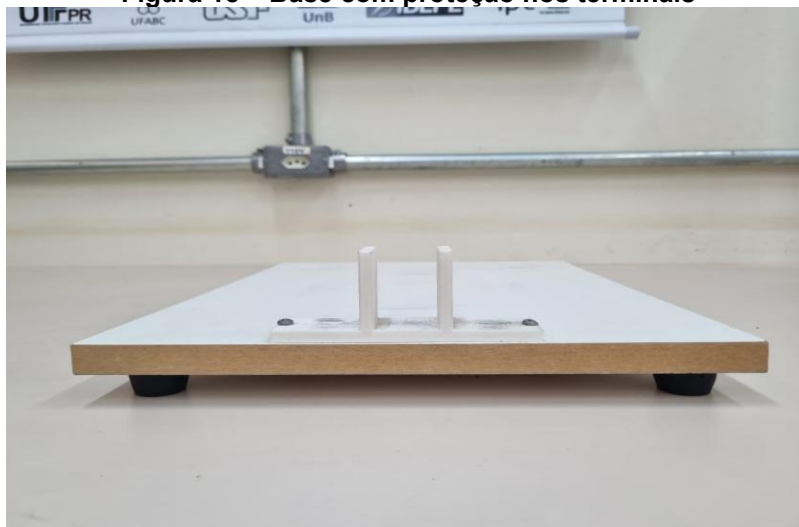
A montagem completa destes *setups* exigiu o emprego de dois *desktops* para controle e aquisição de dados, duas fontes de alimentação de tensão variável, uma para cada PCI, configuradas para fornecer a alimentação simétrica de +15 V e -15 V aos sensores, como descrito anteriormente e, especificamente para a bancada de carga, uma fonte de alimentação linear de alta corrente e uma proteção de policarbonato para segurança. Para a bancada de descarga, foi empregada uma carga eletrônica programável. A configuração detalhada destas bancadas de teste é apresentada na seção seguinte.

### 3.5.1 Configuração detalhada do *setup* de carga e descarga

A configuração detalhada das bancadas de teste, mencionada na seção anterior, inicia-se pelos componentes de segurança e manuseio, seguidos pelos equipamentos de potência.

Primeiramente, para garantir a segurança no manuseio dos módulos e evitar curtos-circuitos acidentais nos terminais da bateria, foi utilizada uma base de suporte com divisórias impressas em impressora 3D. Conforme ilustrado na Figura 18, esta base isola fisicamente os terminais do módulo. É importante salientar que, embora termoplásticos de impressão 3D sejam sensíveis ao calor, as temperaturas de operação nos terminais durante os ensaios controlados (monitoradas pelos sensores térmicos) mantiveram temperaturas inferiores ao suportado pelo material, garantindo a integridade estrutural do suporte sem risco de deformação.

**Figura 18 – Base com proteção nos terminais**



**Fonte: Autoria própria (2025)**

Adicionalmente, especificamente para a bancada de carga, foi construída uma proteção de policarbonato transparente, visualizada na Figura 19. Esta estrutura é fundamental para garantir a segurança do operador durante os ensaios.

**Figura 19 – Base com proteção nos terminais**



**Fonte: Autoria própria (2025)**

O setup de carga, ilustrado na Figura 20, é composto por um *desktop* para aquisição e tratamento de dados (à esquerda), na sequência uma fonte de alimentação de tensão variável para os sensores (+15 V e -15 V), uma fonte de alimentação linear Keithley 2260B-30-72 para aplicar a corrente de carga, e a placa de aquisição de dados. Durante o teste o módulo de bateria fica protegido pela estrutura de policarbonato.

**Figura 20 – Bancada de testes Carga**



**Fonte: Autoria própria (2025)**

Já o setup de descarga, visualizado na Figura 21, possui uma configuração similar, composta pelo *desktop* e a fonte de alimentação para os sensores da PCI. A diferença fundamental é a substituição da fonte linear pela Carga Eletrônica DC

Programável Keithley 2380-500-30, que é o equipamento responsável por consumir a corrente do módulo durante os testes.

**Figura 21 – Bancada de testes Descarga**



Fonte: Autoria própria (2025)

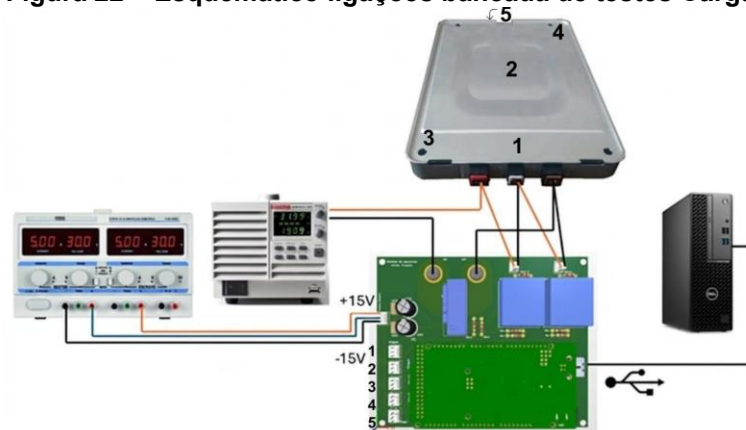
### 3.5.2 Diagrama de blocos do sistema experimental

Para detalhar as conexões elétricas e a instrumentação, as Figuras 22 e 23 apresentam os diagramas esquemáticos das bancadas de carga e descarga, respectivamente.

Nestas figuras, detalhou-se o sistema de monitoramento térmico através de uma identificação numérica. A numeração de 1 a 5 indicada nos conectores da PCI corresponde diretamente à posição física de cada sensor LM35 fixado no módulo de bateria.

A Figura 22 detalha o *setup* de carga. O módulo de bateria é alimentado pela fonte linear (Keithley 2260B-30-72). A PCI monitora as tensões, a corrente e temperaturas deste processo, enviando os dados via USB para o *desktop*, que realiza o tratamento das informações via MATLAB.

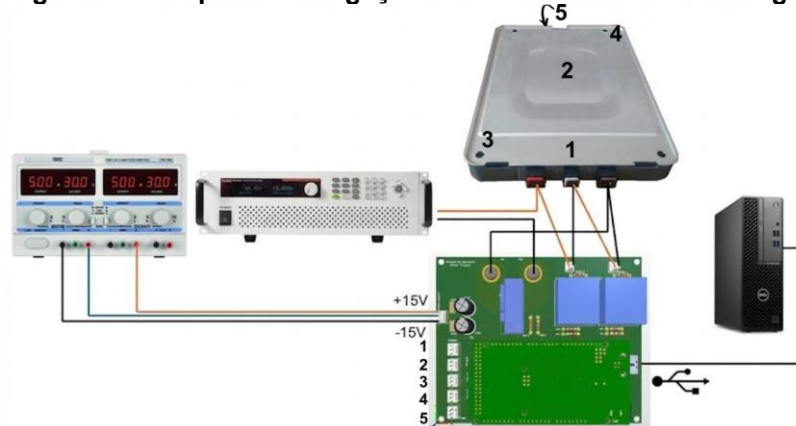
**Figura 22 – Esquemático ligações bancada de testes Carga**



Fonte: Autoria própria (2025)

Já a Figura 23 detalha o ensaio de descarga. Nota-se que a topologia de instrumentação permanece inalterada, mantendo-se a correspondência dos sensores de 1 a 5, modificando-se apenas o elemento de potência para a carga eletrônica (Keithley 2380-500-30).

**Figura 23 – Esquemático ligações bancada de testes Descarga**



Fonte: Autoria própria (2025)

### 3.6 Metodologia e protocolo dos ensaios

Com a infraestrutura de *hardware* montada e validada, a etapa final da metodologia foi a implementação do *software* e a definição do protocolo de testes. Todo o processo de aquisição, processamento de dados e controle dos equipamentos foi centralizado em um algoritmo computacional desenvolvido em MATLAB. Esta seção detalha o funcionamento desse algoritmo e os procedimentos de carga e descarga utilizados para a caracterização dos módulos.

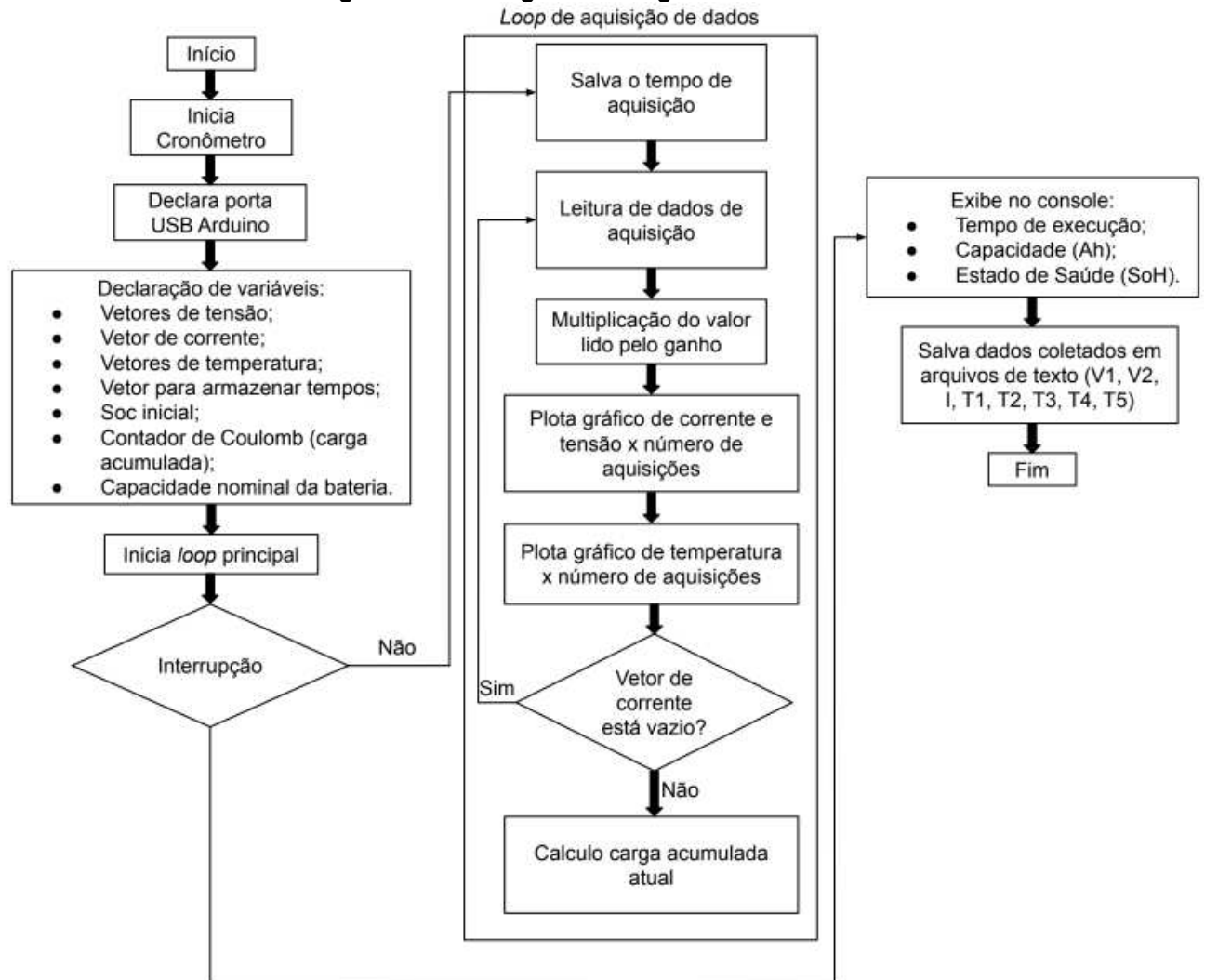
#### 3.6.1 Algoritmo de controle (MATLAB) e método de cálculo

Para a realização dos ensaios foi elaborado um código MATLAB para fazer a aquisição de dados (corrente, tensão e temperatura) ao longo dos processos de carregamento e descarga do módulo e ao final obter como resultado o estado de saúde (SoH) do módulo em questão.

Para isso foi utilizado o método de *Coulomb Counting*, o qual, como descrito anteriormente, é utilizado para estimar o estado de carga (SoC) de uma bateria. Consiste na integração da corrente ao longo do tempo para calcular o valor de carga que foi adicionada ou removida da bateria.

O fluxograma da Figura 24 ilustra a lógica de funcionamento deste algoritmo de aquisição e processamento.

**Figura 24 – Fluxograma Código MATLAB**

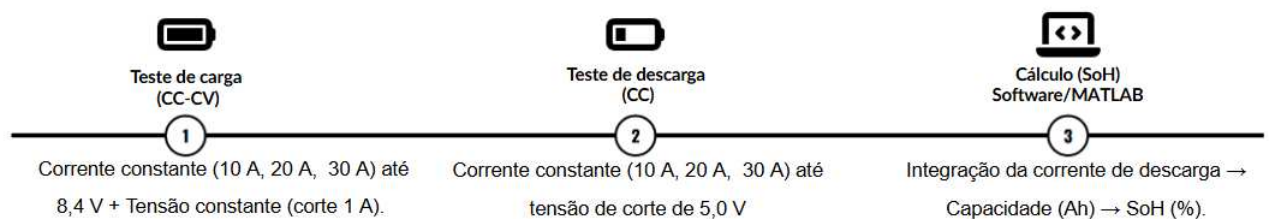


Fonte: Autoria própria (2025)

### 3.6.2 Protocolo de carga (CC-CV)

A caracterização dos módulos segue uma sequência estruturada de etapas. A Figura 25 apresenta o fluxo completo deste protocolo experimental, detalhando os parâmetros de carga, descarga e cálculo.

**Figura 25 – Protocolo de ensaios**



Fonte: Autoria própria (2025)

O protocolo de carga (etapa 1 da Figura 25) foi realizado utilizando o método CC-CV, que é o padrão para baterias de íon-lítio. O módulo é carregado com uma corrente constante pela fonte linear (Keithley 2260B-30-72) até que a tensão do módulo atinja o limite máximo de 8,4 V. Neste ponto, a fonte de alimentação entra no modo de tensão constante (CV), mantendo 8,4 V, enquanto a corrente de carga diminui naturalmente. O processo de carga é considerado completo quando esta corrente cai para um valor de corte pré-determinado.

Para os testes realizados foram utilizadas correntes de 10 A, 20 A e 30 A para o modo CC e corrente de corte de 1 A para o modo CV. Durante todo este processo, o algoritmo aplica o método de Contagem de Coulomb para estimar o estado de carga (SoC) do módulo.

### 3.6.3 Protocolo de Descarga (CC)

O protocolo de descarga (etapa 2 da Figura 25), etapa principal da caracterização, foi realizado utilizando corrente constante. Após o módulo estar plenamente carregado (conforme Seção 3.6.2), o mesmo é descarregado pela carga eletrônica (Keithley 2380-500-30) em uma corrente constante, realizado teste a 10 A, 20 A e 30 A, até que a tensão do módulo atinja a tensão mínima de corte, definida em 5,0 V, como discutido anteriormente.

Durante este processo de descarga, o algoritmo continua a estimar o SoC durante o teste. Ao final do teste, a contagem de Coulomb fornece o valor da capacidade total do módulo em Ah. É neste momento que o Estado de Saúde (SoH) é finalmente obtido, comparando esta capacidade atual com a capacidade de um módulo novo (66,2 Ah).

## **4 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Este capítulo apresenta os resultados experimentais obtidos a partir da aplicação da metodologia e da infraestrutura de testes detalhadas anteriormente, no Capítulo 3. Inicialmente, são exibidas as curvas típicas de corrente, tensão e temperatura para um ensaio completo de carga e descarga, validando o funcionamento do sistema de aquisição. Em seguida, são apresentados os resultados consolidados da classificação do estado de saúde (SoH) para o lote de módulos testados. Por fim, realiza-se uma análise e discussão desses resultados, avaliando a condição das baterias e o desempenho da metodologia proposta.

### **4.1 Apresentação dos ensaios experimentais**

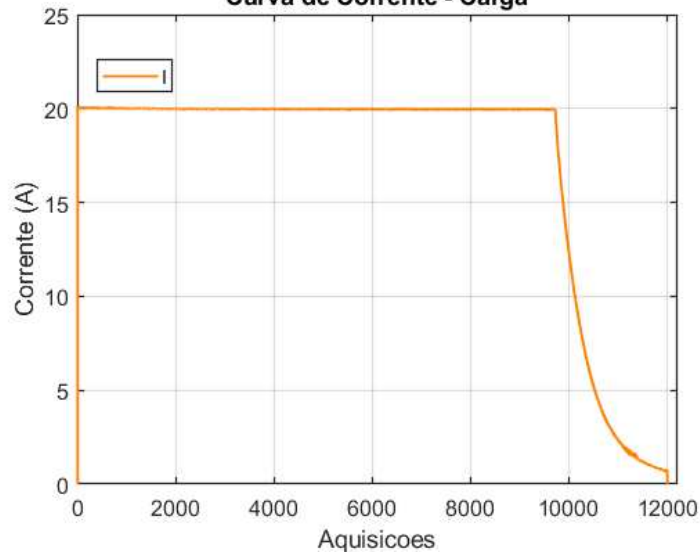
Para ilustrar o funcionamento da bancada e o protocolo de testes, os Gráficos 1 a 6 e Figura 25 exibem os dados adquiridos durante um ensaio completo de carga CC-CV seguida de descarga CC de um módulo representativo escolhido arbitrariamente. Estes gráficos validam o correto funcionamento da infraestrutura de aquisição de dados e a aplicação bem sucedida dos protocolos definidos na metodologia.

#### **4.1.1 Ensaio de carga (CC-CV)**

Os Gráficos 1, 2 e 3 mostram, respectivamente, a evolução da corrente, das tensões das células e das temperaturas durante a etapa de carga.

O Gráfico 1 evidencia a fase de Corrente Constante (CC), onde a corrente é mantida no valor programado, seguida pela fase de Tensão Constante (CV), na qual a corrente decai exponencialmente até o valor de corte (1 A).

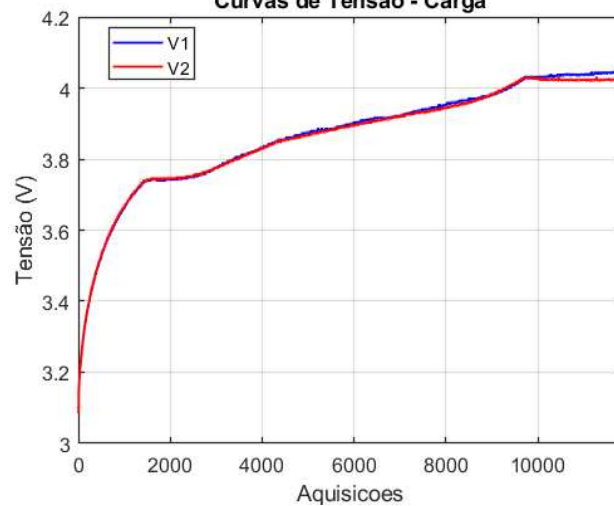
**Gráfico 1 – Corrente durante o ensaio de Carga CC-CV**  
**Curva de Corrente - Carga**



**Fonte: Autoria própria (2025)**

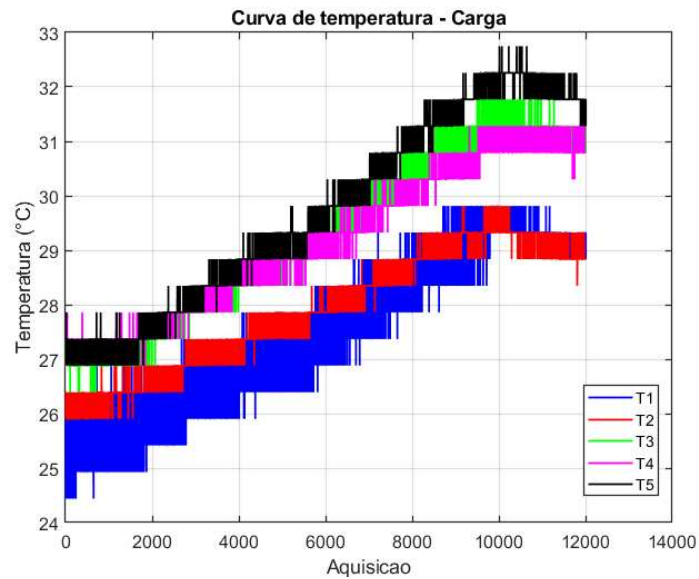
O Gráfico 2 mostra a evolução das tensões dos dois grupos de células em série, medidas pelos sensores LV20-P. É possível observar o aumento da tensão durante a fase CC e a estabilização em 8,4 V (tensão total do módulo) durante a fase CV.

**Gráfico 2 – Tensões das Células durante o ensaio de Carga CC-CV**  
**Curvas de Tensão - Carga**



**Fonte: Autoria própria (2025)**

O Gráfico 3 apresenta as leituras dos cinco sensores de temperatura (LM35) posicionados no módulo, permitindo monitorar a evolução térmica durante o processo de carga.

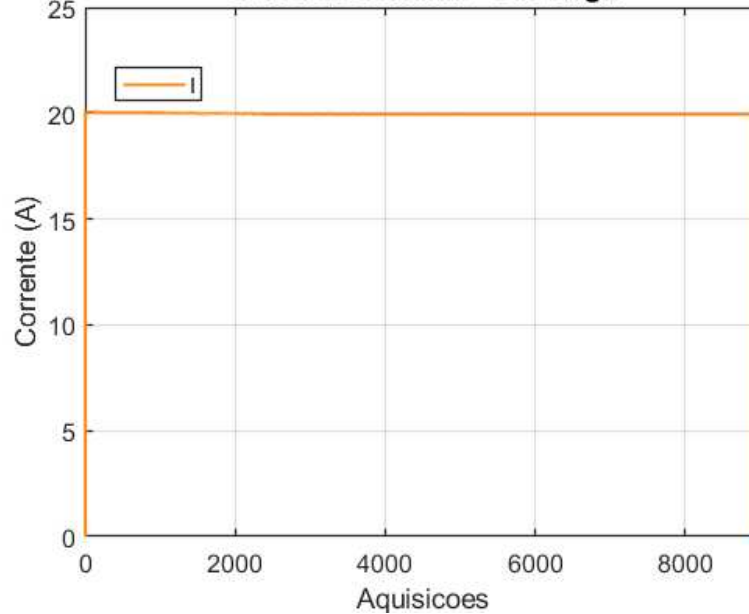
**Gráfico 3 – Temperaturas durante o ensaio de Carga CC-CV**

Fonte: Autoria própria (2025)

#### 4.1.2 Ensaio de descarga (CC)

Após a conclusão da carga, inicia-se o ensaio de descarga em Corrente Constante (CC), cujos resultados são exibidos nos Gráficos 4, 5 e 6.

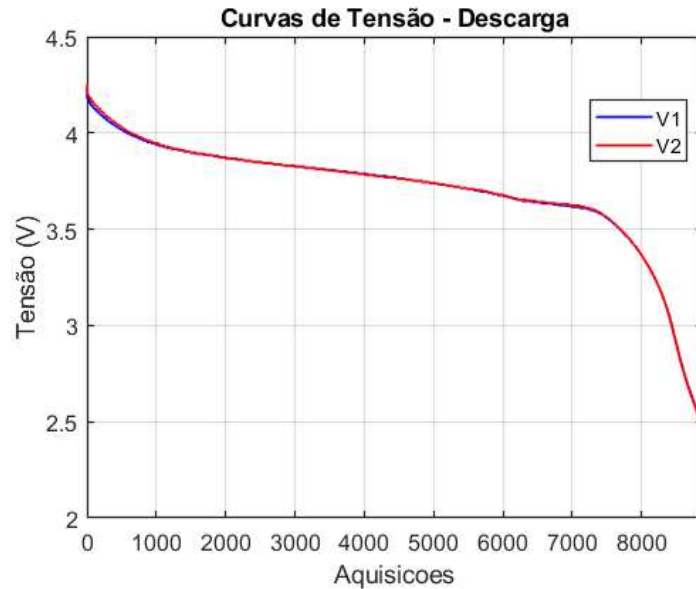
O Gráfico 4 mostra a corrente de descarga, mantida constante no valor programado pela carga eletrônica Keithley até o final do teste.

**Gráfico 4 – Corrente durante o ensaio de Descarga CC**

Fonte: Autoria própria (2025)

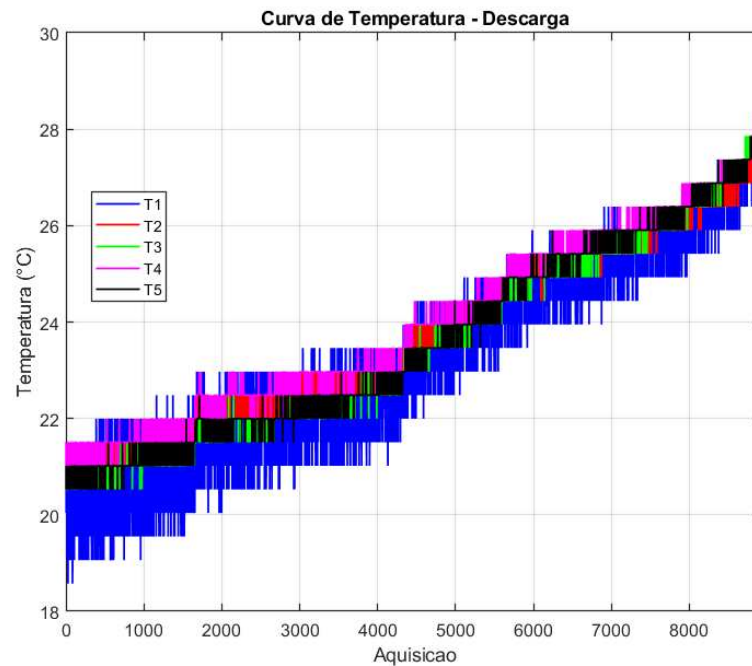
O Gráfico 5 exibe a curva de descarga característica do módulo, mostrando a queda das tensões das células ao longo do tempo, até atingirem a tensão de corte do módulo de 5,0 V.

**Gráfico 5 – Tensões das Células durante o ensaio de Descarga CC**



O Gráfico 6 apresenta a evolução das temperaturas do módulo durante o processo de descarga, de modo análogo a etapa de carga.

**Gráfico 6 – Temperaturas durante o ensaio de Descarga CC**



Ao concluir o ensaio de descarga, o script MATLAB apresenta os resultados consolidados. A Figura 26 exibe uma captura de tela da janela de resultados gerada pelo código, mostrando o tempo total de descarga, a carga acumulada (capacidade em Ah) e o estado de saúde (SoH) calculado para o módulo neste ensaio específico.

**Figura 26 – Resultado final do ensaio de descarga gerado pelo MATLAB**

```
Tempo total de execução: 9273.45 segundos
Tempo total de execução: 154.56 minutos
Carga total acumulada (Coulomb Counting): 51.22 Ah
Estado de Saúde (SOH): 77.38%
```

**Fonte: Autoria própria (2025)**

## 4.2 Resultados da classificação do estado de saúde (SoH)

Após a validação da metodologia e da infraestrutura de testes, foram realizados os ensaios de caracterização nos 114 módulos de bateria provenientes das três baterias de Renault Kangoo Z.E, descritas anteriormente. Os testes de descarga em Corrente Constante (CC), conforme descrito na seção 3.6.3, permitiram determinar a capacidade atual e, conseqüentemente, o estado de saúde (SoH) de cada módulo.

A Tabela 2, consolida os resultados de SoH obtidos para os módulos testados, organizados por bateria de origem (Bateria A, B e C). Módulos identificados como "SENAI" foram aqueles destinados ao Instituto Senai, e "DESATIVADO" indica módulos que apresentaram falha ou foram desconsiderados.

Para uma análise mais detalhada da distribuição do SoH e a identificação de possíveis padrões dentro de cada pack, as Figuras 26, 27 e 28 apresentam uma representação visual das baterias A, B e C, respectivamente, onde a cor de cada módulo indica sua faixa de SoH.

Ademais, para a correta interpretação da Tabela 2 e das representações visuais nas Figuras 26, 27 e 28, a codificação dos módulos segue o padrão linha e coluna dentro de cada bateria de origem. A numeração de linha (1 ou 2) corresponde às duas fileiras que compõem a disposição original da bateria, enquanto a numeração de Coluna (1 a 24) indica a posição horizontal do módulo. Esta convenção permite cruzar o valor de SoH da Tabela 2 com a posição exata e a cor correspondente do módulo nas Figuras.

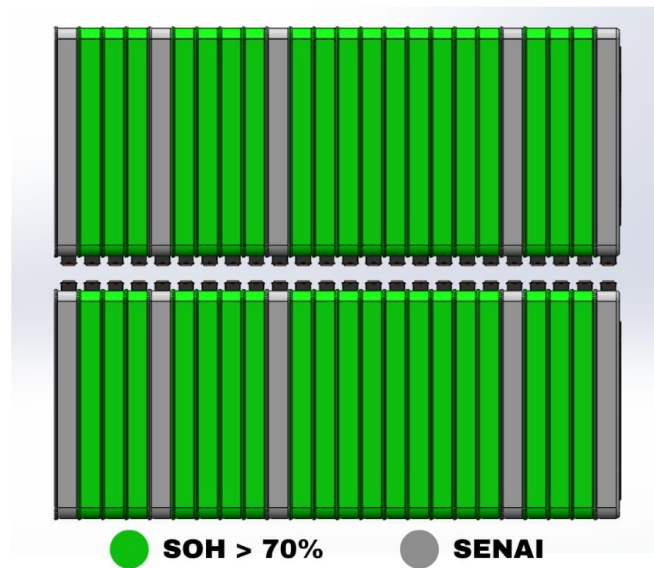
Tabela 2 – Classificação 114 módulos

<b>Codificação da bateria A</b>	<b>SOH</b>	<b>Codificação da bateria B</b>	<b>SOH</b>	<b>Codificação da bateria C</b>	<b>SOH</b>
1_1	SENAI	1_1	SENAI	1_1	SENAI
1_2	88,66%	1_2	69,67%	1_2	62,15%
1_3	73,43,%	1_3	69,66%	1_3	65,85,%
1_4	87,67%	1_4	70,79,%	1_4	60,01%
1_5	SENAI	1_5	SENAI	1_5	SENAI
1_6	89,78%	1_6	DESATIVADO	1_6	62,71%
1_7	82,57%	1_7	71,08%	1_7	59,70%
1_8	79,58%	1_8	67,44%	1_8	63,24%
1_9	83,21%	1_9	70,96,%	1_9	60,13%
1_10	86,91%	1_10	71,56%	1_10	58,62%
1_11	72,65,%	1_11	71,02%	1_11	53,23%
1_12	73,97%	1_12	71,03%	1_12	63,77%
1_13	81,76,%	1_13	69,27%	1_13	62,71%
1_14	79,82,%	1_14	71,67%	1_14	64,56%
1_15	SENAI	1_15	SENAI	1_15	SENAI
1_16	80,92%	1_16	71,55%	1_16	63,59%
1_17	81,30%	1_17	72,60,%	1_17	61,91%
1_18	78,92%	1_18	70,56%	1_18	60,54%
1_19	82,40%	1_19	72,97%	1_19	63,41%
1_20	SENAI	1_20	SENAI	1_20	SENAI
1_21	80,99,%	1_21	57,45%	1_21	54,89%
1_22	80,91%	1_22	71,70%	1_22	62,96%
1_23	78,79,%	1_23	DESATIVADO	1_23	66,98%
1_24	SENAI	1_24	SENAI	1_24	SENAI
2_1	SENAI	2_1	SENAI	2_1	SENAI
2_2	77,38%	2_2	71,79%	2_2	66,00%
2_3	79,44%	2_3	68,94%	2_3	62,35%
2_4	79,05%	2_4	68,11%	2_4	65,83%
2_5	SENAI	2_5	SENAI	2_5	SENAI
2_6	77,79,%	2_6	69,69%	2_6	62,71%
2_7	77,92%	2_7	69,54%	2_7	62,63%
2_8	78,10,%	2_8	76,15%	2_8	62,69%
2_9	81,33%	2_9	69,40%	2_9	63,00%
2_10	78,10,%	2_10	69,42%	2_10	65,63%
2_11	77,63%	2_11	69,83%	2_11	62,51%
2_12	78,16%	2_12	70,45%	2_12	63,99%
2_13	72,08%	2_13	69,79%	2_13	61,76%
2_14	78,17%	2_14	70,51%	2_14	61,17%
2_15	SENAI	2_15	SENAI	2_15	SENAI
2_16	78,02%	2_16	68,76%	2_16	48,86%
2_17	78,14%	2_17	70,64%	2_17	61,67%

2_18	78,18,%	2_18	70,87%	2_18	62,11%
2_19	77,84%	2_19	74,23%	2_19	64,27%
2_20	SENAI	2_20	SENAI	2_20	SENAI
2_21	73,93,%	2_21	70,74%	2_21	64,16%
2_22	77,63%	2_22	68,03%	2_22	64,99,%
2_23	78,48%	2_23	70,39%	2_23	66,98%
2_24	SENAI	2_24	SENAI	2_24	SENAI

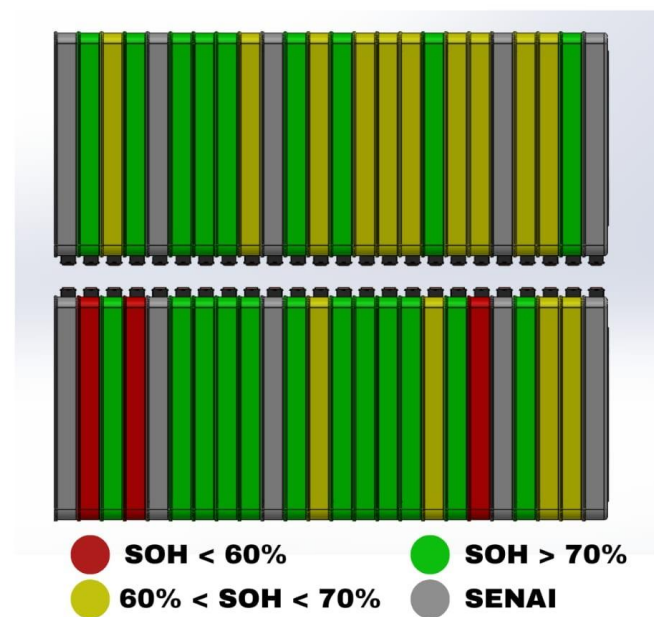
Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 27 – Módulos Bateria A classificados



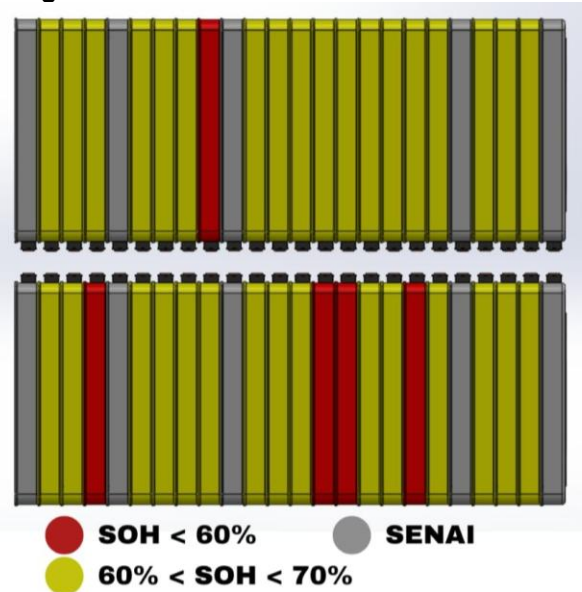
Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 28 – Módulos Bateria B classificados



Fonte: Autoria própria (2025)

**Figura 29 – Módulos Bateria C classificados**



Fonte: Autoria própria (2025)

#### 4.3 Análise e discussão dos resultados

Esta seção analisa os resultados de estado de saúde (SoH) apresentados na Tabela 2 e nas Figuras 27, 28 e 29, discutindo as implicações para a viabilidade da segunda vida dos módulos testados. A análise dos resultados consolidados na Tabela 2 revela informações importantes sobre a condição do lote de baterias avaliadas. Observa-se uma variação considerável nos valores de SoH entre os diferentes packs (Baterias A, B e C), enquanto dentro de cada bateria os módulos apresentam comportamento relativamente uniforme. Considerando todos os módulos testados (excluindo os destinados ao SENAI e os desativados), o SoH variou de 48,86% (módulo 2\_16 da Bateria C) até 89,78% (módulo 1\_6 da Bateria A).

Comparando os três packs, a Bateria A apresentou, em média, os módulos em melhor estado, com a maioria dos valores de SoH concentrados entre 78% e 90%, e sendo todos acima de 70%. Essa condição é visualmente confirmada pela Figura 26, na qual é possível observar que todos os módulos testados estão aptos para aplicação em segunda vida.

A Bateria B apresentou um nível intermediário de degradação, com a maior parte dos módulos na faixa de 68% a 72% de SoH, além de dois módulos desativados e um com valor de 57,45%. A Figura 27 reflete essa condição de degradação moderada, porém com relativa uniformidade interna entre os módulos ativos. Além

disso, nota-se que boa parte dos módulos ainda pode ser utilizada com bom desempenho na sua nova aplicação.

Por fim, a Bateria C apresentou o menor nível de saúde, com praticamente todos os módulos situados entre 60% e 66% de SoH, e um módulo registrando 48,86%, abaixo do limite de operação ideal. A Figura 28 ilustra essa condição, com predominância de cores associadas a SoH mais baixos, indicando um estado avançado de envelhecimento e dificultando sua utilização em uma aplicação de segunda vida.

Esses resultados evidenciam que a principal heterogeneidade ocorre entre as diferentes baterias, refletindo distintos níveis de envelhecimento e histórico de uso. Essa diferença reforça a importância da caracterização individual dos módulos antes da montagem de novos sistemas para aplicações de segunda vida. A simples reutilização de packs completos, sem triagem e balanceamento, poderia resultar em desempenho desigual e redução significativa da vida útil do sistema final.

Para uma quantificação mais objetiva da condição do lote e a identificação de sua aptidão para segunda vida, os 114 módulos disponíveis foram categorizados. A Tabela 3 apresenta a distribuição desses módulos por faixa de SoH, detalhando a contribuição de cada bateria.

**Tabela 3 – Distribuição dos módulos por SOH**

Faixa de SoH	Classificação	Bateria A	Bateria B	Bateria C	Total
> 70%	Saudável	38	21	0	59
60 a 70%	Intermediário	0	14	33	47
< 60% ou desativado	Degradado/Inoperante	0	3	5	8
Total de módulos válidos		38	35	33	106

**Fonte: Autoria própria (2025)**

A Tabela 3 corrobora a análise visual e qualitativa. Verifica-se que, do total de 106 módulos válidos para aplicação de segunda vida, considerando aptos acima de 60% de SoH. Destes, 59 unidades classificam-se com SoH acima de 70%, sendo a grande maioria proveniente da Bateria A. A segunda grande parcela, 47 módulos estão na faixa "intermediária" entre 60% e 70% de capacidade com contribuições significativas da Bateria B e, predominantemente, da Bateria C. Por fim, 8 módulos encontram-se na categoria "Degradado/Inoperante" (SoH < 60% ou desativados).

Estes resultados demonstram a viabilidade técnica da segunda vida para uma parcela considerável dos módulos. No entanto, a alta proporção de módulos nas categorias "Intermediária" e "Degradado/Inoperante" reitera a necessidade imperativa de um sistema de classificação eficiente, como o desenvolvido neste trabalho, para otimizar o processo de utilização em aplicação de segunda vida.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho teve como objetivo principal o desenvolvimento de uma infraestrutura de testes para a classificação de módulos de baterias de segunda vida, visando determinar o estado de saúde (SoH) com precisão. Todos os objetivos propostos foram plenamente alcançados por meio da metodologia e do projeto detalhados no Capítulo 3.

O desenvolvimento resultou na placa de aquisição de dados, uma solução customizada, que, após um processo de design iterativo e validação, demonstrou a robustez necessária para a aquisição precisa de tensão, corrente e temperatura. Adicionalmente, o algoritmo computacional em MATLAB foi implementado com sucesso, utilizando o método de Coulomb Counting para realizar os testes de protocolo Carga CC-CV e Descarga CC e calcular o SoH de forma automatizada.

A aplicação da metodologia no lote de 114 módulos de bateria do Renault Kangoo Z.E. demonstrou a eficácia do sistema. Os resultados obtidos (Tabela 2) revelaram uma acentuada heterogeneidade no lote. A análise estatística confirmou que, do total disponível, 59 módulos ainda estão em condições ótimas para reutilização imediata. Esta conclusão valida a premissa do trabalho, reforçando a viabilidade econômica e ambiental do conceito de segunda vida, desde que haja uma triagem rigorosa.

Portanto, foi logrado êxito no desenvolvimento e validação do projeto, tendo como principal contribuição o estabelecimento de uma bancada de testes completa, incluindo placa de aquisição e *software*, que se torna um ativo permanente para os estudos de eletrônica da UTFPR, servindo como base para futuras pesquisas.

## REFERÊNCIAS

ABVE. Eletrificados superam previsões, passam de 170 mil e batem todos os recordes em 2024. ABVE, 2025. Disponível em: <https://abve.org.br/eletrificados-superam-previsoes-passam-de-170-mil-e-batem-todos-os-recordes-em-2024/>. Acesso em: 10 out. 2025.

ARDUINO. Arduino Mega 2560 REV3. [S.l.]: Arduino, 2017. Datasheet.

GREY, C. P.; HALL, D. S. Prospects for lithium-ion batteries and beyond—a 2030 vision. *Nature Communications*, v. 11, n. 1, p. 6279, dez. 2020. DOI: 10.1038/s41467-020-19991-4.

GU, Fengqi et al. Second life for electric vehicle batteries: A review of challenges, solutions, and opportunities. *arXiv*, 2023. Disponível em: <https://arxiv.org/pdf/2308.06786.pdf>. Acesso em: 26 out. 2025.

GUEDES, W. B. et al. Lithium-ion Batteries State of Charge Comparison between Extended Kalman Filter and Machine Learning. In: *IEEE INTERNATIONAL INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT TECHNOLOGY CONFERENCE (I2MTC)*, 2024. Proceedings [...]. IEEE, 2024. DOI: 10.1109/I2MTC60896.2024.10561115.

HARAM, M. H. S. M. et al. Feasibility of utilising second life EV batteries: Applications, lifespan, economics, environmental impact, assessment, and challenges. *Alexandria Engineering Journal*, [S.l.], v. 60, p. 4517–4536, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.aej.2021.03.021>. Acesso em: 26 out. 2025.

HOSSAIN LIPU, M. S. et al. Data-driven state of charge estimation of lithium-ion batteries: Algorithms, implementation factors, limitations and future trends. *Journal of Cleaner Production*, v. 277, p. 124110, 20 dez. 2020. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.124110.

IEA (International Energy Agency). *Global EV Outlook 2024*. Paris: IEA, 2024. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2024>. Acesso em: 26 out. 2025.

ILLA FONT, C. H. et al. Second life of lithium-ion batteries of electric vehicles: a short review and perspectives. *Energies*, v. 16, n. 2, p. 953, jan. 2023. DOI: 10.3390/en16020953.

MOVASSAGH, Kiarash et al. A critical look at Coulomb Counting approach for state of charge estimation in batteries. *Energies*, Basel, v. 14, n. 14, p. 4074, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/en14144074>.

NISSAN. Nissan elétrico: Baterias de íon-lítio do LEAF encontram um novo uso nos veículos autoguiados da Nissan. *Nissan News*, 23 mar. 2021. Disponível em: <https://brazil.nissannews.com/pt-BR/releases/baterias-de-ion-litio-do-leaf-encontram-um-novo-uso-nos-veiculos-autoguiados-da-nissan>. Acesso em: 26 out. 2025.

QUINARD, Honorat et al. Fast Electrical Characterizations of High-Energy Second Life Lithium-Ion Batteries for Embedded and Stationary Applications. *Batteries*, v. 5, n. 1, p. 33, mar. 2019. DOI: 10.3390/batteries5010033.

RENAULT. 4 million Kangoo vehicles made in Maubeuge: a testament to its success. Renault Group, 2023. Disponível em: <https://www.renaultgroup.com/en/magazine/our-group-news/4-million-kangoo-vehicles-made-in-maubeuge-a-testament-to-its-success>. Acesso em: 25 out. 2025.

RENAULT. Kangoo Z.E. Phase 2: roadside assistance technician's guide. [S.l.], 2013.

RENAULT. Novo Kangoo Z.E.: autonomia maior, recarga mais rápida e mais simples. Imprensa Renault, 2017. Disponível em: <https://imprensa.renault.com.br/release/item/novo-kangoo-ze-autonomia-maior-recarga-mais-rapida-e-mais-simples/pt>. Acesso em: 25 out. 2025.

RENAULT UK. New Kangoo Van Z.E. 33: A new battery, new motor and new connected services. Renault UK Press, 2017. Disponível em: <https://www.press.renault.co.uk/releases/570>. Acesso em: 25 out. 2025.

WANG, S. et al. Charge-discharge strategies. In: LI, Y.; SONG, P.; HAN, X. (Ed.). *Battery System Modeling, Monitoring, and Control: From Automotive to Grid Storage*. Academic Press, 2021.

## **APÊNDICE A - Memória de cálculo do projeto**



## Projeto dos Sensores de Efeito Hall

Projeto: Desenvolvimento de um Sistema de Armazenamento de Energia com Baterias de Segunda Vida Bem Adaptado aos Requisitos da Rede de Distribuição de Energia Elétrica em Baixa Tensão

Aluno IC: Victor Trucolo Ribeiro

Coordenador: Carlos Henrique Illa Font

Ponta Grossa - PR - 10 / 2023

### 1) Especificações:

Tensão da Bateria:  $V_{\text{Bat}} := 3.65\text{V}$

Corrente da Bateria:  $I_{\text{Bat}} := 56.3\text{A}$

Capacidade Estimada:  $C_{\text{Bat}} := 80\%$

Tensão de Saída de Referência:  $V_{V\_med} := 3\text{V}$

$V_{I\_med} := 3\text{V}$

### 2) Sensor da Tensão na Bateria:

Ganho do Sensor Hall de Tensão:  $G_{v\text{Hall}} := \frac{2500}{1000} = 2.5$

Corrente Nominal no Primário do Sensor:  $I_{pn\text{Hall}} := 10\text{mA}$

Resistência do Enrolamento Primário:  $R_{p\text{Hall}} := 250\Omega$

Resistência do Enrolamento Secundário:  $R_{s\text{Hall}} := 110\Omega$

Resistor  $R_p$ :  $R_{p\text{total}} := \frac{V_{\text{Bat}}}{I_{pn\text{Hall}}} = 365 \cdot \Omega$

$R_p := 150\Omega$

	$R_{Voa} := R_p + R_{pHall} = 400 \cdot \Omega$
Corrente Nominal no Primário do Sensor:	$I_{pnHall} := \frac{V_{Bat}}{R_{Voa}} = 9.125 \cdot mA$
Potência do Resistor $R_p$ :	$P_{Rp} := R_p \cdot I_{pnHall}^2 = 12.49 \cdot mW$
Corrente Nominal no Secundário do Sensor:	$I_{snHall} := G_{vHall} \cdot I_{pnHall} = 22.813 \cdot mA$
Resistor $R_{mV}$ :	$R_{mV} := \frac{V_{V\_med}}{I_{snHall}} = 131.507 \cdot \Omega$
	$R_{mV} := 100\Omega + 22\Omega$
Tensão no Resistor $R_{mV}$ :	$V_{RmV} := R_{mV} \cdot I_{snHall} = 2.783 \text{ V}$
Ganho Total do Sensor:	$G_v := \frac{V_{Bat}}{V_{RmV}} = 1.311$

### 3) Sensor da Corrente na Bateria:

Ganho do Sensor Hall de Corrente:	$G_{iHall} := \frac{1}{2000}$
Resistência do Enrolamento Secundário:	$R_{sHall} := 115 \Omega$
Corrente Nominal da Bateria de 2a Vida:	$I_{BatSL} := I_{Bat} \cdot C_{Bat} = 45.04 \text{ A}$
Corrente Nominal no Secundário do Sensor:	$I_{snHall} := G_{iHall} \cdot I_{BatSL} = 22.52 \cdot mA$
Resistor $R_{mI}$ :	$R_{mI} := \frac{V_{I\_med}}{I_{snHall}} = 133.215 \Omega$
	$R_{mI} := 100\Omega + 22\Omega$
	$V_{RmI} := R_{mI} \cdot I_{snHall} = 2.747 \text{ V}$
Ganho Total do Sensor:	$G_i := \frac{I_{BatSL}}{V_{RmI}} = 16.393 \frac{1}{\Omega}$

#### 4) Dimensionamento dos Resistores:

$$R_{\text{pv}} := 150\Omega$$

$$R_{mV1} := 110\Omega$$

$$R_{mV2} := 22\Omega$$

$$R_{mI1} := 110\Omega$$

$$R_{mI2} := 22\Omega$$