



**UNIVERSIDADE  
FEDERAL  
DE PERNAMBUCO**



Universidade Federal de Pernambuco  
Centro de Tecnologia e Geociências  
Departamento de Eletrônica e Sistemas



## **Graduação em Engenharia Eletrônica**

**Victor Hugo de Oliveira Chagas**

**Estimação do estado de carga em bateria de lítio  
com armazenamento em nuvem**

Recife

2023

Victor Hugo de Oliveira Chagas

## **Estimação do estado de carga em bateria de lítio com armazenamento em nuvem**

Trabalho de Conclusão apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Eletrônica, do Departamento de Eletrônica e Sistemas, da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Eletrônica.

**Orientador(a):** Prof. Leonardo Didier Coelho, Dr.

Recife  
2023

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Chagas, Victor Hugo de Oliveira .

Estimação do estado de carga em bateria de lítio com armazenamento em  
nuvem / Victor Hugo de Oliveira Chagas. - Recife, 2023.

72 p. : il., tab.

Orientador(a): Leonardo Didier Coelho

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de  
Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia Eletrônica -  
Bacharelado, 2023.

1. Bateria. 2. Lítio. 3. ESP32. 4. Cloud. I. Coelho, Leonardo Didier.  
(Orientação). II. Título.

620 CDD (22.ed.)

Victor Hugo de Oliveira Chagas

## **Estimação do estado de carga em bateria de lítio com armazenamento em nuvem**

Trabalho de Conclusão apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Eletrônica, do Departamento de Eletrônica e Sistemas, da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Eletrônica.

Aprovado em: 26/09/2023

### **Banca Examinadora**

---

Prof. Leonardo Didier Coelho, Dr.  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Prof. Guilherme Nunes Melo, Dr.  
Universidade Federal de Pernambuco

*A todos aqueles que ousaram  
sonhar em deixar o mundo um  
pouco melhor do que o  
encontraram quando chegaram, e  
seguiram agindo assim até o  
final de suas vidas.*

# Agradecimentos

Família!

Nesses diversos anos em que conhecimento, mudanças e desafios foram encontrados e obtidos, poder contar com uma rede de apoio familiar foi precípuo para conseguir percorrer esse caminho. Meus sinceros e profundos agradecimentos à todos familiares que fizeram parte dessa jornada.

Aos meus professores, obrigado por dividir um trecho das nossas vidas. Pessoas com as mais diversas histórias de vida, mas que tinham em comum o amor pela ciência. Foi ótimo poder crescer profissionalmente e pessoalmente com vocês.

Aos meus amigos, eu regrazio o compartilhamento de momentos incríveis e que foram, sem dúvidas, essenciais para levar uma vida mais leve. E que bom que dividimos o mesmo intervalo de tempo na história do universo.

Aos meus colegas de trabalho durante o estágio, minha gratidão por vocês terem possibilitado a troca de informações, conhecimentos e a disponibilidade para ajudar sempre que foi necessário.

Por fim, gostaria de agradecer especificamente a algumas pessoas. Começo com a minha tia, Josilene Oliveira, que esteve ao meu lado em todas as etapas da minha graduação, sem a sua presença meu trajeto teria sido mais árduo. Agradeço também ao meu orientador, Leonardo Didier, pela paciência, flexibilidade e dicas ao longo desses anos. A minha mãe, Josenilda Oliveira, que sempre acreditou e me incentivou. E ao meu filho, Vinícius Chagas, sendo um dos grandes motivos que me impulsionou e impulsiona a buscar o meu melhor a cada dia.

Para criaturas pequenas como nós,  
a vastidão só é suportável através  
do amor.

---

Carl Sagan

Resumo do Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Eletrônica e Sistemas, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Eletrônica(Eng.)

## **Estimação do estado de carga em bateria de lítio com armazenamento em nuvem**

Victor Hugo de Oliveira Chagas

Com o aumento da inserção das baterias de lítio em diversas aplicações do cotidiano, estando presentes no uso de carros elétricos, *smartphones*, *tablets*, sistemas fotovoltaicos, torres de telecomunicação dentre outros, faz-se necessário o desenvolvimento de ferramentas que visam otimizar e aprimorar seus desempenhos e longevidade. Esse trabalho consiste em estimar o estado da carga de uma bateria de íon-lítio com a química LFP através de um microcontrolador que receberá os dados de algumas variáveis, calculará o estado de carga e os enviará via rede *Wi-Fi* até um serviço de computação em nuvem que ficará responsável pelo armazenamento dos dados. O trabalho está dividido em três partes: a primeira parte consiste na configuração dos dispositivos eletrônicos, que utilizará o microcontrolador ESP32 juntamente a um conversor Buck para alimentar o circuito do sensor de corrente e o amplificador operacional utilizado como *buffer*. Na segunda parte será feita a implementação para a estimação do estado de carga no microcontrolador a partir dos dados de corrente elétrica e o acompanhamento dos níveis de tensão elétrica; todas essas informações serão fornecidas a *Cloud* (AWS). Por fim, a terceira parte trata da transformação e armazenamento dos dados na *Cloud*, para consulta posterior e geração dos gráficos e análises dos resultados em comparação aos dados registrados no BMS e nos equipamentos utilizados.

Palavras-chave: bateria; lítio; ESP32; *cloud* .

Abstract of Course Conclusion Work, presented to Departament of Eletronic and Systems, as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Bachelor of Electronic Engineering(Eng.)

## **State of charge estimation for lithium battery with cloud storage**

Victor Hugo de Oliveira Chagas

As the utilization of lithium batteries continues to rise across various everyday applications, such as electric cars, smartphones, tablets, photovoltaic systems, and telecommunication towers, the development of tools to optimize and enhance their performance and longevity becomes necessary. This work focuses on estimating the state of charge of a lithium-ion battery employing LFP chemistry through a microcontroller. The microcontroller acquires data from multiple variables, computes the state of charge, and transmits this information via Wi-Fi to a cloud computing service responsible for data storage. This work is structured into three parts: the first is about configuring electronic components, employing the ESP32 microcontroller together with a Buck converter to supply the current sensor circuit and the operational amplifier. The second part involves implementing state of charge estimation in the microcontroller using current data and monitoring electrical voltage levels, with all information being transmitted to the Cloud (AWS). Finally, the third part is about the transformation of data within the cloud service to facilitate storage, enabling subsequent querying, graph generation, and result analysis, thereby comparing recorded data with that from the Battery Management System (BMS) and the utilized equipment.

**Keywords:** battery; lithium; ESP32; cloud.

# Lista de Ilustrações

|      |                                                                                                                  |    |
|------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.1  | Baterias com diferentes químicas (Fonte: UNIVERSITY, 2021). . . . .                                              | 22 |
| 2.2  | Diagrama esquemático de uma célula de íon-lítio (Fonte: PLETT, 2015). . . . .                                    | 23 |
| 2.3  | Célula de íon-lítio cilíndrica (Fonte: PLETT, 2015). . . . .                                                     | 25 |
| 2.4  | Célula de íon-lítio <i>pouch</i> (Fonte: PLETT, 2015). . . . .                                                   | 25 |
| 2.5  | Célula de íon-lítio prismática (Fonte: PLETT, 2015). . . . .                                                     | 26 |
| 2.6  | Curvas de recarga e descarga em uma célula $\text{LiFePO}_4$ de 100 Ah (Fonte: LI e YUE, 2012). . . . .          | 27 |
| 2.7  | Descarga em diferentes <i>C-rates</i> em uma célula $\text{LiFePO}_4$ de 100 Ah (Fonte: LI e YUE, 2012). . . . . | 28 |
| 2.8  | Área de operação (Fonte: KORTHAUER, 2018). . . . .                                                               | 31 |
| 2.9  | Sistemas embarcados (Fonte: VALLATHAI, 2017). . . . .                                                            | 33 |
| 2.10 | Efeito Hall (Fonte: FRADEN, 2016). . . . .                                                                       | 34 |
| 2.11 | Terminais do sensor de efeito Hall (Fonte: FRADEN, 2016). . . . .                                                | 35 |
| 2.12 | Conversor Buck (Fonte: HART, 2011). . . . .                                                                      | 36 |
| 2.13 | Representação do amplificador <i>Buffer</i> (Fonte: o autor). . . . .                                            | 38 |
| 2.14 | Exemplo de arquitetura do MQTT (Fonte: HILLAR, 2017). . . . .                                                    | 39 |
| 3.1  | Diagrama de blocos do sistema proposto (Fonte: o autor). . . . .                                                 | 42 |
| 3.2  | Configuração do sistema (Fonte: o autor). . . . .                                                                | 43 |
| 3.3  | <i>Protoboard</i> com a solução proposta (Fonte: o autor). . . . .                                               | 44 |
| 3.4  | Amazon Kinesis (Fonte: AWS). . . . .                                                                             | 46 |
| 3.5  | Amazon S3 (Fonte: AWS). . . . .                                                                                  | 47 |

|      |                                                                                           |    |
|------|-------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.6  | Dados do BMS da bateria na descarga (Fonte: o autor).                                     | 48 |
| 3.7  | Dados do monitoramento da bateria através do BMS (Fonte: o autor).                        | 48 |
| 3.8  | Monitor serial da ESP32 (Fonte: o autor).                                                 | 49 |
| 3.9  | Dados que chegam a AWS por meio do protocolo MQTT (Fonte: o autor).                       | 49 |
| 3.10 | Armazenamento na <i>S3</i> (Fonte: o autor).                                              | 50 |
| 3.11 | Arquivos armazenados (Fonte: o autor).                                                    | 50 |
| 3.12 | Dados da bateria armazenados (Fonte: o autor).                                            | 50 |
| 3.13 | Tensão elétrica nos terminais da bateria (Fonte: o autor).                                | 51 |
| 3.14 | Saída do conversor DC-DC (Fonte: o autor).                                                | 51 |
| 3.15 | Sinal referente a tensão elétrica da bateria (Fonte: o autor).                            | 52 |
| 3.16 | Registro da corrente elétrica no alicate amperímetro (Fonte: o autor).                    | 53 |
| 3.17 | Início da descarga (Fonte: o autor).                                                      | 54 |
| 3.18 | Trecho durante a descarga (Fonte: o autor).                                               | 54 |
| 3.19 | Fim da descarga (Fonte: o autor).                                                         | 54 |
| 3.20 | Proteção na descarga (Fonte: o autor).                                                    | 55 |
| 3.21 | Gráfico da tensão elétrica pelo sistema na descarga (Fonte: o autor).                     | 55 |
| 3.22 | Gráfico da corrente elétrica pelo sistema na descarga (Fonte: o autor).                   | 56 |
| 3.23 | Gráfico da capacidade de carga acumulada pelo sistema na descarga (Fonte: o autor).       | 56 |
| 3.24 | Gráfico do estado de carga pelo sistema na descarga (Fonte: o autor).                     | 57 |
| 3.25 | Gráfico da tensão elétrica pelo BMS na descarga (Fonte: o autor).                         | 57 |
| 3.26 | Gráfico da corrente elétrica pelo BMS na descarga (Fonte: o autor).                       | 58 |
| 3.27 | Gráfico da capacidade de carga pelo BMS na descarga (Fonte: o autor).                     | 58 |
| 3.28 | Gráfico do estado de carga pelo BMS na descarga (Fonte: o autor).                         | 59 |
| 3.29 | Configuração da fonte para recarga (Fonte: o autor).                                      | 59 |
| 3.30 | Dados do BMS da bateria na recarga (Fonte: o autor).                                      | 60 |
| 3.31 | Tensão da bateria que chega aos terminais de entrada do conversor DC-DC (Fonte: o autor). | 60 |

|      |                                                                                                      |    |
|------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.32 | Tensão de saída do conversor DC-DC (Fonte: o autor). . . . .                                         | 61 |
| 3.33 | Corrente elétrica de recarga (10 A) (Fonte: o autor). . . . .                                        | 61 |
| 3.34 | Tensão de entrada referente ao divisor de tensão (Fonte: o autor). . .                               | 62 |
| 3.35 | Sinal de tensão do sensor de corrente passando por um divisor de<br>tensão (Fonte: o autor). . . . . | 62 |
| 3.36 | Início da recarga (Fonte: o autor). . . . .                                                          | 63 |
| 3.37 | Trecho durante a recarga (Fonte: o autor). . . . .                                                   | 63 |
| 3.38 | Fim da recarga (Fonte: o autor). . . . .                                                             | 63 |
| 3.39 | Gráfico da tensão elétrica pelo sistema na recarga (Fonte: o autor). .                               | 64 |
| 3.40 | Gráfico da corrente elétrica pelo sistema na recarga (Fonte: o autor).                               | 64 |
| 3.41 | Gráfico da capacidade de carga pelo sistema na recarga (Fonte: o<br>autor). . . . .                  | 65 |
| 3.42 | Gráfico do estado de carga pelo sistema na recarga (Fonte: o autor). .                               | 65 |
| 3.43 | Gráfico da tensão elétrica pelo BMS na recarga (Fonte: o autor). . .                                 | 66 |
| 3.44 | Gráfico da corrente elétrica pelo BMS na recarga (Fonte: o autor). . .                               | 66 |
| 3.45 | Gráfico da capacidade de carga pelo BMS na recarga (Fonte: o autor).                                 | 67 |
| 3.46 | Gráfico do estado de carga pelo BMS na recarga (Fonte: o autor). . .                                 | 67 |

# Lista de Tabelas

|     |                                                 |    |
|-----|-------------------------------------------------|----|
| 4.1 | Descarga 0,2 C - 10 A (Fonte: o autor). . . . . | 69 |
| 4.2 | Recarga 0,2 C - 10 A (Fonte: o autor). . . . .  | 69 |

# Lista de Símbolos

A      ... Ampère

Ah    Ampère-hora

E      ... Energia

V      ..... Volt

DC    *Direct Current*

$\Omega$       .... Ohm

# Lista de Abreviações

|      |                                            |
|------|--------------------------------------------|
| BMS  | .... <i>Battery Management System</i>      |
| SOC  | ..... <i>State of Charge</i>               |
| SOH  | ..... <i>State of Health</i>               |
| SOL  | ..... <i>State of Life</i>                 |
| IoT  | ..... <i>Internet of Things</i>            |
| AWS  | ..... <i>Amazon Web Services</i>           |
| LFP  | ..... <i>Lithium Iron Phosphate</i>        |
| CPU  | ..... <i>Central Processing Unit</i>       |
| RAM  | ..... <i>Random Access Memory</i>          |
| ROM  | ..... <i>Read-Only Memory</i>              |
| MQTT | <i>Message Queuing Telemetry Transport</i> |
| IaaS | ..... <i>Infrastructure as a Service</i>   |
| PaaS | ..... <i>Platform as a Service</i>         |
| SaaS | ..... <i>Software as a Service</i>         |
| IDE  | <i>Integrated Development Environment</i>  |
| JSON | ..... <i>JavaScript Object Notation</i>    |

# Sumário

|          |                                                           |           |
|----------|-----------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>Introdução</b>                                         | <b>17</b> |
| 1.1      | Justificativa . . . . .                                   | 18        |
| 1.2      | Objetivo Geral . . . . .                                  | 19        |
| 1.2.1    | Objetivos específicos . . . . .                           | 19        |
| 1.3      | Organização do TCC . . . . .                              | 20        |
| <b>2</b> | <b>Fundamentação Teórica</b>                              | <b>21</b> |
| 2.1      | Baterias de Íon-lítio . . . . .                           | 21        |
| 2.1.1    | Formatos Geométricos . . . . .                            | 25        |
| 2.1.2    | Bateria de íon-lítio LFP . . . . .                        | 26        |
| 2.1.3    | Estado de Carga (SOC - <i>State of Charge</i> ) . . . . . | 29        |
| 2.1.4    | BMS - <i>Battery Management System</i> . . . . .          | 30        |
| 2.2      | Sensoriamento - Circuito Eletrônico . . . . .             | 31        |
| 2.2.1    | Sistemas Embarcados - Microcontrolador . . . . .          | 32        |
| 2.2.2    | Sensores de Corrente . . . . .                            | 33        |
| 2.2.3    | Conversor de Tensão DC-DC . . . . .                       | 35        |
| 2.2.4    | Amplificador <i>Buffer</i> . . . . .                      | 37        |
| 2.3      | Comunicação . . . . .                                     | 38        |
| 2.3.1    | MQTT . . . . .                                            | 38        |
| 2.4      | Computação em Nuvem . . . . .                             | 39        |
| <b>3</b> | <b>Desenvolvimento</b>                                    | <b>42</b> |
| 3.1      | Sistema Proposto . . . . .                                | 42        |

|          |                                                |           |
|----------|------------------------------------------------|-----------|
| 3.2      | Equipamentos Utilizados . . . . .              | 45        |
| 3.3      | Serviço da Computação em Nuvem - AWS . . . . . | 45        |
| 3.4      | Resultados e Análises . . . . .                | 47        |
| 3.4.1    | Descarga 0,2 C (10 A) . . . . .                | 47        |
| 3.4.2    | Recarga 0,2 C (10 A) . . . . .                 | 59        |
| <b>4</b> | <b>Considerações Finais</b>                    | <b>68</b> |
| 4.1      | Conclusão . . . . .                            | 68        |
| 4.2      | Dificuldades Encontradas . . . . .             | 69        |
| 4.3      | Trabalhos Futuros . . . . .                    | 70        |
|          | <b>Referências</b>                             | <b>71</b> |

# Capítulo 1

## Introdução

**E**M algumas aplicações para o uso da bateria de lítio, como é o caso das torres de telecomunicações, o acesso físico às baterias pode não ser tão simples e demandar custos operacionais demasiados. Um outro exemplo dessa situação são os sistemas fotovoltaicos de maior complexidade de acesso geográfico. No decorrer do tempo há a possibilidade do surgimento de problemas que necessitam acompanhar o funcionamento da bateria. As causas raízes podem surgir de diversas fontes, como falha intrínseca ao BMS, comportamento anômalo nas células, perda e/ou falha na comunicação com os inversores, fontes retificadoras/controladoras, dentre outros. Esses dois exemplos podem ser usados para a indagação: será possível implementar alguma solução em que determinados parâmetros da bateria possam ser observados à distância e exista a possibilidade de registrar os dados de seus ciclos a um passo (intervalo), sem que seja necessário o custo de um equipamento físico de armazenamento para isso?

## 1.1 Justificativa

Dentre os desafios encontrados para otimizar e, de certa forma, ampliar o uso das baterias de íon de lítio, está o de obter uma bateria que possa ter a maior vida útil possível ou, em outras palavras, uma bateria que possa ter o desempenho melhor que as demais disponíveis no mercado. A partir dessa premissa, como será visto adiante, o acompanhamento das variáveis no sistema da bateria é de extrema importância para que ela possa manter seu bom desempenho ao longo dos anos. A estimativa do estado de carga (*State of Charge* - SOC) é crucial para entender o comportamento da recarga e descarga no sistema em que a bateria está inserida, ou seja, como ela está reagindo nessas etapas demandadas pelo sistema. A célula da bateria, quando submetida a sobrecorrente ou sobretensão, por exemplo, pode ocasionar o envelhecimento precoce das células, reduzindo assim sua vida útil, o que faz com que seja reduzida a capacidade de armazenar e fornecer energia.

A solução proposta neste trabalho visa utilizar alguns conceitos da Internet das Coisas (*Internet of Things* - IoT) juntamente com a computação em nuvem para realizar a estimação do estado de carga das baterias e realizar o acompanhamento dos valores de corrente elétrica e tensão elétrica durante seu funcionamento, incluindo o armazenamento desses dados ao longo do tempo. A intenção disso é fazer com que seja viável o acesso remoto ao comportamento das baterias ao longo do tempo e assim ter um controle melhor de como estão seus desempenhos e o processo de envelhecimento.

## 1.2 Objetivo Geral

Este trabalho propõe-se a fazer o uso em conjunto de duas áreas que ao longo desse século XXI recebem grandes incentivos para pesquisa e desenvolvimento, que são o uso das baterias de íon-lítio e a computação em nuvem. Como objetivo central, será feito um estudo e experimento que utilizará a placa de desenvolvimento ESP32 Dev Kit, que possui um microcontrolador. E será empregue para a estimação do estado de carga e envio de informações via rede *Wi-Fi*, somado à computação em nuvem para armazenar esses dados. Dentre os algoritmos possíveis para essa estimação de estado carga será utilizado o da contagem coulômbica. A partir dos dados obtidos será feita também uma análise com relação a todo o processo de recarga e descarga a 0,2 C (10 A) em uma bateria de modelo 48V50Ah.

### 1.2.1 Objetivos específicos

- Dimensionar os componentes e circuitos eletrônicos que integrarão o microcontrolador e a bateria;
- Obter os valores da tensão elétrica e corrente elétrica em tempo real;
- Fazer o uso da contagem coulômbica para estimar o valor do estado de carga da bateria e enviar os dados via rede *Wi-Fi*;
- Receber os dados em um serviço de nuvem e conseguir fazer o processamento deles na plataforma, incluindo seu armazenamento;
- Analisar se o comportamento do estado de carga calculado, esteve próximo suficiente do que é visto pelo *software* do BMS, gerando gráficos comparativos.

## 1.3 Organização do TCC

Este TCC está dividido em 4 capítulos. As referências serão encontradas nas páginas finais. A seguir está uma lista com uma pequena descrição do que será abordado durante os capítulos.

**Capítulo 1. Introdução** - Como visto, é o capítulo responsável por dar a visão geral do problema encontrado, a solução proposta e de como o trabalho está dividido;

**Capítulo 2. Fundamentação Teórica** - Em suma, está dividido em três subtópicos: no primeiro aborda-se o funcionamento e características de uma bateria de íon-lítio, as diferentes composições que podem ser utilizadas na sua química e os tipos geométricos de células presentes no mercado. A segunda parte irá explicar a teoria que embasa os componentes eletrônicos empregados para a solução proposta. E por fim, na terceira etapa, serão mostradas as características presentes na computação em nuvem;

**Capítulo 3. Desenvolvimento** - É mostrado o sistema como um todo, ou seja, a solução proposta e o que cada etapa será responsável; tem-se também a lista dos equipamentos utilizados, juntamente com o serviço de computação da nuvem escolhido e conseqüentemente seus serviços/produtos selecionados. Por fim, os resultados encontrados;

**Capítulo 4. Considerações Finais** - Serão apontadas as conclusões com a solução proposta, as dificuldades encontradas ao longo do trabalho e também as possíveis oportunidades de melhorias futuras.

## Capítulo 2

# Fundamentação Teórica

**P**ESQUISAS no campo das baterias já são bastante comuns, especificamente a respeito do lítio, que é uma área fundamental para o desenvolvimento da sociedade contemporânea, juntamente com o advento da computação em nuvem. Este capítulo abordará alguns aspectos teóricos dessas áreas, explicando assim, seu funcionamento e o que se espera de uma bateria de íon-lítio.

### 2.1 Baterias de Íon-lítio

Algumas das características que fazem a bateria íon-lítio se destacar, segundo (KORTHAUER, 2018) é o fato dela ter uma alta energia específica, alta eficiência durante a recarga e descarga e o fato dela apresentar uma baixa auto-descarga, ou seja, a bateria quando não está passando por uma recarga ou descarga consegue manter por mais tempo sua energia interna com pouca perda, como mostra a Figura 2.1.

| Specifications                        | Lead Acid                                  | NiCd                                          | NiMH                 | Li-ion <sup>1</sup>                         |                   |              |
|---------------------------------------|--------------------------------------------|-----------------------------------------------|----------------------|---------------------------------------------|-------------------|--------------|
|                                       |                                            |                                               |                      | Cobalt                                      | Manganese         | Phosphate    |
| Specific energy (Wh/kg)               | 30–50                                      | 45–80                                         | 60–120               | 150–250                                     | 100–150           | 90–120       |
| Internal resistance                   | Very Low                                   | Very low                                      | Low                  | Moderate                                    | Low               | Very low     |
| Cycle life <sup>2</sup> (80% DoD)     | 200–300                                    | 1,000 <sup>3</sup>                            | 300–500 <sup>3</sup> | 500–1,000                                   | 500–1,000         | 1,000–2,000  |
| Charge time <sup>4</sup>              | 8–16h                                      | 1–2h                                          | 2–4h                 | 2–4h                                        | 1–2h              | 1–2h         |
| Overcharge tolerance                  | High                                       | Moderate                                      | Low                  | Low. No trickle charge                      |                   |              |
| Self-discharge/month (room temp)      | 5%                                         | 20% <sup>5</sup>                              | 30% <sup>5</sup>     | <5%<br>Protection circuit consumes 3%/month |                   |              |
| Cell voltage (nominal)                | 2V                                         | 1.2V <sup>6</sup>                             | 1.2V <sup>6</sup>    | 3.6V <sup>7</sup>                           | 3.7V <sup>7</sup> | 3.2–3.3V     |
| Charge cutoff voltage (V/cell)        | 2.40<br>Float 2.25                         | Full charge detection by voltage signature    |                      | 4.20 typical<br>Some go to higher V         |                   | 3.60         |
| Discharge cutoff voltage (V/cell, 1C) | 1.75V                                      | 1.00V                                         |                      | 2.50–3.00V                                  |                   | 2.50V        |
| Peak load current Best result         | 5C <sup>8</sup><br>0.2C                    | 20C<br>1C                                     | 5C<br>0.5C           | 2C<br><1C                                   | >30C<br><10C      | >30C<br><10C |
| Charge temperature                    | –20 to 50°C<br>(–4 to 122°F)               | 0 to 45°C<br>(32 to 113°F)                    |                      | 0 to 45°C <sup>9</sup><br>(32 to 113°F)     |                   |              |
| Discharge temperature                 | –20 to 50°C<br>(–4 to 122°F)               | –20 to 65°C<br>(–4 to 149°F)                  |                      | –20 to 60°C<br>(–4 to 140°F)                |                   |              |
| Maintenance requirement               | 3–6 months <sup>10</sup><br>(topping chg.) | Full discharge every 90 days when in full use |                      | Maintenance-free                            |                   |              |
| Safety requirements                   | Thermally stable                           | Thermally stable, fuse protection             |                      | Protection circuit mandatory <sup>11</sup>  |                   |              |
| In use since                          | Late 1800s                                 | 1950                                          | 1990                 | 1991                                        | 1996              | 1999         |
| Toxicity                              | Very high                                  | Very high                                     | Low                  | Low                                         |                   |              |
| Coulombic efficiency <sup>12</sup>    | ~90%                                       | ~70% slow charge<br>~90% fast charge          |                      | 99%                                         |                   |              |
| Cost                                  | Low                                        | Moderate                                      |                      | High <sup>13</sup>                          |                   |              |

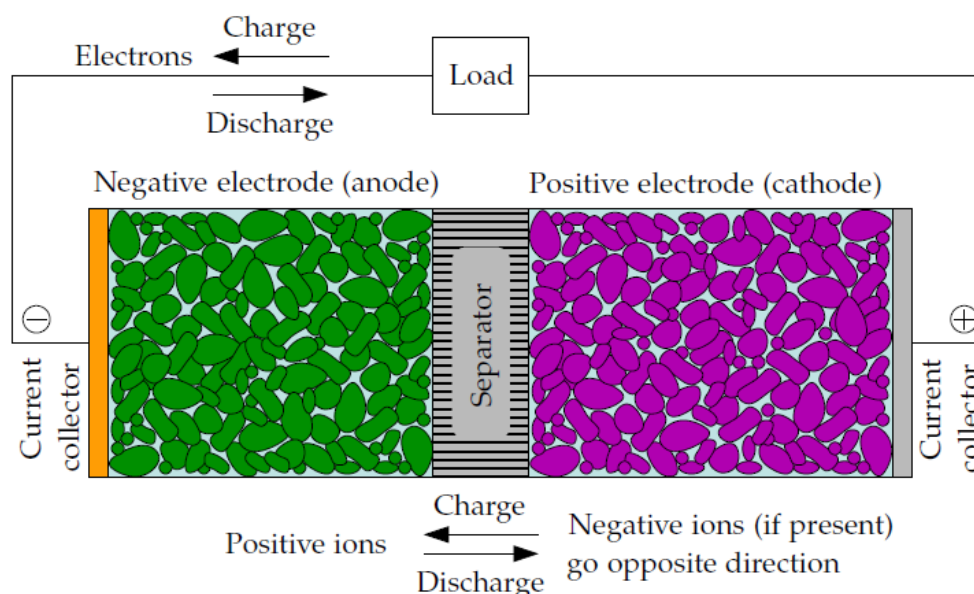
**Figura 2.1:** Baterias com diferentes químicas (Fonte: UNIVERSITY, 2021).

Segundo (WEICKER, 2014), pode-se ter uma compreensão sobre o funcionamento da célula de íon-lítio ao entender seus componentes, que incluem:

- Eletrodo positivo: durante a descarga, recebe elétrons do circuito externo, atendendo ao processo de redução; no processo de recarga, fornece elétrons ao circuito externo;
- Eletrodo negativo: durante a descarga, é o responsável por fornecer elétrons ao circuito externo. Nesse processo, diz-se que o eletrodo é oxidado, porém durante a recarga ele recebe elétrons e acontece o processo de chamado redução;
- Eletrólito: é um condutor iônico que tem como principal função a transferência de carga entre os eletrodos;
- Separador: é uma espécie de filme poroso de polímero que tem como intuito

principal a separação dos eletrodos, criando uma barreira em que só os íons possam trafegar. Os materiais mais utilizados são polietileno e polipropileno;

- Invólucro: sua atribuição está no sentido de fornecer proteção aos componentes internos da células, protegendo contra vazamentos, fazendo isolamento elétrico e também proporcionando proteção mecânica.



**Figura 2.2:** Diagrama esquemático de uma célula de íon-lítio (Fonte: PLETT, 2015).

Apesar de serem comumente chamadas de baterias de lítio, no que diz respeito a massa da bateria, a proporção de lítio utilizada é baixa “Os íons de lítio representam apenas cerca de 2% da massa da célula”(ANDREA, 2020, p. 66)

Existem diversos tipos de baterias, que podem ser categorizadas desde a sua química, formato geométrico ou até mesmo aplicação. Alguns exemplos de baterias de íon-lítio com químicas diversas são:

- Bateria de íon-lítio de fosfato de ferro ( $\text{LiFePO}_4$ ) ou comumente chamada de LFP: células comuns na aplicação de linhas estacionárias, sua faixa de operação fica entre 2,5 V a 3,75 V e tem como valor nominal 3,2 V ou 3,3 V, a depender do fabricante;

- Bateria de íon-lítio de óxido de cobalto (LCO): comumente utilizadas em baterias para *laptops*. Com relação ao seu custo, ela apresenta um dos maiores valores em comparação aos demais tipos, mas sua vantagem reside na alta densidade de energia;
- Bateria de íon-lítio de óxido de níquel(LNO): apresenta uma densidade de energia maior que a LCO, em torno de 15% maior, porém, as características de segurança são fracas;
- Bateria de íon-lítio de níquel-cobalto-manganês (NCM): consiste em utilizar como material do cátodo: níquel, manganês e cobalto. É utilizada, principalmente, em aplicações de veículos elétricos e veículos híbridos.

Quando se deseja utilizar a bateria de lítio, um de seus pontos fortes é justamente a longevidade. Para que isso ocorra da melhor maneira possível, faz-se necessária a estimativa de alguns parâmetros que indicam como está se dando o comportamento da bateria ao longo dos processos de recarga e descarga. Alguns desses parâmetros são: SOC - *State of Charge*, que segundo (PLETT, 2015), é uma estimativa em porcentagem, em que 0% indica que a célula e/ou bateria está totalmente descarregada e 100% quando a célula e/ou bateria está totalmente recarregada; SOH - *State of Health*, segundo (ANDREA, 2020), indica o quanto saudável estão as células da bateria em forma de porcentagem, mas uma das dificuldades está em determinar quais serão os parâmetros utilizados para fazer essa estimativa, como exemplo: resistência real, capacidade real, corrente real de autodescarga, porém, são parâmetros que são difíceis de medir; SOL - *State of Life*, que é uma estimativa do comportamento atual da bateria com relação ao seu estado original (“produto que não tenha passado por uso”), entretanto, segundo (ANDREA, 2020) também têm as mesmas dificuldades da definição dos parâmetros utilizados para o SOH. Essas são algumas das estimativas feitas, mas é possível encontrar outras. Como o foco do trabalho está no estado de carga, ele será discutido com mais detalhes posteriormente ainda nesse capítulo.

Pode-se categorizar as células de íon-lítio de acordo com seu formato geométrico,

sendo uma forma de analisar suas limitações e aplicações.

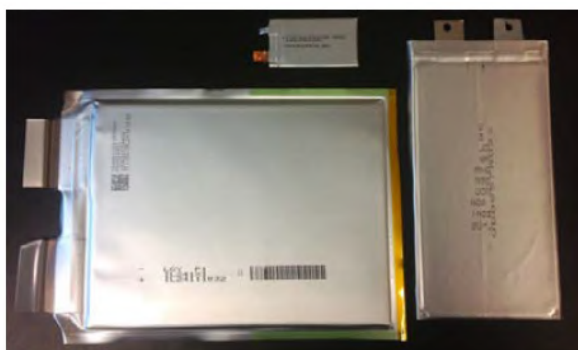
### 2.1.1 Formatos Geométricos

- Cilíndrica: um dos padrões mais comuns de manufatura quando se trata de células que tem uma capacidade energética menor que 5 Ah. Segundo (ANDREA, 2020), essas células tendem a fornecer uma densidade de energia mais baixa devido ao espaço morto que se configura na formação do *pack*.



**Figura 2.3:** Célula de íon-lítio cilíndrica (Fonte: PLETT, 2015).

- *Pouch*: é um tipo de célula com uma alta variedade de tamanhos. Devido ao seu formato físico; necessita de uma atenção maior para o projeto em que será inserida, pela questão da segurança, ou seja, evitar choques mecânicos que possam vir a prejudicar a célula.



**Figura 2.4:** Célula de íon-lítio *pouch* (Fonte: PLETT, 2015).

- Prismática: nessa categoria, pode-se ainda subdividir entre *large prismatic* e *small prismatic*. É um tipo de célula que é possível ser encontrada no mercado opções de capacidade que variam de 1-20 Ah, no caso da *small prismatic*, e também de 20-1000 Ah com relação a *large prismatic* (ANDREA, 2020).

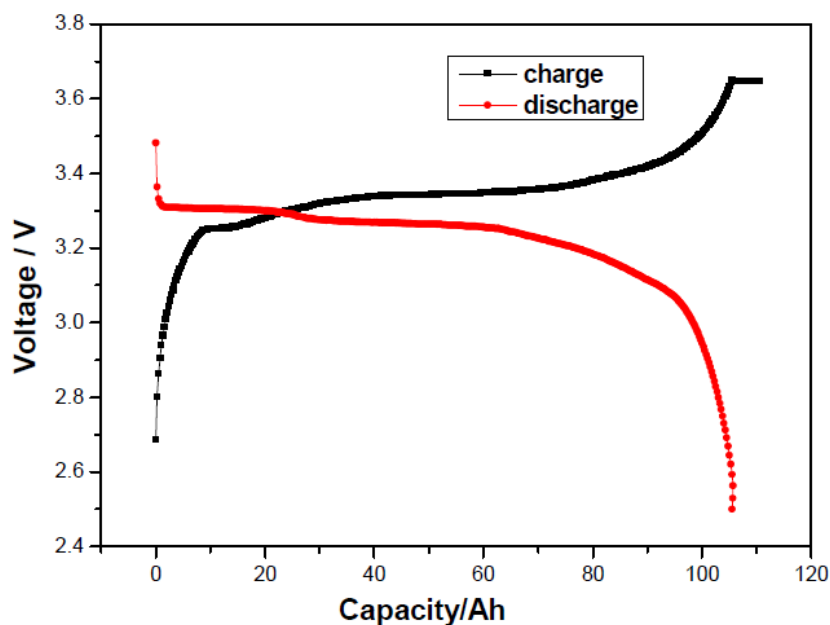


**Figura 2.5:** Célula de íon-lítio prismática (Fonte: PLETT, 2015).

### 2.1.2 Bateria de íon-lítio LFP

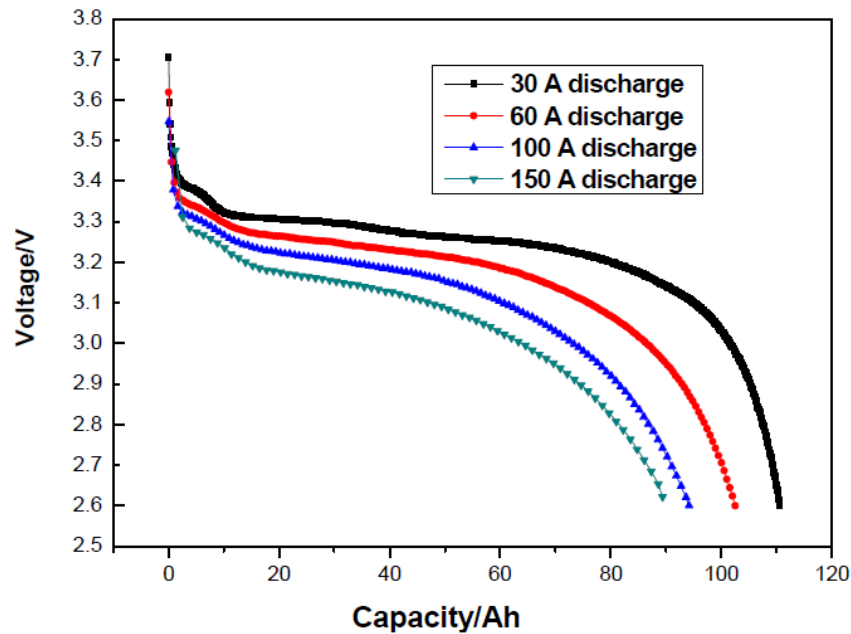
No que diz respeito ao uso de baterias de lítio para aplicação em baterias estacionárias, uma das células mais comuns são as de baterias de íon-lítio de fosfato de Ferro (LFP), mais precisamente  $\text{LiFePO}_4$ . Dentre as grandes vantagens delas, segundo (LI e YUE, 2012), estão: alta capacidade teórica, por volta de  $170 \text{ mAh/g}$ , baixo custo, baixa toxicidade e excelente segurança térmica.

A Figura 2.6 indica a curva característica dessa célula no processo de recarga e descarga.



**Figura 2.6:** Curvas de recarga e descarga em uma célula  $\text{LiFePO}_4$  de 100 Ah (Fonte: LI e YUE, 2012).

Um outro ponto a ser analisado diz respeito ao *C-rate*, uma taxa que se refere a quanto uma bateria está recarregando ou descarregando em relação a sua capacidade total, exemplo: para uma célula de 50 Ah, ao informar que ela está descarregando a 0,5 C significa que sua corrente de descarga é igual a 25 A. O uso do *C-rate* é importante de se trabalhar porque a intensidade da corrente está relacionado à capacidade energética que a bateria pode entregar. A Figura 2.7 ilustra esse comportamento.



**Figura 2.7:** Descarga em diferentes  $C$ -rates em uma célula  $\text{LiFePO}_4$  de 100 Ah (Fonte: LI e YUE, 2012).

Após essa discussão, vê-se que a célula pode ser compreendida como sendo a peça fundamental para o conjunto da bateria. Logo, faz-se necessário entender bem seu funcionamento e dimensioná-la corretamente, pois ao utilizar um conjunto de células para formar a bateria em si, é indicado que elas tenham níveis de tensão e capacidade energética dentro de uma mesma faixa de operação para a partir disso ser possível extrair o máximo de energia que ela poderá armazenar e fornecer.

Segundo (ANDREA, 2020), são características de uma célula de lítio saudável:

- Secundária, ou seja, é recarregável;
- Usa o eletrodo líquido ou em gel;
- Atende ao processo de intercalação dos íons de lítio durante a descarga e recarga e não acaba se tornando outro composto;
- Não contém lítio metálico a granel nem lítio elementar.

### 2.1.3 Estado de Carga (SOC - *State of Charge*)

Como visto anteriormente, o desempenho longo e seguro da bateria de lítio depende de algumas condições, variáveis e grandezas físicas como: tensão elétrica, corrente elétrica e temperatura. Elas podem ser lidas através de um sistema de sensoriamento. Porém, a energia e a potência que a bateria tem um determinado momento não podem ser adquiridas diretamente. Para conseguir esse objetivo, deve-se obter outras estimativas, como: estado de carga  $z_k$ , capacidade das células  $Q_k$ , resistência interna, dentre outros (a depender da aplicação). A partir do conhecimento dessas estimativas é possível desenvolver a estimativa para energia e potência.

O estado de carga, que é o ponto focal deste trabalho, está intrinsecamente relacionado à concentração média de lítio entre as partes dos eletrodos. Segundo (PLETT, 2015), para quantificar o estado de carga, é necessário saber o quanto de carga as células mantêm quando estão totalmente recarregadas e o quanto elas mantêm quando estão totalmente descarregadas, assim é possível determinar a capacidade total da bateria ou da célula em questão. Para representar a bateria totalmente recarregada tem-se  $z = 100\%$  e, no caso de totalmente descarregada,  $z = 0\%$ . Comumente utiliza-se a unidade de Ampere-hora ( $Ah$ ) para se referir a capacidade total. Sabe-se que carga é representada pela letra  $Q$ , e sua unidade de medida é o Coulomb (C); logo, faz-se necessário uma adequação para o ajuste em ampere-hora, em que  $1 Ah = 3600 C$ . O estado de carga está relacionado a capacidade total através da seguinte relação:

$$\frac{dz}{dt} = -\eta(t) \frac{i(t)}{Q}. \quad (2.1)$$

Segundo (PLETT, 2015), o termo  $\eta$  é a eficiência coulômbica ou eficiência de carga. Pode-se modelar  $\eta = 1$  para o sinal de corrente na descarga como positivo e  $\eta \leq 1$  no instante que a bateria está recarregando e a corrente é negativa. O motivo de ser menor que 1 é devido ao processo de recarga, onde algumas cargas que passam pelo conjunto de células acabam participando de reações não desejadas, o que acaba por diminuir o desempenho no estado de carga da célula. Um dos desafios atuais

reside em conseguir desenvolver modelos mais precisos para a eficiência de carga  $\eta(t)$ . Pode-se estimar o estado de carga a partir da equação (2.1), partindo de um intervalo de tempo  $\Delta t$ . Integrando (2.1), tem-se que:

$$z(t) = z(t_0) - \frac{1}{Q} \int_{t_0}^t \eta(\tau) i(\tau) d\tau. \quad (2.2)$$

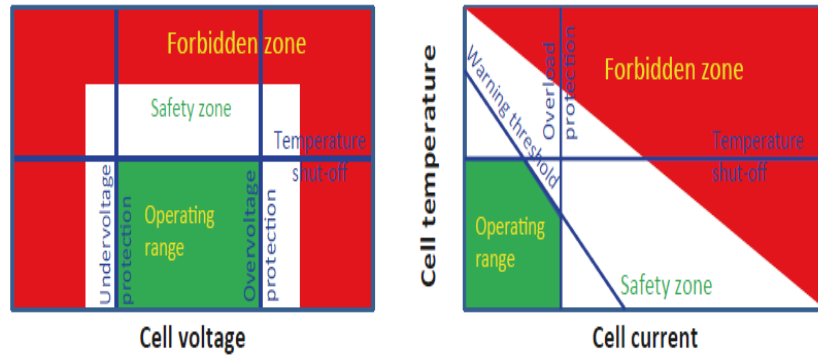
Existem modelos de circuitos equivalentes que podem partir dessa equação e incrementar modelos de circuitos para fazer a diminuição de erro e/ou melhorar a estimativa. Como outro exemplo de estimação de carga, tem-se o uso de algoritmos com filtro de Kalman, que pode adicionar um tratamento estatístico para os erros associados a leitura dos sensores de corrente e/ou outros dispositivos envolvidos no sistema. Isso permite com que seja possível prever com maior precisão o estado de carga, apesar desse método exigir uma complexidade maior ao processamento (PLETT, 2015).

#### 2.1.4 BMS - *Battery Management System*

Toda bateria de lítio deve ter um sistema de gerenciamento. O BMS é um sistema embarcado, ou seja, uma placa eletrônica com funções bem definidas do que deve ser monitorado e controlado. Cada bateria tem uma aplicação específica e, conseqüentemente, o BMS é projetado para atender os parâmetros citados nas seções anteriores. Mas em linhas gerais, o BMS tem como requisitos, segundo (PLETT, 2016):

- Monitoramento e controle de variáveis como: tensão elétrica, corrente elétrica e temperatura;
- Proteção das células, *pack* e operador;
- Interface de comunicação;
- Estimação do estado de carga (SOC), estado de saúde (SOH), dentre outros.

Dada essa lista de funções, é de se fundamentar que há uma espécie de área segura em que a bateria pode operar e, dentro desta, existe uma região em que é desejável que a bateria opere. A Figura 2.8 ilustra essas zonas.



**Figura 2.8:** Área de operação (Fonte: KORTHAUER, 2018).

É comum que o BMS também seja responsável por fornecer uma interface em que um operador possa comunicar a bateria com algum dispositivo, a depender da aplicação. Isto é interessante pois possibilita ao operador o monitoramento e/ou analisar/configurar alguns parâmetros da bateria ou de alguma(s) célula(s) em questão. Pode ser utilizado também para avaliar o comportamento da temperatura no sistema através da leitura dos sensores que há na bateria e, em alguns modelos, ainda há a possibilidade do registro de dados sendo monitorados a um intervalo constante. Outro tipo de registro comum de ser encontrado é o de eventualidades que podem ocorrer na bateria. Esse registro geralmente é feito independentemente do operador estar monitorando a bateria por meio de uma comunicação ou não. Porém, devido a se tratar de um sistema embarcado, consequentemente a memória é limitada e esse registro é feito apenas para condições específicas, por exemplo: registro do número de ciclos da bateria, dia e hora em que ela entrou em proteção por conta de um curto-circuito etc.

## 2.2 Sensoriamento - Circuito Eletrônico

Este tópico tem como objetivo discutir e mostrar os conceitos teóricos dos componentes eletrônicos utilizados na proposta do trabalho.

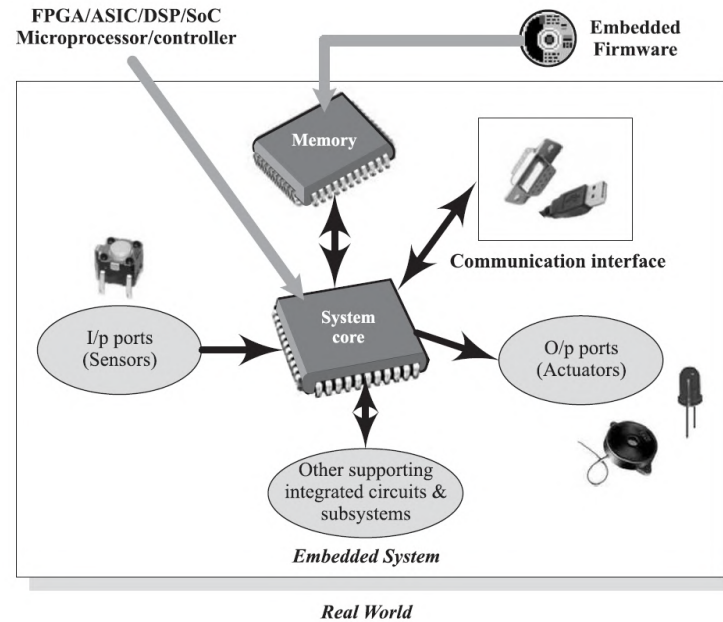
### 2.2.1 Sistemas Embarcados - Microcontrolador

Para se entender a finalidade e características de um microcontrolador, é útil entender o conceito de sistemas embarcados, que é algo bastante presente na sociedade do século XXI. Segundo (VALLATHAI, 2017), é possível definir um sistema embarcado como sendo um sistema eletrônico/eletro-mecânico, projetado com a finalidade de realizar um conjunto de tarefas específicas, e que é uma combinação de *hardware* e *firmware*.

A partir dessa definição, compreende-se que o mundo atual utiliza-se de vários equipamentos que fazem proveito de sistemas embarcados, por exemplo: equipamentos hospitalares, automóveis, equipamentos industriais, e claro o BMS, já citado anteriormente. Nessa conjuntura, segundo (VALLATHAI, 2017), pode-se dividir e classificar os sistemas embarcados da seguinte forma:

- Baseados em geração;
- Complexidade e requisitos de desempenho;
- Baseados em comportamentos determinísticos;
- Baseados em acionamentos (*triggering*).

Neste trabalho será abordado o microcontrolador como ponto focal dos sistemas embarcados. Ele, por sua vez, desempenha o papel de ser o responsável por fazer o gerenciamento entre os dados que chegam através das portas de entrada, o processamento desses dados, o acesso à memória e também o fornecimento das saídas para as tarefas que devem ser desempenhadas. A Figura 2.9 ilustra esse processo.



**Figura 2.9:** Sistemas embarcados (Fonte: VALLATHAI, 2017).

O microcontrolador caracteriza-se por estar encapsulado em um chip e possuir: unidade central de processamento (CPU), terminais de entrada e saída, memórias de acesso aleatório (RAM) e memória de apenas leitura (ROM) utilizada principalmente para o armazenamento dos programas (VALLATHAI, 2017). Esse conjunto de fatores faz do microcontrolador um dispositivo de custo baixo, limitado e feito para atividades específicas. São exemplos de microcontroladores: a família dos PIC (PIC16F877A), STM32F103C8T6, MSP430G2553 etc.

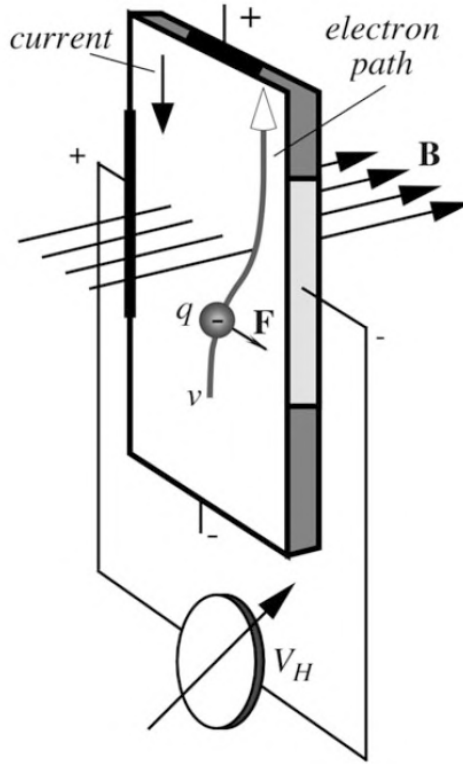
## 2.2.2 Sensores de Corrente

Com relação ao uso do sensoriamento de corrente para aplicações em baterias, dois dispositivos se destacam, os resistores *Shunt* e os sensores de efeito Hall. Como a proposta do trabalho baseia-se em um método não invasivo, será discutido com mais detalhe o sensor de efeito Hall.

(FRADEN, 2016) mostra que o efeito Hall está fundamentado na interação entre os portadores de carga móveis, que para o caso em questão são os elétrons, e um campo magnético externo. Através da lei de Faraday, e o fato que quando um elétron se desloca por um campo magnético, existe força lateral que atua sobre o mesmo, pode-se trabalhar na seguinte equação:

$$\vec{F} = q(\vec{v} \times \vec{B}). \quad (2.3)$$

Em que  $\vec{F}$  é força eletromotriz,  $q$  é a carga do elétron, que é igual a  $1.6 \cdot 10^{-19}$ ,  $\vec{v}$  a velocidade do elétron e  $\vec{B}$  é o campo magnético.



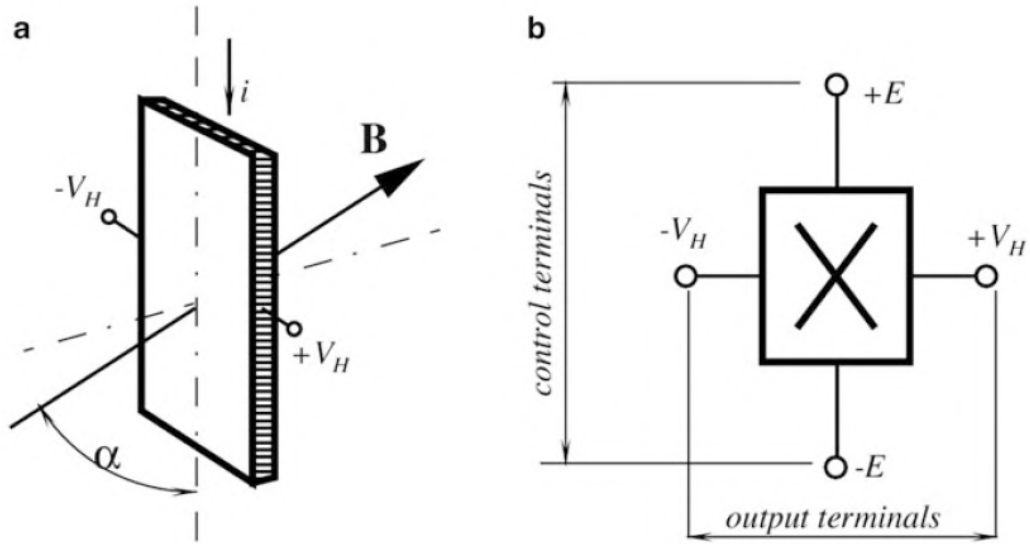
**Figura 2.10:** Efeito Hall (Fonte: FRADEN, 2016).

O elétron ao passar pelo condutor eventualmente chega a placa, e lá sofrerá o desvio em sua trajetória, como indica a Figura 2.10 devido a presença do campo magnético externo, isso faz o acúmulo de elétrons em um lado maior seja maior que o outro, gerando assim a diferença de potencial de Hall  $V_H$ . Ou seja, a magnitude desse potencial vai depender tanto da magnitude quanto das direções do campo magnético e também da corrente elétrica (FRADEN, 2016).

Ao assumir que a temperatura seja constante, pode-se trabalhar com a equação (2.4), em que o alfa  $\alpha$  representa o ângulo com relação ao vetor do campo magnético e a placa de Hall, o  $h$  está relacionado às características do material da placa e sua geometria, é conhecido como coeficiente de sensibilidade global (FRADEN, 2016).

A Figura 2.11 ilustra este funcionamento.

$$V_H = h \cdot i \cdot B \cdot \sin(\alpha). \quad (2.4)$$



**Figura 2.11:** Terminais do sensor de efeito Hall (Fonte: FRADEN, 2016).

No geral, quando se trabalha com sensores vale destacar algumas das características que são inerentes a eles, são exemplos: faixa de trabalho de entrada, faixa de trabalho de saída, acurácia, resolução, histerese, não-linearidade, saturação, erro, repetibilidade, zona morta, dentre outros. Cada tópico desse é uma área de estudo que pode ser analisada mais cuidadosamente a depender da precisão do objeto de estudo/trabalho.

### 2.2.3 Conversor de Tensão DC-DC

Como previamente discuto, as baterias de lítio necessitam de um BMS para seu monitoramento e controle, porém os componentes que o constituem necessitam ser energizados. Para o trabalho proposto, os componentes utilizados também necessitam ser alimentados, tendo em vista que serão usados o sensor e o amplificador operacional. É de extrema importância que a tensão de trabalho atenda às es-

pecificações dos seus *datasheets*, isso faz com que seja necessário reduzir a tensão proveniente dos terminais da bateria. Uma das soluções para esses casos é o uso de um circuito eletrônico que seja responsável por reduzir a tensão. É nesse ponto que entra o conversor de tensão DC-DC do tipo *Step-Down* ou *Buck*. Em seu funcionamento há um balanceamento no que diz respeito a forma com que a potência de entrada é obtida, e que a potência de saída seja a mais próxima possível, em valor, da potência de entrada, pois é notório que em todo sistema há perdas envolvidas, tanto por imperfeições dos componentes, como também pela energia que o dispositivo solicita para funcionamento (HART, 2011).

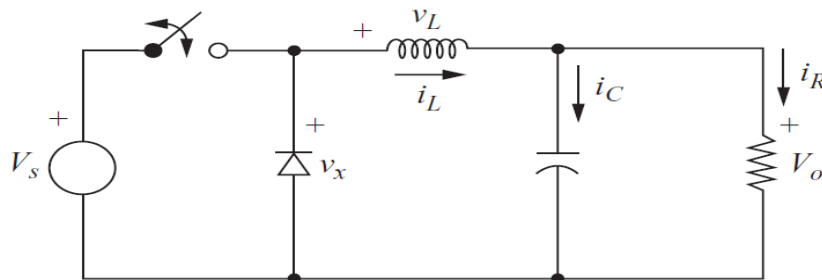
No geral, tem-se a seguinte relação considerando conversores chaveados, que auxiliará o entendimento do conversor *Buck*:

$$V_0 = \frac{1}{T} \int_0^T v_0(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^{DT} V_S dt = V_S D. \quad (2.5)$$

Em que o termo  $D$  é a taxa com que a chave alterna entre os estados fechada e aberta e vem do termo *Duty Cycle*. Assim, tem-se:

$$D = \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}} = \frac{t_{on}}{T} = t_{on} f. \quad (2.6)$$

O conversor *Buck* em seu funcionamento é basicamente a reprodução de um valor médio de tensão na saída que venha a ser menor que o valor médio de tensão de entrada. Com relação a corrente média de saída ela será maior que a corrente média de entrada, respeitando assim o princípio de conservação de energia, (MARTINS e BARBI, 2006). A Figura 2.12 ilustra um exemplo de conversor *Buck*.



**Figura 2.12:** Conversor Buck (Fonte: HART, 2011).

Segundo (HART, 2011), os conversores *Buck* de uma maneira geral, têm as

seguintes propriedades quando operam no estado permanente/estacionário:

- A corrente no indutor é periódica;

$$i_L(t + T) = i_L(t). \quad (2.7)$$

- A tensão média no indutor é zero;

$$V_L = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} v_L(\lambda) d\lambda = 0. \quad (2.8)$$

- A corrente média no capacitor é zero;

$$I_C = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} i_C(\lambda) d\lambda = 0. \quad (2.9)$$

- A potência fornecida pela fonte será a mesma da potência entregue a carga, para componentes ideais. Para os componentes reais, há uma perda somada a equação:

$$P_{sai} = P_{ent} + P_{perdas}. \quad (2.10)$$

Fazendo as análises com a chave fechada e aberta e manipulando as equações, chega-se a equação (2.5). As manipulações e detalhes podem ser encontradas na bibliografia citada. Vale salientar que existem diversas configurações para se fazer o circuito *Buck*, esta utilizada, foi para dar noção do seu funcionamento de uma maneira geral.

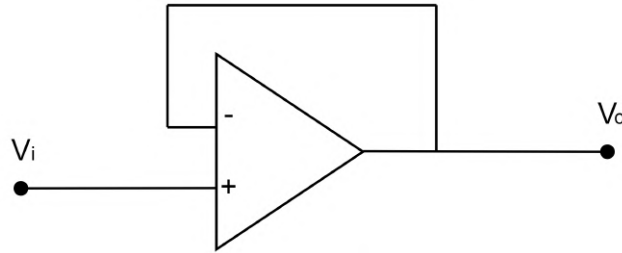
## 2.2.4 Amplificador *Buffer*

Comumente chamado de seguidor de tensão, o amplificador *buffer*, segundo (PERTENCE JÚNIOR, 2012), tem diversas aplicações: separação de estágios, casamento de impedância, reforçador de corrente etc.

Uma característica que se destaca é justamente de apresentar o ganho unitário, ou seja, o sinal de entrada é replicado na saída.

$$A_{vf} = \frac{V_o}{V_i} = 1. \quad (2.11)$$

Um outro ponto essencial é que apresenta uma alta impedância na entrada e uma baixa impedância na saída, o que pode vir a ser útil para algumas implementações. A Figura 2.13 mostra uma representação deste circuito.



**Figura 2.13:** Representação do amplificador *Buffer* (Fonte: o autor).

Essas características fazem com que ele seja bastante útil quando se deseja isolar, na intenção de proteger, um estágio de um circuito de outro estágio.

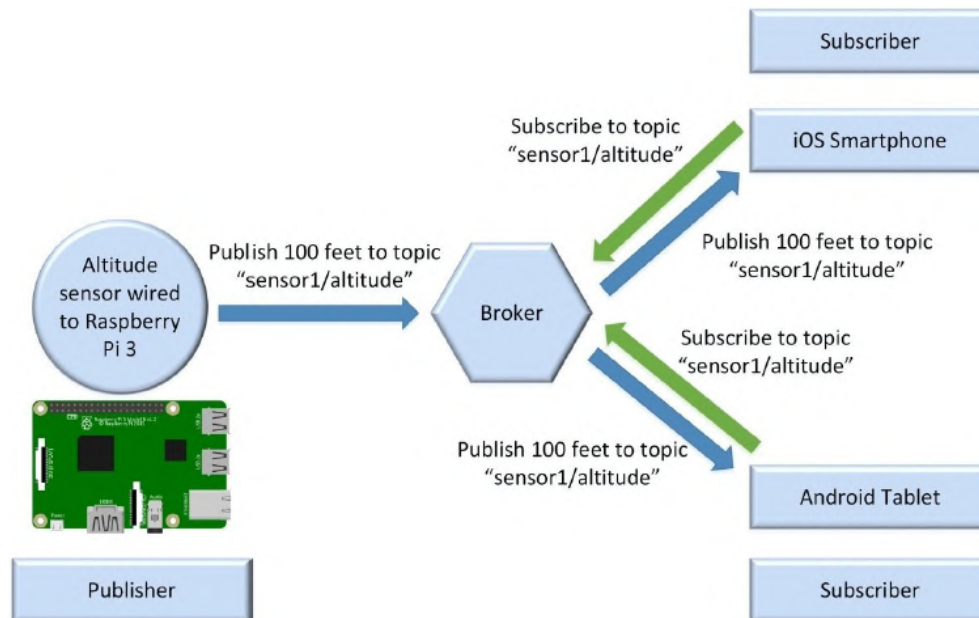
## 2.3 Comunicação

A área de comunicação é bastante ampla, tanto no contexto geral, como no contexto deste trabalho. Porém, o enfoque teórico será com relação ao envio de dados do microcontrolador, por uma via de rede sem fio, na utilização do protocolo MQTT.

### 2.3.1 MQTT

Habitualmente o MQTT (*Message Queuing Telemetry Transport*) é usado para aplicações com IoT, devido a sua facilidade na comunicação e necessidade de transmitir, receber dados em tempo real, usar uma transmissão *wireless* dentre outros fatores. O protocolo MQTT é baseado na troca de informação máquina-máquina M2M, e opera no modo de publicação/assinatura. Onde os dispositivos estarão ligados a um tópico em interesse, e poderão publicar a esse tópico (envio de dados) ou receber as mensagens (recepção).

Para realização dessa comunicação é utilizado um intermediário, chamado de *Broker*, em que seu papel é justamente fazer esse gerenciamento entre as mensagens (HILLAR, 2017).



**Figura 2.14:** Exemplo de arquitetura do MQTT (Fonte: HILLAR, 2017).

Segundo (HILLAR, 2017), um tópico pode ser definido como um canal em que o *broker* será o responsável por enviar as mensagens(dados) até os dispositivos que estão com a assinatura/inscrição para aquele tópico, garantindo assim a associação dos dispositivos. Vale destacar que esses modos podem ser trabalhados tanto de maneira síncrona como assíncrona, a depender dos requisitos do projeto.

## 2.4 Computação em Nuvem

Com o avanço da tecnologia, principalmente na virada do século, o número de dados gerados através dos dispositivos chegam a valores em grande escala, e em alguns casos o armazenamento no local físico passa a ser inviável, por diversos fatores, como: limitação física da localização do dispositivo, aumento da demanda (geração de mais dados, conseqüentemente a necessidade de readequação do projeto de memória ligado ao dispositivo), necessidade de *backup*, segurança dos dados e dos

próprios *data centers* etc.

Segundo (SEHGAL et al., 2022), quando os clientes fazem o uso da nuvem, geralmente é para atender à alguma dessas demandas e características:

- Atribuições com relação a carga de trabalho, que envolve: desempenho, complexidade da integração, o tamanho dos dados e segurança;
- Necessidades do negócio, como: regulamentações, amplitude para alcance geográfico, tempo para implementação;
- Disponibilidade do ecossistema referente ao serviço escolhido, variabilidade na oferta dos serviços.

Pode-se citar também como características da nuvem, (SEHGAL et al., 2022):

- Alocação de recursos e transferência/migração de dados, a nuvem faz com que o cliente não tenha a necessidade de se preocupar com a compra de um novo servidor, com isso a sua instalação física e de sistema operacional, e consequentemente a transferência de dados;
- A escalabilidade é contínua, ou seja, o conceito de ser necessário projetar o *hardware* e *software* para atender a um certo volume de demanda é trocado para o conceito de pagar apenas pelo que é utilizado pelo cliente, semelhante ao que acontece nas despesas de energia elétrica, por exemplo;
- Acréscimo no multi-inquilinato, pois devido ao uso de computadores com *multicore* e também a questão da virtualização, faz com que seja possível vários clientes utilizarem um mesmo servidor, em que cada um terá sua máquina virtual individualizada.

Uma forma de categorizar as aplicações da computação em nuvem diz respeito aos seus tipos e utilidades:

- *IaaS* - Infraestrutura como serviço: consiste em o usuário alugar a infraestrutura que está a disposição na nuvem, seja por máquinas (computadores) vir-

tuais, *hardware* dedicado, gerenciamento do armazenamento de dados, criação de redes virtuais etc;

- *PaaS* - Plataforma como serviço: proporciona o ambiente para a elaboração do desenvolvimento, execução de testes e gerenciar de uma maneira geral as aplicações referentes aos *softwares*. É comum os serviços já fornecerem uma IDE;
- *SaaS* - *Software* como serviço: usualmente referido a quando o usuário já está em contato direto com a aplicação(*software*), ou seja, não é necessário se empenhar a respeito da infraestrutura ou a manutenção do serviço.

Em suma, o uso da computação em nuvem pode vir a trazer vantagens em relação ao modo tradicional de computação, como citado anteriormente. Alguns pontos devem ser avaliados para se ter uma boa noção do *trade-off*, dentre os desafios encontrados e o que a *cloud* pode oferecer, segundo (DONNO et al., 2012) têm-se alguns destes desafios como:

- Busca pela baixa latência, ou seja, demandas como *IoT* em veículos necessitam que o tempo de resposta seja o menor possível;
- Aumento na largura de banda, o aumento no tráfego de dados também gera a necessidade de uma largura de banda de rede alta, isso gera desafios tanto nos aspectos físicos dos componentes como na questão da segurança dos dados;
- Limitação de recursos, muitos dos dispositivos e sensores utilizados não fazem a comunicação com a nuvem diretamente, isso requer o uso de protocolos de comunicação diversos e cada qual com sua complexidade.

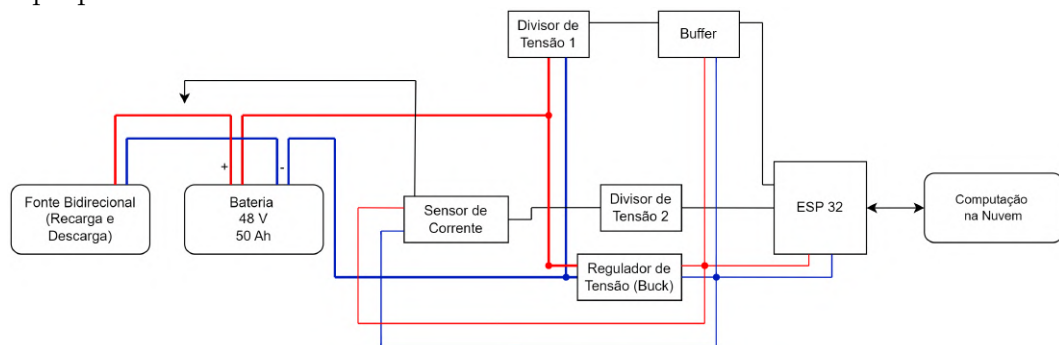
## Capítulo 3

# Desenvolvimento

A partir dos assuntos abordados no capítulo anterior, este capítulo indicará como a proposta de solução para o trabalho foi pensada e desenvolvida, serão especificados os equipamentos utilizados, seus parâmetros e os porquês. Ao final serão apresentados os resultados encontrados por diversas fontes (BMS, computação em nuvem, dentre outros) e também será feita uma análise a respeito deles.

### 3.1 Sistema Proposto

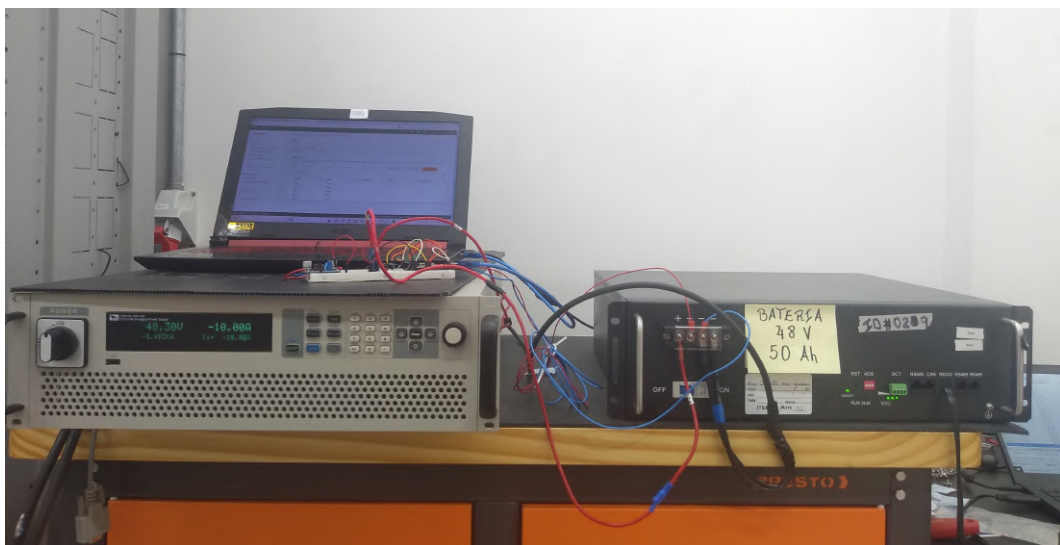
Com o intuito de criar um circuito externo a bateria, ou seja, que não estivesse ligado diretamente ao BMS, foi pensando um conjunto de elementos que farão o sensoriamento e envio de dados. Na Figura 3.1 está um diagrama de blocos para a solução proposta.



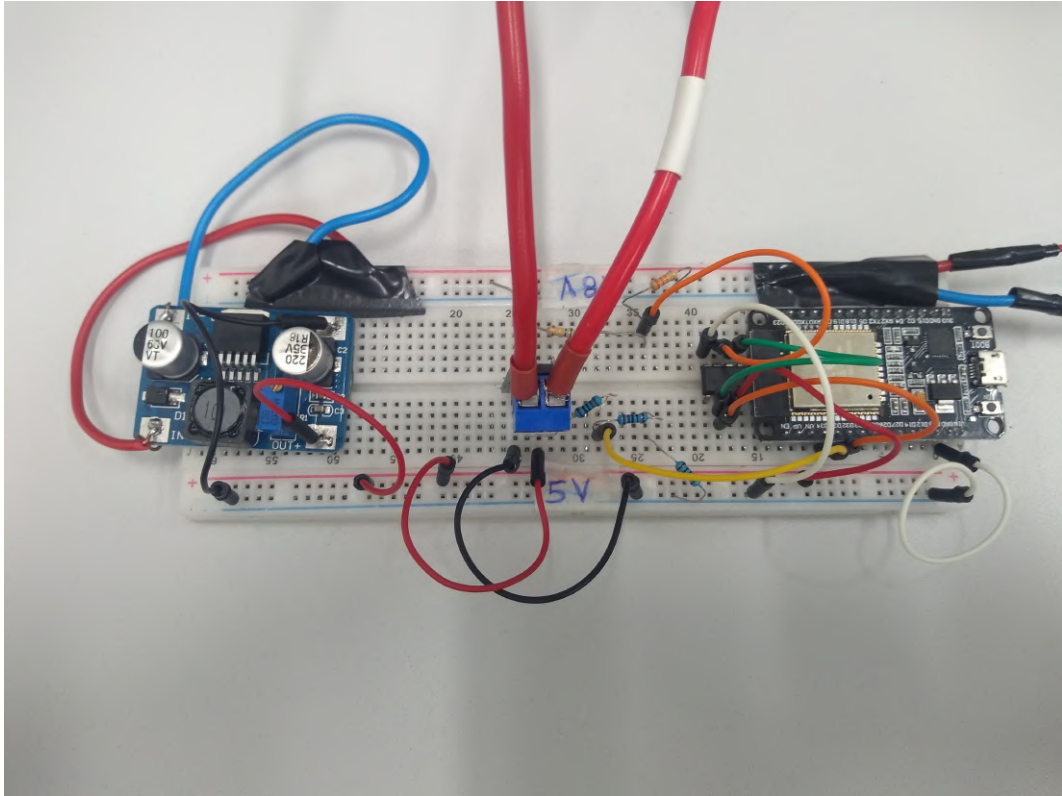
**Figura 3.1:** Diagrama de blocos do sistema proposto (Fonte: o autor).

A bateria escolhida para a realização dos testes é de íon-lítio com química LFP

e modelo 48V50Ah. O microcontrolador utilizado para o projeto é o da *DevKit* ESP32. Será usada uma fonte bidirecional para realizar a recarga e descarga da bateria, com ela também é possível configurar o *C-rate*, ou seja, a corrente elétrica que irá passar. O uso do circuito regulador de tensão se dá para fornecer 5V aos circuitos integrados que necessitam dessa de alimentação. Associado ao sensor de corrente está um divisor de tensão para garantir que o sinal de entrada na ESP32 não ultrapasse os 3,3 V, o outro divisor de tensão foi pensado com a finalidade de indicar a variação de tensão elétrica que ocorre nos terminais de bateria e fazer essa faixa de valores de acordo com os permitidos pela entrada da ESP32 (0 - 3,3V). A aplicação do *buffer* se deu como um circuito de segurança, serve apenas para replicar a tensão de entrada, ou seja  $V_i = V_o$ , já que as tensões que envolvem o microcontrolador costumam ser mais baixas que os valores de fato encontrados nos terminais da bateria. O serviço de armazenamento escolhido foi a *Amazon Web Services* - AWS, que será responsável por receber as mensagens provenientes da ESP32 através do protocolo MQTT, passará por um serviço de *streaming* de dados (*Amazon Kinesis Data Firehouse*) e por fim, armazenará em um *bucket* da *Simple Storage Service* - S3. A partir disso o SOC é calculado no microcontrolador e os valores de tensão elétrica, corrente elétrica, capacidade energética e SOC são enviados à nuvem. As Figuras 3.2 e 3.3 mostram como ficou a proposta.



**Figura 3.2:** Configuração do sistema (Fonte: o autor).



**Figura 3.3:** *Protoboard* com a solução proposta (Fonte: o autor).

## 3.2 Equipamentos Utilizados

Com relação aos equipamentos e componentes utilizados para a montagem do sistema proposto, segue a lista:

- Bateria 48V50Ah - Moura Solar Lítio;
- Fonte Bidirecional Itech - IT6012C-300-150;
- Resistores de  $1\text{ k}\Omega$ ,  $33\text{ k}\Omega$ ,  $560\text{ k}\Omega$ ;
- Amplificador Operacional UA741CP;
- Sensor de Corrente de Efeito Hall ASC712T;
- Conversor *Step Down* - Buck LM2576HV;
- Microcontrolador ESP 32 - DevKit;
- Condutores elétricos.

Com relação aos instrumentos utilizados para medições:

- Multímetro Fluke 287;
- Multímetro Hioki DT4282;
- Alicates Amperímetro Hioki CM4375-50.

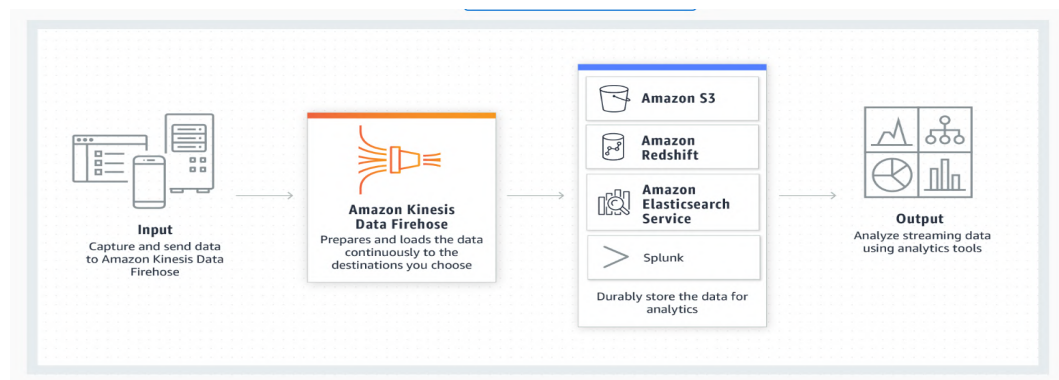
## 3.3 Serviço da Computação em Nuvem - AWS

Como mencionado anteriormente, o serviço de computação em nuvem utilizado foi a AWS. As soluções ofertadas pela plataforma e escolhidas foram:

- IoT *Core* - AWS IoT: solução encontrada para fazer o gerenciamento do dispositivo ESP32, com ele é possível obter os dados enviados da ESP32 utilizando o sistema de tópico que faz parte do protocolo MQTT. Essa comunicação é protegida através de criptografia, ou seja, o serviço fornece as chaves privadas

e públicas que fazem com que seja possível obter uma comunicação do dispositivo com a *Cloud* de forma segura, esses certificados/chaves são baixados para o computador de quem está o configurando e colocadas no código da ESP32, na própria aplicação há uma aba de teste de cliente em que é possível observar os dados que estão sendo recebidos e enviados, caso haja a necessidade;

- *Amazon Kinesis Data Firehose*: serviço utilizado para executar um *pipeline* de dados, ou seja, com ele é possível fazer a extração, transformação e carregamento dos dados. Foi a solução encontrada para fazer o gerenciamento do *streaming* dos dados provenientes do *IoT Core* devido a sua simplicidade e facilidade de lidar com os dados em tempo real e configuração de estrutura. Em suma, ele ficará responsável por captar os dados do *IoT Core* e ir entregando em pacotes para o *Bucket* na S3.



**Figura 3.4:** Amazon Kinesis (Fonte: AWS).

- *S3 - Simple Storage Service*: foi o recurso empregado para fazer o armazenamento dos dados oriundos do *Kinesis* e *IoT Core*. Ele foi escolhido devido a alguns fatores, como: ampla escalabilidade, ou seja, o tamanho dos arquivos não é um fator que prejudique seu armazenamento, devido a facilidade de se adaptar automaticamente às demandas de armazenamento, há também a possibilidade de configuração do acesso aos dados, opções de gerenciamento, sendo possível modificar as classes de armazenamento. Através da tecnologia de *buckets* é possível armazenar os dados com a flexibilidade do sistema e ajustar para a necessidade de capacidade de armazenamento e padronização

no armazenamento dos dados.



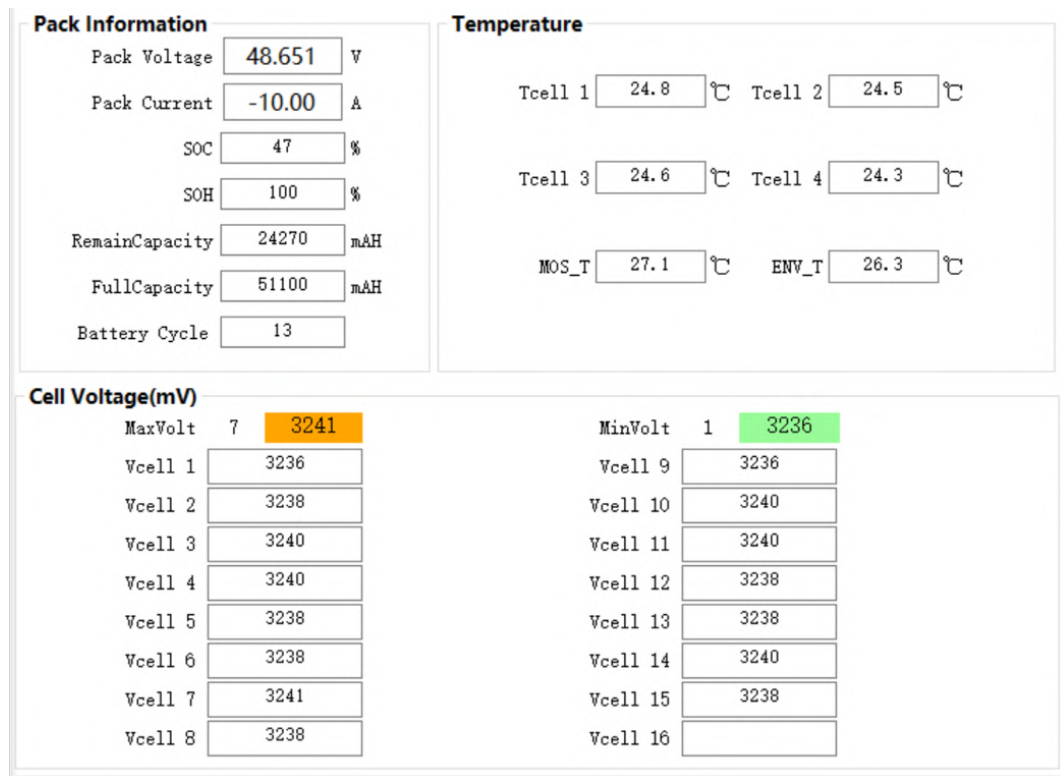
**Figura 3.5:** Amazon S3 (Fonte: AWS).

## 3.4 Resultados e Análises

O experimento com relação ao sistema foi feito em duas etapas, uma descarga e uma recarga, ambas a 0,2 C (*C-rate*), como o modelo da bateria é 48V50Ah, a corrente elétrica é de 10 A.

### 3.4.1 Descarga 0,2 C (10 A)

A corrente elétrica foi configurada através da fonte bidirecional, ou seja, ela atuou como a carga que requisitou o fornecimento de energia proveniente da bateria. Também foi colocado um computador adicional para fazer a comunicação com o BMS da bateria e o registro de dados ao longo do tempo, com a finalidade de fazer a comparação dos estados de carga e o acompanhamento das outras variáveis, como tensão elétrica e corrente elétrica. Isto está indicado nas Figuras 3.6 e 3.7. Vale ressaltar que o registro das imagens foi realizado em momentos distintos, justamente para mostrar o processo da descarga. Com relação aos dados provenientes da ESP32 e os que chegavam a AWS, tem-se as Figuras 3.8 e 3.9.



**Figura 3.6:** Dados do BMS da bateria na descarga (Fonte: o autor).

Os dados registrados pelo monitoramento feito no BMS tem o passo de 1 segundo. A Figura 3.7 indica algumas das variáveis que são acompanhadas. Esses dados podem ser baixados, gerando um arquivo com extensão .xlsx.

| Pack Current(A) | Pack Voltage(V) | RemainCapacity(AH) | FullCapacity(AH) | MaxVolt(mV) | MinVolt(mV) |
|-----------------|-----------------|--------------------|------------------|-------------|-------------|
| -10.00          | 48.360          | 16.960             | 51.100           | 3221        | 3216        |
| -10.00          | 48.360          | 16.950             | 51.100           | 3221        | 3216        |
| -10.00          | 48.359          | 16.950             | 51.100           | 3221        | 3216        |
| -10.00          | 48.359          | 16.950             | 51.100           | 3221        | 3216        |
| -10.00          | 48.359          | 16.940             | 51.100           | 3221        | 3216        |
| -10.00          | 48.359          | 16.940             | 51.100           | 3221        | 3216        |
| -10.00          | 48.359          | 16.940             | 51.100           | 3221        | 3216        |
| -10.00          | 48.359          | 16.940             | 51.100           | 3221        | 3216        |
| -10.00          | 48.359          | 16.930             | 51.100           | 3221        | 3216        |
| -10.00          | 48.359          | 16.930             | 51.100           | 3221        | 3216        |
| -10.00          | 48.358          | 16.930             | 51.100           | 3221        | 3216        |
| -10.00          | 48.358          | 16.920             | 51.100           | 3221        | 3216        |
| -10.00          | 48.358          | 16.920             | 51.100           | 3221        | 3216        |
| -10.00          | 48.356          | 16.920             | 51.100           | 3221        | 3216        |
| -10.00          | 48.356          | 16.910             | 51.100           | 3221        | 3216        |
| -10.00          | 48.356          | 16.910             | 51.100           | 3221        | 3216        |
| -10.00          | 48.356          | 16.910             | 51.100           | 3221        | 3216        |
| -10.00          | 48.356          | 16.910             | 51.100           | 3221        | 3216        |
| -10.00          | 48.356          | 16.900             | 51.100           | 3221        | 3216        |

**Figura 3.7:** Dados do monitoramento da bateria através do BMS (Fonte: o autor).

```

-----
Corrente Real: 10.04
-----
Tensão Real: 48.49
-----
Carga parcial: 0.028
Carga acumulada: 26.882
SoC DCH: 47.39 %
*****
-----
Corrente Real: 9.88
-----
Tensão Real: 48.41
-----
Carga parcial: 0.027
Carga acumulada: 26.910
SoC DCH: 47.34 %
*****
-----
Corrente Real: 9.96
-----
Tensão Real: 48.43
-----
Carga parcial: 0.028
Carga acumulada: 26.937
SoC DCH: 47.29 %
*****
-----
Corrente Real: 9.99
-----
Tensão Real: 48.33
-----
Carga parcial: 0.028
Carga acumulada: 26.965
SoC DCH: 47.23 %
*****

```

**Figura 3.8:** Monitor serial da ESP32 (Fonte: o autor).

Com relação ao sistema proposto, o envio dos dados coletados era feito ao passo de 10 segundos, a Figura 3.8 indica como a ESP32 estava recebendo e tratando esses valores, e na Figura 3.9 como eles chegavam à nuvem.

```

▼ esp32/pub-s3 August 25, 2023, 13:12:06 (UTC-0300)

{
  "Data_Hora": "25-08-2023 13:12:07",
  "corrente": 9.688589096,
  "tensao": 48.34050293,
  "Ah_parcial": 28.45787048,
  "SOC_DCH": 44.30945206
}

► Properties

```

**Figura 3.9:** Dados que chegam a AWS por meio do protocolo MQTT (Fonte: o autor).

A respeito dos dados armazenados na S3, foi utilizado um *bucket* e os dados foram sendo armazenados em pacotes referentes às horas em que eram coletados. Eles são enviados em formatos JSON para o *AWS IoT*, e juntamente com o Kinesis, formam um arquivo contendo esses JSON, que são armazenados no *buckets*. Também foi feita a configuração na S3 para que cada arquivo conseguisse armazenar durante 15 minutos de captação dos dados, ou seja, cada pasta referente a hora em que estava sendo rodado o experimento correspondia a 4 arquivos contendo os valores provenientes da ESP32. As Figuras 3.10, 3.11 e 3.12 indicam esse processo.

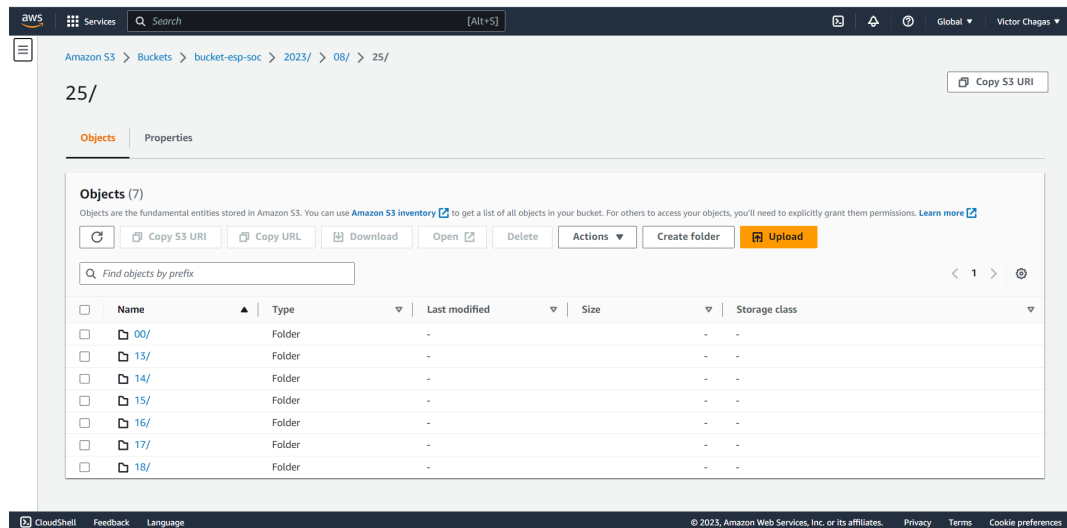


Figura 3.10: Armazenamento na S3 (Fonte: o autor).

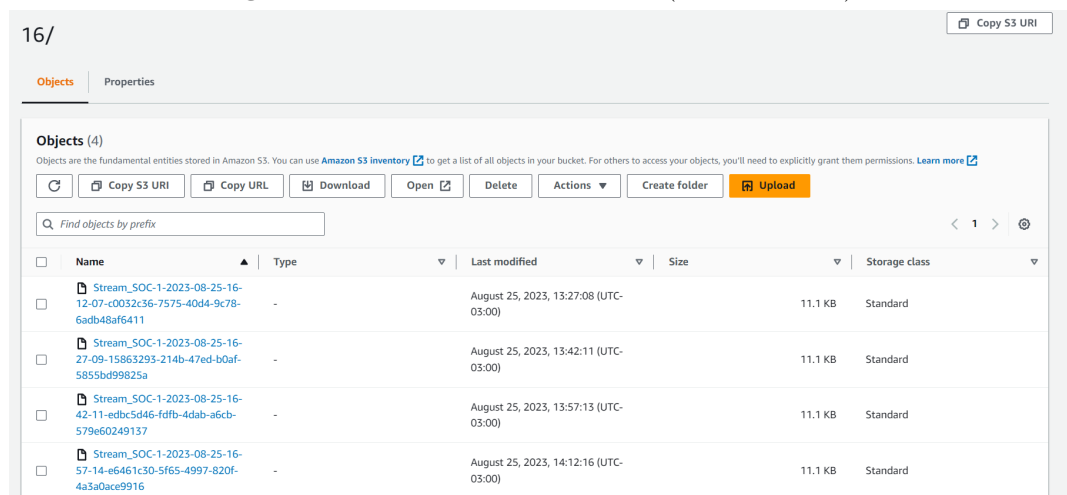


Figura 3.11: Arquivos armazenados (Fonte: o autor).

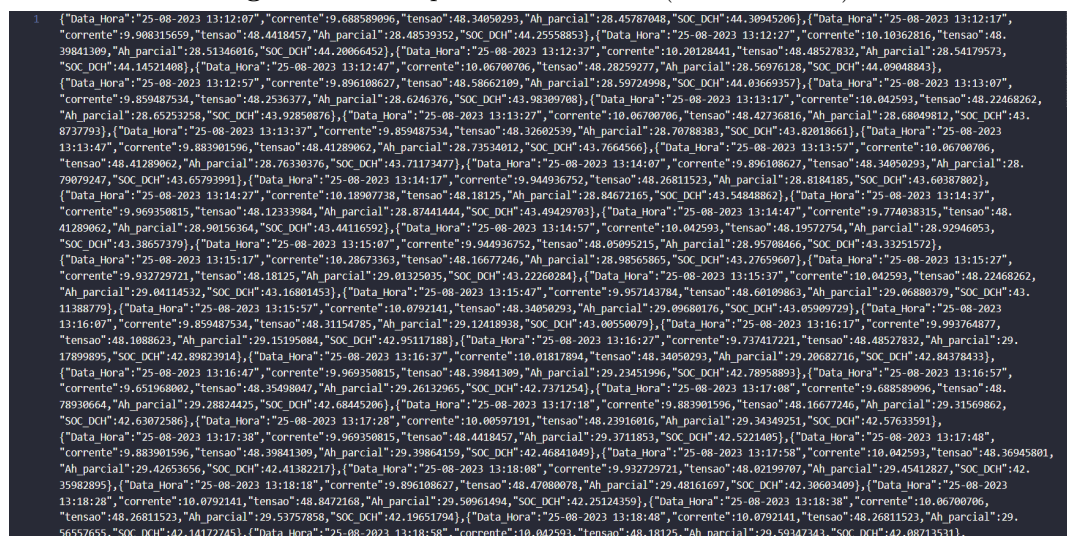
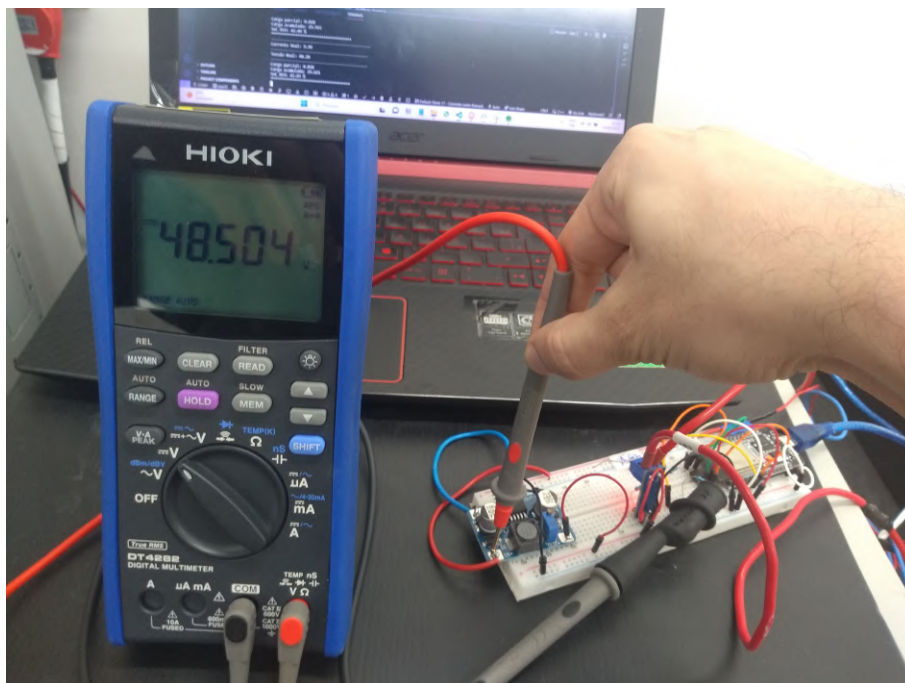
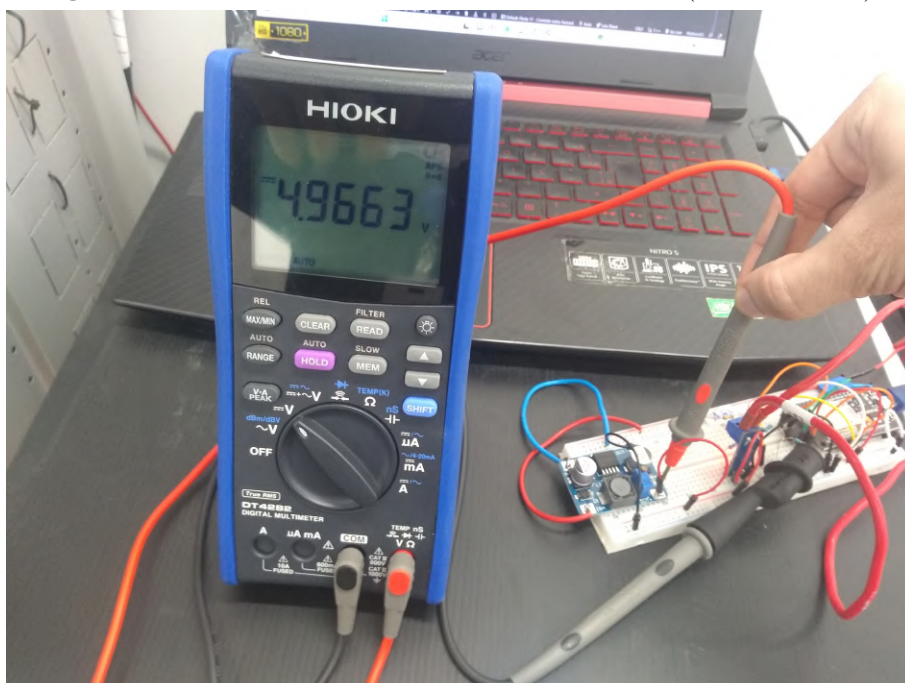


Figura 3.12: Dados da bateria armazenados (Fonte: o autor).

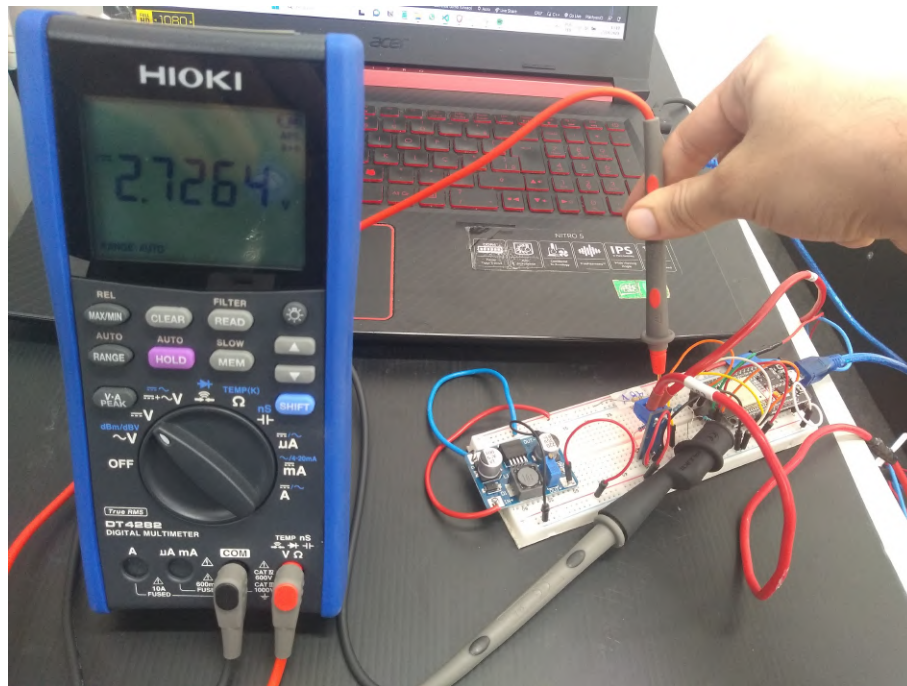
Durante o experimento também foram verificados alguns valores de tensão elétrica e o valor de corrente elétrica por meio dos equipamentos multímetro e alicate amperímetro. As Figuras 3.13, 3.14, 3.15, 3.16 indicam esses registros.



**Figura 3.13:** Tensão elétrica nos terminais da bateria (Fonte: o autor).



**Figura 3.14:** Saída do conversor DC-DC (Fonte: o autor).



**Figura 3.15:** Sinal referente a tensão elétrica da bateria (Fonte: o autor).



**Figura 3.16:** Registro da corrente elétrica no alicate amperímetro (Fonte: o autor).

Com a descarga finalizada, os dados foram baixados e tratados para gerar a planilha deles. Com relação aos que eram armazenados na *S3*, foi realizado um código em *Python* para fazer a junção dos pacotes, criar o *data frame* e gerar o arquivo *.xlsx*.

Ao analisar o comportamento da bateria ao longo do tempo, percebe-se que o estado de carga calculado pelo sistema proposto esteve próximo ao registrado pelo BMS, com uma diferença em torno de 0.6 % ao final da descarga. Uma observação a ser feita é que o BMS entrou em proteção quando a bateria estava com aproximadamente 1,14% de estado de carga. As Figuras 3.17, 3.18, 3.19 e 3.20 mostram estes fatos. Ao lado esquerdo estão os dados referentes ao sistema proposto e na direita

estão os registros feitos pelo *software* do BMS.

| A          | B        | C        | D      | E          | F           | G       | H | I |
|------------|----------|----------|--------|------------|-------------|---------|---|---|
| Data       | Hora     | Corrente | Tensão | Ah parcial | SOC_DCH     | SOC (%) |   |   |
| 25-08-2023 | 10:11:45 | 0.00     | 50.64  | 0.00       | 100         | 100.00% |   |   |
| 25-08-2023 | 10:11:55 | 0.00     | 50.54  | 0.00       | 100         | 100.00% |   |   |
| 25-08-2023 | 10:12:05 | 0.00     | 50.64  | 0.00       | 100         | 100.00% |   |   |
| 25-08-2023 | 10:12:15 | 0.00     | 50.73  | 0.00       | 100         | 100.00% |   |   |
| 25-08-2023 | 10:12:25 | 0.00     | 50.50  | 0.00       | 100         | 100.00% |   |   |
| 25-08-2023 | 10:12:35 | 0.00     | 50.56  | 0.00       | 100         | 100.00% |   |   |
| 25-08-2023 | 10:12:45 | 0.00     | 50.70  | 0.00       | 100         | 100.00% |   |   |
| 25-08-2023 | 10:12:55 | 0.00     | 50.66  | 0.00       | 100         | 100.00% |   |   |
| 25-08-2023 | 10:13:05 | 0.00     | 50.70  | 0.00       | 100         | 100.00% |   |   |
| 25-08-2023 | 10:13:15 | 0.00     | 50.73  | 0.00       | 100         | 100.00% |   |   |
| 25-08-2023 | 10:13:25 | 0.00     | 50.73  | 0.00       | 100         | 100.00% |   |   |
| 25-08-2023 | 10:13:35 | 0.00     | 50.64  | 0.00       | 100         | 100.00% |   |   |
| 25-08-2023 | 10:13:45 | 0.00     | 50.66  | 0.00       | 100         | 100.00% |   |   |
| 25-08-2023 | 10:13:55 | 16.13    | 49.35  | 0.08       | 99.90305479 | 99.81%  |   |   |
| 25-08-2023 | 10:21:39 | 10.13    | 49.80  | 0.07       | 99.85323334 | 99.85%  |   |   |
| 25-08-2023 | 10:21:49 | 10.14    | 49.67  | 0.10       | 99.79811096 | 99.80%  |   |   |
| 25-08-2023 | 10:21:59 | 10.09    | 49.67  | 0.13       | 99.74325262 | 99.74%  |   |   |
| 25-08-2023 | 10:22:09 | 9.85     | 49.66  | 0.16       | 99.68972778 | 99.69%  |   |   |
| 25-08-2023 | 10:22:19 | 10.01    | 49.66  | 0.19       | 99.63533783 | 99.64%  |   |   |
| 25-08-2023 | 10:22:29 | 9.84     | 49.34  | 0.21       | 99.58327103 | 99.58%  |   |   |
| 25-08-2023 | 10:22:39 | 10.04    | 49.44  | 0.24       | 99.53270271 | 99.53%  |   |   |
| 25-08-2023 | 10:22:49 | 10.10    | 49.34  | 0.27       | 99.47235877 | 99.47%  |   |   |
| 25-08-2023 | 10:22:59 | 9.92     | 49.35  | 0.30       | 99.41842651 | 99.42%  |   |   |
| 25-08-2023 | 10:23:09 | 10.07    | 49.32  | 0.33       | 99.36578063 | 99.36%  |   |   |
| 25-08-2023 | 10:23:19 | 9.99     | 49.34  | 0.35       | 99.30937958 | 99.31%  |   |   |
| 25-08-2023 | 10:23:29 | 10.08    | 49.18  | 0.38       | 99.25459299 | 99.25%  |   |   |
| 25-08-2023 | 10:23:39 | 10.08    | 49.34  | 0.41       | 99.19978658 | 99.20%  |   |   |

Figura 3.17: Início da descarga (Fonte: o autor).

| A          | B        | C        | D      | E          | F           | G       | H | I |
|------------|----------|----------|--------|------------|-------------|---------|---|---|
| Data       | Hora     | Corrente | Tensão | Ah parcial | SOC_DCH     | SOC (%) |   |   |
| 25-08-2023 | 11:58:25 | 10.08    | 48.72  | 16.21      | 68.2769607  | 68.28%  |   |   |
| 25-08-2023 | 11:58:35 | 10.34    | 48.60  | 16.24      | 68.22041321 | 68.22%  |   |   |
| 25-08-2023 | 11:58:45 | 9.93     | 48.63  | 16.27      | 68.16641904 | 68.17%  |   |   |
| 25-08-2023 | 11:58:55 | 9.84     | 48.80  | 16.29      | 68.11295319 | 68.11%  |   |   |
| 25-08-2023 | 11:59:05 | 10.08    | 48.77  | 16.32      | 68.05815887 | 68.06%  |   |   |
| 25-08-2023 | 11:59:15 | 10.08    | 48.88  | 16.35      | 68.00373219 | 68.00%  |   |   |
| 25-08-2023 | 11:59:25 | 10.01    | 48.88  | 16.38      | 67.94898234 | 67.95%  |   |   |
| 25-08-2023 | 11:59:35 | 9.90     | 48.59  | 16.41      | 67.89518738 | 67.90%  |   |   |
| 25-08-2023 | 11:59:45 | 10.01    | 48.62  | 16.43      | 67.84079742 | 67.84%  |   |   |
| 25-08-2023 | 11:59:55 | 9.86     | 48.67  | 16.46      | 67.78653717 | 67.79%  |   |   |
| 25-08-2023 | 12:00:05 | 10.02    | 48.82  | 16.49      | 67.73207855 | 67.73%  |   |   |
| 25-08-2023 | 12:00:15 | 10.08    | 48.59  | 16.52      | 67.67728424 | 67.68%  |   |   |
| 25-08-2023 | 12:00:25 | 9.81     | 48.95  | 16.54      | 67.62359477 | 67.62%  |   |   |
| 25-08-2023 | 12:00:35 | 9.97     | 48.85  | 16.57      | 67.56976348 | 67.57%  |   |   |
| 25-08-2023 | 12:00:45 | 9.84     | 48.60  | 16.60      | 67.51629639 | 67.52%  |   |   |
| 25-08-2023 | 12:00:55 | 10.09    | 48.83  | 16.63      | 67.46144104 | 67.46%  |   |   |
| 25-08-2023 | 12:01:05 | 10.12    | 48.77  | 16.66      | 67.40645509 | 67.41%  |   |   |
| 25-08-2023 | 12:01:15 | 10.10    | 48.63  | 16.68      | 67.35153198 | 67.35%  |   |   |
| 25-08-2023 | 12:01:25 | 9.98     | 48.69  | 16.71      | 67.29727173 | 67.30%  |   |   |
| 25-08-2023 | 12:01:35 | 10.08    | 48.70  | 16.74      | 67.24248855 | 67.24%  |   |   |
| 25-08-2023 | 12:01:45 | 9.81     | 48.85  | 16.77      | 67.18914795 | 67.19%  |   |   |
| 25-08-2023 | 12:01:55 | 9.96     | 48.40  | 16.79      | 67.13502052 | 67.14%  |   |   |
| 25-08-2023 | 12:02:05 | 10.08    | 48.46  | 16.82      | 67.08026071 | 67.08%  |   |   |
| 25-08-2023 | 12:02:15 | 10.08    | 48.62  | 16.85      | 67.02544403 | 67.03%  |   |   |
| 25-08-2023 | 12:02:25 | 10.14    | 48.47  | 16.88      | 66.97032166 | 66.97%  |   |   |
| 25-08-2023 | 12:02:35 | 9.96     | 48.83  | 16.91      | 66.91619311 | 66.92%  |   |   |

Figura 3.18: Trecho durante a descarga (Fonte: o autor).

| A          | B        | C        | D      | E          | F           | G       | H | I |
|------------|----------|----------|--------|------------|-------------|---------|---|---|
| Data       | Hora     | Corrente | Tensão | Ah parcial | SOC_DCH     | SOC (%) |   |   |
| 25-08-2023 | 15:22:18 | 9.63     | 41.85  | 49.92      | 2.314574605 | 2.31%   |   |   |
| 25-08-2023 | 15:22:28 | 9.87     | 41.97  | 49.94      | 2.260715008 | 2.26%   |   |   |
| 25-08-2023 | 15:22:38 | 10.03    | 41.70  | 49.97      | 2.206189394 | 2.21%   |   |   |
| 25-08-2023 | 15:22:48 | 9.96     | 41.54  | 50.00      | 2.152395955 | 2.15%   |   |   |
| 25-08-2023 | 15:22:58 | 9.90     | 41.45  | 50.03      | 2.098265648 | 2.10%   |   |   |
| 25-08-2023 | 15:23:08 | 9.91     | 41.57  | 50.06      | 2.044040507 | 2.04%   |   |   |
| 25-08-2023 | 15:23:18 | 9.92     | 41.32  | 50.08      | 1.990476131 | 1.99%   |   |   |
| 25-08-2023 | 15:23:28 | 9.77     | 41.54  | 50.11      | 1.937346578 | 1.94%   |   |   |
| 25-08-2023 | 15:23:38 | 10.02    | 41.17  | 50.14      | 1.88288817  | 1.88%   |   |   |
| 25-08-2023 | 15:23:48 | 9.91     | 41.09  | 50.17      | 1.829027176 | 1.83%   |   |   |
| 25-08-2023 | 15:23:58 | 9.99     | 40.81  | 50.19      | 1.774703145 | 1.77%   |   |   |
| 25-08-2023 | 15:24:08 | 9.94     | 40.75  | 50.22      | 1.720640421 | 1.72%   |   |   |
| 25-08-2023 | 15:24:18 | 0.00     | 0.00   | 50.22      | 1.720640421 | 1.72%   |   |   |
| 25-08-2023 | 15:24:28 | 0.00     | 0.00   | 50.22      | 1.720640421 | 1.72%   |   |   |
| 25-08-2023 | 15:24:38 | 0.00     | 0.00   | 50.22      | 1.720640421 | 1.72%   |   |   |
| 25-08-2023 | 15:24:48 | 0.00     | 0.00   | 50.22      | 1.720640421 | 1.72%   |   |   |
| 25-08-2023 | 15:24:58 | 0.00     | 0.00   | 50.22      | 1.720640421 | 1.72%   |   |   |
| 25-08-2023 | 15:25:08 | 0.00     | 0.00   | 50.22      | 1.720640421 | 1.72%   |   |   |
| 25-08-2023 | 15:25:18 | 0.00     | 0.00   | 50.22      | 1.720640421 | 1.72%   |   |   |
| 25-08-2023 | 15:25:28 | 0.00     | 0.00   | 50.22      | 1.720640421 | 1.72%   |   |   |

Figura 3.19: Fim da descarga (Fonte: o autor).

| BMS256 |           |          |         |        |                 |                 |         |                    |                  |             |                  |            |              |            |             |
|--------|-----------|----------|---------|--------|-----------------|-----------------|---------|--------------------|------------------|-------------|------------------|------------|--------------|------------|-------------|
|        | Date      | Time     | Current | Norm   | Pack Current(A) | Pack Voltage(V) | SOC (%) | RemainCapacity(AH) | FullCapacity(AH) | MaxVolt(mV) | MinVolt(mV)      | Alarm Type | Protect Type | Fault Type | Vcell 1(mV) |
| 18236  | 8/25/2023 | 15:24:09 | 10.00   | -10.00 | 41.72           | 1.15k           | 0.590   | 51.100             | 2843             | 2515        | Cell UV, SOC Low |            |              |            | 2515        |
| 18237  | 8/25/2023 | 15:24:10 | 10.00   | -10.00 | 41.71           | 1.15k           | 0.590   | 51.100             | 2843             | 2512        | Cell UV, SOC Low |            |              |            | 2512        |
| 18238  | 8/25/2023 | 15:24:11 | 10.00   | -10.00 | 41.69           | 1.15k           | 0.590   | 51.100             | 2842             | 2509        | Cell UV, SOC Low |            |              |            | 2509        |
| 18239  | 8/25/2023 | 15:24:12 | 10.00   | -10.00 | 41.68           | 1.15k           | 0.590   | 51.100             | 2841             | 2506        | Cell UV, SOC Low |            |              |            | 2506        |
| 18240  | 8/25/2023 | 15:24:13 | 10.00   | -10.00 | 41.67           | 1.14k           | 0.580   | 51.100             | 2841             | 2503        | Cell UV, SOC Low |            |              |            | 2503        |
| 18241  | 8/25/2023 | 15:24:14 | 10.00   | -10.00 | 41.65           | 1.14k           | 0.580   | 51.100             | 2840             | 2499        | Cell UV, SOC Low |            |              |            | 2499        |
| 18242  | 8/25/2023 | 15:24:15 | 10.00   | -10.00 | 41.64           | 1.14k           | 0.580   | 51.100             | 2840             | 2497        | Cell UV, SOC Low | Cell UVP   |              |            | 2497        |
| 18243  | 8/25/2023 | 15:24:16 | 0.00    | 0.00   | 41.90           | 1.14k           | 0.580   | 51.100             | 2855             | 2522        | Cell UV, SOC Low | Cell UVP   |              |            | 2522        |
| 18244  | 8/25/2023 | 15:24:17 | 0.00    | 0.00   | 41.97           | 1.14k           | 0.580   | 51.100             | 2862             | 2528        | Cell UV, SOC Low | Cell UVP   |              |            | 2528        |
| 18245  | 8/25/2023 | 15:24:18 | 0.00    | 0.00   | 42.02           | 1.14k           | 0.580   | 51.100             | 2862             | 2535        | Cell UV, SOC Low | Cell UVP   |              |            | 2535        |
| 18246  | 8/25/2023 | 15:24:19 | 0.00    | 0.00   | 42.05           | 1.14k           | 0.580   | 51.100             | 2864             | 2536        | Cell UV, SOC Low | Cell UVP   |              |            | 2536        |
| 18247  | 8/25/2023 | 15:24:20 | 0.00    | 0.00   | 42.09           | 0.00k           | 0.000   | 51.100             | 2866             | 2543        | Cell UV, SOC Low | Cell UVP   |              |            | 2543        |
| 18248  | 8/25/2023 | 15:24:21 | 0.00    | 0.00   | 42.11           | 0.00k           | 0.000   | 51.100             | 2867             | 2544        | Cell UV, SOC Low | Cell UVP   |              |            | 2544        |
| 18249  | 8/25/2023 | 15:24:22 | 0.00    | 0.00   | 42.16           | 0.00k           | 0.000   | 51.100             | 2869             | 2552        | Cell UV, SOC Low | Cell UVP   |              |            | 2552        |
| 18250  | 8/25/2023 | 15:24:23 | 0.00    | 0.00   | 42.17           | 0.00k           | 0.000   | 51.100             | 2871             | 2552        | Cell UV, SOC Low | Cell UVP   |              |            | 2552        |
| 18251  | 8/25/2023 | 15:24:24 | 0.00    | 0.00   | 42.20           | 0.00k           | 0.000   | 51.100             | 2872             | 2554        | Cell UV, SOC Low | Cell UVP   |              |            | 2554        |
| 18252  | 8/25/2023 | 15:24:25 | 0.00    | 0.00   | 42.22           | 0.00k           | 0.000   | 51.100             | 2873             | 2556        | Cell UV, SOC Low | Cell UVP   |              |            | 2556        |
| 18253  | 8/25/2023 | 15:24:26 | 0.00    | 0.00   | 42.24           | 0.00k           | 0.000   | 51.100             | 2874             | 2559        | Cell UV, SOC Low | Cell UVP   |              |            | 2559        |
| 18254  | 8/25/2023 | 15:24:27 | 0.00    | 0.00   | 42.26           | 0.00k           | 0.000   | 51.100             | 2875             | 2561        | Cell UV, SOC Low | Cell UVP   |              |            | 2561        |
| 18255  | 8/25/2023 | 15:24:28 | 0.00    | 0.00   | 42.28           | 0.00k           | 0.000   | 51.100             | 2876             | 2564        | Cell UV, SOC Low | Cell UVP   |              |            | 2564        |
| 18256  | 8/25/2023 | 15:24:29 | 0.00    | 0.00   | 42.29           | 0.00k           | 0.000   | 51.100             | 2877             | 2566        | Cell UV, SOC Low | Cell UVP   |              |            | 2566        |
| 18257  | 8/25/2023 | 15:24:30 | 0.00    | 0.00   | 42.31           | 0.00k           | 0.000   | 51.100             | 2878             | 2569        | Cell UV, SOC Low | Cell UVP   |              |            | 2569        |

Figura 3.20: Proteção na descarga (Fonte: o autor).

Um outra análise que pode ser feita é com relação aos gráficos gerados a respeito do comportamento da tensão elétrica, corrente elétrica, capacidade de carga e o estado de carga, tanto a partir dos dados armazenados com o auxílio do monitoramento do BMS pelo *software*, com o uso de um cabo de comunicação RS232, como também pelo sistema proposto.

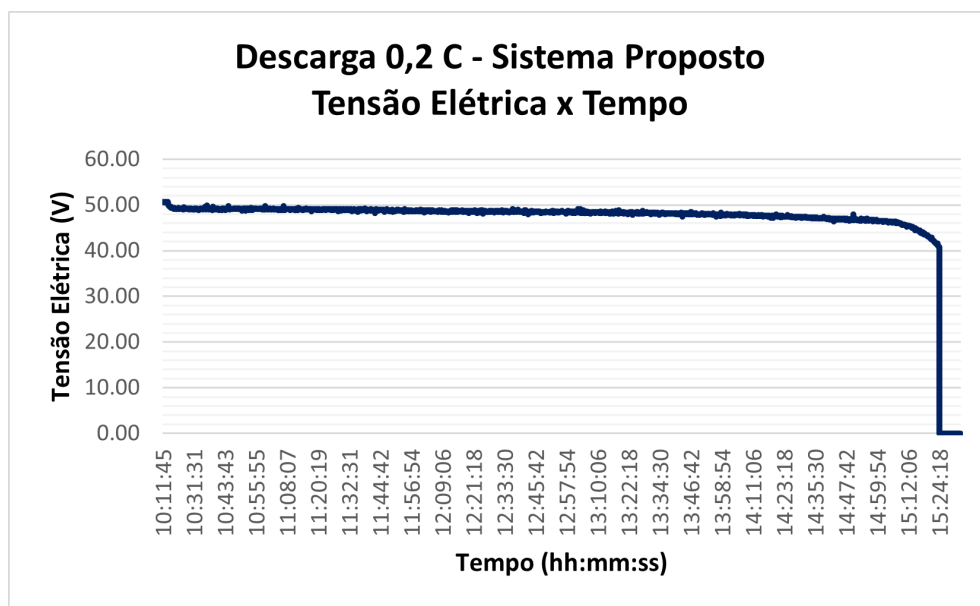
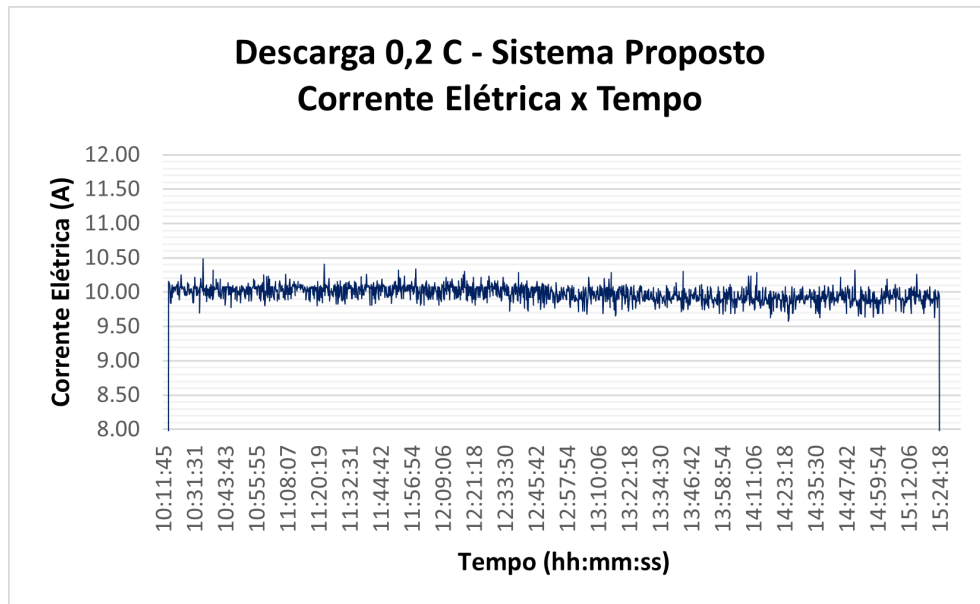
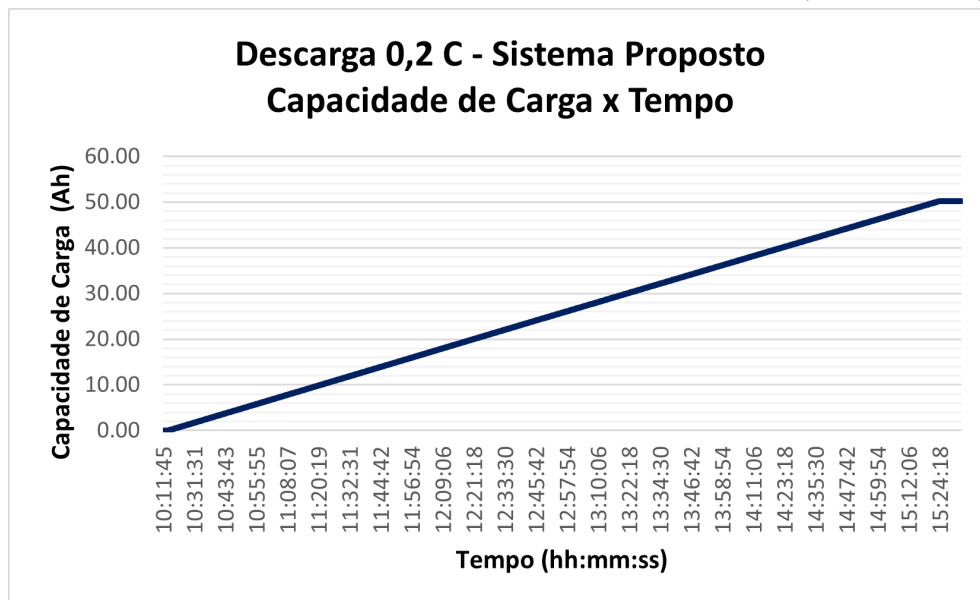


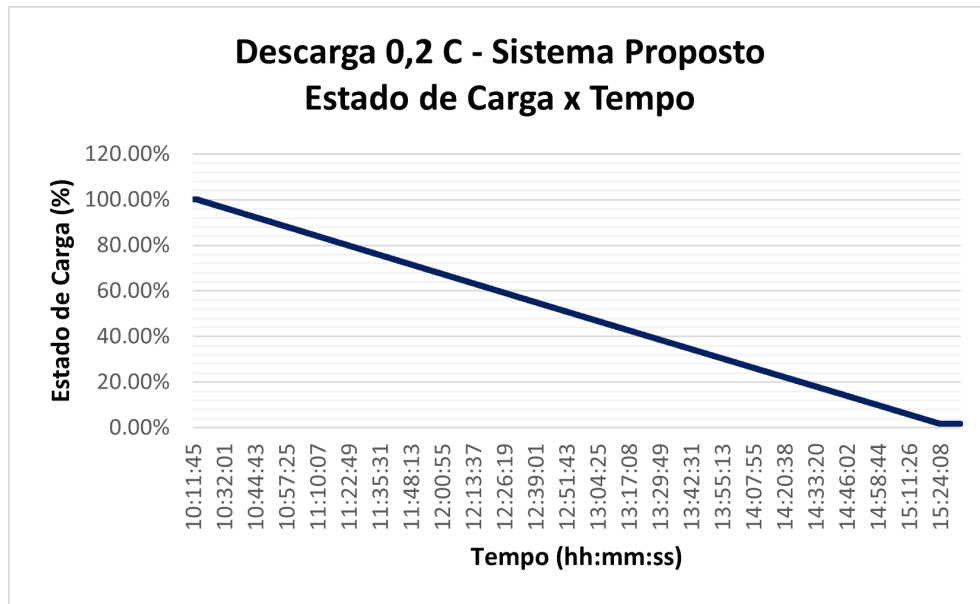
Figura 3.21: Gráfico da tensão elétrica pelo sistema na descarga (Fonte: o autor).



**Figura 3.22:** Gráfico da corrente elétrica pelo sistema na descarga (Fonte: o autor).

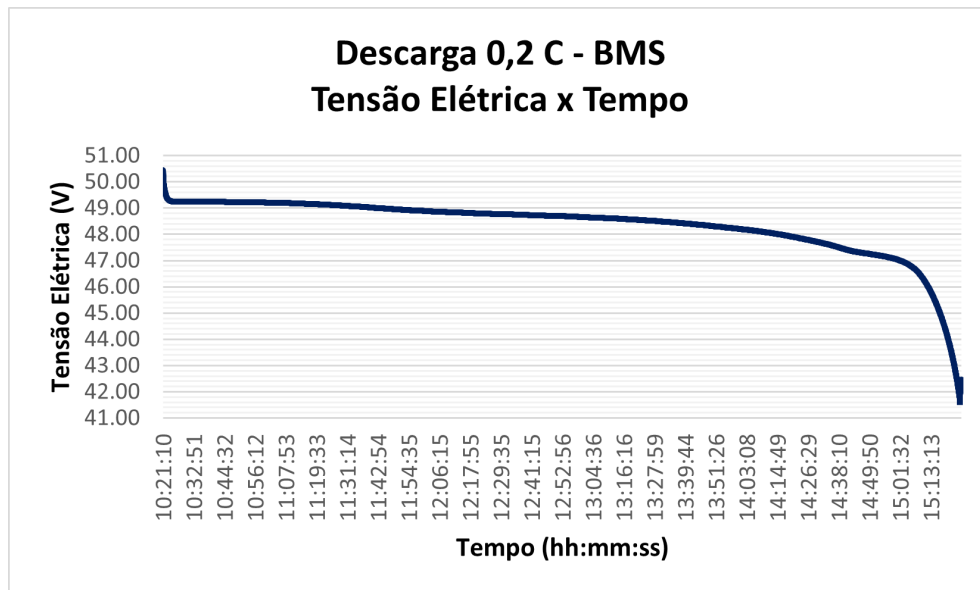


**Figura 3.23:** Gráfico da capacidade de carga acumulada pelo sistema na descarga (Fonte: o autor).

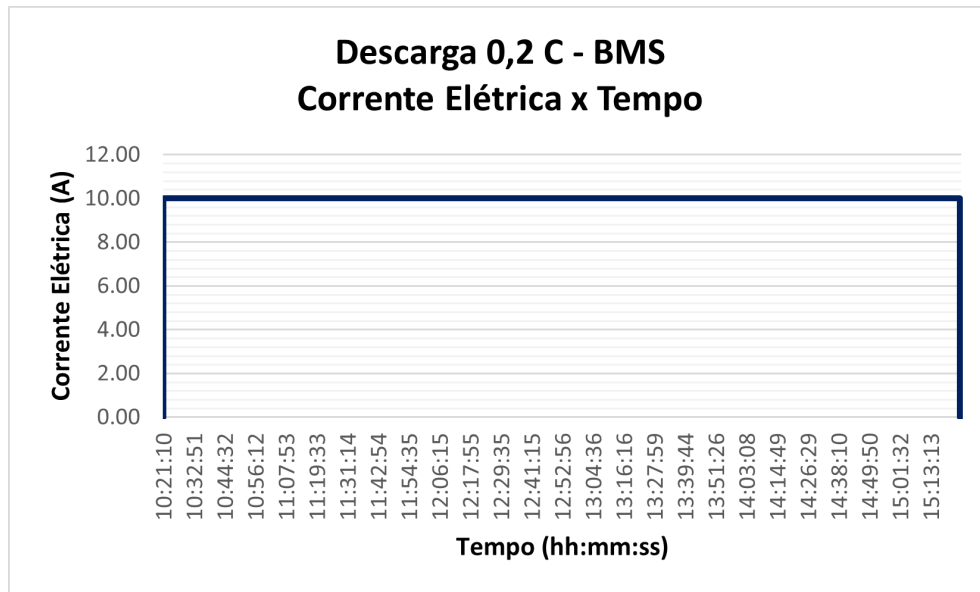


**Figura 3.24:** Gráfico do estado de carga pelo sistema na descarga (Fonte: o autor).

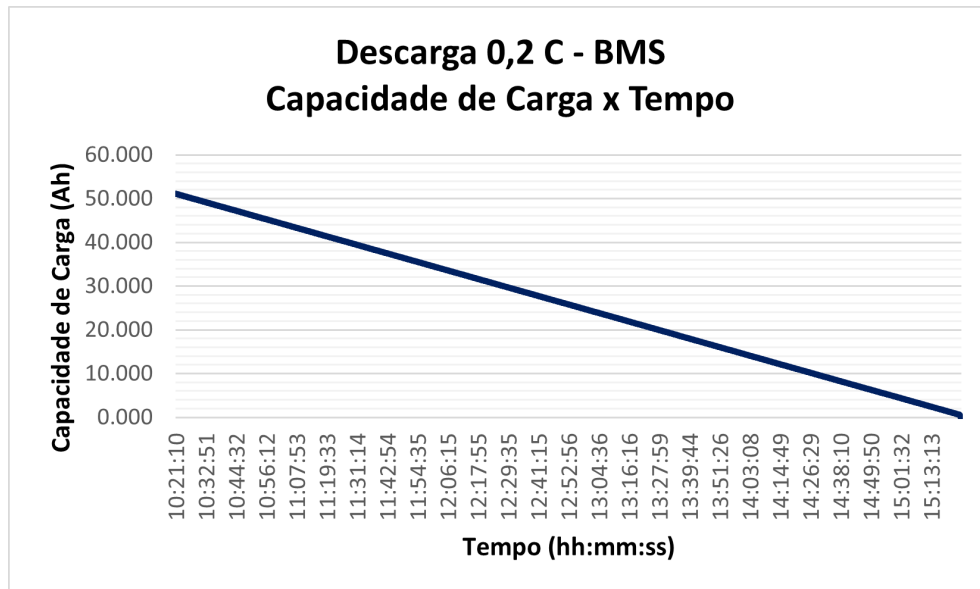
As Figuras abaixo foram feitas com relação ao dados extraídos pelo BMS.



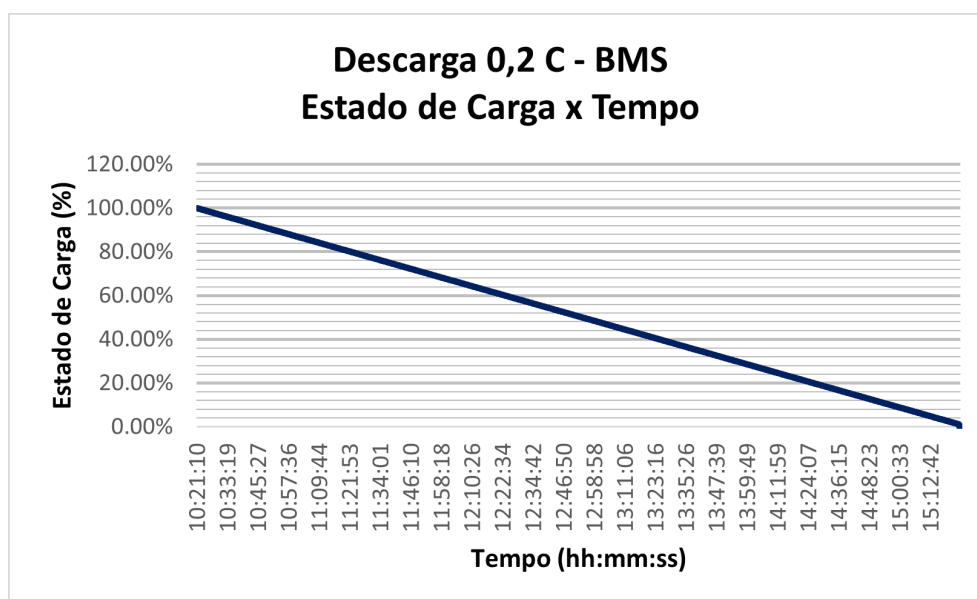
**Figura 3.25:** Gráfico da tensão elétrica pelo BMS na descarga (Fonte: o autor).



**Figura 3.26:** Gráfico da corrente elétrica pelo BMS na descarga (Fonte: o autor).



**Figura 3.27:** Gráfico da capacidade de carga pelo BMS na descarga (Fonte: o autor).



**Figura 3.28:** Gráfico do estado de carga pelo BMS na descarga (Fonte: o autor).

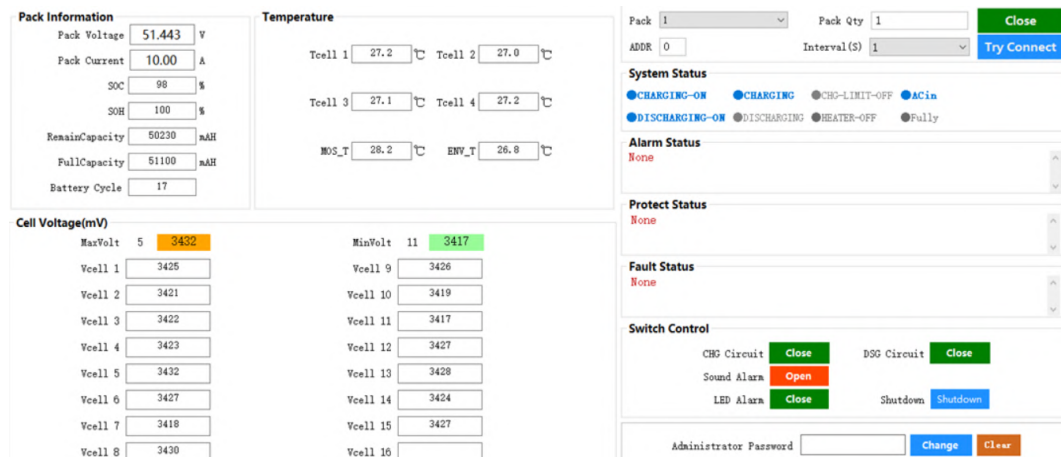
### 3.4.2 Recarga 0,2 C (10 A)

Para a recarga, foi utilizada também uma corrente de 10 A. Porém, é necessário configurar a fonte para uma tensão de 54 V, este valor foi escolhido de acordo com o *datasheet* da bateria. A Figura 3.29 indica a configuração.



**Figura 3.29:** Configuração da fonte para recarga (Fonte: o autor).

Seguindo o mesmo procedimento da descarga, houve o registro da tela do computador em alguns momentos durante a recarga, a Figura 3.30 aponta um destes registros.

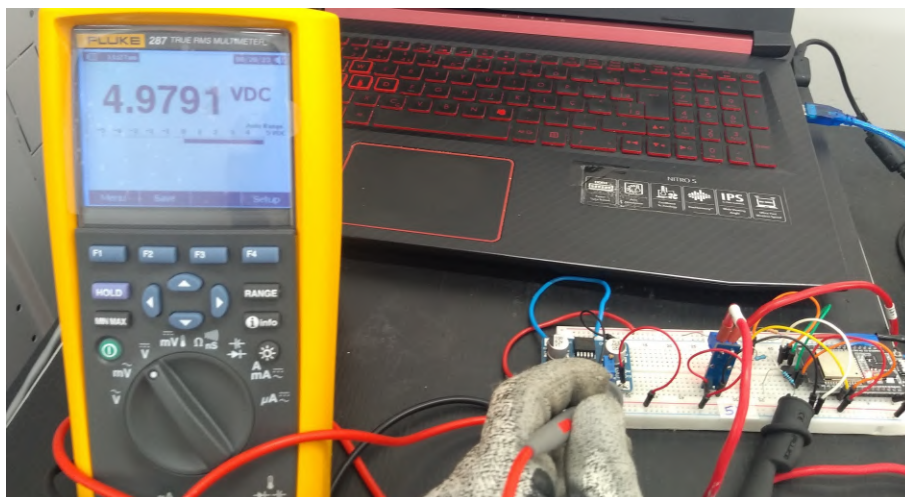


**Figura 3.30:** Dados do BMS da bateria na recarga (Fonte: o autor).

Os equipamentos de medições como o alicate amperímetro e multímetro foram importantes para verificar se a corrente elétrica e as tensões elétricas estavam de acordo com o esperado, as Figuras 3.31, 3.32, 3.33, 3.34 e 3.35 indicam esses valores.



**Figura 3.31:** Tensão da bateria que chega aos terminais de entrada do conversor DC-DC (Fonte: o autor).



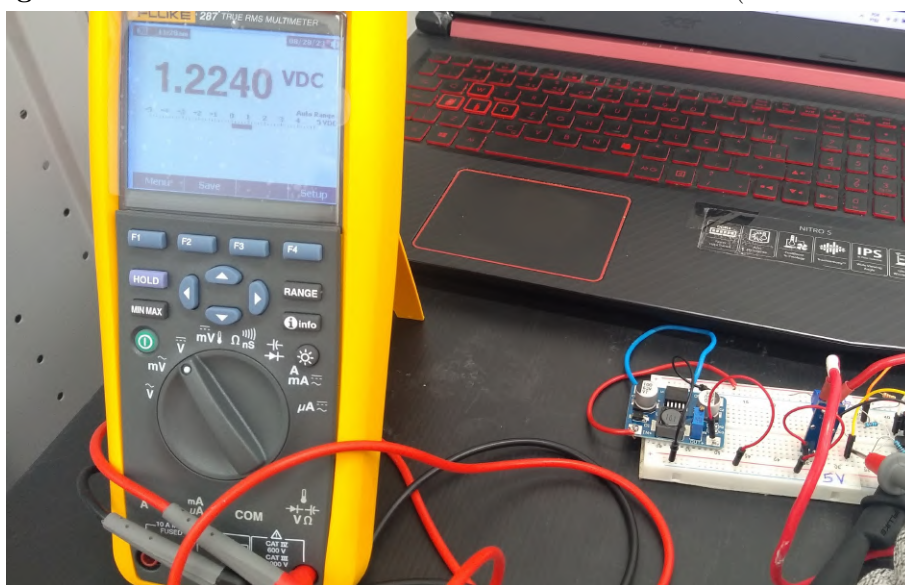
**Figura 3.32:** Tensão de saída do conversor DC-DC (Fonte: o autor).



**Figura 3.33:** Corrente elétrica de recarga (10 A) (Fonte: o autor).



**Figura 3.34:** Tensão de entrada referente ao divisor de tensão (Fonte: o autor).



**Figura 3.35:** Sinal de tensão do sensor de corrente passando por um divisor de tensão (Fonte: o autor).

Na recarga, também foram feitos os gráficos referentes aos dados gerados tanto pelo *software* do BMS quanto os dados provenientes da AWS.

**Figura 3.36: Início da recarga (Fonte: o autor).**

The image displays two Excel spreadsheets side-by-side. The left spreadsheet shows a data table with columns A-J, and the right spreadsheet shows a summary table with columns A-M. The data is for a battery with a capacity of 51.100 Ah.

| A           | B       | C        | D      | E          | F           | G       | H | I | J |
|-------------|---------|----------|--------|------------|-------------|---------|---|---|---|
| Data        | Hora    | Corrente | Tensão | Ah parcial | SOC_CH      | SOC (%) |   |   |   |
| 31-08-2023  | 9:53:31 | 0.00     | 43.71  | 0.00       | 0           | 0.00%   |   |   |   |
| 31-08-2023  | 9:54:27 | 10.01    | 42.67  | 0.06       | 0.10883718  | 0.11%   |   |   |   |
| 41-08-2023  | 9:54:37 | 10.01    | 42.96  | 0.08       | 0.16525796  | 0.16%   |   |   |   |
| 51-08-2023  | 9:54:47 | 9.99     | 43.55  | 0.11       | 0.21754465  | 0.22%   |   |   |   |
| 61-08-2023  | 9:54:57 | 10.01    | 43.30  | 0.14       | 0.271960229 | 0.27%   |   |   |   |
| 71-08-2023  | 9:55:07 | 10.02    | 43.36  | 0.17       | 0.32645162  | 0.33%   |   |   |   |
| 81-08-2023  | 9:55:17 | 9.94     | 43.56  | 0.19       | 0.38046597  | 0.38%   |   |   |   |
| 91-08-2023  | 9:55:27 | 9.82     | 43.69  | 0.22       | 0.433822483 | 0.43%   |   |   |   |
| 101-08-2023 | 9:55:37 | 9.90     | 43.78  | 0.25       | 0.48743888  | 0.49%   |   |   |   |
| 111-08-2023 | 9:55:47 | 10.04    | 43.74  | 0.28       | 0.542195141 | 0.54%   |   |   |   |
| 121-08-2023 | 9:55:57 | 10.01    | 43.97  | 0.30       | 0.596813765 | 0.60%   |   |   |   |
| 131-08-2023 | 9:56:07 | 10.29    | 44.27  | 0.33       | 0.652258506 | 0.65%   |   |   |   |
| 141-08-2023 | 9:56:17 | 10.12    | 44.24  | 0.36       | 0.707574388 | 0.71%   |   |   |   |
| 151-08-2023 | 9:56:27 | 10.18    | 44.32  | 0.39       | 0.762932129 | 0.76%   |   |   |   |
| 161-08-2023 | 9:56:37 | 10.10    | 44.52  | 0.42       | 0.817804992 | 0.82%   |   |   |   |
| 171-08-2023 | 9:56:47 | 10.04    | 44.63  | 0.45       | 0.872356296 | 0.87%   |   |   |   |
| 181-08-2023 | 9:56:57 | 10.13    | 44.69  | 0.47       | 0.927438486 | 0.93%   |   |   |   |
| 191-08-2023 | 9:57:07 | 10.15    | 44.69  | 0.50       | 0.98258698  | 0.98%   |   |   |   |
| 201-08-2023 | 9:57:17 | 10.19    | 45.04  | 0.53       | 1.038009941 | 1.04%   |   |   |   |
| 211-08-2023 | 9:57:27 | 10.15    | 44.89  | 0.56       | 1.09349424  | 1.09%   |   |   |   |
| 221-08-2023 | 9:57:37 | 10.01    | 45.03  | 0.59       | 1.147567987 | 1.15%   |   |   |   |
| 231-08-2023 | 9:57:47 | 10.01    | 45.17  | 0.61       | 1.20186667  | 1.20%   |   |   |   |
| 241-08-2023 | 9:57:57 | 10.12    | 45.17  | 0.64       | 1.256204793 | 1.26%   |   |   |   |
| 251-08-2023 | 9:58:07 | 10.00    | 45.42  | 0.67       | 1.311613997 | 1.31%   |   |   |   |
| 261-08-2023 | 9:58:17 | 10.04    | 45.40  | 0.70       | 1.36617136  | 1.37%   |   |   |   |
| 271-08-2023 | 9:58:27 | 9.85     | 45.40  | 0.73       | 1.419727125 | 1.42%   |   |   |   |
| 281-08-2023 | 9:58:37 | 10.01    | 45.53  | 0.75       | 1.47445889  | 1.47%   |   |   |   |
| 291-08-2023 | 9:58:47 | 10.05    | 45.69  | 0.78       | 1.528763652 | 1.53%   |   |   |   |
| 301-08-2023 | 9:58:57 | 10.07    | 45.80  | 0.81       | 1.58313856  | 1.58%   |   |   |   |
| 311-08-2023 | 9:59:07 | 10.15    | 45.79  | 0.84       | 1.638664517 | 1.64%   |   |   |   |
| 321-08-2023 | 9:59:18 | 10.12    | 45.78  | 0.87       | 1.69367626  | 1.69%   |   |   |   |

| Date      | Time    | Pack Current(A) | Pack Voltage(V) | SOC (%) | RemainCapacity(Ah) | FullCapacity(Ah) | M  |
|-----------|---------|-----------------|-----------------|---------|--------------------|------------------|----|
| 31/8/2023 | 9:54:25 | 10.00           | 43.40           | 0.06%   | 0.03               | 51.100           | 29 |
| 31/8/2023 | 9:54:26 | 10.00           | 43.43           | 0.08%   | 0.04               | 51.100           | 29 |
| 31/8/2023 | 9:54:27 | 10.00           | 43.44           | 0.08%   | 0.04               | 51.100           | 29 |
| 31/8/2023 | 9:54:28 | 10.00           | 43.47           | 0.08%   | 0.04               | 51.100           | 29 |
| 31/8/2023 | 9:54:29 | 10.00           | 43.48           | 0.08%   | 0.04               | 51.100           | 29 |
| 31/8/2023 | 9:54:30 | 10.00           | 43.51           | 0.10%   | 0.05               | 51.100           | 29 |
| 31/8/2023 | 9:54:31 | 10.00           | 43.52           | 0.10%   | 0.05               | 51.100           | 29 |
| 31/8/2023 | 9:54:32 | 10.00           | 43.55           | 0.10%   | 0.05               | 51.100           | 29 |
| 31/8/2023 | 9:54:33 | 10.00           | 43.56           | 0.12%   | 0.06               | 51.100           | 29 |
| 31/8/2023 | 9:54:34 | 10.00           | 43.58           | 0.12%   | 0.06               | 51.100           | 29 |
| 31/8/2023 | 9:54:35 | 10.00           | 43.60           | 0.12%   | 0.06               | 51.100           | 29 |
| 31/8/2023 | 9:54:36 | 10.00           | 43.62           | 0.12%   | 0.06               | 51.100           | 29 |
| 31/8/2023 | 9:54:37 | 10.00           | 43.63           | 0.14%   | 0.07               | 51.100           | 29 |
| 31/8/2023 | 9:54:38 | 10.00           | 43.65           | 0.14%   | 0.07               | 51.100           | 29 |
| 31/8/2023 | 9:54:39 | 10.00           | 43.67           | 0.14%   | 0.07               | 51.100           | 29 |
| 31/8/2023 | 9:54:40 | 10.00           | 43.69           | 0.16%   | 0.08               | 51.100           | 29 |
| 31/8/2023 | 9:54:41 | 10.00           | 43.70           | 0.16%   | 0.08               | 51.100           | 29 |
| 31/8/2023 | 9:54:42 | 10.00           | 43.72           | 0.16%   | 0.08               | 51.100           | 29 |
| 31/8/2023 | 9:54:43 | 10.00           | 43.73           | 0.16%   | 0.08               | 51.100           | 29 |
| 31/8/2023 | 9:54:44 | 10.00           | 43.75           | 0.16%   | 0.09               | 51.100           | 29 |
| 31/8/2023 | 9:54:45 | 10.00           | 43.77           | 0.18%   | 0.09               | 51.100           | 29 |
| 31/8/2023 | 9:54:46 | 10.00           | 43.79           | 0.18%   | 0.09               | 51.100           | 29 |
| 31/8/2023 | 9:54:47 | 10.00           | 43.80           | 0.18%   | 0.09               | 51.100           | 29 |
| 31/8/2023 | 9:54:48 | 10.00           | 43.82           | 0.20%   | 0.10               | 51.100           | 29 |

Figura 3.36: Início da recarga (Fonte: o autor).

**Figura 3.37: Trecho durante a recarga (Fonte: o autor).**

The image displays two Excel spreadsheets side-by-side. The left spreadsheet shows a data table with columns A-J, and the right spreadsheet shows a summary table with columns A-M. The data is for a battery with a capacity of 51.100 Ah.

| A            | B        | C        | D      | E          | F           | G       | H | I | J |
|--------------|----------|----------|--------|------------|-------------|---------|---|---|---|
| Data         | Hora     | Corrente | tensão | Ah parcial | SOC_CH      | SOC (%) |   |   |   |
| 31-08-2023   | 10:00:40 | 10.01    | 50.08  | 10.82      | 21.1807033  | 21.18%  |   |   |   |
| 3891-08-2023 | 10:00:58 | 10.01    | 50.05  | 10.85      | 21.23485892 | 21.23%  |   |   |   |
| 3901-08-2023 | 10:01:08 | 9.95     | 50.05  | 10.88      | 21.28979585 | 21.29%  |   |   |   |
| 3911-08-2023 | 10:01:18 | 10.00    | 50.28  | 10.91      | 21.34349442 | 21.34%  |   |   |   |
| 3921-08-2023 | 10:01:28 | 10.01    | 50.18  | 10.94      | 21.39797101 | 21.40%  |   |   |   |
| 3931-08-2023 | 10:01:38 | 10.39    | 49.80  | 10.94      | 21.45358167 | 21.46%  |   |   |   |
| 3941-08-2023 | 10:01:48 | 10.21    | 50.24  | 10.96      | 21.50916186 | 21.51%  |   |   |   |
| 3951-08-2023 | 10:01:58 | 9.97     | 50.09  | 10.99      | 21.56080186 | 21.56%  |   |   |   |
| 3961-08-2023 | 11:00:08 | 9.84     | 50.11  | 11.02      | 21.5621935  | 21.56%  |   |   |   |
| 3971-08-2023 | 11:00:18 | 9.89     | 50.27  | 11.05      | 21.61704636 | 21.62%  |   |   |   |
| 3981-08-2023 | 11:00:28 | 9.97     | 50.05  | 11.07      | 21.67126465 | 21.67%  |   |   |   |
| 3991-08-2023 | 11:00:38 | 10.15    | 50.27  | 11.10      | 21.72641373 | 21.73%  |   |   |   |
| 4001-08-2023 | 11:00:48 | 10.01    | 50.11  | 11.13      | 21.7808342  | 21.78%  |   |   |   |
| 4011-08-2023 | 11:00:58 | 10.01    | 50.35  | 11.16      | 21.83525276 | 21.84%  |   |   |   |
| 4021-08-2023 | 11:01:08 | 10.01    | 50.06  | 11.19      | 21.88966942 | 21.89%  |   |   |   |
| 4031-08-2023 | 11:01:18 | 10.17    | 50.02  | 11.21      | 21.94495201 | 21.94%  |   |   |   |
| 4041-08-2023 | 11:01:28 | 10.13    | 50.12  | 11.24      | 22.00030342 | 22.00%  |   |   |   |
| 4051-08-2023 | 11:01:38 | 9.88     | 50.11  | 11.27      | 22.05572238 | 22.06%  |   |   |   |
| 4061-08-2023 | 11:01:48 | 10.07    | 50.28  | 11.30      | 22.10847282 | 22.11%  |   |   |   |
| 4071-08-2023 | 11:01:58 | 9.99     | 50.18  | 11.32      | 22.16327357 | 22.16%  |   |   |   |
| 4081-08-2023 | 11:02:08 | 10.17    | 50.24  | 11.35      | 22.21804047 | 22.22%  |   |   |   |
| 4091-08-2023 | 11:02:18 | 10.01    | 50.25  | 11.38      | 22.27245903 | 22.27%  |   |   |   |
| 4101-08-2023 | 11:02:28 | 9.94     | 49.88  | 11.41      | 22.32647896 | 22.33%  |   |   |   |
| 4111-08-2023 | 11:02:38 | 9.80     | 50.31  | 11.44      | 22.37996189 | 22.38%  |   |   |   |
| 4121-08-2023 | 11:02:48 | 10.02    | 50.22  | 11.46      | 22.43438721 | 22.43%  |   |   |   |
| 4131-08-2023 | 11:02:58 | 9.85     | 50.16  | 11.49      | 22.48794365 | 22.49%  |   |   |   |
| 4141-08-2023 | 11:03:08 | 10.01    | 50.22  | 11.52      | 22.54236321 | 22.54%  |   |   |   |
| 4151-08-2023 | 11:03:19 | 9.40     | 50.28  | 11.55      | 22.59546199 | 22.59%  |   |   |   |

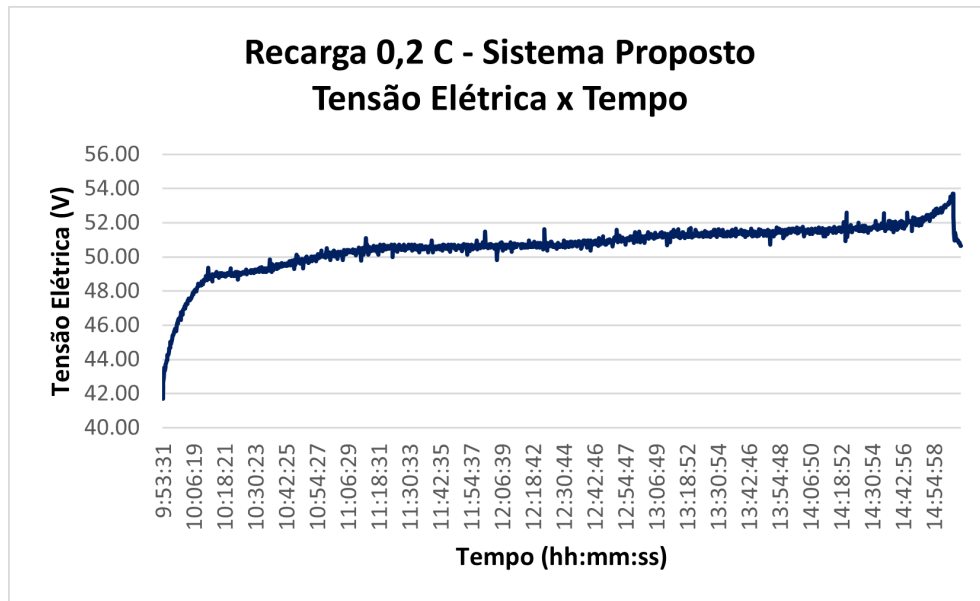
| Date      | Time     | Pack Current(A) | Pack Voltage(V) | SOC (%) | RemainCapacity(Ah) | FullCapacity(Ah) | M  |
|-----------|----------|-----------------|-----------------|---------|--------------------|------------------|----|
| 31/8/2023 | 11:00:02 | 10.00           | 49.78           | 21.47%  | 10.97              | 51.100           | 31 |
| 31/8/2023 | 11:00:03 | 10.00           | 49.78           | 21.49%  | 10.98              | 51.100           | 31 |
| 31/8/2023 | 11:00:04 | 10.00           | 49.78           | 21.49%  | 10.98              | 51.100           | 31 |
| 31/8/2023 | 11:00:05 | 10.00           | 49.78           | 21.49%  | 10.98              | 51.100           | 31 |
| 31/8/2023 | 11:00:06 | 10.00           | 49.78           | 21.51%  | 10.99              | 51.100           | 31 |
| 31/8/2023 | 11:00:07 | 10.00           | 49.78           | 21.51%  | 10.99              | 51.100           | 31 |
| 31/8/2023 | 11:00:08 | 10.00           | 49.78           | 21.51%  | 10.99              | 51.100           | 31 |
| 31/8/2023 | 11:00:09 | 10.00           | 49.78           | 21.51%  | 10.99              | 51.100           | 31 |
| 31/8/2023 | 11:00:10 | 10.00           | 49.78           | 21.53%  | 11.00              | 51.100           | 31 |
| 31/8/2023 | 11:00:11 | 10.00           | 49.78           | 21.53%  | 11.00              | 51.100           | 31 |
| 31/8/2023 | 11:00:12 | 10.00           | 49.78           | 21.53%  | 11.00              | 51.100           | 31 |
| 31/8/2023 | 11:00:13 | 10.00           | 49.78           | 21.53%  | 11.00              | 51.100           | 31 |
| 31/8/2023 | 11:00:14 | 10.00           | 49.78           | 21.55%  | 11.01              | 51.100           | 31 |
| 31/8/2023 | 11:00:15 | 10.00           | 49.78           | 21.55%  | 11.01              | 51.100           | 31 |
| 31/8/2023 | 11:00:16 | 10.00           | 49.78           | 21.55%  | 11.01              | 51.100           | 31 |
| 31/8/2023 | 11:00:17 | 10.00           | 49.79           | 21.57%  | 11.02              | 51.100           | 31 |
| 31/8/2023 | 11:00:18 | 10.00           | 49.79           | 21.57%  | 11.02              | 51.100           | 31 |
| 31/8/2023 | 11:00:19 | 10.00           | 49.79           | 21.57%  | 11.02              | 51.100           | 31 |
| 31/8/2023 | 11:00:20 | 10.00           | 49.79           | 21.57%  | 11.02              | 51.100           | 31 |
| 31/8/2023 | 11:00:21 | 10.00           | 49.79           | 21.57%  | 11.03              | 51.100           | 31 |
| 31/8/2023 | 11:00:22 | 10.00           | 49.79           | 21.59%  | 11.03              | 51.100           | 31 |
| 31/8/2023 | 11:00:23 | 10.00           | 49.79           | 21.59%  | 11.03              | 51.100           | 31 |

Figura 3.37: Trecho durante a recarga (Fonte: o autor).

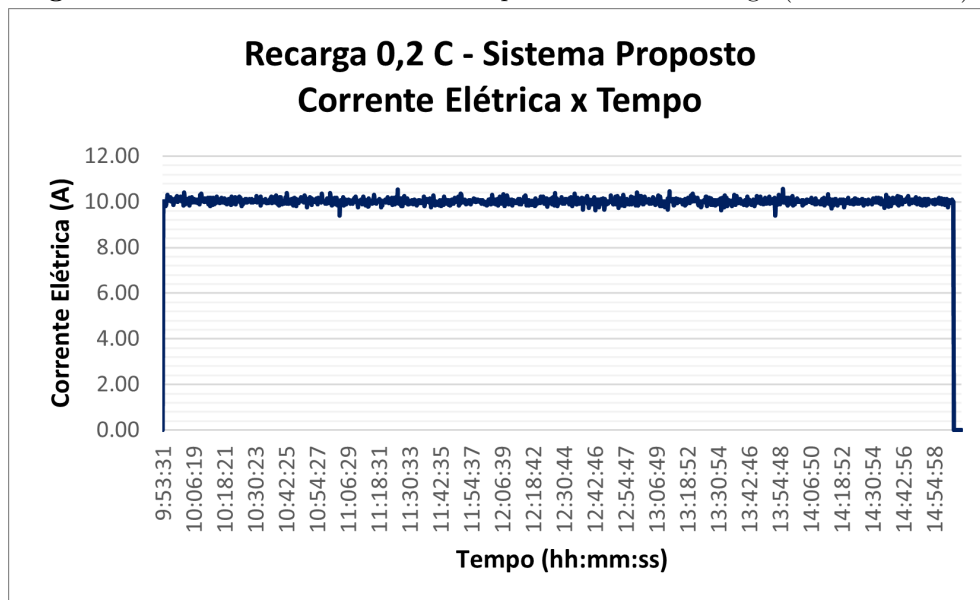
**Figura 3.38: Fim da recarga (Fonte: o autor).**

The image displays two Excel spreadsheets side-by-side. The left spreadsheet shows a data table with columns A-J, and the right spreadsheet shows a summary table with columns A-M. The data is for a battery with a capacity of 51.100 Ah.

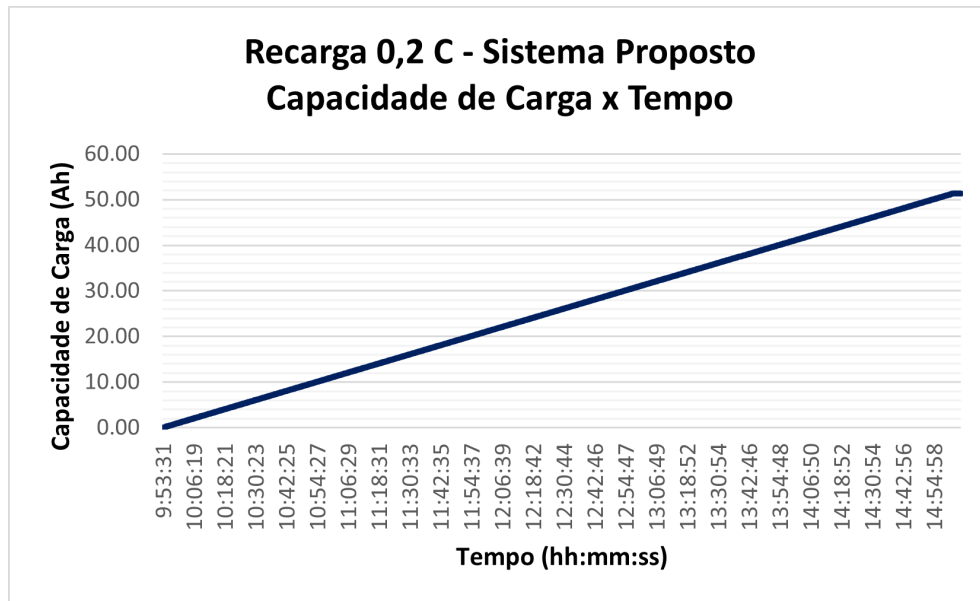
| A | B | C | D | E | F | G | H | I |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|



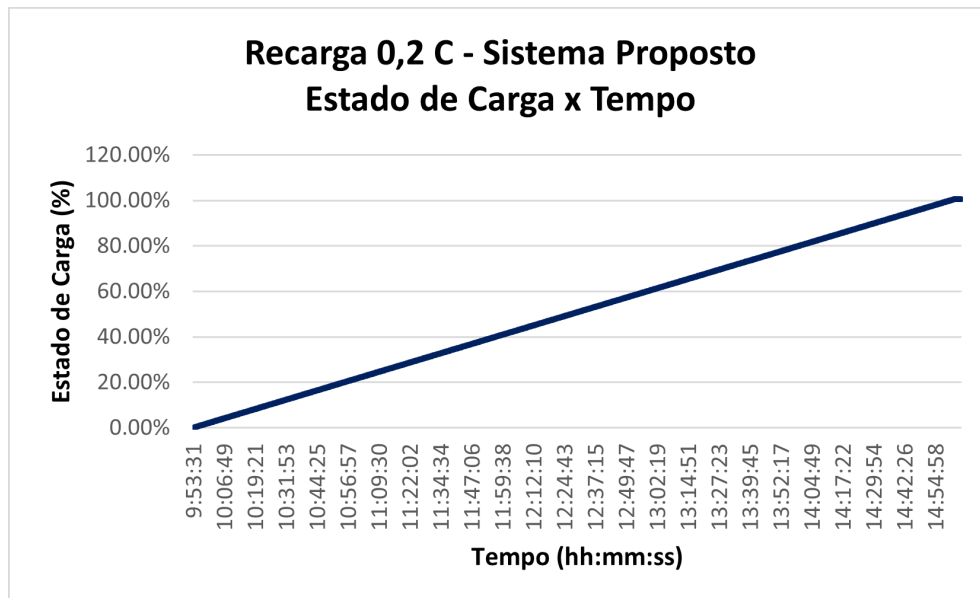
**Figura 3.39:** Gráfico da tensão elétrica pelo sistema na recarga (Fonte: o autor).



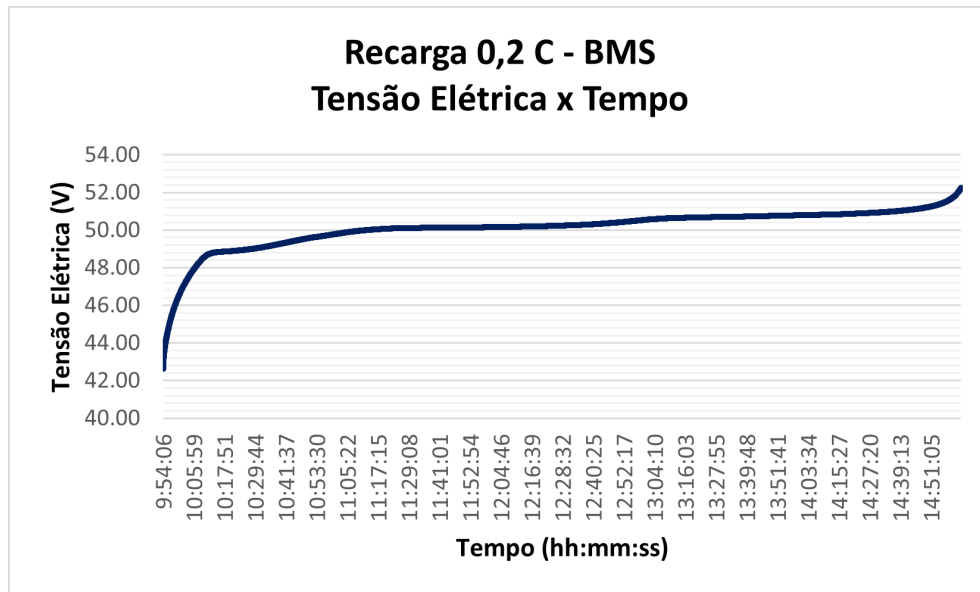
**Figura 3.40:** Gráfico da corrente elétrica pelo sistema na recarga (Fonte: o autor).



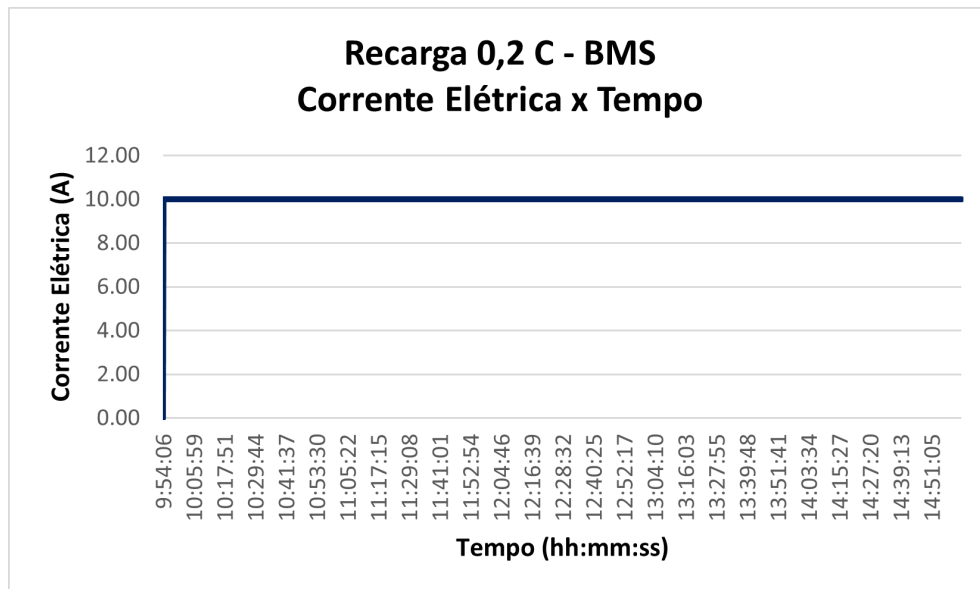
**Figura 3.41:** Gráfico da capacidade de carga pelo sistema na recarga (Fonte: o autor).



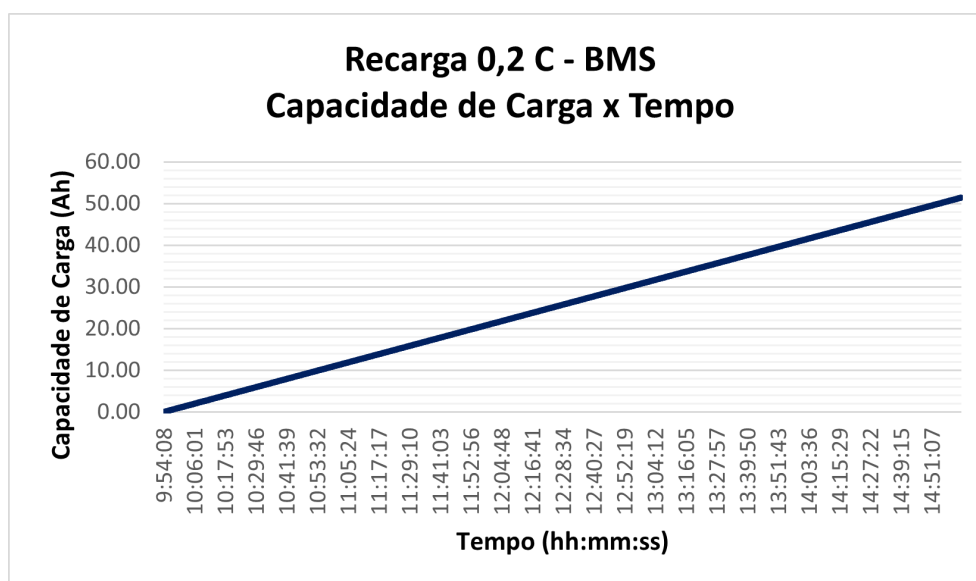
**Figura 3.42:** Gráfico do estado de carga pelo sistema na recarga (Fonte: o autor).



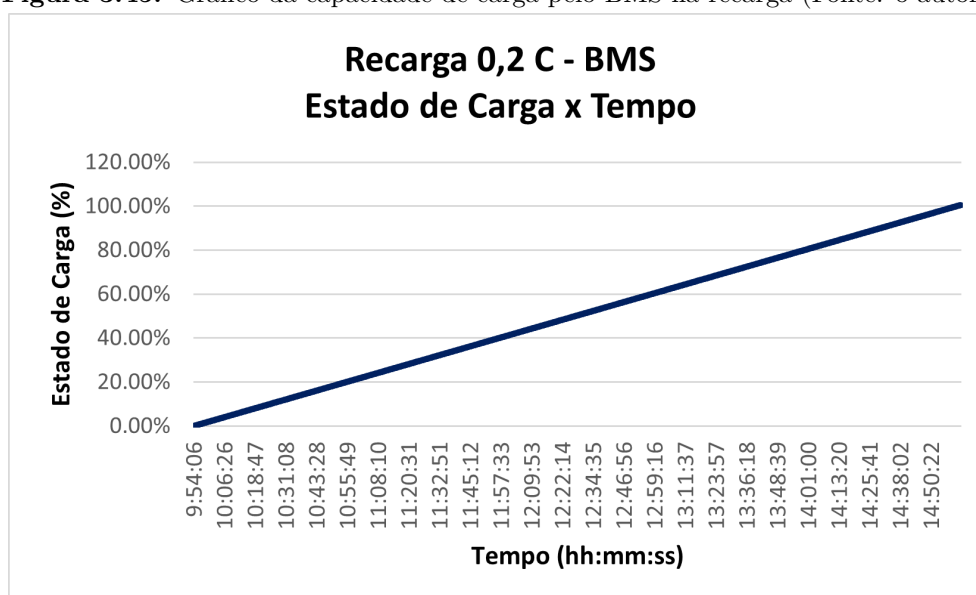
**Figura 3.43:** Gráfico da tensão elétrica pelo BMS na recarga (Fonte: o autor).



**Figura 3.44:** Gráfico da corrente elétrica pelo BMS na recarga (Fonte: o autor).



**Figura 3.45:** Gráfico da capacidade de carga pelo BMS na recarga (Fonte: o autor).



**Figura 3.46:** Gráfico do estado de carga pelo BMS na recarga (Fonte: o autor).

Como pode ser visto, o sistema em linhas gerais correspondeu bem a solução proposta, o próximo capítulo discutirá mais sobre as conclusões a respeito do projeto.

## Capítulo 4

# Considerações Finais

### 4.1 Conclusão

O sistema proposto para o cálculo do estado de carga se mostrou satisfatório e promissor, principalmente por apresentar uma divergência com relação ao cálculo do BMS menor que 1%, na descarga e também recarga, a diferença na descarga foi próxima dos 0,6 % com relação ao estado de carga final. Uma observação a ser feita é que o BMS quando entra em proteção por *under voltage* ele zera a tensão elétrica nos terminais, porém mantém o monitoramento da tensão elétrica do *pack* de células normalmente, como pode ser visto na Figura 3.20. O comportamento da *Cloud* também correspondeu ao esperado, ou seja, foi possível transmitir os dados em tempo real ao passo escolhido e o armazenamento ocorreu durante toda descarga e recarga. A leitura da tensão elétrica e corrente elétrica equivaleram aos do *software* do BMS, com diferenças menores que 2 V e 1 A, respectivamente. Ao analisar os gráficos de tensão com a Figura 2.6, vê-se que o comportamento se deu como esperado. Em resumo, a solução proposta pelo sistema atendeu às expectativas, com margem a possíveis melhorias futuras, que serão abordadas em um tópico adiante.

Para o preenchimento das tabelas 4.1 e 4.2, os valores foram colocados baseados no mesmo instante de tempo, pois o *software* do *BMS* registra ao passo de 1 segundo, enquanto que o do sistema proposto é de 10 segundos.

|                | Tensão Inicial | Tensão Final | <i>SOC</i> Inicial | <i>SOC</i> Final | Corrente Elétrica |
|----------------|----------------|--------------|--------------------|------------------|-------------------|
| <b>BMS</b>     | 49,87 V        | 41,73 V      | 99,92 %            | 1,17 %           | 10,00 A           |
| <b>Sistema</b> | 49,93 V        | 40,75 V      | 99,91 %            | 1,72%            | 9,94 A            |

**Tabela 4.1:** Descarga 0,2 C - 10 A (Fonte: o autor).

|                | Tensão Inicial | Tensão Final | <i>SOC</i> Inicial | <i>SOC</i> Final | Corrente Elétrica |
|----------------|----------------|--------------|--------------------|------------------|-------------------|
| <b>BMS</b>     | 43,44 V        | 52,22 V      | 0,08 %             | 100,57 %         | 10,00 A           |
| <b>Sistema</b> | 42,67 V        | 53,68 V      | 0,11 %             | 100,48 %         | 10,01 A           |

**Tabela 4.2:** Recarga 0,2 C - 10 A (Fonte: o autor).

## 4.2 Dificuldades Encontradas

Dentre as dificuldades ao longo do desenvolvimento do sistema, com base na linha do tempo, as principais foram:

- Definição de qual componente utilizar para fazer a medição da corrente elétrica. Como visto anteriormente, os resistores *shunt* costumam ser amplamente utilizados nos BMS, porém seria necessária uma abordagem mais invasiva com relação ao sistema, pois o uso desses dispositivos faz-se necessário a conexão com o *pack* das células. O que conflitou com a premissa do projeto, que é ser o menos invasivo possível. Logo, uma saída encontrada foi a utilização do sensor de efeito Hall, este porém, costuma ter a precisão menor que a de um resistor *shunt*, então foi necessário um estudo maior sobre como utilizá-lo. E apesar de seu circuito integrado suportar uma corrente elétrica de até 30 A, segundo o *datasheet*, o *borne* estava limitado a 10 A;
- Fazer a configuração da computação em nuvem necessitou de bastante atenção, para fazer de forma correta e não gerar custos indevidos, pois foi preciso estudar as melhores possibilidades de se realizar o *pipeline* dos dados, de forma que fosse possível registrá-los em tempo real e ao mesmo tempo ter o cuidado com os custos que essa computação poderia vir a gerar.

## 4.3 Trabalhos Futuros

Tanto ao longo do trabalho como perto do seu fim, já foi possível observar que existem possibilidades de melhorias para o sistema, em cada aérea, algumas que podem ser citadas são:

- Sensores de efeito Hall mais precisos, e que consigam trabalhar com correntes mais elevadas, para o caso de recargas e descargas de maiores *c-rate*;
- Pode-se também viabilizar o estudo de uma estrutura física para acomodação dos componentes eletrônicos utilizados, que vise a proteção contra choques mecânicos e interferências externas de diversas fontes;
- Utilizar a própria *cloud* para fazer a análise dos dados e até gerar *dashboards* para apresentações e acompanhamentos.

# Referências

ANDREA, D. (2020). *Lithium-ion Batteries and Applications - Batteries Volume 1*. Artech House.

AWS. Amazon kinesis data firehose.

<https://aws.amazon.com/pt/kinesis/data-firehose>. Acesso em: 05-08-2023.

AWS. Amazon s3. <https://aws.amazon.com/pt/s3/>. Acesso em: 05-08-2023.

AWS. Aws iot core. <https://aws.amazon.com/pt/iot-core/>. Acesso em: 05-08-2023.

Azure. O que é computação em nuvem? <https://azure.microsoft.com/pt-br/resources/cloud-computing-dictionary/what-is-cloud-computing>. Acesso em: 05-08-2023.

DONNO, M. D., TANGE, K., e DRAGONI, N. (2019). Foundations and evolution of modern computing paradigms: Cloud, iot, edge, and fog. *IEEE Access*, 7:150936 – 150948.

FRADEN, J. (2016). *Handbook of Modern Sensors*. Springer, 5. edição.

HART, D. W. (2011). *Power Electronics*. Springer, 1. edição.

HILLAR, G. C. (2017). *MQTT Essentials - A Lightweight IoT Protocol*. Packt, 1. edição.

KORTHAUER, R. (2018). *Lithium-Ion Batteries: Basics and Applications*. Springer, 1. edição.

LI, J. e YUE, L. S. (2012). Preparation and performance of 100ah li-ion battery with lifepo4 as cathode material. *Advanced Materials Research*, 463-464:753–759.

MARTINS, D. C. e BARBI, I. (2006). *Eletrônica de Potência: Conversores CC-CC básicos não isolados*. Springer, 2. edição.

MQTT-Organization. Mqtt: The standard for iot messaging. <https://mqtt.org/>. Acesso em: 05-08-2023.

- PERTENCE JÚNIOR, A. (2012). *Amplificadores Operacionais e Filtros Ativos*. Springer, 7. edição.
- PLETT, G. L. (2015). *Battery Management Systems Volume I: Battery Modeling*. Artech House.
- PLETT, G. L. (2016). *Battery Management Systems Volume II: Equivalent-Circuit Methods*. Artech House.
- SEHGAL, N. K., BHATT, P. C. P., e ACKEN, J. M. (2022). *Cloud Computing with Security and Scalability*. Springer, 3. edição.
- Services, A. W. O que é a computação em nuvem?  
<https://aws.amazon.com/pt/what-is-cloud-computing/>. Acesso em: 2023-08-05.
- UNIVERSITY, B. (2021). Comparison table of secondary batteries.  
<https://batteryuniversity.com/article/bu-107-comparison-table-of-secondary-batteries>. Acesso em: 02-09-2023.
- VALLATHAI, S. K. (2017). *Introduction to Embedded Systems*. McGraw Hill Education, 2. edição.
- WEICKER, P. (2014). *A Systems Approach to Lithium-Ion Battery Management*. Artech House.
- YUAN, D., YANG, Y., e CHEN, J. (2013). *Computation and Storage in the Cloud*. Elsevier, 1. edição.