

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

LUCAS BRAGGIÃO CALLIGARIS

**DESENVOLVIMENTO DE UM MÓDULO ESCRAVO PARA
UM SISTEMA DE GERENCIAMENTO DE BATERIAS**

PONTA GROSSA

2024

LUCAS BRAGGIÃO CALLIGARIS  

DESENVOLVIMENTO DE UM MÓDULO ESCRAVO PARA UM SISTEMA DE GERENCIAMENTO DE BATERIAS

Development of a battery management system slave module

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

Orientadora: Profa. Dra. Fernanda Cristina Corrêa   

PONTA GROSSA

2024



Este Trabalho de conclusão de curso está licenciado sob uma Licença Creative Commons Atribuição–NãoComercial–SemDerivações 4.0 Internacional, que permite uso e distribuição em qualquer meio ou formato, desde que o trabalho original seja devidamente citado, o uso não seja comercial e nenhuma modificação ou adaptação seja feita.

LUCAS BRAGGIÃO CALLIGARIS

**DESENVOLVIMENTO DE UM MÓDULO ESCRAVO PARA
UM SISTEMA DE GERENCIAMENTO DE BATERIAS**

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

Data de aprovação: 08 de maio de 2024

Profa. Dra. Fernanda Cristina Corrêa
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof. Dr. Carlos Henrique Illafont
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof. Dr. Sergio Luiz Stevan Junior
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

PONTA GROSSA

2024

Dedico este trabalho a meus pais, por todo
o apoio, amor e aprendizados que
moldaram quem eu sou hoje.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, em primeiro lugar, ao meu pai Aldo e minha mãe Izabela por serem meus maiores apoiadores durante toda essa jornada.

Agradeço a minha orientadora Profa. Dra. Fernanda Cristina Corrêa, por todo o conhecimento transmitido e pela oportunidade de participar em um projeto tão incrível como o ROTA2030.

Agradeço aos meus amigos Emerson (Jamal) Gonçalves, Esther Sangali, Felipe Nicolini, Vitor Pagani e Wesley Alves que tive o prazer de conhecer durante a graduação, vocês foram os responsáveis por deixar todo esse período muito mais divertido e memorável.

Ao grupo LICON agradeço a estrutura disponibilizada para que este trabalho fosse realizado, aos demais integrantes por todo o suporte no desenvolvimento do projeto e pela parceria dentro e fora do campus.

A UTForce agradeço por ser meu ponto de partida nesse estudo sobre baterias e eletrificação veicular, sendo a base para todo o conhecimento que adquiri e para as oportunidades que agarrei nessa área de conhecimento.

Aos meus amigos da infância e adolescência que, mesmo com a distância, continuam fazendo parte da minha vida e mantendo contato durante todos esses anos.

A todos os que contribuíram, direta ou indiretamente, para a realização desta pesquisa.

E por último agradeço a FUNDEP pelos recursos que foram disponibilizados ao ROTA2030 que tornaram esse trabalho viável.

Quase sempre existe um bom caminho que você ainda não descobriu. Procure até encontrar, em vez de se contentar com a escolha que está diante dos seus olhos no momento. (Dalio, 2019)

RESUMO

Este trabalho tem por objetivo apresentar o projeto e desenvolvimento da parte de um sistema monitorador de um gerenciador de baterias de íons de lítio responsável pela coleta de dados sobre tensão, corrente e temperatura das baterias durante sua carga, descarga e estado estacionário, utilizando como inspiração a arquitetura de baterias de um veículo elétrico. Para o desenvolvimento do dispositivo, utilizou-se um microcontrolador ESP32 somado a periféricos como sensores de corrente, sensores de temperatura e conversores analógico-digitais, para realizar o papel de um monitorador de baterias. Os *softwares* utilizados para o projeto foram Altium Designer e Microsoft Visual Studio Code com a extensão Platform IO. E, para validações, foram utilizadas baterias de íons de lítio modelo 18650. No decorrer do trabalho foram relatados o procedimento utilizado para a definição de componentes, desenvolvimento do projeto de *hardware* e de *software* do dispositivo, obstáculos encontrados e decisões tomadas para contornar esses problemas.

Palavras-chave: Baterias de íons de Lítio; BMS; ESP32; Módulo escravo; Veículos Elétricos.

ABSTRACT

This paper aims to present the project and development of a lithium-ion battery management system monitoring module inspired on an electric vehicle battery architecture. For the device development it was used the microcontroller ESP32 attached with peripherals such as current sensors, temperature sensors and analogic to digital converter, to be used as a battery monitor. The software used for the project were Altium Designer and Microsoft Visual Studio Code with the Platform IO extension. And, for validation, it was used 18650 lithium-ion batteries. Also, during this paper, the used procedure used for component definition, hardware project development, obstacles found, and the decisions made to overcome these problems were reported.

Keywords: Lithium-ion batteries; BMS; ESP32; Slave Module; Electric Vehicles.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Exemplo de curva de descarga em baterias de íons de lítio. . .	19
Figura 2 – Exemplo de curva de descarga em baterias de íons de lítio. . .	20
Figura 3 – Exemplo de associações em série e paralelo de baterias: (a) Série, (b) Paralelo	21
Figura 4 – Energia e potência específicas para diferentes químicas de baterias de lítio	22
Figura 5 – Comparação geral para diferentes químicas de baterias de lítio	24
Figura 6 – Tipos de arquiteturas para BMS: (a) distribuído, (b) centralizado	25
Figura 7 – Metodologia para projetar um BMS	26
Figura 8 – Diagrama de blocos funcional do ESP32	28
Figura 9 – Pinagem do módulo de ESP32 utilizado	28
Figura 10 – Comparação de um sinal contínuo e discreto	29
Figura 11 – Exemplo de um resistor <i>shunt</i>	31
Figura 12 – Exemplo de um sensor de efeito <i>hall</i>	31
Figura 13 – Tipos de conversores de potência estáticos	33
Figura 14 – Esquemático de exemplo para balanceamento passivo	35
Figura 15 – Circuito de balanceamento ativo com transformador <i>flyback</i> compartilhado	36
Figura 16 – Diagrama exemplificando a comunicação I2C	37
Figura 17 – Exemplo de bateria utilizada para o projeto	40
Figura 18 – Módulo com conversor analógico digital ADS1115 escolhido .	41
Figura 19 – Sensor de corrente escolhido	42
Figura 20 – Sensor de temperatura escolhido	42
Figura 21 – Conversor CC-CC <i>Buck</i> escolhido	43
Figura 22 – CAN transceiver escolhido	44
Figura 23 – Descarregador de baterias	45
Figura 24 – Esquemático do circuito	50
Figura 25 – Módulo para o sensor de temperatura Dallas com resistor integrado	51
Figura 26 – Fluxograma explicando o desenvolvimento de software do módulo escravo	52
Figura 27 – Descrição dos elementos do módulo escravo	53
Figura 28 – Conectores para as baterias	54
Figura 29 – Apresentação do sistema não energizado	55
Figura 30 – Apresentação do sistema energizado	56
Figura 31 – Parametrização do descarregador	57
Figura 32 – Coleta de dados durante descarga	58

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Tensão total do sistema	59
Gráfico 2 – Corrente durante a descarga	60
Gráfico 3 – Comparativo entre comportamento de corrente e tensão durante a descarga	61
Gráfico 4 – Tensão de cada célula durante a descarga	62
Gráfico 5 – Tensão medida para cada célula	63
Gráfico 6 – Temperatura média do módulo	64
Gráfico 7 – Comparação entre a temperatura média do módulo e a corrente	65
Gráfico 8 – Temperaturas de cada célula do módulo	65
Gráfico 9 – Temperaturas individuais em comparação com a média	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	– Tabela de características de uma célula de íons de lítio	18
Tabela 2	– Características da bateria do Kwid e-tech	39
Tabela 3	– Valores de resistores calculados e seus respectivos equivalentes comerciais escolhidos	47

LISTA DE SIGLAS

ADC	Conversor Analógico Digital, do inglês <i>Analog to Digital Converter</i>
BLE	Bluetooth de baixa energia, do inglês <i>Bluetooth Low Energy</i>
BMS	Sistema Gerenciador de Baterias, do inglês <i>Battery Management System</i>
CAN	Rede de Controle por Área, do inglês <i>Controller Area Network</i>
CANH	CAN alto, do inglês <i>CAN High</i>
CANL	CAN baixo, do inglês <i>CAN Low</i>
CI	Circuito Integrado
CP	Potência constante, do inglês <i>Constant Power</i>
CSV	Valores Separados por Vírgula, do inglês <i>Comma Separated Value</i>
DAC	Conversor Digital Analógico, do inglês <i>Digital to Analog Converter</i>
DDP	Diferença De Potencial
GND	Aterramento, do inglês <i>ground</i>
GPIO	Pino de Propósito Geral, do inglês <i>General Purpose Input Output</i>
Hz	Hertz
I ² C	Protocolo de comunicação I2C (<i>Inter-Integrated Circuit</i>)
IoT	Internet das coisas, do inglês <i>Internet of Things</i>
LFP	Lítio, Ferro, Fosfato
NMC	Níquel, Manganês e Cobalto
NTC	Coeficiente de temperatura negativo, do inglês <i>Negative Temperature Coefficient</i>
PTC	Coeficiente de temperatura positivo, do inglês <i>Positive Temperature Coefficient</i>
PWM	Modulação por Largura de Pulso, do inglês <i>Pulse Width Modulation</i>
SCL	<i>Clock</i> Serial, do inglês <i>Serial Clock</i>
SDA	Dado Serial, do inglês <i>Serial Data</i>
SoC	Estado de Carga, do inglês <i>State of Charge</i>
SoH	Estado de Saúde, do inglês <i>State of Health</i>
SPI	Interface de Periférico Serial, do inglês <i>Serial Peripheral Interface</i>
TWAI	Interface Automotiva de 2 fios, do inglês <i>Two Wire Automotive Interface</i>
UART	Recebidor-Transmissor Assíncrono Universal, do inglês <i>Universal Asynchronous Receiver-Transmitter</i>
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
VEs	Veículos Elétricos

LISTA DE SÍMBOLOS

W	Watts, W
V	Tensão, V
i	Corrente, A
Wh	Watt-hora, Wh
Ah	Ampere-hora, Ah
C	Taxa C de carga e descarga
z	Faixa de resolução discreta

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Objetivos	16
1.1.1	Objetivo geral	16
1.1.2	Objetivos específicos	16
1.2	Justificativa	16
1.3	Estrutura do trabalho	17
2	REVISÃO DA LITERATURA	18
2.1	O pacote de baterias	18
2.2	O BMS	24
2.3	Microcontroladores	27
2.3.1	ESP32	27
2.4	Sensores	28
2.4.1	Aquisição do sinal de tensão	28
2.4.2	Sensores de corrente	30
2.4.3	Sensor de temperatura	32
2.5	Conversores estáticos	32
2.6	Equalização de tensão	34
2.6.1	Balanceamento passivo	34
2.6.2	Balanceamento ativo	35
2.6.3	Balanceamento híbrido	36
2.7	Comunicação de dados	36
2.7.1	Comunicação I2C	36
2.7.2	Comunicação CAN	37
3	MATERIAL E MÉTODOS	39
3.1	Materiais	39
3.2	Desenvolvimento	46
3.3	Escopo do módulo desenvolvido	46
3.4	Formulação do sistema	47
3.4.1	Formulação do Hardware	47
3.4.2	Formulação do software	51
3.5	Apresentação do módulo	53
3.6	Implementação do módulo	54
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	59
5	CONCLUSÕES	67
	REFERÊNCIAS	68

1 INTRODUÇÃO

O surgimento dos Veículos Elétricos (VEs) se deu em meados do século XIX, estando diretamente atrelado ao avanço tecnológico das baterias. A bateria de chumbo-ácido foi apresentada pela primeira em 1859 pelo belga Gaston Planté, esta nova tecnologia passou a ser utilizada por diversos VEs produzidos no início da década de 80 em países como França e Estados Unidos (Baran; Legey, 2011), e até hoje são utilizadas para alimentar os sistemas elétricos dos veículos à combustão devido ao seu baixo preço e alta segurança.

Entretanto, devido à baixa densidade de energia, sua utilização se tornou inviável para alimentar os novos motores elétricos que pudessem ser utilizados para eletrificação veicular dentro do espaço disponível (Castro; Barros; Veiga, 2013), então os VEs passaram a perder espaço no mercado para os veículos à combustão que possuíam uma autonomia e potência muito maior do que os elétricos da época e eram muito mais baratos (Venditti, 2020).

Com a evolução do potencial energético de baterias de íons de lítio e da tecnologia dos motores elétricos, tanto em quesitos de potência, volume e peso, os VEs voltaram a ganhar espaço no mercado mundial, que está se intensificando cada vez mais por quesitos ambientais e até mesmo por barateamento do produto final.

Além do avanço tecnológico relacionado à composição química das baterias, outras duas invenções que impulsionaram o desenvolvimento, eficientemente, dos VEs foram: a frenagem regenerativa e o surgimento de sistemas híbridos envolvendo motores à combustão e motores elétricos.

A frenagem regenerativa permite que as baterias sejam carregadas por meio da energia cinética produzida pela rotação do motor elétrico, fazendo com que a autonomia do veículo se prolongue durante a viagem, postergando a necessidade de uma parada em um posto de recarga.

Existem diversas tecnologias para implementar esse processo, sendo as principais: o volante de inércia, molas de armazenagem de energia, sistema hidráulico e sistema eletromagnético.

Dentre essas, uma das mais utilizadas para veículos elétricos é a tecnologia do sistema eletromagnético (Ehsani; Gao; Emadi *et al.*, 2003). Essa tecnologia consiste em utilizar o motor elétrico do veículo como um gerador elétrico, dessa forma, quando

o motor desacelera ocorre uma inversão no sentido da corrente elétrica, retornando ao pacote de baterias e recarregando as células que o compõe (JUNIOR; DE ABREU, 2019).

Como os veículos no geral constituem uma parte muito importante na vida da população moderna, as consequências ambientais de se utilizar a combustão como meio principal de deslocamento começaram a aparecer (Emadi, 2014). Como resultado, a eletrificação veicular voltou a ser considerada já que ela não gera poluentes durante o funcionamento do veículo.

As baterias de veículos modernos são majoritariamente de íons de lítio, pois esse material possui alta densidade de potência e energia como principais características, fazendo com que seja possível armazenar e liberar muita energia utilizando um pequeno espaço e possuindo pouco peso. Entretanto, essas baterias precisam ser gerenciadas para que se possa garantir a segurança do veículo, do passageiro e uma alta vida útil, portanto foram criados circuitos denominados de Sistema Gerenciador de Baterias, do inglês *Battery Management System* (BMS), responsáveis por monitorar o desempenho do pacote de baterias e tomar medidas resultantes desse desempenho.

Os BMS são utilizados em todos os tipos de produtos que necessitam de baterias, realizando desde as funções mais básicas, como coleta de dados e estimativa de Estado de Carga, do inglês *State of Charge* (SoC), até funções de grande sofisticação e complexidade, como balanceamento ativo e estimativa do estado de saúde. Com a ascensão dos VEs, sua utilização e desenvolvimento se tornaram inevitáveis, principalmente devido ao grande número de baterias necessárias para alimentar um sistema de tração elétrico.

Para BMS que gerenciam um grande número de baterias a modularização do sistema passa a ser interessante, separando-se assim o dispositivo em 2 tipos de módulos, os mestres e os escravos.

O módulo escravo é o responsável por monitorar, coletar e compartilhar com o módulo mestre as características eletromecânicas do pacote de baterias que ele está cuidando. Estas características são compostas pela tensão de cada célula, corrente drenada (descarregamento) ou introduzida a elas (carregamento) e suas respectivas temperaturas. Além disso, também pode caber ao módulo escravo realizar a equalização da tensão das baterias pelo fato dele ter um controle maior a nível de célula.

Já o módulo mestre é responsável por receber os dados coletados pelo escravo

e estimar o SoC e o SoH, tomar medidas de segurança, administrar o balanceamento entre módulos ou entre células, entre outras funções.

1.1 Objetivos

Nesta seção serão apresentados tanto o objetivo geral como os objetivos específicos a serem atingidos para a conclusão do trabalho. Além disso, também será apresentada a justificativa que direcionou a realização desse trabalho.

1.1.1 Objetivo geral

Desenvolver a parte, de um sistema gerenciador de baterias de íons de lítio, responsável pela coleta de dados e monitoramento de características importantes de um grupo específico de células.

1.1.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Entender a estrutura, elementos e funcionamento de um BMS e definir componentes a serem utilizados no módulo;
- projetar um esquemático com o todos os componentes definidos, além de montar um protótipo conforme o esquemático projetado;
- Realizar testes com o protótipo para garantir seu funcionamento e coletar os dados de tensão, corrente e temperatura de um conjunto de seis baterias associadas em série.

1.2 Justificativa

Quando se trata de equipamentos alimentados a bateria, sejam eles veículos totalmente elétricos ou híbridos, patinetes e bicicletas, smartphones ou notebooks, todos os equipamentos que precisam de um controle de carga e de vida útil dessas baterias precisam de um sistema que as gerencie. Considerando mais especificamente com relação à mobilidade elétrica, onde se está lidando com níveis de energia e valores

monetários muito maiores, estes sistemas de gerenciamento desempenham um papel fundamental no funcionamento do produto e na segurança do consumidor. Estes são responsáveis por garantir que o suprimento de energia do veículo esteja em níveis seguros, que ele dure por mais tempo possível e que o usuário consiga acessar e entender todas as informações importantes sobre o pacote de baterias, tais como: estado de carga, estado de saúde, autonomia e temperatura.

Os VEs estão em crescimento constante e acelerado no Brasil, porém, as tecnologias voltadas ao gerenciamento de suas baterias são majoritariamente importadas, gerando altos custos logísticos, tarifários e cambiais. Tendo isso em vista, decidiu-se desenvolver uma das partes principais deste sistema de gerenciamento, o sistema de aquisição de dados, como tema principal deste trabalho. Utilizando como inspiração o pacote de baterias do Renault Kwid e-tech, também chamado de Dacia Spring, para realizar o dimensionamento e modelagem do dispositivo.

1.3 Estrutura do trabalho

O capítulo dois deste trabalho apresenta uma descrição sobre o conteúdo teórico necessário para o desenvolvimento do trabalho. Nele são abordadas informações sobre baterias de lítio e suas associações, o que são gerenciadores de baterias e como eles funcionam, além de uma contextualização sobre microcontroladores e suas funções, como é feito e porque é necessária a equalização de tensão das baterias e também uma descrição sobre o protocolo de comunicação Rede de Controle por Área, do inglês *Controller Area Network* (CAN).

No Capítulo 3, é apresentado como o projeto de pesquisa foi desenvolvido, listando quais materiais foram utilizados, para que função eles servem, como foi desenvolvida a parte do projeto e os protótipos do produto, além de apresentar suas alterações e melhorias decorrentes.

No quarto capítulo tem-se os resultados obtidos com os protótipos produzidos. Também é abordada uma análise sobre o que esses resultados significam, como podem ter sido causados e buscando propor melhorias futuras.

Por último, foi apresentada a conclusão da pesquisa com base nos resultados obtidos e discutidos no capítulo anterior.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 O pacote de baterias

As baterias de um VE são a sua parte mais importante e mais cara, constituindo cerca de 50% do valor do veículo (Xiong, 2020), pois serão elas que fornecerão energia tanto para o sistema de tração quanto para o sistema de comunicação e controle do veículo. Elas são associadas em série e paralelo para suprir a potência demandada pelo conjunto motor, inversor e demais equipamentos. Para definir o arranjo total do pacote de baterias deve-se considerar fatores como: potência do motor, composição eletro-química da célula de bateria, capacidade da célula de bateria, robustez térmica, tensões (total, nominal e mínima), custo, dimensões, estrutura (prismática, 18650 ou tipo bolsa), peso e densidade de energia, densidade de potência (Bhatt; Darieby, 2018; Lacerda, 2016).

As baterias de lítio possuem três valores principais de tensão: máxima (total), nominal e mínima (de corte) apresentadas na Tabela 1. A tensão máxima, chamada de tensão de carregamento na tabela, indica o valor de tensão que a célula apresenta quando está totalmente carregada e também com qual valor deve ser definido na fonte quando se deseja carregá-la. A tensão nominal é o valor de tensão que ela assume durante maior parte da descarga onde, na Tabela 1, é de 3,62 V. Já a tensão mínima indica a tensão que a bateria assume quando está descarregada, na Tabela 1 representa a tensão de corte e possui valor de 2,75 V.

Tabela 1 – Tabela de características de uma célula de íons de lítio

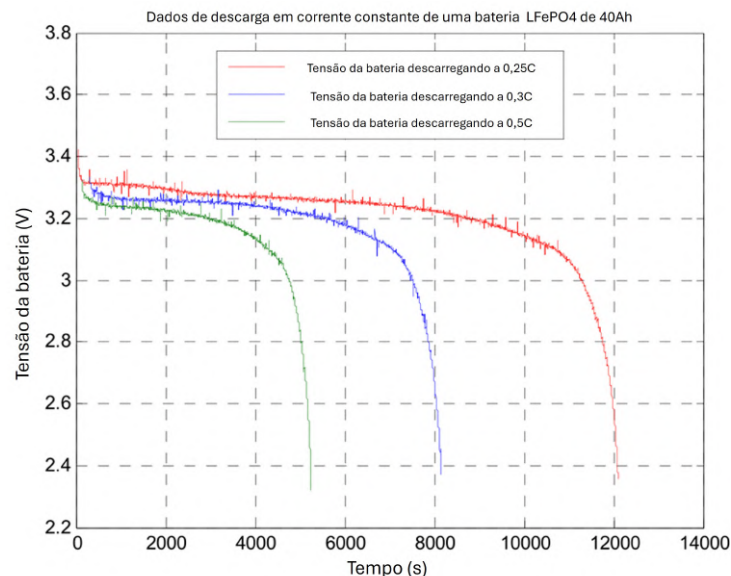
Item	Especificação
Capacidade típica	2150 mAh (0,2C, 2,75V descarga)
Capacidade mínima	2050 mAh (0,2C, 2,75V descarga)
Tensão de carregamento	4,2 V $\pm$ 0,05 V
Tensão nominal	3,62 V (Descarga a 1C)
Método de carga	CC-CV (Tensão constante com corrente limitada)
Tensão de corte	2,75 V
Temperatura de operação	0 a 45 °C em carga -20 a 60 °C em descarga

Fonte: Adaptado de Samsung (2020)

Uma apresentação do gráfico da tensão de uma bateria durante o processo de descarga é apresentada na Fig. 1, onde se tem a tensão máxima da bateria em análise é de aproximadamente 3,4 V indicada no tempo 0 do gráfico. A tensão possui algumas

variações conforme a taxa de descarga ficando em torno de 3,3 V que corresponde ao período, onde as três curvas de descarga tendem a se manter constantes e a tensão mínima é indicada pelo menor valor de tensão que as células assumem (2,4 V) ao final do ciclo.

Figura 1 – Exemplo de curva de descarga em baterias de íons de lítio.

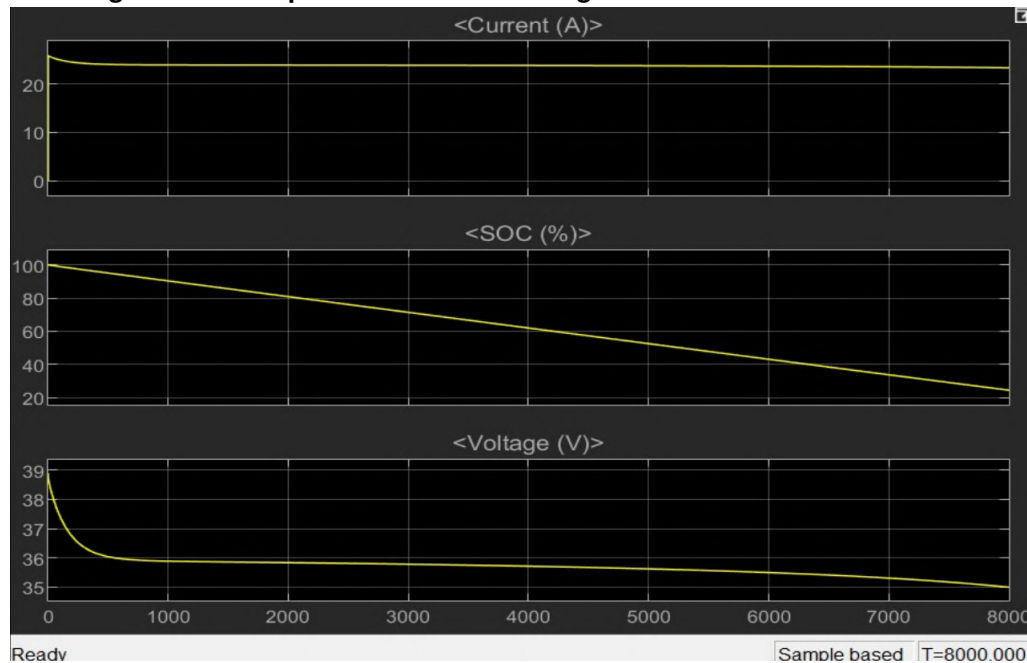


Fonte: Adaptado de Wu (2011)

Na Fig. 2, tem-se uma simulação da descarga de baterias de íons de lítio onde se pode observar, não só o comportamento teórico da tensão (terceira curva), como também o comportamento do SoC (segunda curva) e da corrente drenada da bateria (primeira curva). Com a descarga ocorrendo em corrente constante, é possível observar que o SoC da bateria decai linearmente e enquanto a tensão apresenta seu comportamento característico. Na curva de tensão, entre o tempo zero e mil segundos, também é possível verificar a transição entre tensão máxima (39 V) e tensão nominal (36 V) da bateria, onde a tensão apresenta uma queda de 2V logo no início da simulação e depois a curva sofre uma amortização até se estabilizar em 36 V pelos próximos quatro mil segundos.

Essa é uma característica padrão de células de íons de lítio e, portanto, quando se decide dimensionar as baterias para um dispositivo, deve-se considerar não apenas a tensão máxima para limitações elétricas do sistema, mas também a tensão nominal para a estimativa de desempenho. Essas curvas podem sofrer variações de comportamento devido à sua composição química, taxa de descarga (como mostra a Figura 1), desgaste e até mesmo pelas suas características singulares atreladas à sua fabricação.

Figura 2 – Exemplo de curva de descarga em baterias de íons de lítio.



Fonte: Takkalaki *et al.* (2021)

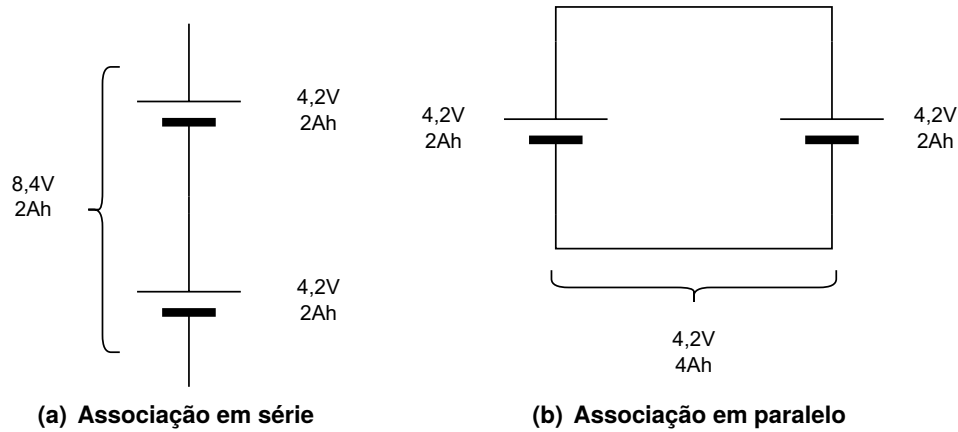
Para exemplificar as características que uma célula pode apresentar, se tem a Tabela 1 onde tais características são fornecidas pelo fabricante da célula em seu respectivo *datasheet* e são utilizadas para dimensionar o pacote de baterias e, posteriormente, o BMS.

Para atender as demandas de potência das baterias de lítio é possível associá-las de duas formas diferentes: em série e em paralelo. Ambas aumentam a potência disponível do sistema através do aumento de tensão ou do aumento de capacidade, respectivamente.

A Fig. 3 ilustra como são feitas as conexões em série e paralelo de baterias. Ao associar muitas células em paralelo, a corrente drenada para suprir a potência exigida se torna proporcionalmente maior, pois a tensão do conjunto se mantém. Por consequência, os cabos e componentes precisam ser superdimensionados ocupando maior volume, deixando o conjunto mais caro e gerando mais perdas de energia, na associação em paralelo não é necessária a realização de equalização dessas células, pois terão obrigatoriamente a mesma tensão. Quando se associam células em série tem-se um aumento de tensão do conjunto, aumentando-se a potência fornecida sem aumentar a corrente. Com isso, não é crucial superdimensionar o sistema, entretanto, é necessário equalizar a tensão entre as células que vão se diferenciando conforme a demanda de energia do sistema propulsor do veículo. Essa equalização consiste em

manter todas as baterias em série com o mesmo nível de tensão, dessa forma não existe risco de uma bateria descarregar por completo antes das demais e prejudicar o desempenho do sistema.

Figura 3 – Exemplo de associações em série e paralelo de baterias: (a) Série, (b) Paralelo



Fonte: Autoria própria (2024)

Quando um conjunto é associado em paralelo, a tensão do conjunto é igual à tensão de uma única célula, em contrapartida, sua capacidade aumenta proporcionalmente ao número de células conectadas, para realizar essa associação deve-se interconectar os polos positivos e negativos de uma célula com a outra. A tensão nominal de um pacote de baterias por meio da equação (1). E a capacidade por meio da equação (2).

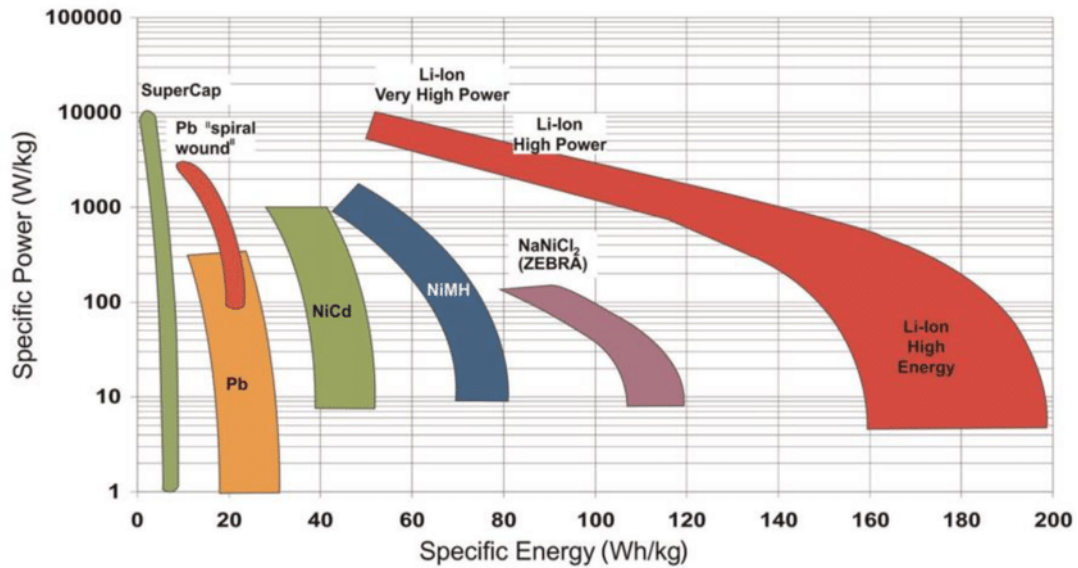
$$V_{pacote} = V_{célula} \times n_{células \text{ em série}} \quad (1)$$

$$Capacidade_{pacote} = Capacidade_{célula} \times n_{células \text{ em paralelo}} \quad (2)$$

A Fig. 4 apresenta um gráfico de diversas composições diferentes para baterias de lítio, e até mesmo supercapacitores, comparadas com relação à sua potência e energia. Quanto maior a área coberta pela figura, maior a densidade de potência e energia da química. Como é possível de se observar, a química que ocupa a maior área do gráfico são as baterias de íons de lítio. Dentro dessa categoria, existem outras diversas variações de composição que devem ser consideradas na hora de escolher qual bateria utilizar.

De acordo com Bhatt e Dariaby (2018) a energia específica é a quantidade nominal de energia, em Watt-hora, por massa, em quilos. Já a potência específica,

Figura 4 – Energia e potência específicas para diferentes químicas de baterias de lítio



Fonte: Kraft, Stahl e Vetter (2020)

também de acordo com Bhatt e Darieby (2018), é a potência máxima disponível, em Watts, por massa, em quilos também. Essas características são influenciadas conforme a composição química da bateria e também com as suas dimensões. Analogamente pode-se comparar essas duas características com um copo e uma garrafa, a garrafa é maior que um copo, mas demora mais para ser enchida ou esvaziada, devido ao seu tamanho e também devido ao tamanho do seu gargalo, portanto ela tem maior densidade de energia; já um copo não consegue armazenar tanta água quanto uma garrafa, mas pode ser enchido e esvaziado quase que imediatamente e, portanto, ele tem a maior densidade de potência (Naseri, 2017).

Observando a Figura 4 observa-se que as baterias de íons de lítio ocupam maior área no gráfico, indicando que possuem as melhores propriedades de armazenamento energético comparada com as demais composições químicas apresentadas.

A potência é expressa em Watts (W) e é dada pela equação (3), V é a tensão da bateria em Volts (V) e i é a corrente em amperes (A).

$$\text{Potência} = V_{\text{nominal}} \times i \quad (3)$$

A energia é expressa em Watt-hora (Wh) e pode ser calculada por meio da equação (4) onde *Capacidade* refere-se à capacidade energética da bateria em Ampere-hora (Ah) sendo a corrente de descarga que a bateria consegue fornecer por 1h. (University, 2021).

$$Energia = V_{nominal} \times Capacidade \quad (4)$$

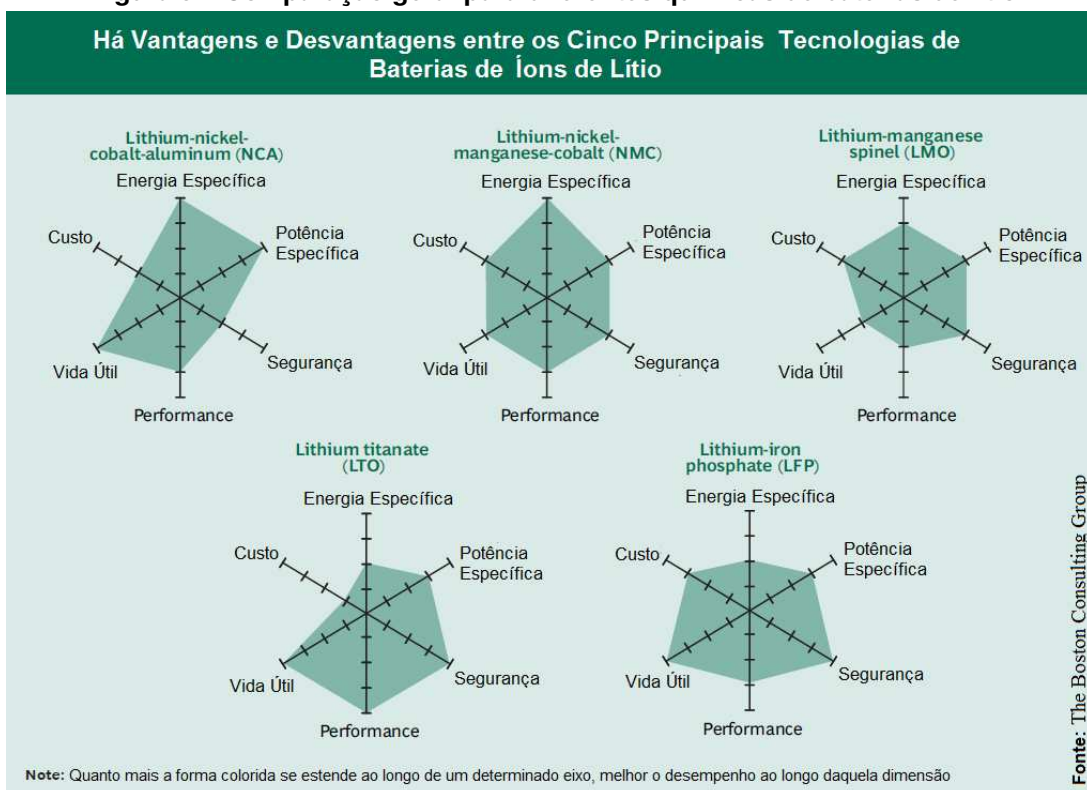
Ao conhecer a capacidade de uma bateria é possível definir as suas taxas de carga e descarga, também chamada de taxa C . Ou seja, a taxa C define a velocidade com que a bateria é carregada ou descarregada com base na sua capacidade (Univerity, 2021), esta taxa pode ser calculada por meio da equação (5).

$$C = \frac{Corrente_{Descarga/Carga}}{Capacidade} \quad (5)$$

Além da necessidade de se realizar uma comparação de densidade de potência e energia específica para a escolha da melhor química de baterias, também é importante considerar outros fatores igualmente importantes como, por exemplo, custo e segurança. Um exemplo deste tipo de comparação pode ser encontrado na Figura 5, ela é composta por 5 gráficos de radar, um para cada química analisada, onde se compara 6 aspectos: energia específica, custo, vida útil, desempenho, segurança e potência específica. Quanto maior a área do gráfico em um determinado eixo, melhor é a bateria neste aspecto. Portanto, quanto maior a área geral do gráfico, melhor é a bateria. Destacam-se entre essas variações as baterias de Lítio Ferro Fosfato ($LiFePO_4$) ou também chamada de LFP, Lítio Cobalto Oxigênio ($LiCoO_2$) e Lítio Manganês ($LiNMC$).

Observando novamente a Figura 5, percebe-se que a bateria mais bem avaliada, mantendo equilíbrio nos aspectos avaliados dentre as cinco, é a NMC, tendo como maior destaque sua energia específica. Outra química que é muito utilizada no mercado em geral é a LFP que, como se pode observar, destaca-se pela sua alta vida útil e segurança apesar de não ter muita energia específica assim como alto desempenho. O fato dela ser extremamente segura e ter uma vida útil alta acaba sendo vantajoso, pois não coloca os clientes em risco e dá uma maior longevidade para o produto adquirido. Sua baixa densidade de energia é geralmente compensada pela utilização de mais células, que, a curto prazo, pode gerar um custo maior, mas pela alta vida útil, se paga no longo prazo.

Figura 5 – Comparação geral para diferentes químicas de baterias de lítio



Fonte: Fatima Rosolem (2018)

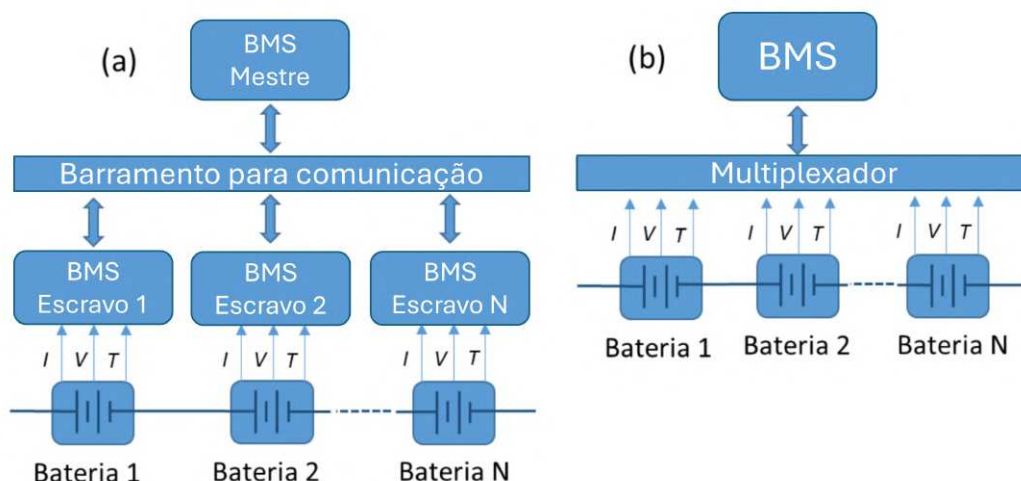
2.2 O BMS

Um BMS é um dispositivo cuja função é gerenciar e controlar, de alguma forma, as baterias conectadas a ele (Xiong, 2020). Este controle é feito a partir do monitoramento de seus sinais, como a tensão, corrente e a temperatura da bateria para, a partir destas informações, estimar seu SoC, seu Estado de Saúde, do inglês *State of Health* (SoH), sua resistência interna e demais informações vitais para o bom funcionamento delas e do produto que estão alimentando.

O BMS, possui duas arquiteturas: distribuída (a) e centralizada (b), como mostra a Figura 6. Na arquitetura centralizada, o mesmo dispositivo será responsável por todas as células de um pacote e realizará as funções do BMS, tais como, a coleta de dados, estimativa de parâmetros, balanceamento, etc. Enquanto um BMS distribuído é composto por vários dispositivos, denominados módulos escravos, responsáveis pela coleta de dados, realização de tarefas de segurança e desempenho em conjuntos de baterias que compõe o pacote total. Esses módulos enviam os dados coletados para outro dispositivo, chamado de módulo mestre, que irá receber os dados que os módulos escravos coletam, estimar os parâmetros das células e avaliar se alguma medida de

segurança ou desempenho precisará ser tomada. Caso seja necessário, ele enviará essa decisão ao módulo responsável por esse conjunto realizar a tarefa necessária (Duarte, 2013).

Figura 6 – Tipos de arquiteturas para BMS: (a) distribuído, (b) centralizado



Fonte: Adaptado de Duarte (2013)

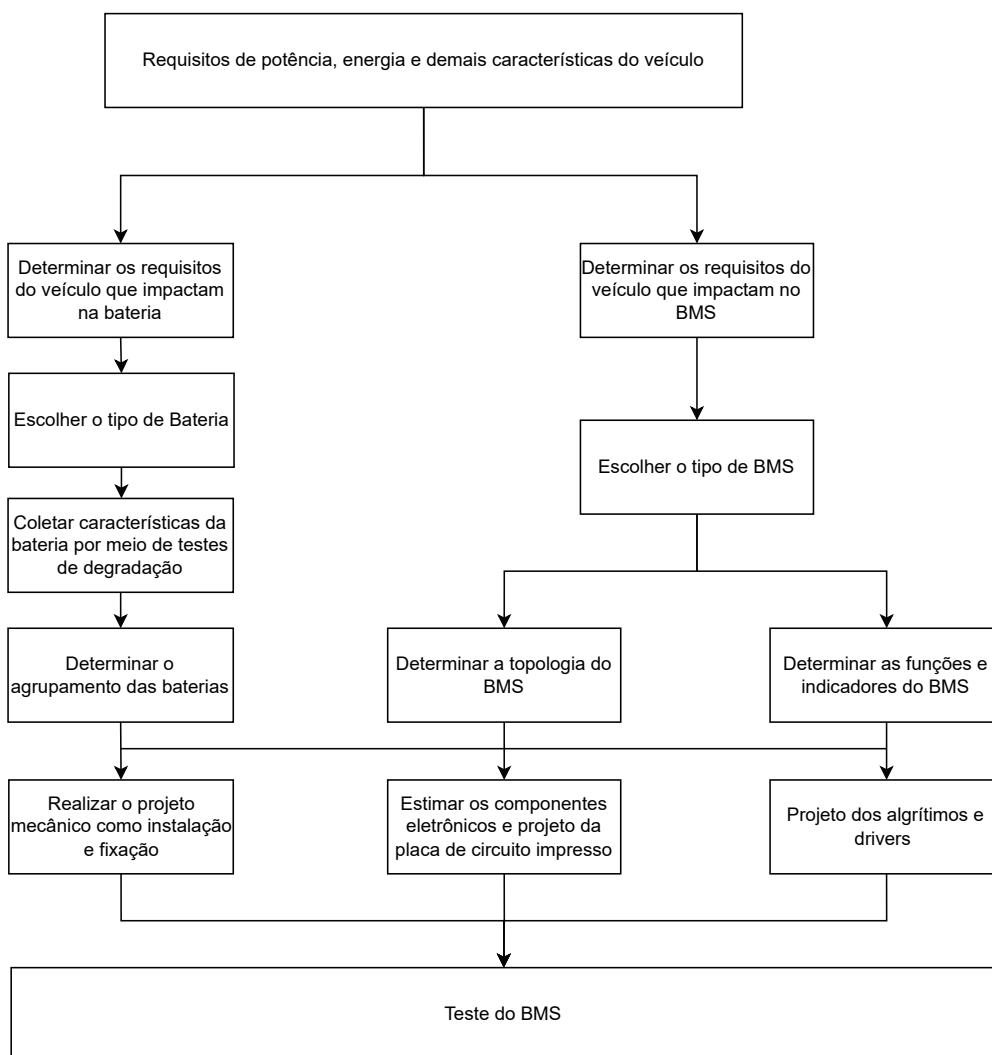
Quando se trata de sistemas pequenos, simples e/ou com espaço reduzido, a arquitetura centralizada se torna comum devido ao seu baixo custo e simplicidade de implementação. Entretanto, quando o sistema vai ficando maior e mais complexo, a arquitetura distribuída começa a ser mais vantajosa, pois dispositivos diferentes vão ficar responsáveis por pequenas parcelas da bateria, evitando sobrecarga de tarefas no microcontrolador central, evitando a necessidade de componentes mais caros.

Para projetar o dispositivo de gerenciamento de baterias, é essencial considerar as características da arquitetura distribuída do pacote de baterias. Isso inclui o número de células em série, a divisão em módulos, e as tensões máxima e mínima de operação. Também são importantes a capacidade das células, as correntes e tensões máximas suportadas pelo controlador e periféricos, a composição química das células, o método de medição de corrente do BMS e os sensores de temperatura utilizados.

A Figura 7 apresenta, de forma simplificada, a metodologia para realizar um projeto de um BMS aplicado a VEs, nota-se que ele pode ser projetado em paralelo com, ou após, o projeto do pacote de baterias, pois as características da bateria e sua topologia impactam diretamente no projeto e topologia do BMS. Portanto, estas informações são utilizadas não somente para escolher ou modelar fisicamente o BMS como também para definir os parâmetros do sistema a ser monitorado em software

e garantir a eficiência do monitoramento, seu tempo de vida e segurança do usuário. Esta metodologia foi utilizada como base para realizar o projeto do módulo escravo do BMS neste trabalho.

Figura 7 – Metodologia para projetar um BMS



Fonte: Adaptado de Xiong (2020)

Segundo Devi e Kumar (2022), as principais características que um BMS deve ter são a coleta de dados por meio dos vários sensores e a estimativa do SoC e do SoH da bateria. Ainda, é tarefa do BMS informar se as células estejam em boas condições, alertando os controladores ou atuadores necessários sobre a condição em que a bateria se encontra. O BMS também é o responsável em realizar a comunicação com os demais componentes da bateria, realizar o gerenciamento térmico, realizar a equalização dos níveis de tensão entre as células e controlar a carga e descarga do pacote de baterias.

2.3 Microcontroladores

Segundo Cardoso (2020) um microcontrolador é um único Circuito Integrado (CI) que reúne um núcleo de processador, memórias voláteis e não voláteis e diversos periféricos de entrada e de saída de dados.

Existem diversos tipos de microcontroladores para as mais diversas aplicações, como, por exemplo: automação de processos, instrumentação, soluções de Internet das coisas, do inglês *Internet of Things* (IoT) e sistemas de gerenciamento. Eles variam em tamanho, formato, número de núcleos, poder de processamento, forma de programação, memória, entre outros.

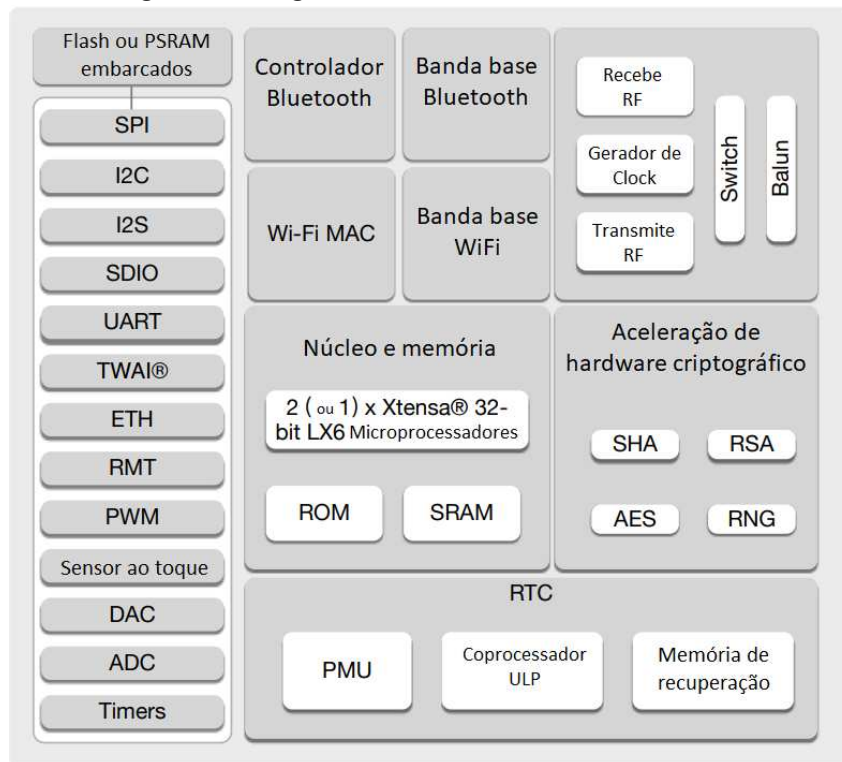
2.3.1 ESP32

O microcontrolador ESP32 é um dispositivo de baixo custo da empresa ESPRESSIF que, por possuir um módulo de Bluetooth de baixa energia, do inglês *Bluetooth Low Energy* (BLE) e Wi-Fi integrado, é muito utilizado para aplicações de IoT, contudo seu potencial excede apenas um tipo de aplicação.

A Figura 8 apresenta um diagrama de blocos do ESP32, sendo possível visualizar sua arquitetura e recursos integrados no chip. Dentre todas as suas características ressaltam-se: seu chip de 32 bits, com 2 núcleos de 2,4GHz, *clock* de 8MHz, 34 pinos de propósito geral, suporte à comunicação Interface de Periférico Serial, do inglês *Serial Peripheral Interface* (SPI), Interface Automotiva de 2 fios, do inglês *Two Wire Automotive Interface* (TWAI), também chamado de CAN 2.0, Recebidor-Transmissor Assíncrono Universal, do inglês *Universal Asynchronous Receiver-Transmitter* (UART) e Protocolo de comunicação I2C (*Inter-Integrated Circuit*) (I²C), Timers integrados e controle via Modulação por Largura de Pulso, do inglês *Pulse Width Modulation* (PWM).

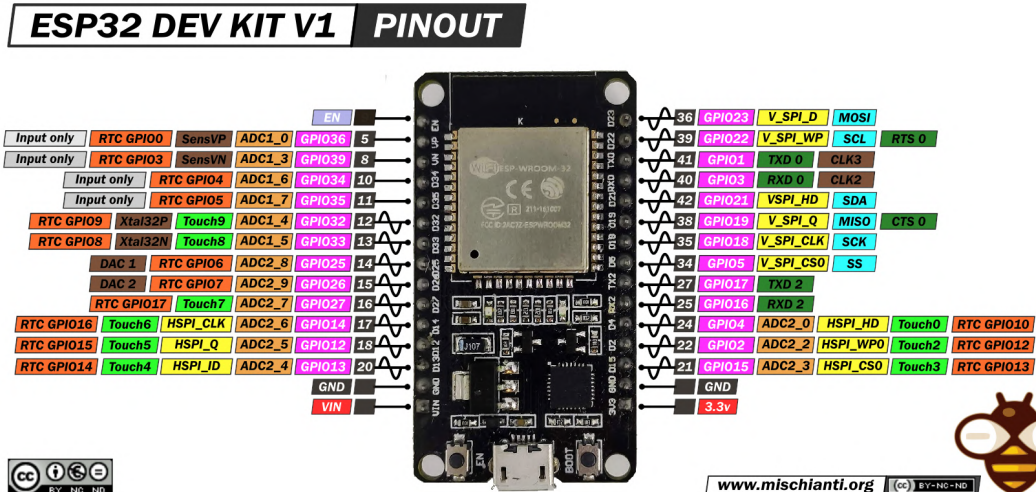
Na Figura 9 é possível observar a pinagem do módulo de ESP32, nota-se que um pino tem diversos propósitos como, por exemplo, o 14, que além de ser um Pino de Propósito Geral, do inglês *General Purpose Input Output* (GPIO) pode ser um ADC, um RTC GPIO e um Conversor Digital Analógico, do inglês *Digital to Analog Converter* (DAC).

Figura 8 – Diagrama de blocos funcional do ESP32



Fonte: Traduzido de ESPRESSIF (2022)

Figura 9 – Pinagem do módulo de ESP32 utilizado



Fonte: Mischianti (2022)

2.4 Sensores

2.4.1 Aquisição do sinal de tensão

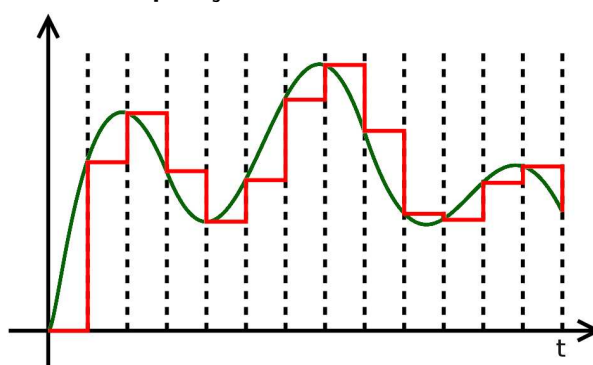
A aquisição dos valores de tensão pelo microcontrolador se dá por meio de um Conversor Analógico Digital, do inglês *Analog to Digital Converter* (ADC) que transforma

sinais contínuos em sinais discretos. Estes sinais discretos são quantizados por um número limitado de valores inteiros (z) os quais são delimitados a partir da resolução deste conversor representada por bits e podem ser calculados por meio da equação (6). Quanto maior o número de bits (n_{bits}), maior a sua precisão na leitura de valores contínuos (Puhlmann, 2015).

$$z = 2^{n_{bits}} \quad (6)$$

Na Figura 10, é possível observar uma comparação de um sinal contínuo, representado pela curva em verde, e um sinal discreto, representado pela curva em vermelho. A “largura” dos degraus na curva discreta é definida pela resolução do conversor, quanto maior a resolução, maior a taxa de amostragem e menor a largura do degrau, consequentemente, maior a precisão e semelhança da curva discreta com a curva real. Existem diversos métodos de conversão: flash, aproximação sucessiva, rampa dupla e sigma-delta (Floyd, 2009). Cada método varia em quesitos de precisão, velocidade e custo. Em geral, quanto maior for a precisão do método empregado, mais lenta é a captura do sinal. Se a aplicação necessitar de alta precisão num tipo de sinal que tenha variações rápidas, o custo de um conversor com essas características será consideravelmente mais alto, sendo assim é necessário ponderar os tipos de conversor para a aplicação desejada visando encontrar o melhor custo-benefício.

Figura 10 – Comparação de um sinal contínuo e discreto



Fonte: Puhlmann (2015)

Os ADCs podem ser internos ao microcontrolador ou externos, os internos economizam espaço disponível na placa de circuito impresso, pois já estão integrados ao chip do microcontrolador. Os externos são utilizados quando o controlador não possui ADC integrado ou quando ele não apresenta a precisão ou linearidade necessária para

o tipo de aplicação e enviam os dados coletados por algum protocolo de comunicação suportado pelo microcontrolador e pelo ADC.

2.4.2 Sensores de corrente

Os dois principais métodos para realizar a coleta de dados de corrente de um dispositivo elétrico são: por resistência *shunt* e por efeito hall (Duarte, 2013). Cada um desses métodos possui características singulares e deve ser escolhido considerando seus pontos fortes e fracos e a intensidade da corrente que passa pelo sistema em análise (Maniar, 2019).

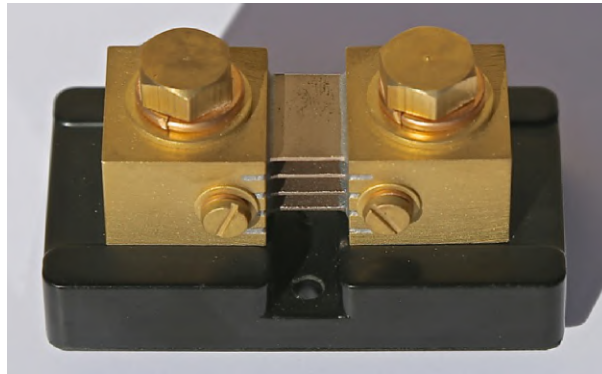
O método de resistência *shunt* consiste na utilização de um resistor, ligado em série no circuito de descarga, que suporte a corrente que ele precisará medir e que tenha uma resistência baixa o suficiente para que o ADC consiga adquirir os sinais sem gerar uma queda de potencial muito grande em seus polos a ponto de queimá-lo (Duarte, 2013). É por meio desta Diferença De Potencial (DDP) que se determinará a corrente que o atravessa. Suas maiores vantagens são a linearidade de instrumentação, não provocando distorções significativas de valores, e ele não gera um valor *offset* (valor de desvio de um ponto de origem) quando a corrente é 0. Desta forma, se não houver passagem de corrente, a diferença de potencial será 0, isso não acontece com sensores de efeito hall, sendo necessário calibrá-lo para remover esse desvio de valor.

Entretanto, duas grandes desvantagens desse método são que ele não fica eletricamente isolado do sistema, deixando o BMS suscetível a picos de tensão e corrente que atravessem o resistor, podendo danificar o equipamento e, por se tratar de uma carga resistiva, gera perdas no sistema.

A Figura 11 apresenta um exemplo de um resistor *shunt*. Como ele será conectado em série ao circuito de descarga, utilizam-se os parafusos nos seus polos para interromper barramento e também para conectar os fios de medição da diferença de potencial gerada por ele. Para baixas correntes, o mesmo conceito se aplica, a única mudança é que a potência, e por consequência o volume físico, do resistor podem ser bem menores do que o apresentado na Figura 11.

Um sensor de efeito hall, apresentado na Figura 12, mede a intensidade da corrente que passa por um cabo através do campo magnético gerado por essa movimentação de elétrons no condutor (Plett, 2015). Por realizarem essa instrumentação

Figura 11 – Exemplo de um resistor *shunt*



Fonte: Plett (2015)

através do campo magnético resultante no barramento, ao invés de serem ligados em série no circuito, como o resistor *shunt*, o dispositivo fica eletricamente isolado do circuito em teste (Maniar, 2019).

Figura 12 – Exemplo de um sensor de efeito *hall*



Fonte: LEM (2022)

Esse tipo de sensor retorna um valor de tensão (geralmente de 0 a 5V ou -12V a 12V) ou de corrente (geralmente na faixa dos mA) proporcional à corrente de que ele está medindo. Quando o sensor gera uma corrente de saída, utiliza-se um resistor para transformá-la em um valor de tensão correspondente para que o ADC consiga ler e enviar as informações para o BMS (Carvalho, 2016). Uma vantagem da saída em corrente do sensor de efeito hall é que o sinal fica imune a ruídos independentemente da distância que o sensor está no módulo.

2.4.3 Sensor de temperatura

Baterias de íons de lítio funcionam numa faixa de temperatura bem restrita, portanto cabe ao BMS monitorar essa temperatura e tomar ações para que, durante a carga e descarga das baterias, a sua temperatura se mantenha dentro dessa zona.

Para realizar este controle utilizam-se sensores de temperatura em conjunto com um algoritmo no microcontrolador que leia esses dados, compare com os valores máximo e mínimo permitido e comunique o *master* sobre as informações para que ele possa tomar, ou não, alguma ação.

Os sensores precisam transformar a temperatura do ambiente em que se encontram em diferentes níveis de tensão para o microcontrolador conseguir ler esses dados.

O sensor de temperatura mais utilizado em aplicações comuns é o termistor, podendo ser NTC ou PTC, são resistores que variam sua resistência, inversamente (NTC) ou diretamente (PTC) proporcional, conforme a temperatura à qual ele está exposto.

Outro tipo de sensor é o termômetro digital, como o Dallas 18B20 (Dallas, 2024), onde um circuito integrado é responsável por realizar o sensoriamento da temperatura e ele consegue retornar um sinal digital ao invés de níveis de tensão que precisam ser convertidos em sinais discretos. Com isso, é possível obter as temperaturas sem a necessidade de utilizar divisores de tensão, conversores analógicos digitais e também tem interface com comunicação *onewire*, permitindo que vários sensores possam ser conectados ao mesmo pino do microcontrolador, otimizando o número de entradas e saídas digitais disponíveis (Dallas, 2024). Sendo assim optou-se por sua utilização no projeto do módulo escravo.

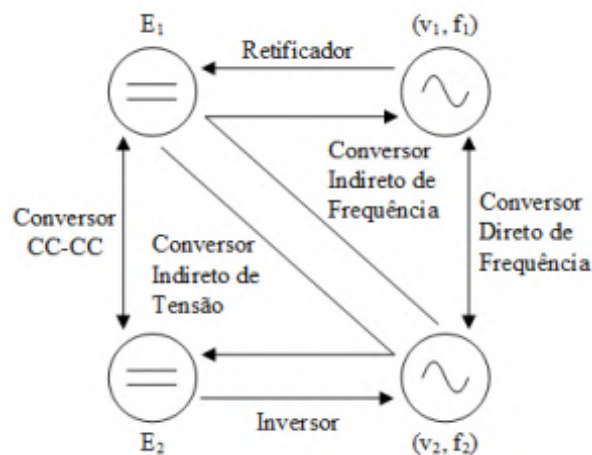
2.5 Conversores estáticos

Segundo Barbi (2006), um conversor estático pode ser definido como um sistema, construído por sistemas passivos como, por exemplo, resistores, capacitores e indutores, e elementos ativos, como diodos, transistores MOSFETs, entre outros, associados a uma lei pré-estabelecida.

Estes conversores permitem realizar o tratamento eletrônico da energia elétrica, ou seja, eles serão responsáveis por controlar o fluxo de energia entre dois sistemas ou mais (Barbi, 2006).

Existem 4 tipos de conversores estáticos: CA-CC, CC-CC, CC-CA e CA-CA. Um diagrama demonstrando as transformações de corrente pode ser encontrado na Figura 13.

Figura 13 – Tipos de conversores de potência estáticos



Fonte: Barbi (2006)

Para os conversores CC-CC, o foco principal é a alteração dos níveis de tensão, seja para mais ou para menos. Quando se deseja elevar os níveis de tensão de um circuito deve-se utilizar um conversor denominado de "*boost*". Este termo se refere a palavra "impulso" do inglês, e sua grande vantagem é que ao aumentar os níveis de tensão a corrente consequentemente se torna menor, melhorando a eficiência do sistema, pois a dissipação de energia por calor é menor. Quando aplicado a um VE, este método pode reduzir o número de baterias necessárias para alimentar o sistema de tração do carro, deixando-o mais leve e potencialmente mais barato também (Barrozo *et al.*, 2010).

Quando se deseja reduzir os níveis de tensão de um circuito, deve-se optar pelo conversor do tipo "*buck*" que realiza o papel contrário do conversor *boost*, abaixando os níveis de tensão de entrada para um valor desejado de saída. Sua aplicação é muito utilizada para alimentar todos os componentes eletrônicos de um sistema de gerenciamento de baterias. Principalmente em sistemas distribuídos, acaba sendo vantajoso utilizar o próprio módulo da bateria como fonte de alimentação dos módulos do BMS. Entretanto, componentes eletrônicos possuem alimentação que variam de

3,3V a 12V e, muitas vezes, a tensão do módulo ultrapassa esses valores, portanto é necessária a utilização do conversor *buck* para ajustar a tensão das baterias aos limites elétricos dos componentes.

2.6 Equalização de tensão

O método de equalização de tensão consiste em, por meio da utilização de sistemas mais simples ou mais complexos, igualar os níveis de tensão de células associadas em série. A ideia é diminuir a diferença do estado de carga das baterias, também chamado de SoC, para assim otimizar o desempenho do veículo e prolongar a vida útil das baterias.

Diferentes problemas são decorrentes do desbalanceamento de baterias, dentre eles se destacam a diminuição do seu SoH, sobrecarga ou sub carga (Galvão *et al.*, 2022).

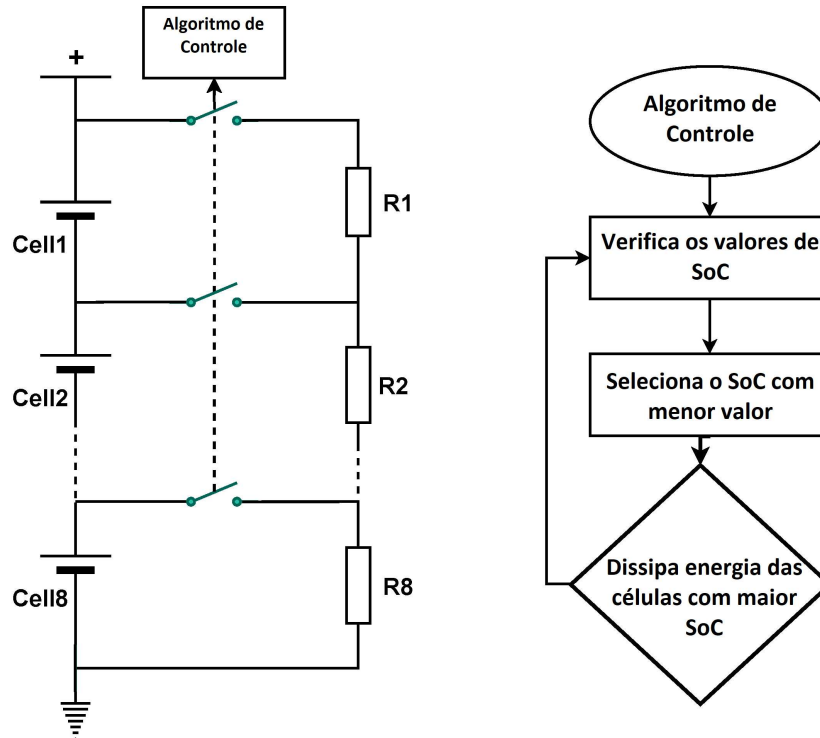
Existem duas formas de equalizar os níveis de tensão de uma bateria: de forma passiva ou ativa. Ademais, também existe uma forma de combinação entre esses dois métodos chamada de balanceamento híbrido. Essas formas de equalização serão discutidas a seguir:

2.6.1 Balanceamento passivo

O método de balanceamento passivo consiste em equalizar o nível de tensão das baterias em série por meio da dissipação de energia das células com maiores níveis de tensão. Esta dissipação é feita controladamente a partir de um algoritmo embarcado no microcontrolador utilizado.

A Figura 14 apresenta um fluxograma e esquemático da arquitetura básica de um balanceamento passivo. A dissipação é feita de forma sistemática a partir da diferença do nível de tensão de cada célula, quando esses valores diferem. O SoC também fica diferente e, como consequência, o algoritmo envia um sinal para o fechamento de determinadas chaves, conectando-as aos resistores e descarregando as células com maiores níveis de tensão.

Figura 14 – Esquemático de exemplo para balanceamento passivo



Fonte: Traduzido de Galvão *et al.* (2022)

2.6.2 Balanceamento ativo

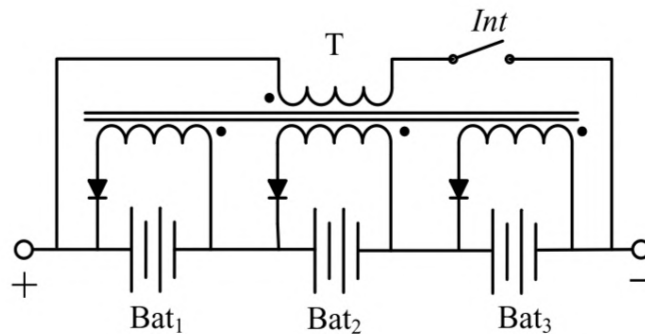
O método de balanceamento ativo consiste na equalização do nível de tensão de um conjunto de baterias por meio da transferência de energia de uma célula para outra, evitando altos desperdícios de energia. Este método é mais eficiente que o método passivo, entretanto, se torna mais custoso, de maior complexidade e exige muito mais espaço disponível para sua implementação.

Existem diversos meios de se realizar esta forma de equalização, podendo utilizar capacitores comutados de uma ou duas camadas (Duarte, 2013), transformador partilhado ou em paralelo (Qiu *et al.*, 2022), além de indutores compartilhados (Pokhariya; Kumar; Hardas, 2023). A escolha do método deve considerar características importantes de projeto, tais como: custo, espaço disponível, velocidade de equalização e quantidade de energia a ser transferida.

A Figura 15 mostra um dos métodos de balanceamento ativo, este método utiliza um transformador *flyback* primário compartilhando múltiplos secundários, sendo um para cada bateria, e utilizando diodos para impedir o fluxo de corrente no sentido contrário e um interruptor para controlar o fluxo de equalização. Como os secundários têm um

mesmo núcleo e o mesmo número de espiras, as tensões se equalizam naturalmente, pois, a corrente de cada secundário resulta da tensão de cada bateria (Duarte, 2013). A principal desvantagem deste método é que, quando se decide aumentar o número de baterias no balanceamento, deve-se trocar o transformador todo, pois seu número de secundários é pré-definido, gerando custos altos para expandir o sistema.

Figura 15 – Circuito de balanceamento ativo com transformador *flyback* compartilhado



Fonte: Duarte (2013)

2.6.3 Balanceamento híbrido

Este método de equalização é uma mistura dos dois métodos descritos anteriormente e pode ser utilizado quando se trata de um grande conjunto de baterias e se utiliza um BMS distribuído. A ideia é que os módulos escravos do BMS façam um balanceamento passivo ao nível de célula, ou seja, nível micro, enquanto o BMS mestre faça o balanceamento dos módulos ativamente, nível macro, podendo assim evitar grandes desperdícios de energia sem encarecer demais o sistema.

2.7 Comunicação de dados

É de extrema importância a comunicação entre os módulos do BMS, entre seus periféricos e com o mestre. Para isso deve-se adotar protocolos de comunicação para realizar essas atividades da forma mais eficiente e segura.

2.7.1 Comunicação I2C

A comunicação por Protocolo de comunicação I2C (*Inter-Integrated Circuit*) I²C, é uma comunicação serial composta pela utilização de dois barramentos, ou fios,

denominados Dado Serial, do inglês *Serial Data* (SDA) e *Clock Serial*, do inglês *Serial Clock* (SCL), eles são responsáveis por enviar, receber e garantir a mesma velocidade de informações. Este tipo de comunicação também segue a estrutura *master* e *slave*, ou seja, essa estrutura possui uma hierarquia onde o único que pode solicitar uma informação é o *master* e o *slave* por sua vez apenas envia a informação solicitada.

A Figura 16 apresenta como são conectados os componentes num barramento I2C. Esse protocolo é muito utilizado para realizar a comunicação do microcontrolador com periféricos, como, por exemplo, sensores ou ADCs, ao permitir que o mesmo barramento comporte vários periféricos e que se tenha controle de onde cada informação está vindo (Souza, 2023).



Fonte: Souza (2023)

2.7.2 Comunicação CAN

Sistemas automotivos, em geral, utilizam o protocolo de comunicação denominado CAN para transmitir todos os dados coletados pelo veículo. Este protocolo foi criado pela BOSCH e difundiu-se na indústria devido a sua alta blindagem contra ruídos que podem afetar as informações que trafegam no sistema de comunicação do veículo.

Este sistema também é composto por dois barramentos principais de comunicação, CAN alto, do inglês *CAN High* (CANH) e CAN baixo, do inglês *CAN Low* (CANL), responsáveis pela transmissão das informações e dois resistores de 120 Ω em cada extremidade dos barramentos para manter uma resistência equivalente do barramento de 60 Ω . A principal característica deste protocolo é que não existe uma hierarquia de mestre e escravo, como ocorre na comunicação I2C. Ademais, não existe um destinatário específico para a mensagem enviada, ou seja, quando um módulo envia uma

informação, todos os outros dispositivos, conectados diretamente ao barramento, a recebem e podem, ou não, realizar alguma ação com base nela.

Apesar de não haver hierarquia entre dispositivos, existe uma hierarquia entre mensagens nos barramentos, apenas uma mensagem pode ser transmitida por vez. Cada mensagem possui um endereçamento e, atrelado a ele, uma prioridade. Esta prioridade define qual a ordem de mensagens a serem enviadas pelos barramentos.

Essas mensagens, por conterem informações sigilosas do veículo, são criptografadas pelas montadoras em sistemas hexadecimais para proteger os dados que são transmitidos e evitar que pessoas externas consigam ter acesso ao controle completo do veículo.

3 MATERIAL E MÉTODOS

Neste capítulo, na seção 3.1, são listados quais materiais foram utilizados para o desenvolvimento deste trabalho e posteriormente, na seção 3.2, é descrito como são realizadas as atividades para se obter os resultados esperados.

3.1 Materiais

O Kwid e-tech, veículo cujas características foram utilizadas como base para este projeto, utiliza um pacote de baterias com potência de 26,8 kW, composto por 72 células de íons de lítio associadas em série e separadas em 12 módulos, conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 – Características da bateria do Kwid e-tech

Característica	Valor
Tipo de bateria	Íons de Lítio
Capacidade da bateria	26,8 kWh
Número de células	72
Número de módulos	12
Tensão total	262,8 V

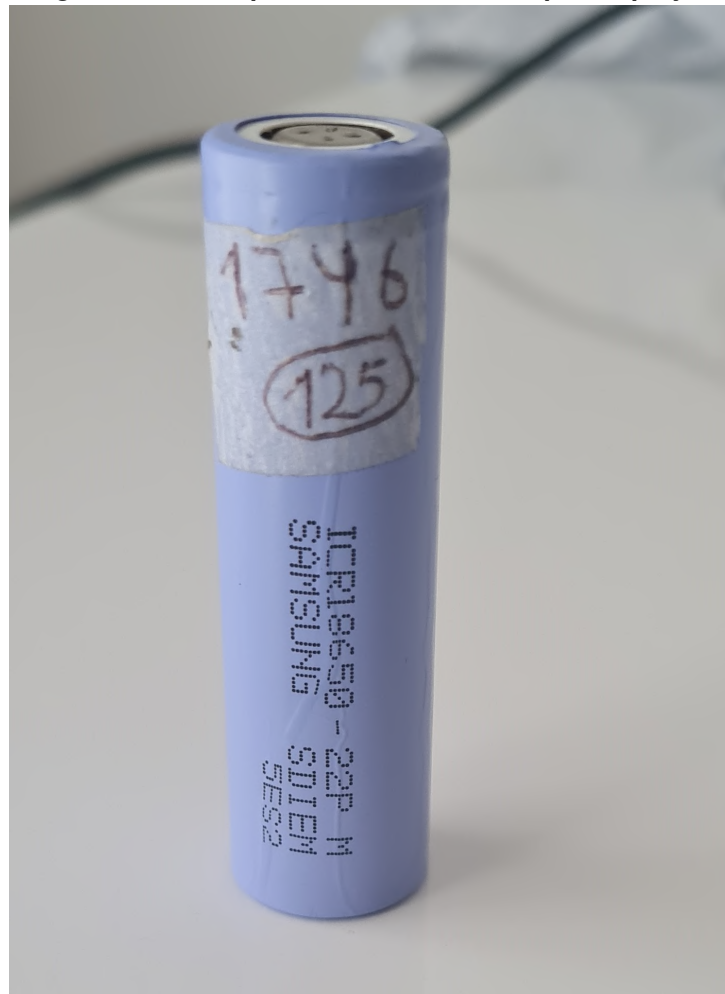
Fonte: Traduzido de Specifications (2021)

Com base nos valores apresentados na Tabela 2, nas informações descritas no capítulo 2 e nas equações (1) e (2) pode-se extrair as seguintes informações: cada módulo é composto de 6 células, a tensão nominal de cada célula é de 3,65 V e a capacidade de cada célula é de aproximadamente 102 Ah;

Tendo essas características em mente, definiu-se a utilização de baterias de lítio modelo 18650 com aproximadamente 2,2 Ah de capacidade e tensão nominal de 3,62 V (Samsung, 2020), que compreende a mesma faixa de valores da célula utilizada pelo veículo. Assim, é possível atingir níveis de tensão idênticos, mas com capacidades menores para evitar riscos de segurança durante os testes. A Figura 17 apresenta uma das células utilizadas no projeto e serviu como referência para a coleta dos parâmetros descritos de tensão e capacidade neste parágrafo.

A análise da literatura revelou que os projetos de monitoramento de baterias para veículos elétricos usam BMS comerciais específicos para essa aplicação. No entanto, devido à crise de semicondutores (Lima, 2021), a compra desses componentes se tornou inviável. Para resolver isso, optou-se por usar um microcontrolador facilmente

Figura 17 – Exemplo de bateria utilizada para o projeto



Fonte: Autoria própria (2024)

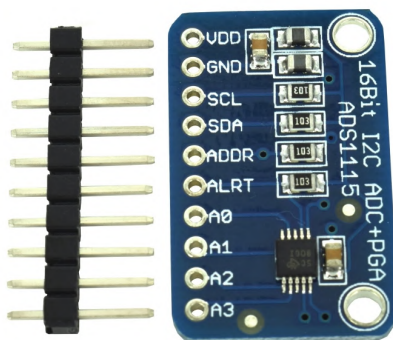
encontrado no mercado nacional e que não exige componentes específicos. O escolhido foi o ESP32, por ser barato, amplamente disponível, programável com a interface Arduino, compatível com comunicações SPI, UART e I2C, e por oferecer um processador potente com comunicação *Bluetooth* e WiFi, permitindo testes com esses recursos.

O ESP32 apresenta uma característica em relação ao seu ADC integrado, este só consegue manter sua linearidade lendo tensões entre 0,2 V e 2,5 V (Dobies, 2022) sendo que sua escala de leitura vai de 0V a 3,3V. Portanto, para corrigir este problema e utilizar um produto mais robusto e eficiente dedicado a leituras analógicas, característica principal do dispositivo, optou-se pela utilização do ADC ADS1115, apresentado na Figura 18. Sendo esse um conversor analógico digital com 16 bits de resolução com interface de comunicação I2C, cada ADS possui 4 entradas para leituras analógicas e permitem que mais de um seja conectado no mesmo barramento por meio de um pino de endereçamento, portanto é possível expandir para até 16 leituras (Instruments,

2018a).

Figura 18 – Módulo com conversor analógico digital ADS1115 escolhido

Optimus Digital



Fonte: Digital (2023)

Cada entrada analógica do ADS consegue suportar no máximo 0,3 V acima da tensão de alimentação aplicada a ele (Instruments, 2018a). Como serão associadas 9 células em série com tensão máxima de 3,7 V, foi necessária a utilização de resistores para realizar uma divisão de tensão nas entradas analógicas para adequar a tensão da célula com a tensão suportada pelo equipamento.

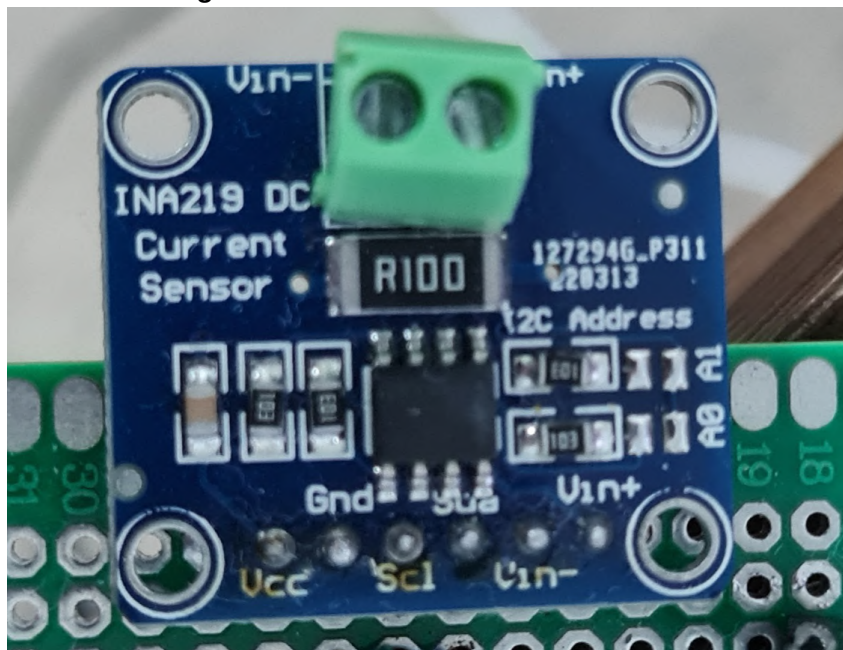
Para realizar a medição de corrente, foi utilizada uma resistência *Shunt* atrelada ao CI INA219. Este CI converte os valores da queda de tensão no resistor para o domínio discreto e consegue enviar esses dados via comunicação I2C, sendo a mesma utilizada pelos conversores AD1115, evitando a utilização de mais pinos do ESP (Instruments, 2015). O módulo utilizado pode ser visto na Figura 19.

Esse módulo consegue ler correntes até 3,2 A e suporta uma tensão máxima entre os pinos V_{in-} e V_{in+} de 26 V, sendo assim, definiu-se o tamanho do módulo a ser monitorado a partir dessa limitação.

Para a temperatura serão utilizados sensores Dallas D18B20 por possuírem ótima linearidade, faixa de temperatura de - 55 °C até +125 °C (Dallas, 2024), serem compatíveis com bibliotecas da IDE Arduino, possuírem saída digital e por serem facilmente encontrados em território nacional. Além disso, ele permite que mais sensores sejam conectados em série e seus dados são enviados para o microcontrolador via comunicação serial (Engineers, 2023).

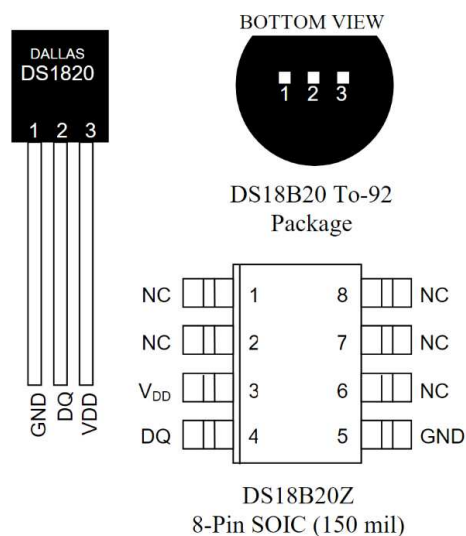
Cada módulo de baterias será responsável por alimentar seu respectivo módulo escravo do BMS, mas como a tensão do conjunto de baterias é maior do que a suportada

Figura 19 – Sensor de corrente escolhido



Fonte: Autoria própria (2024)

Figura 20 – Sensor de temperatura escolhido



Fonte: Dallas (2024)

pelos componentes do módulo, foi necessária a utilização de um conversor CC-CC *buck* para ajustar a tensão das baterias a um valor adequado para o BMS. O conversor escolhido foi o módulo LM2576HV que consegue converter tensões de até 60V em tensões de saída que podem ir de 35V até 1,35V (Instruments, 2023) atendendo a faixa de tensão de entrada dos componentes utilizados.

Figura 21 – Conversor CC-CC *Buck* escolhido



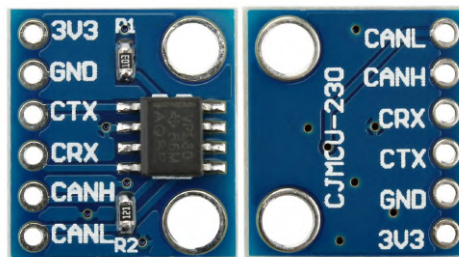
Fonte: Aliexpress (2023)

A Figura 21 apresenta o módulo do conversor definido, nota-se que ele permite escolher a tensão de saída por meio de um potenciômetro embutido no próprio sistema, facilitando sua aplicação.

Para realizar a comunicação do microcontrolador com os demais módulos e o mestre, optou-se pelo módulo de *CAN Transceiver* chamado SN65HVD230, sua escolha se deu pelo fato de ser possível alimentá-lo com 3,3V (Instruments, 2018b) que é a tensão de saída do ESP.

Outros módulos, que possuem interface com a comunicação Arduino, como o TJA1050 precisam de uma tensão de alimentação de 5 V para funcionar, o que dificulta a interface com ESP. Outra opção seria utilizar um módulo com o MCP2515 que permite uma faixa de tensão de alimentação entre 2,75 V até 5,5 V, mas devido ao espaço ocupado pelo módulo ser maior do que o ocupado pelo SN65HVD230 e por ser mais caro, optou-se por seguir com a utilização do SN65HVD230. Uma ilustração deste módulo pode ser observada na Figura 22.

Figura 22 – CAN transceiver escolhido



Fonte: Info (2023)

As baterias precisam ser descarregadas ou carregadas, para ser possível realizar a coleta de dados de corrente e verificar o comportamento dinâmico tanto das baterias quanto do módulo todo. Para isso, utilizou-se o dispositivo apresentado na Figura 23. O dispositivo suporta até 200 V de tensão na sua entrada (Atorch, s.d.) e possui uma interface interativa para ser possível selecionar o tipo de descarga que o usuário deseja realizar, estes modos são: tensão constante, corrente constante, resistência constante e potência constante. Ademais, é possível definir a duração da descarga, o valor de corrente desejado e qual a tensão de corte para interromper o processo. Além desses parâmetros que podem ser alterados, o *display* também mostra as características do conjunto de células, como a tensão, corrente, potência, capacitância, entre outros (Atorch, s.d.).

Figura 23 – Descarregador de baterias



Fonte: Autoria própria (2024)

Observa-se também que ele possui, a direita, um conector de 4 entradas, as 3 centrais são utilizadas para medir a tensão da bateria conectada a ele, já as que ficam na extremidade servem para medir a corrente que está sendo drenada das baterias (Atorch, s.d.). Portanto, para utilizar esse dispositivo corretamente, é necessário conectar as 4 entradas da mesma bateria.

A escolha deste descarregador se deu, principalmente, pela compatibilidade com tensões de até 200 V, pois componentes RLC simples como servo-motores ou ventoinhas se restringem a tensões de até 12 V e, como o módulo assume tensões acima de 20V, a utilização destes componentes se torna inviável. Portanto, a utilização de um dispositivo especificamente voltado a este tipo de aplicação se tornou necessária.

Além disso, também foram utilizados componentes passivos, como resistores e capacitores, conforme as instruções contidas nos *datasheets* destes componentes. Inclusive, para garantir o bom funcionamento do sistema todo, seja para os divisores de tensão utilizados para realizar a leitura de tensão das células ou para ter os 60 Ω no

barramento CAN e garantir a comunicação entre os módulos.

3.2 Desenvolvimento

Inicialmente, foi realizada uma pesquisa bibliográfica sobre o tema em estudo para adquirir conhecimento, encontrar equipamentos utilizados em outros trabalhos, definir as funções que um módulo escravo de BMS precisa ter e entender melhor as etapas do desenvolvimento de um BMS por completo.

Com a pesquisa bibliográfica feita partiu-se para o projeto de *hardware* do circuito a ser montado. Para isso, utilizou-se o software *Altium Designer* para projetar o esquemático do BMS. Conforme foi sendo desenvolvido o projeto de *hardware*, iniciou-se, em paralelo, a montagem de pequenos protótipos deste circuito em uma *protoboard* para realizar testes e validações em bancada, para assim poder realizar as devidas correções no projeto.

Em conjunto com a montagem em *protoboard* e projeto em *hardware*, iniciou-se a programação do ESP32 para ser possível realizar os testes em bancada, programando suas devidas funções conforme se desejava testar algum componente ou recurso necessário.

Tendo o circuito montado por completo, iniciou-se a montagem do protótipo utilizando uma placa de circuito impresso genérica e cabos para efetuar as devidas conexões. Em paralelo a isso, realizou-se os ajustes finais no código do ESP para garantir um bom funcionamento do equipamento.

Finalizado o desenvolvimento, realizou-se testes finais para a coleta dos dados e eventuais ajustes necessários.

3.3 Escopo do módulo desenvolvido

A maior prioridade de um módulo é a coleta dos dados da célula para posteriormente enviá-las para outros módulos, para comparar os resultados, e para o mestre, que será responsável por medidas de segurança e desempenho com base nessas informações. Essas decisões podem englobar tanto o comando para iniciar uma equalização de um módulo quanto para iniciar o processo de *shutdown* do pacote inteiro devido a fatores de segurança.

Sendo assim, este trabalho está contemplando o desenvolvimento em *hardware* de um módulo capaz de realizar a aquisição de todas as principais características de um pacote de baterias (tensão, corrente e temperatura) e se comunicar com outros módulos. Além da parte de *hardware*, o escopo também contempla a estruturação do software a ser embarcado no microcontrolador para realizar a aquisição desses dados. Os protocolos de comunicação estão fora do escopo deste projeto.

3.4 Formulação do sistema

3.4.1 Formulação do Hardware

Como dito na [Seção 3.1](#), para que o ADS1115 consiga realizar a leitura das tensões no módulo corretamente e sem colocar em risco seu próprio funcionamento, é necessária a utilização de divisores de tensão para que a tensão de entrada no pino de leitura não ultrapasse 3,7 V.

A Tabela 3 apresenta os valores de resistência teóricos e comerciais que foram necessários para garantir o funcionamento do ADC. Os valores teóricos foram calculados através do método de divisores de tensão e os valores comerciais foram definidos de acordo com uma tabela de resistores comercialmente disponíveis.

Tabela 3 – Valores de resistores calculados e seus respectivos equivalentes comerciais escolhidos

Tensão de entrada máxima [V]	Resistores	Razão entre V_{entrada} por $V_{\text{saída}}$	Resistor calculado [$k\Omega$]	Resistor comercial [$k\Omega$]
4,2	R1	1,2727	2,7273	3
8,4	R2	2,5455	15,4545	15,1
12,6	R3	3,8182	28,1818	30
16,8	R4	5,0909	40,9091	40
21,0	R5	6,3626	53,6364	51
25,2	R6	7,6364	66,3636	68

Fonte: Autoria própria (2024)

Com todos os componentes do projeto definidos, iniciou-se a estruturação do esquemático elétrico. Como foram escolhidos módulos para montar o sistema incluíram-se apenas conectores no esquemático, pois os componentes passivos que garantem seu funcionamento já estão inclusos no próprio módulo, exceto para os sensores de temperatura onde se utilizou apenas um módulo com outros 5 sensores, devido a questões espaciais e simplicidade.

A Figura 24 apresenta o esquemático elétrico pronto do módulo do gerenciador. Cada conjunto de componentes responsável por uma das funções do módulo está seccionado por cores e possui um respectivo título.

Na seção em verde, têm-se as conexões do módulo escravo com cada polo positivo das baterias e com o polo negativo da primeira bateria do módulo. O polo negativo será conectado ao mesmo aterramento do módulo escravo, os polos positivos serão conectados aos respectivos resistores, também presentes na seção verde, que irão dividir a diferença de potencial entre a bateria e a referência de aterramento para ficar nos limites elétricos do ADC. As tensões divididas são representadas pelos rótulos que vão de "Cell1D" até "Cell6D", sendo conectados a cada um dos pinos de aquisição de dados dos ADCs.

Na seção azul têm-se os dois ADCs, responsáveis por coletar as tensões das baterias após os divisores de tensão, representados por conectores de 10 pinos. O primeiro pino é o responsável por alimentar o ADC com um nível de tensão de 3,3 V, fornecido pelo ESP 32, e está representado pelo rótulo "3,3V". O segundo pino refere-se ao aterramento do componente, indicado pelo símbolo de aterramento e pela sigla GND que é uma abreviação para *ground*, que é comum aos demais componentes. O terceiro e o quarto pino são os pinos responsáveis pela comunicação I2C com o microcontrolador, sendo representados pelos rótulos SCL e SDA respectivamente. O quinto pino é referente ao endereçamento do ADC para o microcontrolador. Este pino, quando conectado a um dos 4 anteriores, atribui um endereço ao ADC, com ele é possível que o ESP distinga os dois componentes e as informações que cada um envia. O sexto pino é um pino de alerta e não foi utilizado. E os 4 últimos pinos são os responsáveis pelas coletas de tensão.

Na seção rosa tem-se o circuito responsável por fazer as conexões dos sensores de temperatura ao ESP. Este circuito é composto por 3 conectores, o primeiro, denominado de P12, é responsável por aterrar todos os 6 sensores, o segundo, P11, é responsável por fornecer os 3,3 V para os sensores e o terceiro é o responsável conectar as saídas de sinal dos sensores e enviá-las para o microcontrolador via comunicação serial, a conexão dos sinais enviados para o ESP é indicada pelo rótulo denominado "onewire", para a comunicação ser bem sucedida é preciso interconectar todas as saídas a um resistor de *pull-up* conforme mostra o circuito a direita.

Na seção laranja tem-se o conversor *buck* representado pelos 4 conectores a

direita (J1 a J4). J1 e J2 representam a entrada do conversor, onde J1 está conectado ao polo positivo da última bateria do módulo e J2 está conectado ao polo negativo da primeira célula para que se tenha a tensão total do módulo na entrada do conversor. Já J3 e J4 representam a saída do conversor que abaixa a tensão de entrada para 5 V, responsáveis por alimentar o ESP32. J3 mostra a saída positiva do conversor em 5 V e J4 mostra a saída negativa aterrada com os demais componentes.

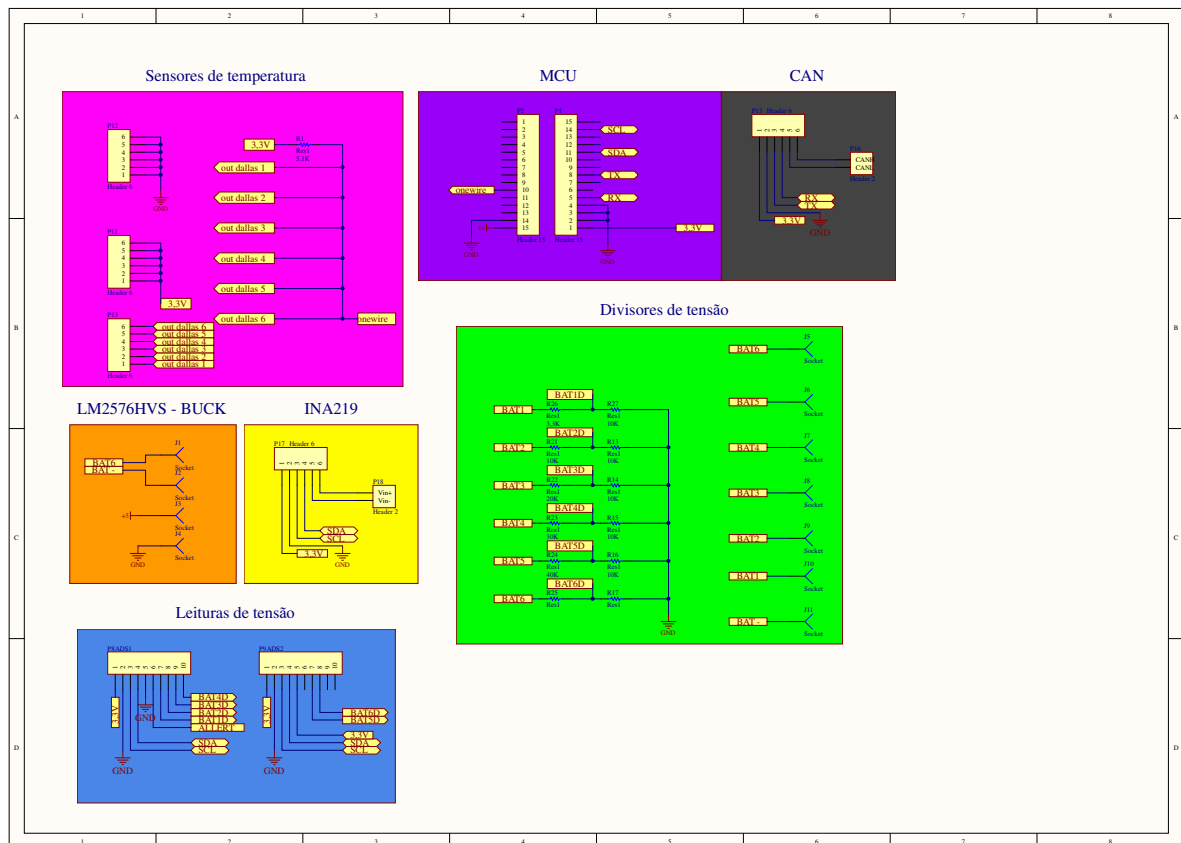
Na seção amarela está representado, pelo conector de 6 vias denominado P17, o sensor de corrente utilizado (INA219). As 2 primeiras vias, assim como no ADS1115, são responsáveis pela alimentação do aparelho, a terceira e quarta via são responsáveis pela comunicação em protocolo I2C para o ESP32, a quinta e sexta via são conectadas ao resistor shunt para medir a queda de tensão nele com a passagem da corrente.

Na seção cinza tem-se o circuito responsável por fazer a comunicação CAN, conector de 6 vias é o responsável por conectar o módulo CAN *transceiver* ao BMS escravo, as duas primeiras vias são para alimentá-lo com 3,3 V, vias 3 e 4 fazem a interface com o ESP32 via comunicação serial e as duas últimas transformam a comunicação serial em CANH e CANL que podem ser utilizadas para fazer a comunicação com o BMS mestre ou outros escravos.

Por fim, na seção roxa, tem-se, representado por 2 conectores de 15 vias, o módulo do ESP32 com as devidas conexões que fazem interface com os demais componentes. Têm-se os rótulos SCL e SDA para se comunicar via comunicação I2C com o ADS1115 e o INA219, RX e TX para se comunicar com o CAN *transceiver*, 3,3 V para alimentar os periféricos, o rótulo "onewire" é responsável por receber as informações dos sensores de temperatura e o rótulo +5 é a entrada de alimentação do ESP fornecida pelo conversor *buck*.

Como dito anteriormente, foi utilizado apenas um módulo para os sensores de temperatura na bateria, pois ele já possui o resistor de *pullup*, entre a saída e o pino de alimentação, necessário para realizar a comunicação de dados corretamente. Segundo a sua especificação técnica, esse resistor precisa ser de aproximadamente $5k\Omega$ (Dallas, 2024), portanto seu módulo utiliza um resistor de $5,1k\Omega$ conforme mostra a Figura 25. O resistor é o componente no canto superior esquerdo que possui a escrita "512". Este é o código que indica a sua resistência, onde os 2 primeiros números são os caracteres da resistência e o último é o multiplicador em base 10, ou seja, o número 2 significa que os 2 primeiros números (51) estão sendo multiplicados por 100, totalizando 5100Ω .

Figura 24 – Esquemático do circuito



Fonte: Autoria própria (2024)

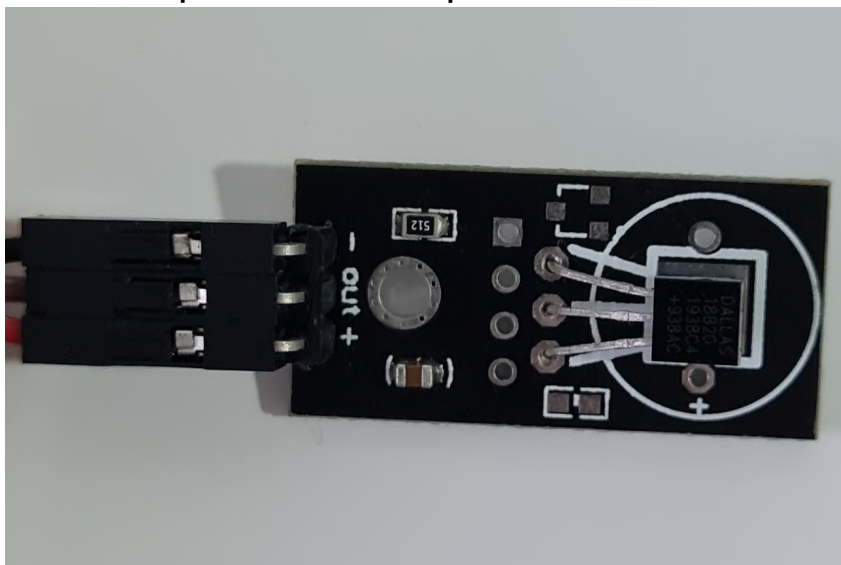
ou $5,1k\Omega$.

Como apenas um resistor é necessário para toda a cadeia de sensores, a utilização de mais módulos resultaria em uma instrumentação incorreta da temperatura, já que cada módulo possui um resistor próprio, além disso, ocupariam um espaço desnecessário no módulo de baterias.

Nos conversores analógico digitais têm-se os pinos de alimentação (pinos 1 e 2), comunicação (pinos 3 e 4), endereçamento (pino 5), alerta (pino 6) e pinos de leitura (pinos 7 a 10). O pino de endereçamento permite que o ESP consiga identificar quem é o responsável pelos sinais enviados e não misture as informações. Os endereços são pré-determinados pelo *datasheet* e definidos ligando o pino de endereço a um dos outros 4 pinos anteriores (VDD, GND, SCA, SCL). O sinal de alerta é deixado flutuando, pois sua utilização não será necessária.

Para o módulo de comunicação CAN têm-se os pinos de alimentação (pinos 1 e 2), os pinos de comunicação serial (pinos 3 e 4) sendo a entrada de informações que o ESP envia, e os pinos de saída no protocolo (pinos 5 e 6) os quais são ligados a um

Figura 25 – Módulo para o sensor de temperatura Dallas com resistor integrado



Fonte: Autoria própria (2024)

conector responsável por fazer a comunicação com os demais módulos.

3.4.2 Formulação do software

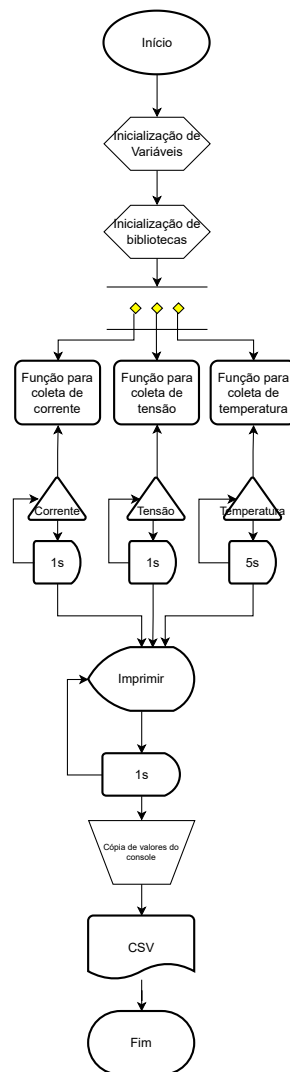
Para que o ESP32 consiga coletar todos dados recebidos pelos periféricos do circuito é necessário realizar a integração destes componentes em software que será embarcado no microcontrolador.

Esta integração foi realizada através da *framework* do arduíno e utilizando as bibliotecas prontas dos componentes utilizados, facilitando a interface via comunicação I2C e também a conversão dos valores digitais adimensionais recebidos para seus correspondentes em unidades analógicas.

A Fig. 26 apresenta o fluxograma de funcionamento do software projetado. Nele tem-se a inicialização do ESP32, indicada pelo bloco "Início", a inicialização das variáveis declaradas e as bibliotecas de cada periférico em conjunto com as configurações definidas. Após essas inicializações tem-se 3 funções correndo em paralelo, uma para a coleta e monitoramento de tensões, uma para a corrente e outra para as temperaturas. Como a tensão e temperatura possuem comportamentos mais voláteis, ou seja, de rápida transição, definiu-se que a coleta de dados deverá ocorrer a cada um segundo, já para a temperatura, que não sofre grandes variações em pouco tempo definiu-se um intervalo de coleta a cada 5 segundos. Com as coletas sendo feitas e sendo salvas nas variáveis declaradas, imprime-se esses valores no console do computador, estruturando-

os de forma compatível com formato CSV que depois são copiados e transformados efetivamente em um CSV.

Figura 26 – Fluxograma explicando o desenvolvimento de software do módulo escravo



Fonte: Autoria própria (2024)

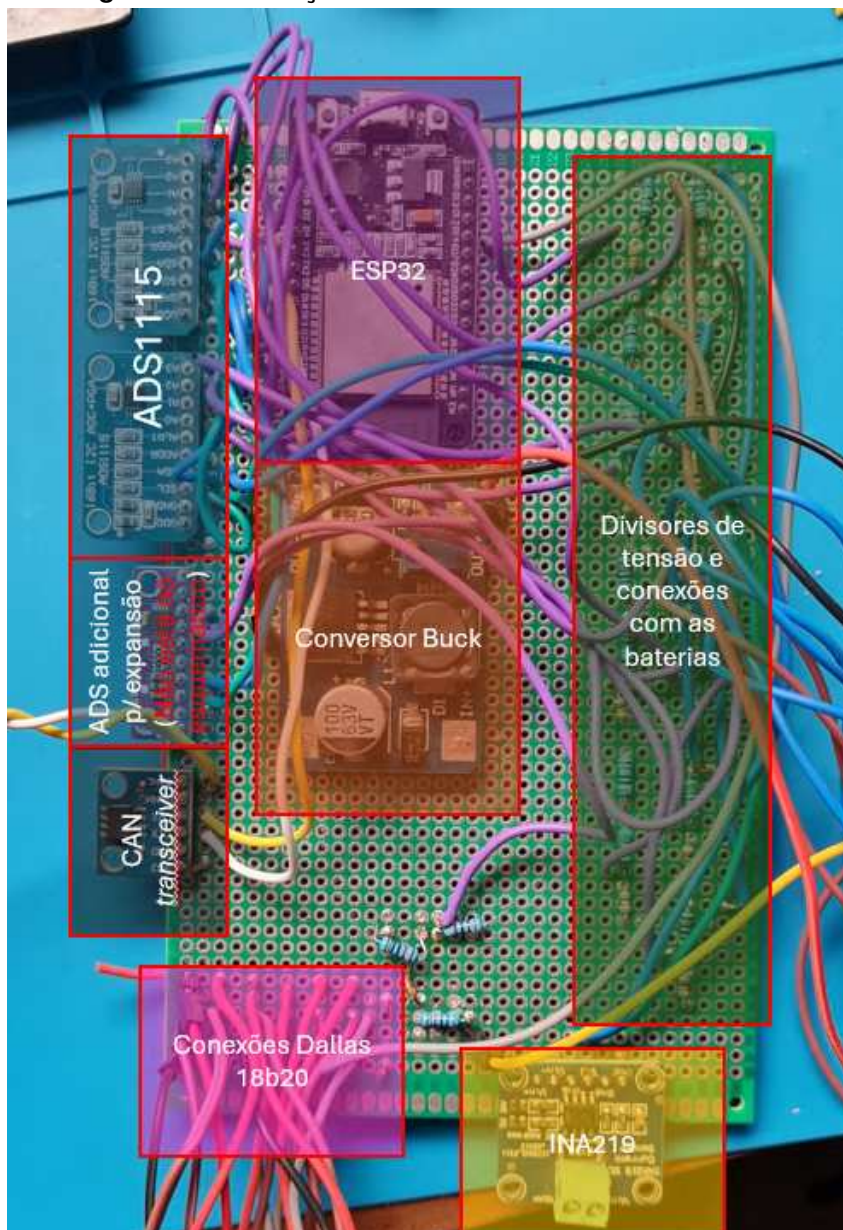
Tendo o CSV pronto, importou-se os dados no Excel para gerar os gráficos apresentados no Capítulo 4.

3.5 Apresentação do módulo

Com base no circuito apresentado na Figura 24 e com os componentes descritos na seção 3.1, montou-se o protótipo do módulo escravo, como pode ser visto na Figura 27.

Observando a Figura 27 e as descrições de cada componente na seção 3.1, é possível segregar todos os componentes e suas devidas funções no sistema. Nota-se que as cores utilizadas para identificar as partes do módulo são as mesmas das cores utilizadas para indicar cada parte do esquemático na Figura 24.

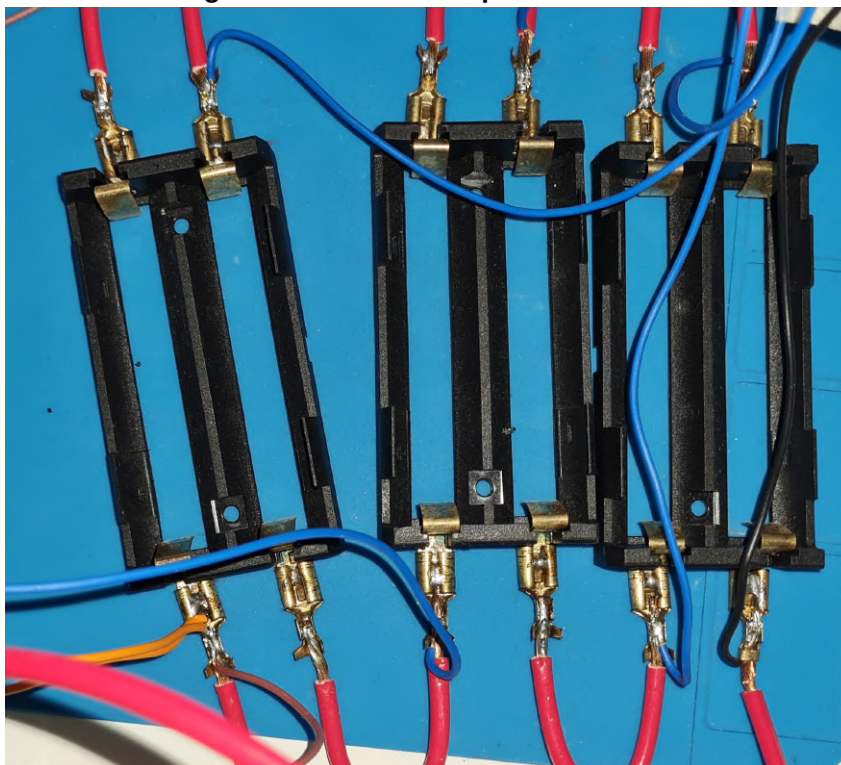
Figura 27 – Descrição dos elementos do módulo escravo



Fonte: Autoria própria (2024)

Para ser possível efetuar a coleta das variáveis das baterias utilizou-se os suportes de baterias 18650 apresentados na Figura 28. Utilizando cabos de 2,5 mm, realizou-se a associação em série das 6 células, obtendo-se uma tensão nominal de aproximadamente 22 V e uma tensão máxima de 25,2 V, atendendo às limitações do sensor de corrente escolhido.

Figura 28 – Conectores para as baterias



Fonte: Autoria própria (2024)

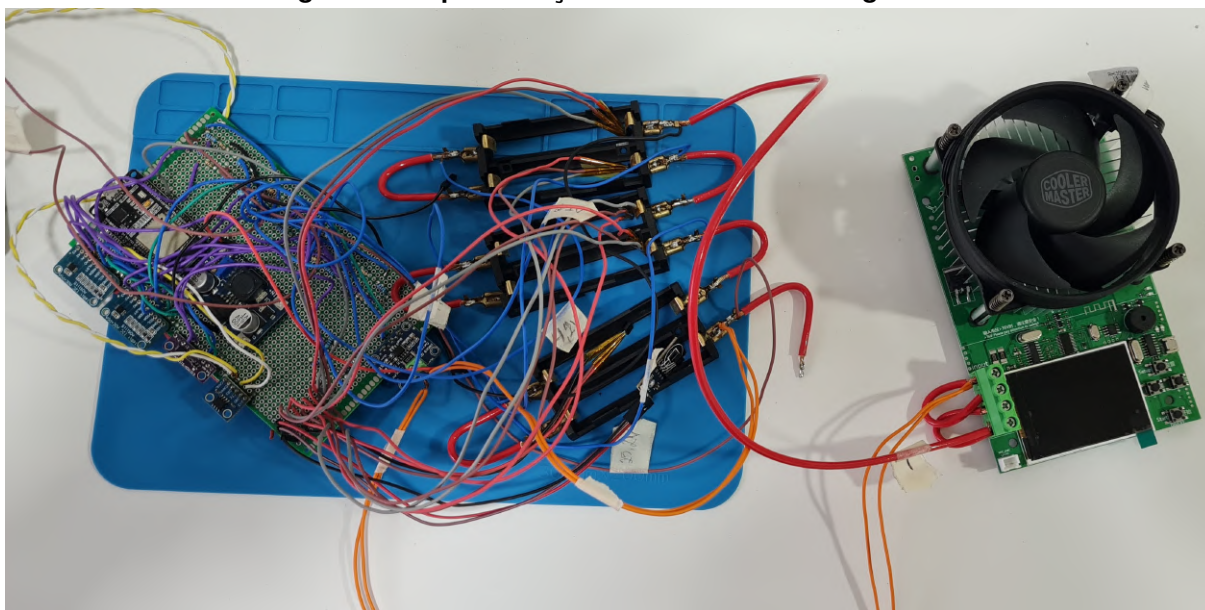
Em cada polo positivo foi ligado um cabo em paralelo responsável por levar as informações de tensão para o módulo. Cada cabo é conectado ao módulo nos respectivos polos do divisor de tensão. Na primeira célula têm-se os cabos de aterramento ligados em paralelo com a associação também (cabo de cor preta) e na última célula é possível observar um cabo de cor laranja, este é responsável por conectar o módulo ao sensor de corrente e consequentemente ao descarregador utilizado para realizar os testes do sistema.

3.6 Implementação do módulo

Realizando a conexão das células de bateria com os divisores de tensão do módulo, com o resistor *shunt* do sensor de corrente e com o dispositivo responsável

por fazer a descarga dessas baterias obteve-se o sistema apresentado na Figura 29.

Figura 29 – Apresentação do sistema não energizado



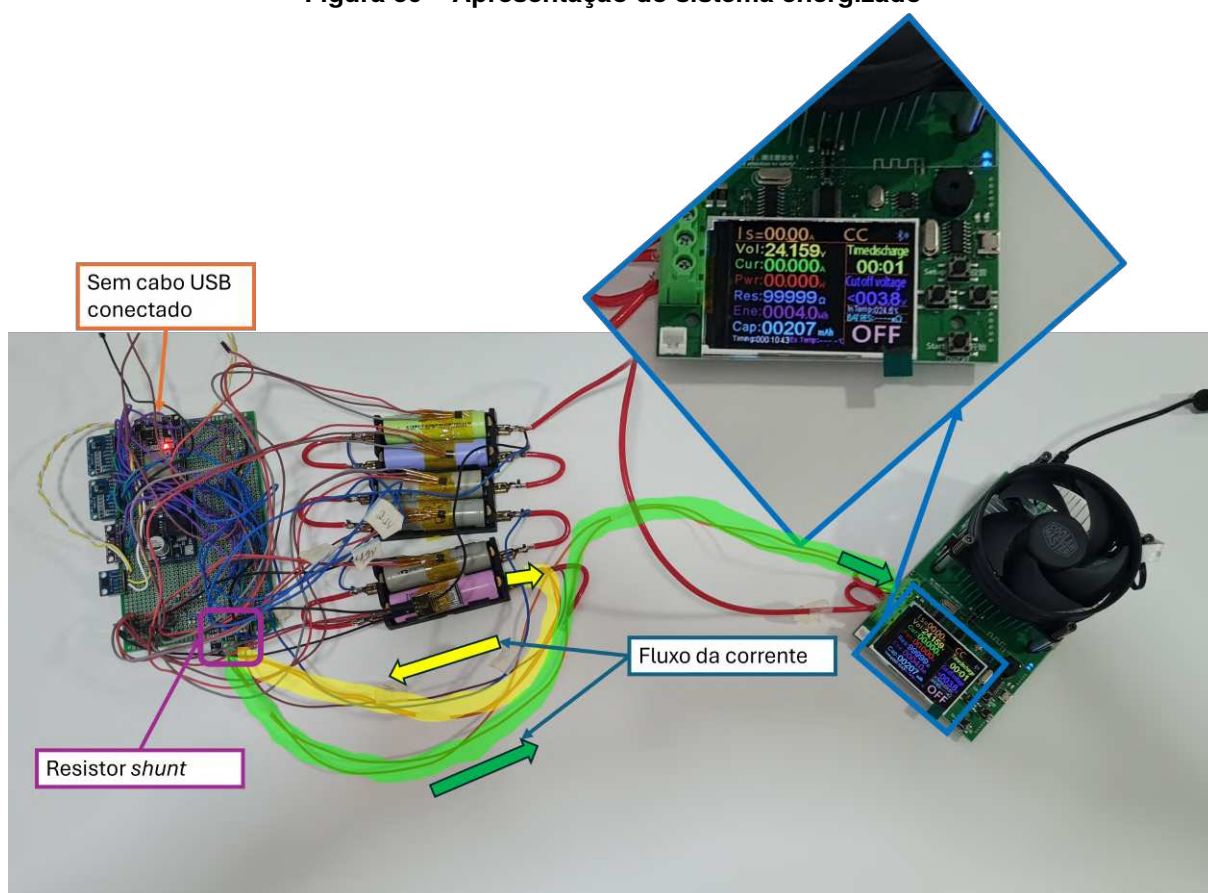
Fonte: Autoria própria (2024)

A Figura 29 mostra o sistema montado para realizar a coleta de dados das baterias desenergizado, mas com todas as conexões realizadas. Já na Figura 30 é apresentado o sistema com todas as baterias conectadas e associadas e com o descarregador conectado à fonte para possibilitar a parametrização da descarga.

Observando a Figura 30 é possível identificar, por meio da tela do descarregador, que o módulo de baterias estava com uma tensão total de 24,159 V (no item denominado "Vol:") e que não há nenhuma corrente passando pelo sistema (item "Cur"), pois ele está em estado estacionário. Percebe-se, por meio do led vermelho aceso no módulo e pela ausência de um cabo USB conectado ao ESP, que ele está energizado sem que nenhuma outra fonte externa esteja conectada a ele além das baterias, validando a utilização do conversor *Buck* que está sendo responsável por transformar 24 V em aproximadamente 5 V, para alimentar o microcontrolador, que por sua vez, alimenta os demais componentes do módulo.

Nota-se também, que os sensores de temperatura estão devidamente colados a cada bateria por meio do uso de fitas *Kapton*. Essas fitas são isolantes e possuem propriedades retardantes de chamas, sendo ideais para ambientes em que possa existir qualquer risco de incêndio e que exija isolamento elétrico entre os elementos do sistema (Solectro, 2020).

Figura 30 – Apresentação do sistema energizado



Fonte: Autoria própria (2024)

Com o sistema montado, pode-se parametrizar as características de descarga conforme apresentado na Figura 31, e iniciar a coleta de dados.

Figura 31 – Parametrização do descarregador



Fonte: Autoria própria (2024)

Para se obter uma característica dinâmica para a corrente, definiu-se que as baterias seriam descarregadas a uma potência constante, na Fig. 31 indicada pela sigla "CP" (Potência constante, do inglês *Constant Power*), assim, conforme a tensão do módulo diminui, a corrente tende a aumentar para ser possível manter a mesma potência no sistema.

Conforme mostrado na Figura 31 pela sigla "Ps", o sistema está sendo descarregado com uma potência de 25 W. Este valor foi definido considerando a tensão mínima do módulo e a corrente que descarregasse as baterias numa velocidade adequada sem que se ultrapassasse as limitações do sensor de corrente.

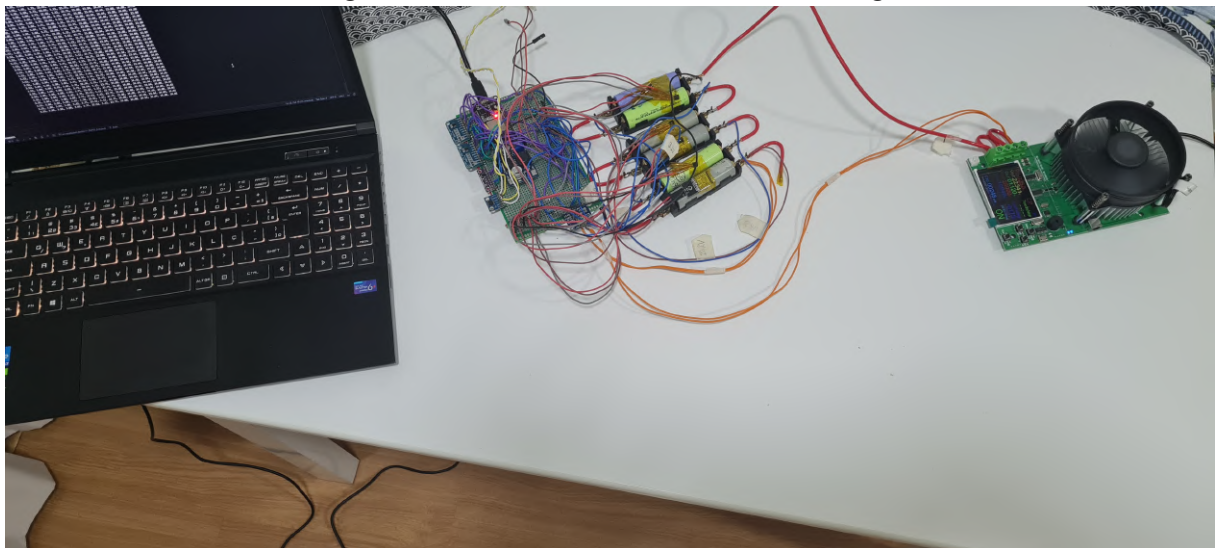
A tensão mínima é utilizada por ser nela onde a corrente atinge seu valor máximo para manter a potência especificada. Sendo assim, utilizando a equação (1), e a tensão mínima do módulo sendo de aproximadamente 17 V e considerando uma corrente máxima de aproximadamente 1,5 A (pouco menos da metade das limitações do sensor de corrente) chegou-se no valor de 25,5 W arredondando-se para 25 W para absorver possíveis variações do sistema.

O display do descarregador apresentado nas Figuras 30 e 31 também indica

outras características sobre o módulo de baterias. Além dos indicativos de tensão, potência de descarga e corrente, tem-se a potência de descarga real ("Pwr"), a resistência equivalente do sistema, a energia presente no sistema em Wh ("Ene") e a capacidade do módulo em mAh ("Cap"), essas informações são estimadas automaticamente a partir da conexão das células ao descarregador. Mais a direita tem-se outra seção de informações definidas pelo usuário, a primeira, ao topo, permite que seja definido por quanto tempo a descarga irá ocorrer, a segunda permite definir qual a tensão mínima que o conjunto de baterias pode assumir, sendo assim, quando essa tensão for atingida a descarga é interrompida automaticamente, o terceiro e quarto campos não são parametrizáveis e representam a temperatura média medida dentro do descarregador e a resistência medida nas baterias. E por fim, tem-se um indicativo de que a descarga está ativa, pela palavra "ON", ou não, "OFF".

A Figura 32 apresenta o sistema em funcionamento e o computador sendo responsável pela recepção dos dados adquiridos pelo BMS.

Figura 32 – Coleta de dados durante descarga



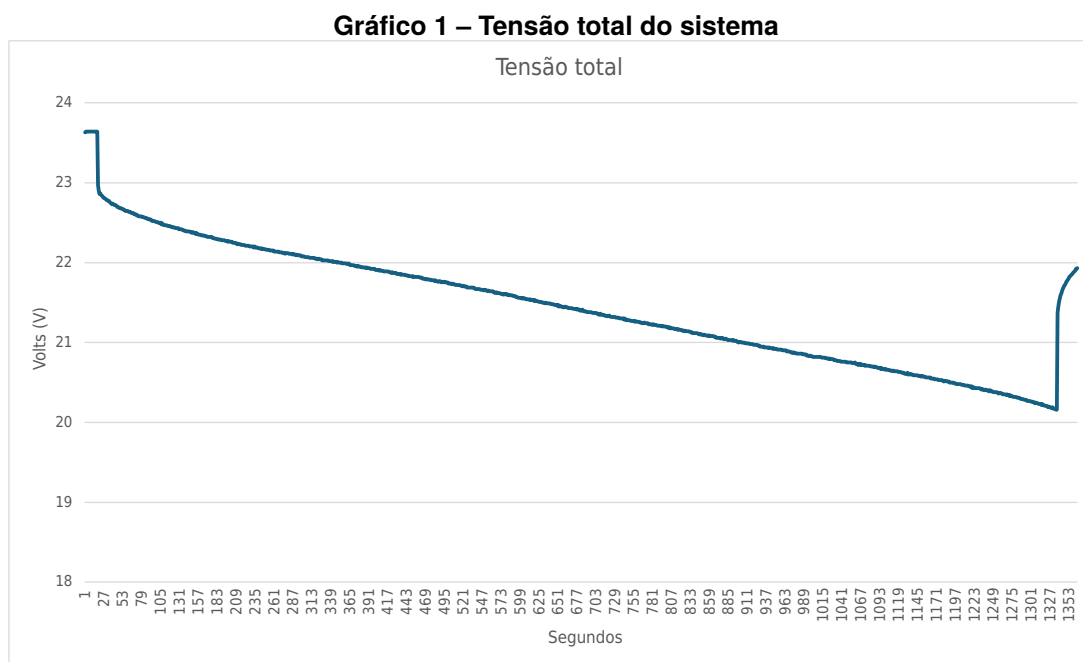
Fonte: Autoria própria (2024)

Os dados adquiridos são impressos no console do computador por meio do programa *Visual Studio Code* e estão em formato CSV. Quando a descarga foi completa, esses dados foram transferidos para o Excel para gerar os gráficos apresentados na seção 4, que mostram o comportamento do pacote de baterias em tal condição para análise.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir do experimento realizado e descrito no capítulo anterior, foi possível obter os resultados descritos a seguir.

Primeiramente, no gráfico 1, é apresentado o comportamento da tensão total do módulo durante a descarga.

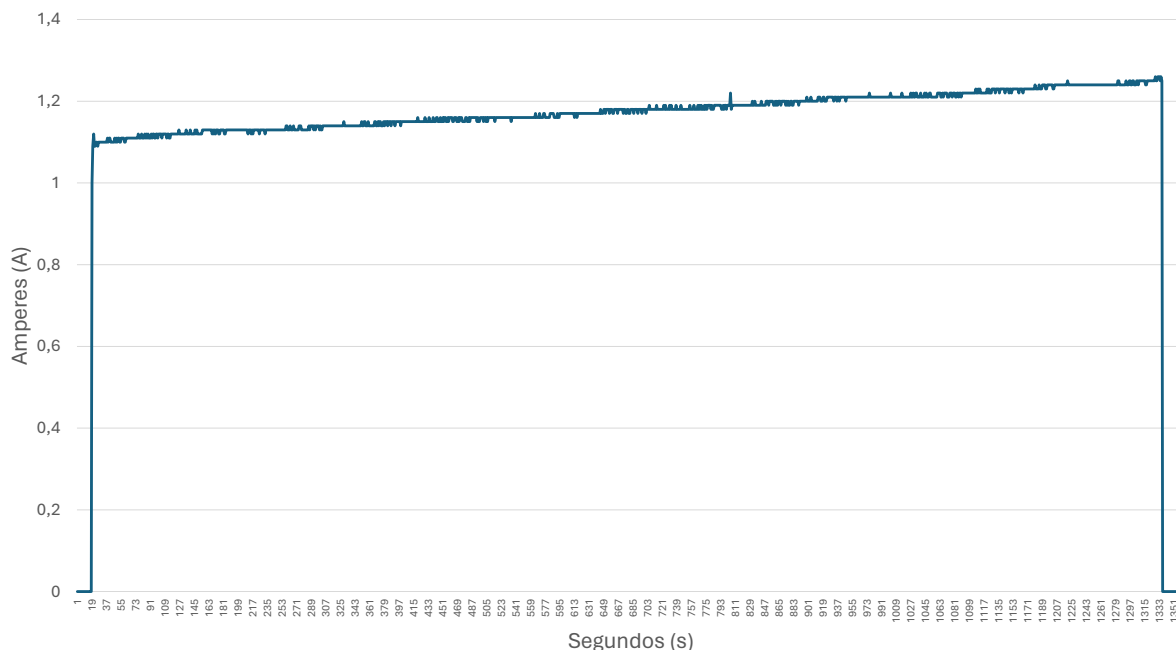


Fonte: Autoria própria (2024)

O sistema inicia-se em estado estacionário até que todos os sensores sejam acionados, com todos coletando dados, iniciou-se o processo de descarga do sistema. Este ponto é observado no gráfico 1 no segundo 27, onde ocorre uma queda brusca na tensão total. Isso se dá pela energia que está sendo drenada do sistema.

Em conjunto, no gráfico 2, tem-se o comportamento da corrente que atravessa o sistema durante o experimento. Nota-se que, enquanto o sistema é estacionário, a corrente no sistema é igual a 0, quando o descarregador é acionado, inicia-se a passagem de corrente pelo sistema. Observa-se que a curva de corrente aparenta ter um tipo de ruído na coleta de dados, mas, na verdade, isso se dá pela característica do dispositivo utilizado para descarregar as baterias. Ele controla a descarga por meio do "chaveamento" de um transistor que está localizado embaixo da ventoinha e por isso a curva assume essa característica. O chaveamento do transistor ocorre para ser possível controlar o fluxo de carga que sai das baterias, permitindo que elas sejam descarregadas com uma potência constante.

Gráfico 2 – Corrente durante a descarga



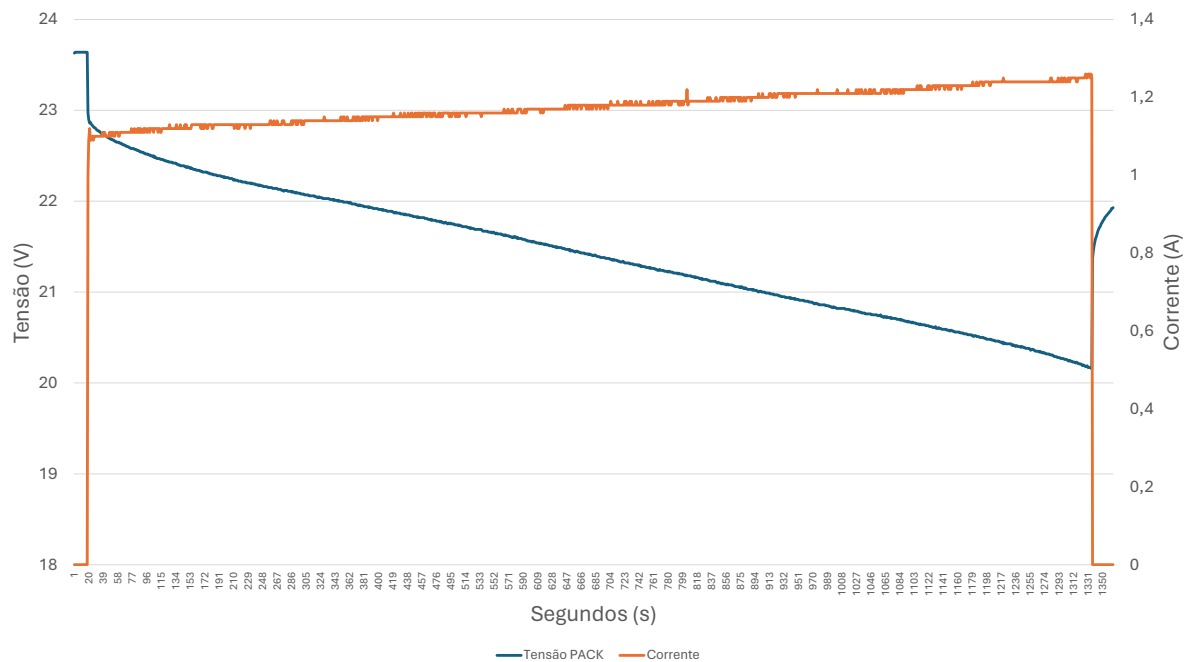
Fonte: Autoria própria (2024)

Para uma melhor visualização da relação entre corrente e tensão no início, fim e durante a descarga das baterias tem-se o gráfico 3. Nele pode-se observar de forma mais clara o impacto do início e fim da descarga na tensão do conjunto de baterias e também é importante ressaltar o aumento da corrente no sistema conforme a tensão total diminui, abordado na seção 3.6 e pela equação (3).

O gráfico 4 apresenta uma comparação entre os níveis de tensão e de comportamento para cada célula do sistema. Já o gráfico 5 apresenta a tensão acumulada no sistema devido à associação das baterias, ou seja, ele mostra qual nível de tensão cada célula representa no conjunto a partir do polo negativo geral.

Analisando o gráfico 4, pode-se verificar o desempenho das células durante uma descarga em potência constante, com esses dados é possível extrair informações importantes de cada uma. As células 3 e 4 apresentam comportamentos quase idênticos, porém com uma leve diferença de tensão entre elas. Ambas iniciam com uma tensão um pouco menor que 4,1 V, indicando que ainda estavam na tensão máxima e por isso sua inclinação de descarga é maior do que a célula 6, por exemplo, que por estar na tensão nominal, mantém praticamente o mesmo nível de tensão durante todo o teste.

As células 2 e 5, por sua vez, apresentam um desempenho inferior em comparação com as demais. Ambas sofreram quedas de tensão severas, mesmo iniciando

Gráfico 3 – Comparativo entre comportamento de corrente e tensão durante a descarga

Fonte: Autoria própria (2024)

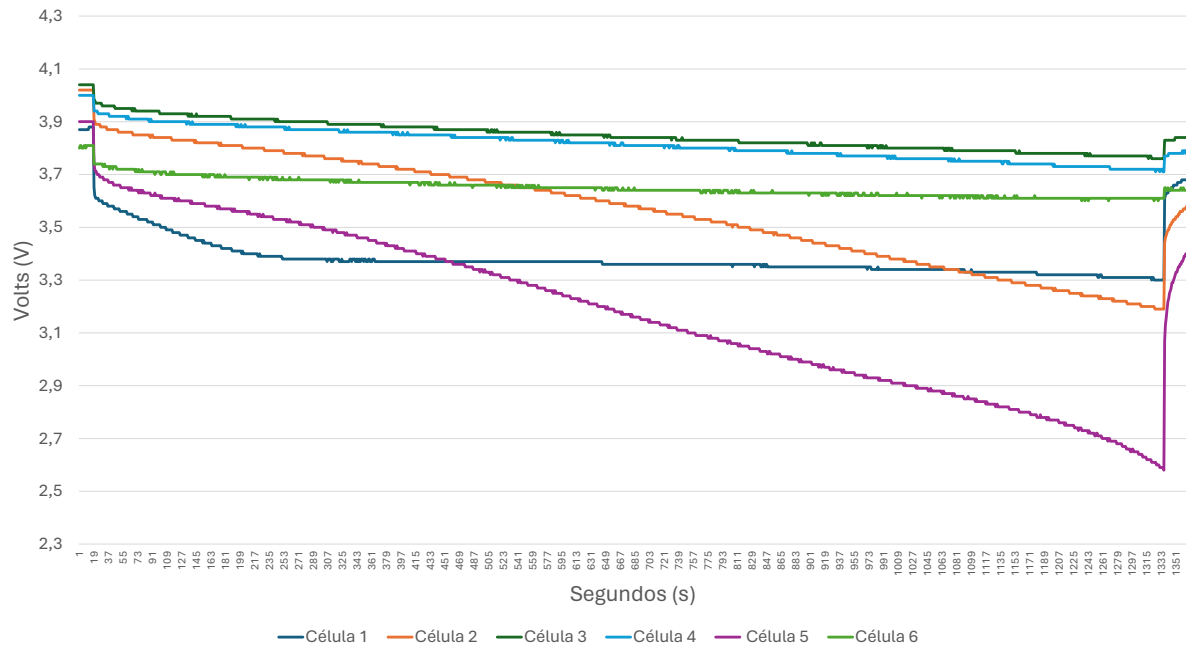
seu ciclo entre a tensão máxima e nominal. Percebe-se também que, apesar de ambas estarem perdendo carga de forma mais rápida do que as demais, a célula 5 é a que possui a condição mais crítica, sendo a responsável pela interrupção do ciclo, pois, durante a descarga, ela chegou na sua tensão de corte. Este comportamento tanto da célula 5 quanto da célula 2 indicam um péssimo SoH, pois essas baterias não conseguem segurar energia quando estão sendo descarregadas.

Analisando a célula 5, ao final da descarga, o retorno da célula ao seu nível de tensão estacionário é de extrema amplitude, ao ponto de que a célula praticamente sai da sua tensão de corte e volta para a nominal, isso novamente indica um grande desgaste na sua eficiência.

A célula 6 apresenta um dos comportamentos mais eficientes dentre as demais, por iniciar seu ciclo na tensão nominal, não teve uma queda de tensão muito forte quando se iniciou os testes e conseguiu manter um nível de tensão quase que constante durante todo o ciclo, indicando um ótimo estado de saúde geral.

A célula 1, por sua vez, apresentou uma forte queda de tensão no início da descarga. Após isso, sua tensão foi amortecida de forma bem mais demorada do que as demais, para depois se estabilizar. Ela pode ter apresentado este comportamento devido ao seu desgaste natural de ciclos anteriores e também pelo fato de, antes de

Gráfico 4 – Tensão de cada célula durante a descarga



Fonte: Autoria própria (2024)

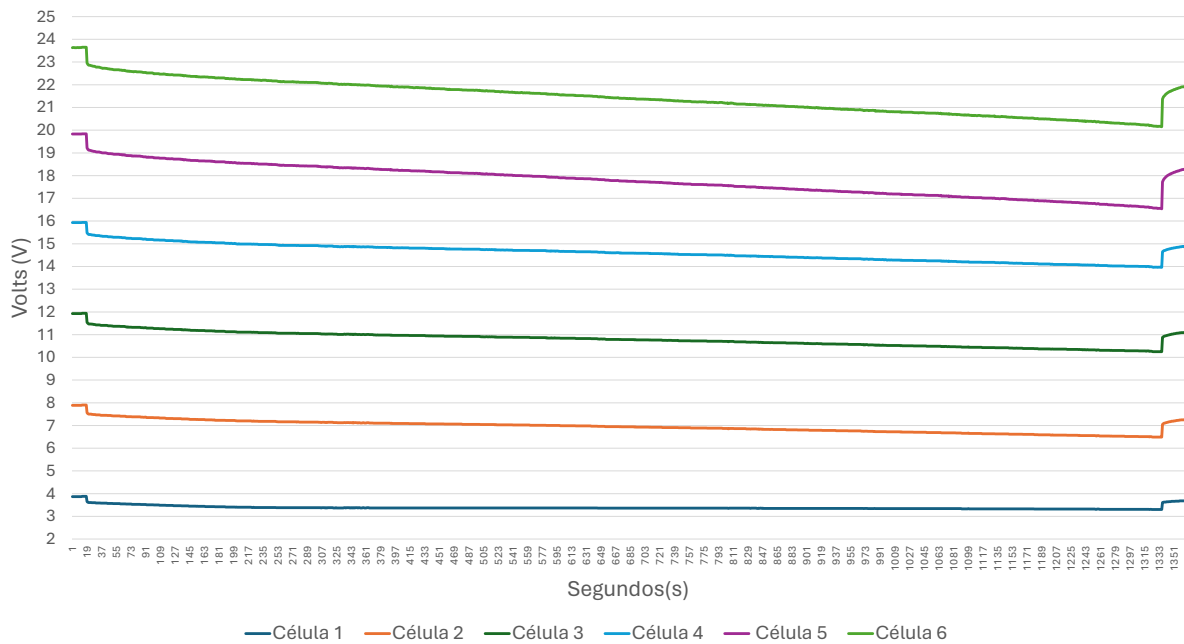
sofrer a queda de tensão no início da descarga, estar bem perto da fronteira entre tensão máxima e tensão nominal. Sendo assim, ela pode ter apresentado o comportamento dessa transição, também apresentado na Figura 2, entre zero e mil segundos (Takalaki *et al.*, 2021). Um indicativo que embasa essa análise é no fim da descarga, quando a célula recupera sua tensão em estado estacionário e pode-se perceber que ela retorna para uma tensão um pouco menor que 3,7 V. E sua tensão nominal pelo *datasheet* é de 3,62 V, pela proximidade de valores entende-se que essa célula já atingiu a transição da tensão máxima para a tensão nominal.

Analisando o gráfico 5, a parcela de tensão que cada célula contribui para compor a tensão total do módulo e também apresenta uma perspectiva mais realista do comportamento e influência das baterias no sistema todo.

Para analisar o comportamento térmico do sistema por meio dos sensores Dallas utilizou-se os gráficos 6, 7, 8 e 9.

Observa-se no gráfico 6 o comportamento do sistema em sua totalidade, que foi gerado a partir da média aritmética da temperatura de todas as células no sistema. É possível notar que a temperatura inicia-se em 0 °C, e depois salta para uma temperatura de aproximadamente 24 °C (Temperatura ambiente). Isso ocorre porque os sensores de temperatura levam um pouco mais de um segundo para ativar e começar a enviar

Gráfico 5 – Tensão medida para cada célula



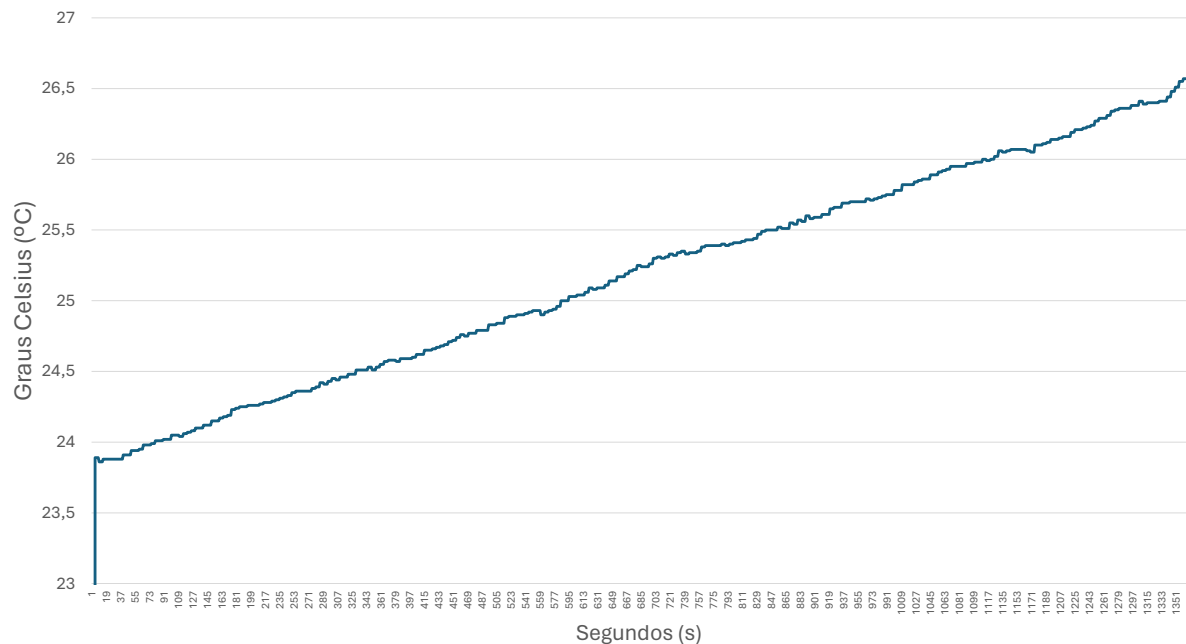
Fonte: Autoria própria (2024)

dados para o ESP32.

Outra característica bem importante de ser ressaltada é que a temperatura do módulo apresenta um aumento linear durante todo o experimento, mostrando um comportamento bem semelhante ao da corrente, mostrando uma relação direta entre essas duas grandezas. O gráfico 7 permite uma melhor compreensão dessa relação.

A partir do gráfico 7, é possível observar a relação direta entre o desempenho da corrente e a temperatura média do sistema. Percebe-se que a inclinação entre as duas curvas tende a ser a mesma durante todo o experimento. O eixo da corrente começa em zero e vai sendo incrementado a cada 0,2 A enquanto o da temperatura também começa em zero, mas é incrementado a cada 2 °C, portanto se tem uma proporção de 10 vezes entre um eixo e outro. Ressalta-se também que mesmo após a interrupção de passagem de corrente pelo sistema, as baterias ainda apresentaram uma tendência ao aumento de temperatura, isso acontece, pois o resfriamento do sistema não ocorre de imediato, as células precisam de mais tempo para voltar à temperatura de quando estavam em estado estacionário.

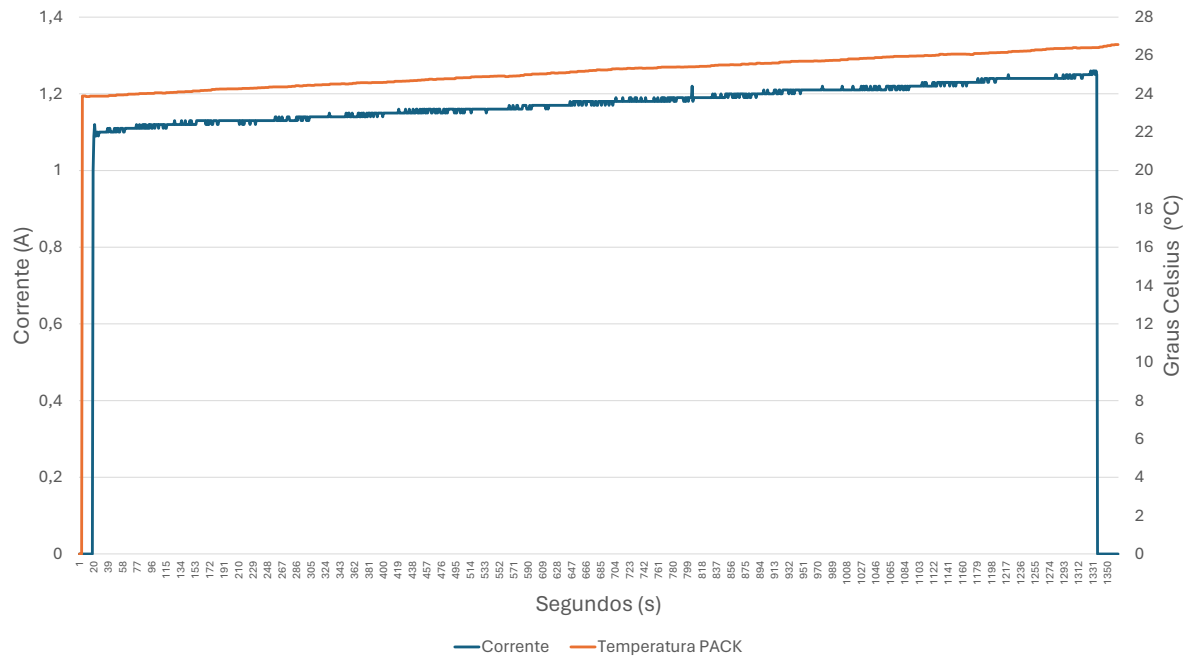
Tendo feito a análise da temperatura do módulo todo, agora será estudado o comparativo do desempenho térmico das 6 células. Este comparativo é apresentado no Gráfico 8.

Gráfico 6 – Temperatura média do módulo

Fonte: Autoria própria (2024)

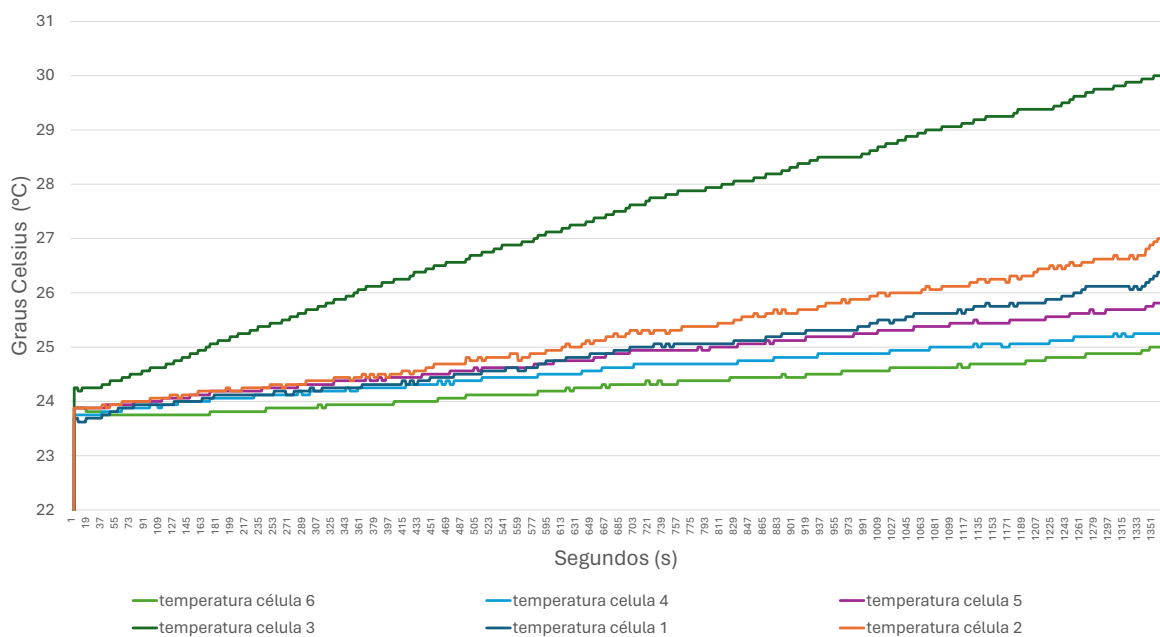
Observa-se, no gráfico 8, que no início da descarga todas as células, exceto a terceira, partem de pontos bem similares de temperatura. Enquanto a célula 3 parte de aproximadamente 24,5 °C, as demais iniciam com um pouco menos de 24 °C. A princípio essa diferença não é tão grande, porém conforme o módulo é drenado essa diferença se torna crescente. Ao final do experimento, ela chegou aos 30 °C, resultando em um aumento de 5,5 °C enquanto as demais tiveram um aumento máximo de 3 °C. Esse comportamento pode ser resultante de descargas de alta intensidade ou até mesmo curto-circuitos que podem ter ocorrido no passado e que acabaram por deixá-la mais instável durante descargas simples.

Comparando com a temperatura da célula 3 no gráfico 8 com a tensão dela no gráfico 4 percebe-se uma característica importante. Mesmo sendo a célula que mais aqueceu durante o experimento, ela conseguiu manter um bom nível de tensão com relação às demais, considerando que ela ainda estava em sua faixa de tensão máxima. Sendo assim, os fatores que impactaram o seu desempenho térmico, parecem não ter impactado na sua capacidade de armazenamento e retenção de energia para os níveis de tensão e temperatura atingidos. É bem provável que, caso ela chegasse a níveis de temperatura acima dos 50 °C, a sua descarga ficaria mais acelerada e poderia apresentar riscos de incêndio também.

Gráfico 7 – Comparação entre a temperatura média do módulo e a corrente

Fonte: Autoria própria (2024)

Em compensação, outras células que sofreram descargas bem severas, como a célula 5 e a 2, mantiveram temperaturas similares às demais, indicando novamente que o comportamento da tensão não impacta diretamente na temperatura da célula e vice-versa, pelo menos enquanto as células estão mantidas dentro da sua zona de

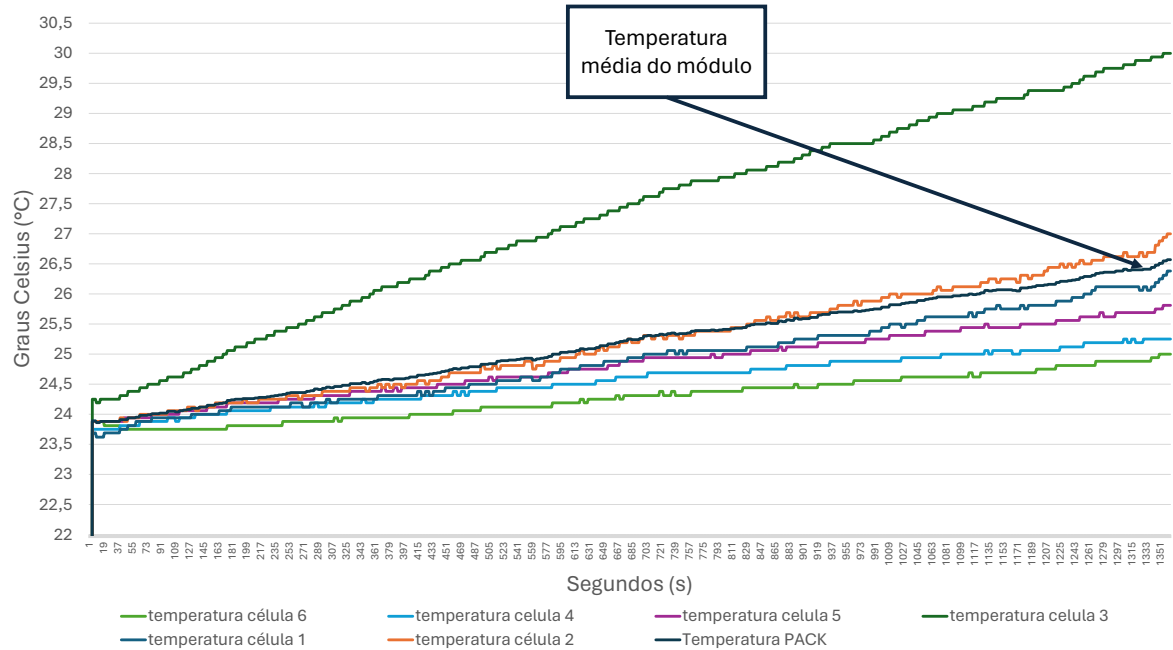
Gráfico 8 – Temperaturas de cada célula do módulo

Fonte: Autoria própria (2024)

temperatura segura. A célula 2 acabou sendo a segunda que mais aqueceu durante o experimento, porém não chegou a ter uma diferença tão grande quanto a célula 3 em comparação com as demais.

O gráfico 9 também mostra as temperaturas individuais das células, mas com a temperatura média do módulo em conjunto para uma percepção mais clara da posição do todo em comparação com sua composição.

Gráfico 9 – Temperaturas individuais em comparação com a média



Fonte: Autoria própria (2024)

Apesar da discrepância na célula 3, a temperatura do módulo permaneceu na faixa das demais células e, do meio para o fim do experimento, ficou menor que a da célula 2. Isso indica que o desempenho da célula 3 não afetou significativamente a temperatura média do módulo.

5 CONCLUSÕES

Com base nos resultados apresentados e discutidos e ainda considerando os objetivos geral e específico, conclui-se que o dispositivo projetado e construído conseguiu atender aos requisitos estipulados no início deste trabalho. Podendo coletar, de todas as baterias em análise, suas três principais características. Em *hardware*, os componentes necessários para que os dados coletados fossem comunicados entre os demais módulos do BMS, possibilitando a expansão do sistema para monitorar mais células.

Com os dados coletados também foi possível relacionar não só o desempenho das baterias em uma característica em comum como também entre características distintas e até mesmo compará-las em relação ao sistema todo, abrindo a possibilidade de um estudo mais detalhado das relações comportamentais encontradas neste experimento.

Considerando todo o desenvolvimento do projeto, pode-se afirmar que as maiores dificuldades se deram na escolha do dispositivo de descarga das células. Como a tensão do sistema ultrapassou os 12 V, as opções de componentes que pudessem ser utilizados para tal aplicação foi reduzida significativamente. Entretanto, mesmo utilizando um dispositivo mais específico para este tipo de aplicação, a grande vantagem é que foi possível realizar descargas por meio de parâmetros controlados, que facilitaram a compreensão dos resultados obtidos no experimento.

Para projetos futuros, recomenda-se implementar um sistema de equalização de tensão controlado pelas leituras realizadas pelo módulo, utilizando os pinos livres do ESP32. E a implementação em *software* da comunicação com outros módulos por protocolo CAN com o módulo, que está previsto em *hardware* no projeto.

REFERÊNCIAS

- ALIEXPRESS. **Módulo Buck de Alimentação Ajustável, Step Down, LM2576HV, DC-DC, LM2576, LM2576HVS, Entrada 5V-60V, Saída 1.25V-26V.** [S. l.: s. n.]. Disponível em: <https://pt.aliexpress.com/item/1005003923533090.html>. Acesso em: 23 out. 2023.
- ATORCH. **DL24 Color Screen Bluetooth Data Transmission Digital control Curve Load Meter.** [S. l.].
- BARAN, Renato; LEGEY, Luiz Fernando Loureiro. Veículos elétricos: história e perspectivas no Brasil. **BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n. 33, p. 207-224, mar. 2011.**, Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social, 2011.
- BARBI, Ivo. Eletrônica de potência. Ed. do Autor, 2006.
- BARROZO, FEO *et al.* Conversor bidirecional baseado na célula de três estados para aplicação em veículos elétricos. *In: IEEE. 2010 9th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications-INDUSCON 2010.* [S. l.: s. n.], 2010. P. 1–6.
- BHATT, Devang Kirtikumar; DARIEBY, Mohamed El. An assessment of batteries form battery electric vehicle perspectives. *In: IEEE. 2018 IEEE International Conference on Smart Energy Grid Engineering (SEGE).* [S. l.: s. n.], 2018. P. 255–259.
- CARDOSO, Matheus. **O Que É Um Microcontrolador?** [S. l.: s. n.], 2020. Disponível em: <https://edu.ieee.org/br-ufcgras/o-que-e-um-microcontrolador/>. Acesso em: 18 abr. 2024.
- CARVALHO, Ana Cláudia Rodrigues de. **Desenvolvimento de uma Bateria com BMS para uso em Veículo Elétrico.** 2016. Tese (Doutorado) – Instituto Politécnico de Viseu (Portugal).
- CASTRO, Bernardo Hauch Ribeiro de; BARROS, Daniel Chiari; VEIGA, Suzana Gonzaga da. Baterias automotivas: panorama da indústria no Brasil, as novas tecnologias e como os veículos elétricos podem transformar o mercado global. **BNDES Setorial, n. 37, mar. 2013, p. 443-496**, Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social, 2013.
- DALIO, Ray. **Princípios.** [S. l.]: Self, 2019.
- DALLAS. **DS18B20 Programmable Resolution 1-Wire® Digital Thermometer.** [S. l.], 2024. Disponível em: <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/58557/DALLAS/DS18B20.html>.
- DEVI, B; KUMAR, V Suresh. Lithium-ion Battery Management System: A review. *In: IEEE. 2022 International Conference on Power, Energy, Control and Transmission Systems (ICPECTS).* [S. l.: s. n.], 2022. P. 1–6.

DIGITAL, Optimus. **ADS1115 CJMCU Analog-Digital Converter Module (ADC)**. [S. l.: s. n.], 2023. Disponível em: https://www.optimusdigital.ro/en/analog-to-digital-converters-adcs/1696-ads1115-cjmcu-digital-analogic-converter-module-adc.html?search_query=ads1115&results=5. Acesso em: 30 jul. 2023.

DOBIES, José Victor Costa. Sistema de monitoramento de baterias íon-lítio. Universidade Estadual Paulista (Unesp), 2022.

DUARTE, Bruno Ricardo Antunes. **Desenvolvimento de um BMS para aplicações de mobilidade elétrica**. 2013. Tese (Doutorado) – Universidade do Minho.

EHSANI, Mehrdad; GAO, Yimin; EMADI, Ali *et al.* **Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles: fundamentals, theory, and design**. [S. l.], 2003.

EMADI, Ali. **Advanced electric drive vehicles**. [S. l.]: CRC Press, 2014.

ENGINEERS, Last Minutes. **Interfacing Multiple DS18B20 Digital Temperature Sensors with Arduino**. [S. l.: s. n.], 2023. Disponível em: <https://lastminuteengineers.com/multiple-ds18b20-arduino-tutorial/>. Acesso em: 30 jul. 2023.

ESPRESSIF. **ESP32 Series Datasheet**. [S. l.: s. n.], 2022. Disponível em: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datash eet_en.pdf. Acesso em: 11 dez. 2022.

FATIMA ROSOLEM, Maria de. BATERIAS DE LÍTIO-ÍON – DESAFIOS E OPORTUNIDADES. *In*. Disponível em: https://www.gov.br/defesa/pt-br/arquivos/ciencia_tecnologia/acumuladores_energia/cpqda_.pdf. Acesso em: 11 jun. 2023.

FLOYD, Thomas. **Sistemas digitais: fundamentos e aplicações**. [S. l.]: Bookman Editora, 2009.

GALVÃO, José Rodolfo *et al.* Hybrid Equalization Topology for Battery Management Systems Applied to an Electric Vehicle Model. **Batteries**, MDPI, v. 8, n. 10, p. 178, 2022.

INFO, Usina. **Módulo CAN BUS Arduino SN65HVD230 VP230**. [S. l.: s. n.], 2023. Disponível em: <https://www.usinainfo.com.br/outros-modulos-arduino/modulo-can-bus-arduino-sn65hvd230-vp230-5468.html>.

INSTRUMENTS, Texas. **ADS111x Ultra-Small, Low-Power, I2C-Compatible, 860-SPS, 16-Bit ADCs With Internal Reference, Oscillator, and Programmable Comparator**. [S. l.], 2018a.

INSTRUMENTS, Texas. **INA219 Zero-Drift, Bidirectional Current/Power Monitor With I2C Interface**. [S. l.], 2015. Disponível em: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ina219.pdf?ts=1704712267774>. Acesso em: 20 fev. 2024.

INSTRUMENTS, Texas. **LM2576xx Series SIMPLE SWITCHER® Power Converter 3-A Step-Down Voltage Regulator**. [S. l.], 2023. Disponível em: https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm2576hv.pdf?ts=1698110304859&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FLM2576HV. Acesso em: 23 out. 2023.

INSTRUMENTS, Texas. **SN65HVD23x 3.3-V CAN Bus Transceivers**. [S. l.: s. n.], 2018b. Disponível em: https://www.ti.com/lit/ds/symlink/sn65hvd230.pdf?ts=1690769287096&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FSN65HVD230. Acesso em: 30 jul. 2023.

JUNIOR, ELZEÁRIO CAETANO; DE ABREU, JORDAN SANTOS. FRENAGEM REGENERATIVA: UM ESTUDO SOBRE SEU FUNCIONAMENTO E DIFERENTES APLICAÇÕES, 2019.

KRAFT, Werner; STAHL, Veronika; VETTER, Peter. Thermal storage using metallic phase change materials for bus heating—state of the art of electric buses and requirements for the storage system. **Energies**, MDPI, v. 13, n. 11, p. 3023, 2020.

LACERDA, Kallil Rocha. Critérios de escolha e dimensionamento para o sistema motriz de um veículo tipo fórmula SAE elétrico. **Projeto de fim de curso em Engenharia Automotiva da Universidade de Brasília, UnB, Brasília**, 2016.

LEM. **Current Transducer HASS 50 .. 600-S**. [S. l.]. Disponível em: https://www.lem.com/sites/default/files/products_datasheets/hass_50_600-s.pdf. Acesso em: 1 out. 2022.

LIMA, Edson Kaique. **Por que é difícil resolver a crise global dos chips semicondutores?** [S. l.: s. n.], 2021. Disponível em: <https://olhardigital.com.br/2021/04/20/pro/crise-global-dos-chips-semicondutores/>. Acesso em: 13 nov. 2022.

MANIAR, Krunal. **Comparing shunt- and hall-based isolated current-sensing solutions in HEV/EV**. [S. l.: s. n.], 2019. Acesso em: 2 out. 2023.

MISCHIANTI. **ESP32: pinout, specs and Arduino IDE configuration – Part 1**. [S. l.: s. n.]. Disponível em: <https://www.mischianti.org/2020/05/30/esp32-pinout-specs-and-arduino-ide-configuration-part-1/>. Acesso em: 7 set. 2022.

NASERI, Farshid. **What is the difference between specific power and specific energy. And in steady state operation are they both the same**. [S. l.: s. n.], mai. 2017.

PLETT, Gregory L. **Battery-Management-System Requirements**. [S. l.: s. n.], 2015. Acesso em: 3 out. 2023.

POKHARIYA, Hemant Singh; KUMAR, Divesh; HARDAS, Bhalchandra M. Real-Time Battery Equalization Circuitry for Series Battery Packs with Inverse-Excitation Type

Multi-directional DC-DC Converter. *In*: IEEE. 2023 3rd International Conference on Pervasive Computing and Social Networking (ICPCSN). [S. l.: s. n.], 2023. P. 1672–1676.

PUHLMANN, Henrique Frank Werner. **Trazendo o mundo real para dentro do processador – Conversor A/D**. [S. l.: s. n.], 2015.

QIU, Danfeng *et al.* The battery equalization circuit based on the bidirectional flyback transformer used for vehicle power battery packs. *In*: IEEE. 2022 5th International Conference on Advanced Electronic Materials, Computers and Software Engineering (AEMCSE). [S. l.: s. n.], 2022. P. 83–86.

SAMSUNG. **ICR18650-22P Datasheet**. [S. l.], 2020. Disponível em: <https://datasheet4u.com/datasheet-pdf/Samsung/ICR18650-22P/pdf.php?id=845518>. Acesso em: 5 abr. 2024.

SOLECTRO. **O que é a fita kapton e para que é?** [S. l.: s. n.], 2020. Disponível em: <https://solectroshop.com/pt/blog/que-e-fita-kapton-e-o-que-e-para-n46>. Acesso em: 2 abr. 2024.

SOUZA, Fábio. **Comunicação I2C**. [S. l.: s. n.], 2023.

SPECIFICATIONS, EV. **2021 Dacia Spring Electric - Specifications**. [S. l.: s. n.], 2021. Disponível em: <https://www.evspecifications.com/en/model/2ee911a>. Acesso em: 2 abr. 2024.

TAKKALAKI, Nazeeya *et al.* Design and simulation of lithium-ion battery for electric vehicle. *In*: IEEE. 2021 12th International Conference on Computing Communication and Networking Technologies (ICCCNT). [S. l.: s. n.], 2021. P. 1–6.

UNIVERITY, Battery. **BU-105: Battery Definitions and what they mean**. [S. l.: s. n.], 2021. Disponível em: <https://batteryuniversity.com/article/bu-105-battery-definitions-and-what-they-mean>. Acesso em: 27 set. 2023.

VENDITTI, Mário Sérgio. **A história do carro elétrico**. [S. l.: s. n.], 2020. Disponível em: <https://mobilidade.estadao.com.br/inovacao/a-historia-do-carro-eletrico/>. Acesso em: 15 mai. 2024.

WU, Hongjie. Hardware-in-loop verification of battery management system. *In*: IEEE. 2011 4th International Conference on Power Electronics Systems and Applications. [S. l.: s. n.], 2011. P. 1–3.

XIONG, Rui. **Battery management algorithm for electric vehicles**. [S. l.]: Springer, 2020.