

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
CURSO DE ENGENHARIA MECATRÔNICA

DANIEL STRINGARI

ESTUDO E DESENVOLVIMENTO DE UM BMS PARA BATERIAS DE ÍON-LÍTIO

Joinville
2020

DANIEL STRINGARI

ESTUDO E DESENVOLVIMENTO DE UM BMS PARA BATERIAS DE ÍON-LÍTIO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Mecatrônica no curso de Engenharia Mecatrônica, da Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Orientador: Prof. Dr. Diego Santos Greff

Joinville
2020

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a **Deus**, por ter me fortalecido e sustentado durante todo este tempo na universidade e mesmo em meio às dificuldades impostas neste ano devido ao COVID, nunca deixou-me desanimar ou desistir.

Aos meus pais, **Leonite Anderle Stringari** e **Nelson Stringari** e aos meus irmãos **Douglas Stringari** e **Jocelé Diego Stringari**, pelo apoio à minha dedicação aos estudos e compreensão nos momentos de ausência.

Ao professor e diretor do centro tecnológico de Joinville, **Diego Santos Greff**, pela orientação e pelo constante estímulo transmitido durante todo o trabalho.

A professora e amiga **Aline Durrer Patelli Juliani**, responsável pela organização dos trabalhos de conclusão, por conduzir todo processo acadêmico de maneira clara e objetiva.

Aos professores coordenadores do curso de engenharia mecatrônica, **Milton Evangelista de Oliveira Filho** e **Tatiana Renata Garcia**, que nos momentos difíceis, sempre estiveram ao meu lado, auxiliando e ouvindo minhas dificuldades durante este período.

A todos que colaboraram direta ou indiretamente na execução deste trabalho e que foram aqui involuntariamente omitidos.

RESUMO

Células de lítio estão cada vez mais difundidas no cenário atual, principalmente nas aplicações que envolvem o desenvolvimento de células recarregáveis, onde são usadas em agrupamentos denominados pacote de baterias. Aplicações que utilizam muitas células de lítio para formar um pacote de baterias com determinada capacidade de potência necessitam de cuidados especiais em relação a tensão, corrente e temperatura de modo a manter a vida útil dessas células. Nesse contexto, se faz necessário o uso de um circuito eletrônico de gerenciamento da energia de modo a minimizar os riscos que possam surgir. Esse trabalho relata o processo de projeto, prototipagem e validação de um Battery Management System (BMS) utilizando um microcontrolador para o balanceamento passivo e controle do momento de carga e descarga das baterias. Como resultado, tem-se um protótipo de BMS passível de adaptação para a embarcação Babitonga, que possui energia solar como principal fonte energética.

Palavras-chave: Células de lítio. Pacote de baterias. Vida útil. BMS. Circuitos eletrônicos.

ABSTRACT

Lithium cells are increasingly widespread in the current scenario, especially in applications involving the development of rechargeable cells, in which they are used in groups called batteries. Applications that many lithium cells are used to form a battery pack with a certain power capacity require special care regarding voltage, current and temperature in order to preserve the life cycle of the cells. In this context, it is necessary to use an electronic energy management circuit in order to minimize the risks that may arise. This work reports the process of design, prototyping and validation of a Battery Management System (BMS), using a microcontroller for passive balancing and control of the moment of charging and discharging batteries. As a result, it presents a BMS prototype that can be adapted for the Babitonga boat, in which is its main source of energy.

Keywords: Lithium cells. Battery pack. Life cycle. BMS. Electronic circuits.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Formas construtivas de células de lítio	12
Figura 2 – Capacidade recuperável da célula, capacidade efetiva da célula e resistência da célula <i>versus</i> ciclos.	17
Figura 3 – Área de operação segura	19
Figura 4 – Curvas de SOC e DOD: (a) na capacidade nominal e (b) após a célula ou bateria perder metade da sua capacidade.	21
Figura 5 – Algoritmos de descarregamento: (a) conforme definido pelo fabricante da célula e (b) compensado por IR.	22
Figura 6 – Algoritmos de carregamento: (a) conforme definido pelo fabricante da célula e (b) compensado por IR.	23
Figura 7 – Resistência da célula <i>versus</i> alguns parâmetros: (a) corrente, (b) temperatura, (c) SOC e (d) ciclos.	24
Figura 8 – Modelos equivalentes elétricos (Li-Ion) e gráficos de tensão e corrente: (a) R simples, (b) RC, (c) RC de impedância CA e (d) ambos os circuitos RC.	25
Figura 9 – Comportamento do BMS na carga	26
Figura 10 – Comportamento do BMS na descarga	26
Figura 11 – Topologias de BMS	27
Figura 12 – Variação das células tendo em vista a necessidade de balanceamento	29
Figura 13 – Energia desperdiçada por calor, passivo <i>versus</i> ativo, para algumas aplicações.	30
Figura 14 – Típico circuito de um balanceamento passivo	31
Figura 15 – Visão geral do sistema da embarcação	32
Figura 16 – Visão geral do subsistema: bateria	33
Figura 17 – Visão geral do sistema do projeto	34
Figura 18 – Pacote de baterias	35
Figura 19 – Proposta de circuito eletrônico de balanceamento	36
Figura 20 – Esquema elétrico do divisor resistivo	37
Figura 21 – Circuito de balanceamento	38
Figura 22 – Circuito com BJT	40
Figura 23 – H_{fe} Vs I_c @25°C	41
Figura 24 – Circuito eletrônico de carga e descarga proposto	43
Figura 25 – Circuito com MOSFET	44
Figura 26 – Protótipo do BMS projetado	46
Figura 27 – Fluxograma do algoritmo de carga e descarga	47

Figura 28 – Ambiente de testes do BMS	49
Figura 29 – Curvas de carga para duas séries	51
Figura 30 – Filtro com curvas de carga para duas séries	51
Figura 31 – Curvas de carga para seis séries	53
Figura 32 – Filtro com curvas de carga para seis séries	54
Figura 33 – Curvas de descarga para duas séries	55
Figura 34 – Curvas de descarga para quatro séries	56
Figura 35 – Curvas de descarga para seis séries	58

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Características dos componentes de uma bateria	15
Quadro 2 – Fatores que influenciam a longevidade de uma bateria	20
Quadro 3 – Variáveis que influenciam na resistência da célula	24

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparativo entre diferentes tipos de baterias	16
Tabela 2 – Dados de uma única célula	35
Tabela 3 – Características TIP31C	40
Tabela 4 – Características 4N25	42
Tabela 5 – Características IRF320	44
Tabela 6 – Características ESP32	45
Tabela 7 – Estado inicial de carga para duas séries	50
Tabela 8 – Estado final de carga para duas séries	52
Tabela 9 – Estado inicial de carga para seis séries	52
Tabela 10 – Estado final de carga para seis séries	54
Tabela 11 – Estado inicial de descarga para duas séries	55
Tabela 12 – Estado final de descarga para duas séries	55
Tabela 13 – Estado inicial de descarga para quatro séries	56
Tabela 14 – Estado final de descarga para quatro séries	57
Tabela 15 – Estado inicial de descarga para seis séries	57
Tabela 16 – Estado final de descarga para seis séries	58

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ADC	Conversor Analógico-Digital
Ah	Ampere-hora
AOS	Área de Operação Segura
BJT	Transistor Bipolar de Junção
BMS	Battery Management System
CI	Circuito Integrado
DAC	Conversor Digital-Analógico
DOD	Profundidade de Descarga
Li	Lítio
LiFePO ₄	Íon de Lítio Ferro Fosfato
LiPo	Íon de Lítio Polímero
Li-Ion	Íon de Lítio
MOSFET	Transistor de Efeito de Campo
NiCd	Níquel Cádmio
NiMH	Níquel Hidreto Metálico
OCV	Tensão de Circuito Aberto
PCB	Placa de Circuito Impresso
Pb	Chumbo
SOC	Estado de Carga
SOH	Estado de Saúde
V	Volts
VEs	Veículos Elétricos
Wh	Watt-hora

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	OBJETIVOS	13
1.1.1	Objetivo geral	13
1.1.2	Objetivos específicos	13
1.2	JUSTIFICATIVA	14
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO	14
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	15
2.1	BATERIAS	15
2.2	CÉLULAS DE LÍTIO	18
2.2.1	Área de operação segura e longevidade	18
2.2.2	Estado de carga e profundidade de descarga	20
2.2.3	Comportamento das células na carga e descarga	21
2.2.4	Modelagem	23
2.3	BATTERY MANAGEMENT SYSTEM	25
2.3.1	Topologias	27
2.3.1.1	BMS centralizado	27
2.3.1.2	BMS modular	28
2.3.1.3	BMS mestre-escravo	28
2.3.1.4	BMS distribuído	28
2.3.2	Balanceamento	28
2.3.2.1	Balanceamento ativo e passivo	30
3	ANÁLISE E PROJETO DO BMS	32
3.1	CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA	32
3.2	REQUISITOS DE PROJETO	34
3.3	DEFININDO AS CÉLULAS A SEREM UTILIZADAS	35
3.4	ARQUITETURA PROPOSTA	35
3.4.1	Análise e projeto do circuito de balanceamento passivo	36
3.4.1.1	Medição da tensão	37
3.4.1.2	Dimensionando o resistor de Balanceamento	38
3.4.1.3	Dimensionamento do BJT	39
3.4.1.3.1	TIP31C	40
3.4.1.4	Dimensionamento do optoacoplador	41
3.4.1.4.1	4N25	42
3.4.2	Análise e projeto do circuito eletrônico de carga e descarga	42

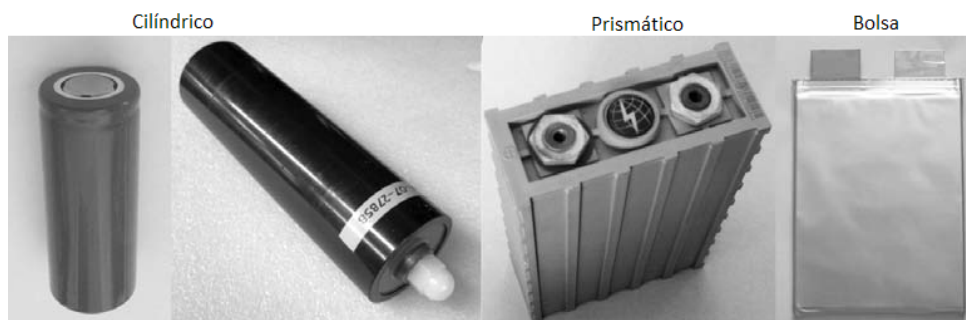
3.4.2.1	Dimensionamento dos MOSFETS	43
3.4.2.2	IRF320	44
3.4.3	Dimensionamento do microcontrolador	45
3.4.3.1	ESP32	45
4	IMPLEMENTAÇÃO	46
4.1	PROTÓTIPO CONSTRUÍDO	46
4.2	ALGORITMOS DE CONTROLE	46
4.2.1	Algoritmos de carga	48
4.2.2	Algoritmos de descarga	48
5	RESULTADOS	49
5.1	TESTE DE CARGA	50
5.1.1	Teste de carga com duas séries	50
5.1.2	Teste de carga com seis séries	52
5.2	TESTE DE DESCARGA	54
5.2.1	Teste de descarga com duas séries	54
5.2.2	Teste de descarga com quatro séries	56
5.2.3	Teste de descarga com seis séries	57
6	CONCLUSÕES	59
	REFERÊNCIAS	60
	APÊNDICE A - Projeto completo com 6 séries e 2 paralelos	61
	APÊNDICE B - Algoritmo implementado no ESP32	62

1 INTRODUÇÃO

Embarcações tradicionais representam uma parcela significativa da emissão de poluentes atmosféricos relacionados, principalmente, a propulsão. Em decorrência desse aspecto, os motores elétricos vêm ganhando notoriedade em aplicações que visam baixar os níveis de emissão de gases nocivos por apresentarem melhor desempenho e, conseqüentemente, reduzirem o consumo energético (HAN; CHARPENTIER; TANG, 2014). Embarcações com esse tipo de motor necessitam de alimentação diferenciada em relação às embarcações com motor a combustão ou diesel. A alimentação utilizada é aplicada a pacotes de baterias que podem ser constituídas de lítio, chumbo, níquel- cádmio, zinco ou gel (ROSOLEM et al., 2018).

Baterias do tipo lítio são desenvolvidas através de células no formato cilíndrico, prismático ou de bolsa, conforme ilustrado na figura 1 (ANDREA, 2010). Segundo Rosolem et al. (2018), todas as células devem ser carregadas e descarregadas simultaneamente respeitando limites mínimo e máximo de carga. Para que se possa garantir as especificações do fabricante quanto ao ciclo de vida desse tipo de bateria é imprescindível a utilização de um BMS (cuja função principal é o controle de carga e descarga das células).

Figura 1 – Formas construtivas de células de lítio



Fonte: adaptado de Andrea (2010)

Há mais de uma definição na literatura sobre o que é um BMS e o que ele faz. Uma definição recorrente é dada por Weicker (2014), que o relaciona com sistemas que integram eletrônicos sofisticados e software para medir parâmetros da bateria, determinar sua condição e garantir que ela opere conforme desejado. Para esse autor, um BMS deve ser minimamente responsável por controlar o carregamento da bateria. Nesse caso, a unidade de controle é comumente centralizada no gerenciamento de baterias, no qual o BMS toma todas as decisões sobre o carregamento, enquanto os componentes eletrônicos do carregador de baterias realizam apenas a conversão de

energia desejada, sob o comando do BMS (WEICKER, 2014). Para Pop et al. (2008), a tarefa básica de um BMS é garantir que o uso ideal da bateria seja feito no sistema embarcado e que o risco de danos à bateria seja evitado. Esse objetivo é alcançado monitorando e controlando o processo de carregamento e descarregamento da bateria. O BMS pode ser integrado a um sistema remoto para que dados sejam enviados aos usuários ou dispositivos, e o controle de carga e descarga possa ser feito com maior robustez.

Ainda que essas duas definições contribuam para a compreensão do conceito de BMS, para os efeitos desse trabalho assume-se a definição de Andrea (2010) que, de modo a estabelecer uma linguagem comum, define BMS como qualquer produto ou tecnologia utilizada com a intenção de aplicar limites no uso de uma bateria. De acordo com esse conceito, um BMS pode incluir funções como: monitorar, proteger, estimar o estado de carga, maximizar o desempenho e informar dados em tempo real da bateria a seus usuários ou a dispositivos externos.

Embora BMSs venham sendo amplamente utilizados em sistemas embarcados, o custo de tais circuitos e a reduzida flexibilidade para customização ainda restringem sua utilização de maneira mais ampla. Essa restrição foi verificada no contexto do projeto Barco Solar Babitonga, um projeto de extensão universitário que projeta, desenvolve e aplica sistemas mecânico, elétrico e de navegação a bordo para um barco movido a energia solar.

1.1 OBJETIVOS

Com o intuito de desenvolver um BMS aplicável ao Barco Solar Babitonga, são delineados os objetivos geral e específicos apresentados abaixo.

1.1.1 Objetivo geral

Desenvolver o projeto e protótipo de um BMS de baixo custo capaz de ser facilmente customizado para aplicações que envolvem pacotes de baterias maiores.

1.1.2 Objetivos específicos

- a) Projetar um BMS com balanceamento passivo, utilizando microcontrolador para controle do momento de carga e descarga das células.
- b) Desenvolver um protótipo do BMS projetado, aplicando limites de desempenho conforme necessidade imposta pela embarcação.
- c) Validar o BMS proposto a partir de curvas de carga e descarga.

1.2 JUSTIFICATIVA

A principal motivação desse trabalho, é a fácil adaptação do protótipo criado ao projeto de extensão Barco Solar Babitonga, com o intuito de obter resultados satisfatórios em relação a eficiência e aplicação de métodos. A estrutura obtida ao fim desse trabalho, poderá ser customizada e tornar-se efetiva para outros tipos de aplicações que requerem controle e robustez de sistema.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Esse trabalho está dividido em seis capítulos. O primeiro capítulo apresenta uma contextualização da situação de aplicação, seus objetivos geral e específicos, a justificativa para sua realização e sua relevância para o Projeto Barco Solar Babitonga, assim como apresenta uma descrição de sua estrutura de texto.

As bases teóricas para o desenvolvimento do BMS são apresentadas no segundo capítulo, de fundamentação teórica. Esse capítulo está subdividido em três seções, que apresentam individualmente partes do sistema e facilitam a compreensão do sistema proposto como um todo.

O terceiro capítulo apresenta os principais requisitos do sistema e a metodologia adotada durante todo o planejamento, desenvolvimento e validação do protótipo do sistema, enquanto a implementação do sistema – incluindo as informações necessárias para sua reprodução para requisitos gerais de outros projetos ou aplicações – é apresentada no capítulo seguinte.

Os dois últimos capítulos desse documento, resultados e conclusão, abordam respectivamente, a avaliação dos resultados obtidos através do protótipo construído e os algoritmos implementados seguindo as especificações e componentes relatados nos capítulos anteriores, e uma síntese dos principais resultados durante o processo de pesquisa, desenvolvimento e teste do BMS aqui proposto.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Esse capítulo apresenta as teorias que fundamentam o trabalho e que servem de base para o projeto e implementação do BMS aqui proposto. São apresentadas as características e tipos de baterias comercialmente disponíveis, justificando a aplicação em células de lítio e são feitas considerações a respeito da interpretação das curvas de carga e descarga para determinar os limites e áreas de operação segura da célula. Além disso, é mostrado o funcionamento de um BMS e suas topologias de circuitos. Por fim, o capítulo apresenta um circuito de balanceamento passivo.

A partir dessas informações interpretadas, será projetado o circuito eletrônico de controle do balanceamento passivo para, posteriormente, definir as variáveis de entrada e saída a serem configuradas no microcontrolador.

2.1 BATERIAS

Para a melhor interpretação do trabalho é preciso definir o que são alguns componentes de um pacote de baterias e quais as suas características. Essas definições são apresentadas no quadro 1.

Quadro 1 – Características dos componentes de uma bateria

Componentes	Características
Célula	Elemento fundamental de um pacote de baterias. Fornece de 3V a 4V, considerando células de lítio.
Série	Um conjunto de células conectadas diretamente em paralelo, também fornecendo de 3V a 4V.
Paralelo	Um conjunto de células conectadas em série fornecendo uma tensão proporcional ao número de células multiplicadas por sua tensão nominal.
Pacote de Baterias	Conjunto de séries e paralelos, dispostos em diferentes combinações, fornecendo uma energia total.

Fonte: adaptado de Andrea (2010)

Além das nomenclaturas utilizadas, alguns conceitos importantes também precisam ser definidos. Com base em dados extraídos de *datasheets*, Marcelino (2013) forma um comparativo entre as baterias mais usuais. A partir das considerações feitas pelo autor, sintetizadas na tabela 1, pode-se observar que as células de lítio têm a mais alta densidade de energia e uma das mais altas densidades de potência.

Tabela 1 – Comparativo entre diferentes tipos de baterias

	Energia específica (Wh/kg)	Densidade de Energia volumétrica (Wh/l)	Potência Específica (W/kg)	Ciclo de Vida (nº ciclos)	Eficiência (%)	Tempo de Carregamento (h)
NiCd	40-60	50-50	150	2000	70-90	1
NiMh	60-120	140-300	250-1000	1000	66	02-04
Pb	30-40	60-75	180	500-800	70-92	8-16
Li-Ion	90-160	250-730	250-340	1200	94	2-4
LiPo	130-200	300	2000-5000	1000	97	1-2
LiFePO4	90-110	220	>300	2000	92	1-2

Fonte: adaptado de Marcelino (2013)

Na comparação apresentada acima, a caracterização da energia em unidade de Watt-hora (Wh) é importante para comparar diferentes tipos de baterias. O que gera a unidade é a multiplicação da tensão do pacote em Volts (V) pela capacidade de corrente do pacote em Ampere-hora (Ah). Assim, ambos valores não precisam ser diretamente definidos e várias combinações de tensão e capacidade de corrente são possíveis para gerar a mesma energia. Essa configuração permite comparar alguns tipos de baterias com relação a algum atributo específico (MARCELINO, 2013).

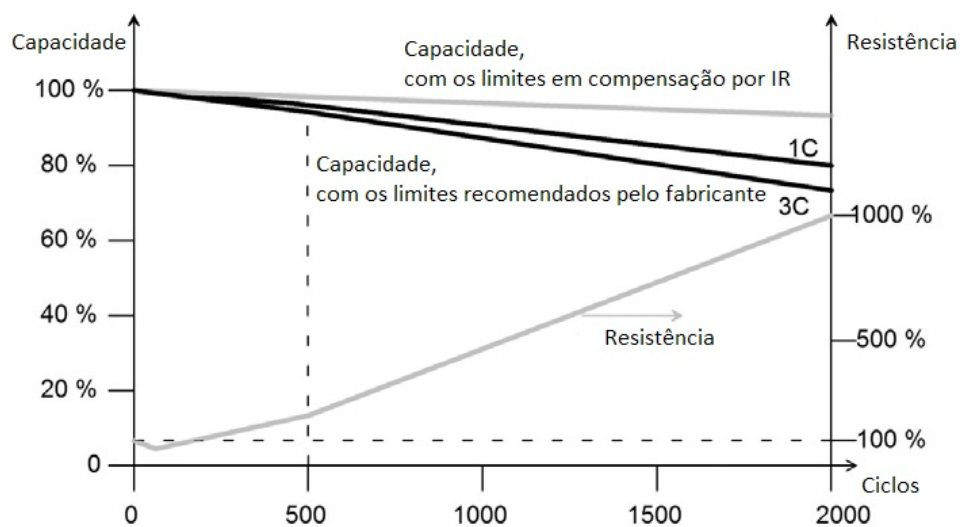
Ao observar a energia em relação à massa em quilograma na tabela 1, tem-se a energia específica de cada bateria. Ou seja, quando a aplicação necessitar uma baixa massa, é possível escolher apenas para uma bateria que entrega maior energia específica. O mesmo vale para a densidade de energia volumétrica: quando a aplicação necessitar um baixo volume, é possível escolher a densidade de energia volumétrica e considerar a bateria com maior valor. Também pode ser feita uma análise considerando a quantidade de energia que se pode armazenar ou retirar a cada quilograma ou litro de bateria.

A potência específica não é uma energia cumulativa como a energia específica. Isso torna-se evidente quando observada a sua unidade, o Watt por quilograma. De acordo com Weicker (2014), o interesse maior em relação à potência específica é o fluxo de energia que é liberado pela bateria, i.e., quantos Watts por quilograma a bateria consegue entregar a determinada aplicação.

Com relação ao ciclo de vida, após análise mais aprofundada de diversos *datasheets*, Marcelino (2013) afirma que algumas diferenças são bem perceptíveis e que, por vezes, acabam fazendo pouco sentido. Isso acontece, por exemplo, na definição de critérios de parada pelos fabricantes. Alguns deles especificam que a degradação da bateria é feita com 50% de ciclos de carga e descarga, enquanto outros especificam essa mesma degradação com 80%.

A figura 2 apresenta uma análise feita por Andrea (2010), considerando 80% de perda da capacidade de uma bateria. Assim, os dados da tabela 1 também consideram esse percentual para todos tipos de baterias. Tome-se como exemplo prático do funcionamento dessa contagem uma célula nova que entrega a capacidade de corrente de 20Ah. Ao considerar 80% de ciclos para definir a degradação da mesma, a análise vai ser feita quando a célula chegar em 16Ah. Em 16Ah, a contagem é interrompida, e o número de ciclos com que a célula atingiu a capacidade de corrente final é contado.

Figura 2 – Capacidade recuperável da célula, capacidade efetiva da célula e resistência da célula *versus* ciclos.



Fonte: adaptado de Andrea (2010)

Ao comparar a eficiência ou rendimento, também é necessário tomar cuidados com a interpretação dos dados e relacioná-los de forma correta. Ao observar descargas mais rápidas, o rendimento não vai ser o mesmo em descargas mais lentas, e a perda por aquecimento torna-se um fator importante nessa análise. Marcelino (2013) explana que para permitir as comparações de forma correta, é definido uma variável. A variável é definida como 'C' e é disponibilizada por fabricantes de baterias nos *datasheets* respectivos. Ela pode ser relacionada a fração de hora, por exemplo, 0,5C, sendo interpretado como se a bateria estivesse sendo descarregada em duas horas. 1C equivalendo a uma hora e 2C equivalendo a meia hora. Essa variável também é múltipla da corrente, por exemplo, tendo uma bateria de 1Ah e descarregando ela em 2C significa que se pode extrair dois amperes, 1C equivalendo a um ampere e em 0,5C meio ampere. A partir disso é possível obter um ciclo inteiro de carga e um ciclo inteiro de descarga para posteriormente comparar os rendimentos de cada bateria. Na carga, é desprezada a energia do carregador, conseqüentemente, sua ineficiência (MARCELINO, 2013).

No tempo de carregamento, uma variável importante é a temperatura. Se a temperatura for bem condicionada em qualquer bateria, é possível fazer cargas até mais rápidas do que as que estão estipuladas na tabela 1, considerando carregadores mais bem estruturados para isso. Os valores referentes a esse tempo foram referenciados como uma média das baterias mais encontradas no mercado, ou seja, com aplicações mais comuns (MARCELINO, 2013).

2.2 CÉLULAS DE LÍTIO

Conforme explanado no capítulo anterior, a superioridade em termos de tecnologia e robustez das células de Li-Ion são evidentes e, com base nessa constatação, elas foram escolhidas para o projeto do BMS. Contudo, esse tipo de bateria requer cuidados específicos, que serão apresentados no decorrer dessa seção.

2.2.1 Área de operação segura e longevidade

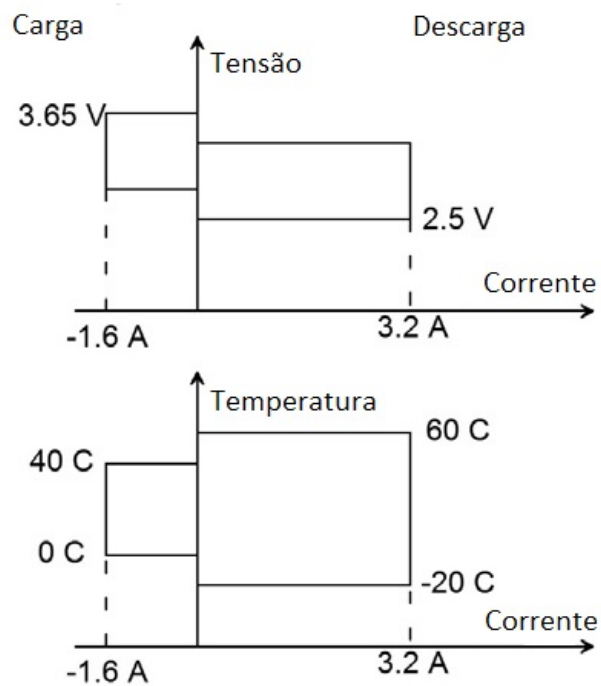
Apesar dos recentes avanços na tecnologia e segurança das células, todas as baterias de Li-Ion apresentam riscos que surgem se a bateria for utilizada fora de sua área de operação segura (AOS). A necessidade de usar as baterias de maneira controlada para evitar que as mesmas tenham redução da vida útil ou sofram degradações superiores às projetadas aumenta conforme as baterias extrapolam os limites de operação. O BMS deve impedir que a bateria seja utilizada fora desses limites, de maneira que possa mitigar os riscos associados a um evento de pior caso, como um acidente ou exposição ao calor extremo.

Definir a área operacional segura não é algo trivial, uma vez que o grau de segurança varia à medida que os parâmetros da bateria mudam. Em geral, um conjunto de parâmetros da bateria, incluindo tensão, corrente, temperatura e estado de carga (SOC), devem ser estabelecidos aceitáveis do ponto de vista de segurança, vida útil e desempenho. A aplicação deve estar bem definida e, com base nela, esse conjunto de limites é estabelecido (ANDREA, 2010).

Andrea (2010) apresenta um conjunto de cinco fatores para consolidar a AOS. São eles: (1) as células de Li-Ion podem ser rapidamente danificadas e poderão explodir se sobrecarregadas acima de uma certa tensão; (2) a maioria das células de Li-Ion podem ser danificadas se forem descarregadas abaixo de uma certa tensão; (3) a vida útil das células de Li-Ion pode ser reduzida se descarregadas ou carregadas fora de uma faixa de temperatura; (4) A vida útil das células de Li-Ion pode ser reduzida se descarregadas a uma corrente muito alta ou carregadas muito rapidamente; e (5) as células de Li-Ion podem ser danificadas se operadas em altas correntes de pulso por mais de alguns segundos.

Esses limites variam de acordo com o especificado pelo fabricante. Alguns fabricam células que podem ser descarregadas até 1,80V, outros fabricam células que podem ser descarregadas até 0V sem efeitos negativos. A figura 3, mostra a AOS de uma célula de LiFePO4 que pode ser descarregada até uma tensão de 1,80V (ANDREA, 2010).

Figura 3 – Área de operação segura



Fonte: adaptado de Andrea (2010)

Com relação à longevidade e ao desempenho, Andrea (2010) observa que a perda de desempenho pode ter como motivações a degradação da bateria a cada ciclo de carga e descarga, além do envelhecimento das células. Os principais modos de degradação das células de Li-Ion estão relacionados com a diminuição da capacidade utilizável e diminuição da potência, também conhecido como crescimento de impedância. A capacidade utilizável da bateria geralmente diminui com o tempo, reduzindo a quantidade de energia que a bateria pode armazenar. A impedância interna da bateria aumenta com o envelhecimento, levando a uma redução na energia disponível da célula. Alguns dos principais fatores de influência na longevidade das células são listados no quadro 2.

Quadro 2 – Fatores que influenciam a longevidade de uma bateria

Fatores	Causas
Temperatura	O carregamento a baixa temperatura pode causar revestimento de lítio no ânodo, o que leva a uma perda prematura de capacidade
Janela de operação	A operação em estados de carga alto e baixo tende a ser mais prejudicial para a bateria do que a operação em estado de carga intermediário. Como resultado, as baterias profundamente descarregadas e totalmente carregadas geralmente degradam mais rapidamente
Taxas de carga e descarga	Taxas mais rápidas de carga e descarga normalmente levam a uma degradação mais rápida da bateria

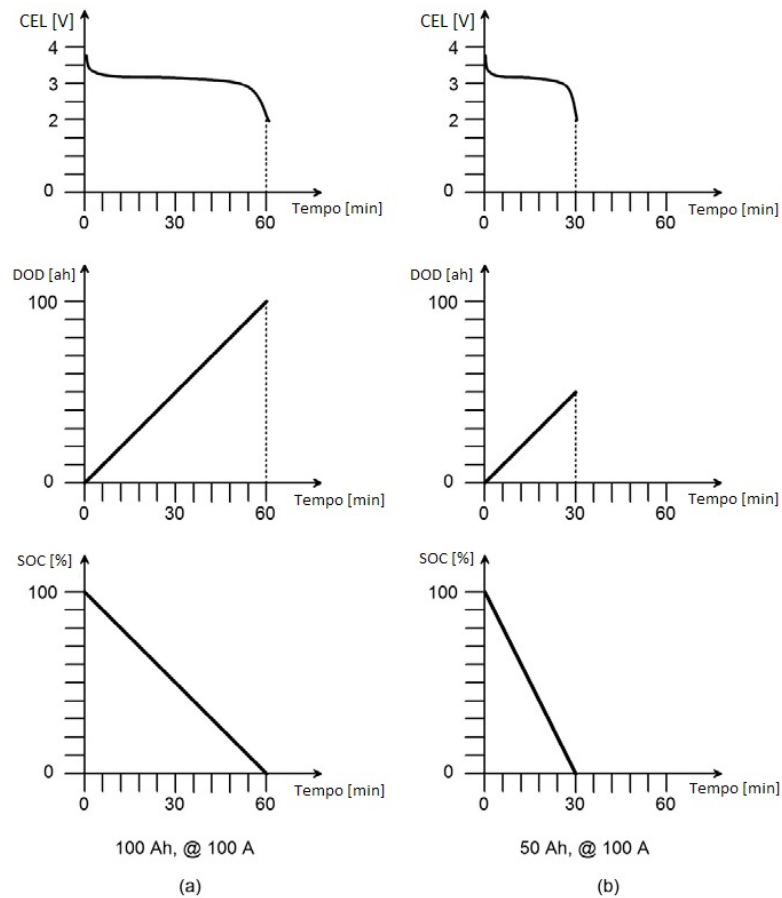
Fonte: adaptado de Andrea (2010)

2.2.2 Estado de carga e profundidade de descarga

O estado de carga (SOC), do inglês *State Of Charge*, de uma célula ou bateria em um determinado instante é a proporção da carga disponível naquele instante em comparação com a carga total disponível quando a célula está totalmente carregada. É expresso em porcentagem, de 100% quando carregada a 0% quando descarregada. Devido à sua analogia com veículos elétricos (VEs), o SOC também é conhecido como medidor de combustível. Cada célula de uma bateria possui seu próprio SOC e o pacote todo de baterias possui SOC diferente das células individuais (ANDREA, 2010).

A profundidade de descarga (DOD), do inglês *Depth Of Discharge*, de uma célula ou bateria é uma variável da carga removida dela, com unidade de Ampere-hora (Ah). O DOD também pode ser expresso em porcentagem, porém é mais útil expressar DOD em Ah para que a combinação de SOC (em porcentagem) e DOD (em Ah) transmita mais informações do que se ambos fossem expressos em porcentagens (ANDREA, 2010). Uma razão para expressar do DOD em Ah é que o DOD não depende da taxa de descarga. Por mais que SOC pareça apenas o inverso do DOD (um aumenta enquanto o outro diminui), isso não é verdade. Conforme uma bateria de 100 Ah perde metade de sua capacidade, o SOC ainda passa de 100% para 0%, mas o DOD, que costumava ir de 0 Ah a 100 Ah, agora passa de 0 Ah a 50 Ah (Fig. 4).

Figura 4 – Curvas de SOC e DOD: (a) na capacidade nominal e (b) após a célula ou bateria perder metade da sua capacidade.



Fonte: adaptado de Andrea (2010)

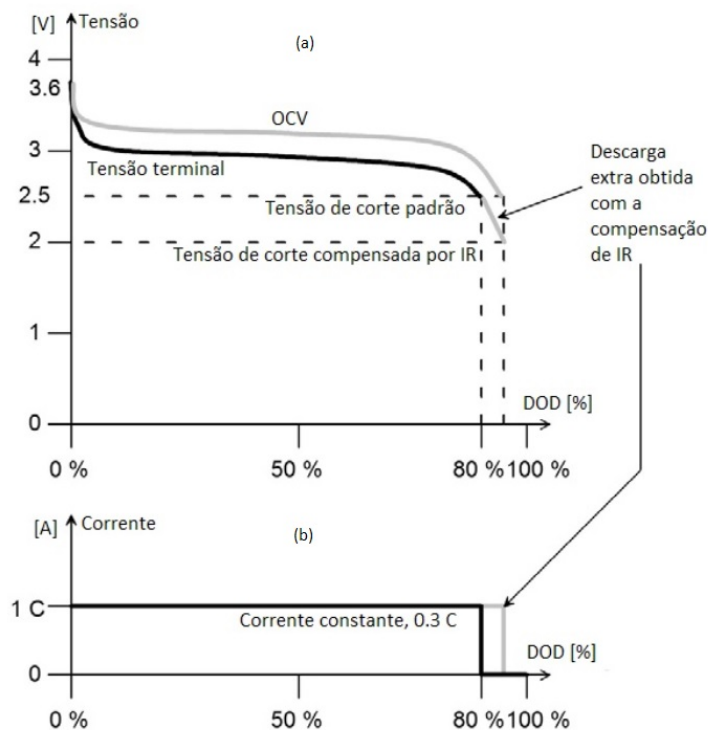
2.2.3 Comportamento das células na carga e descarga

Para entender melhor o comportamento das células na carga e na descarga, Plett (2015) sugere que seja feita uma comparação de uma célula nova e uma célula mais antiga, que já tenha tido alguns ciclos de carga e descarga. Para tanto, deve-se considerar a descarga de ambas as células em uma corrente constante até chegarem à tensão mínima e, por fim, interrompendo a corrente. Após a descarga, as células entram em estado de relaxamento até estabilização das reações químicas internas. Uma leitura da tensão após essa estabilização deve levar à conclusão de que a tensão medida após o período de relaxamento não é a mesma medida no período em que foi cessado o descarregamento de ambas as células. O autor explica que esse comportamento se deve ao fato de que a corrente causa estresse na célula e faz com que a tensão seja alterada. Conseqüentemente, a tensão medida após o período de relaxamento é maior que no momento final da descarga. Na célula mais nova, a diferença de tensão será menor, pois, a célula mais antiga está com a resistência interna maior. Isso significa que a célula antiga resiste a entregar energia e, assim, possui tensão maior para entregar a

mesma corrente e atingir a mesma tensão mínima que a célula mais nova, i.e., chega mais rápido à tensão mínima do que a célula mais nova.

De acordo com Andrea (2010), um dispositivo capaz de medir a resistência de uma célula pode fazer mais uso da carga nessa célula fazendo uma compensação IR de sua tensão terminal para estimar a tensão de circuito aberto (OCV), do inglês *Open Circuit Voltage*, e interromper a descarga mais tarde, no momento em que o OCV estimado atingir a tensão de corte inferior (e não quando atingir tensão mínima que o fabricante estipula). A figura 5, abaixo, exemplifica essa afirmação.

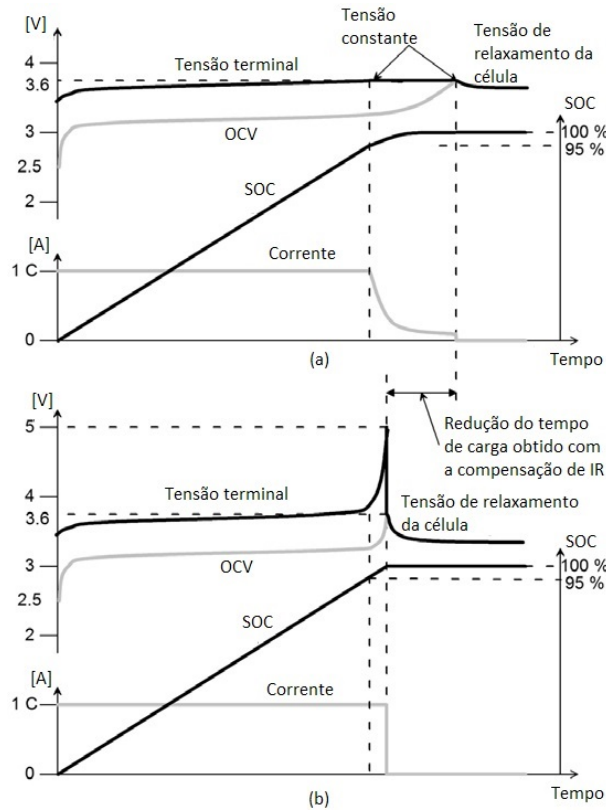
Figura 5 – Algoritmos de descarregamento: (a) conforme definido pelo fabricante da célula e (b) compensado por IR.



Fonte: adaptado de Andrea (2010)

Um comportamento similar ocorre na carga. Entretanto, a carga apresenta uma diferença: se for possível medir a resistência da célula enquanto ela está sendo carregada, o algoritmo de carregamento poderá ser otimizado e isso resultará em um carregamento mais rápido. Isso é feito através da compensação IR para determinar a tensão de corte da célula e, conseqüentemente, fazendo com que o estágio de corrente constante termine mais tarde, quando o OCV (e não a tensão do terminal) atingir a tensão de corte (Fig. 6).

Figura 6 – Algoritmos de carregamento: (a) conforme definido pelo fabricante da célula e (b) compensado por IR.



Fonte: adaptado de Andrea (2010)

2.2.4 Modelagem

Com relação à modelagem das células, Andrea (2010) expõe alguns modelos elétricos equivalentes. Todos os modelos levam em consideração o uso de uma resistência. Em uma célula típica de Li-Ion, a resistência é da ordem de alguns miliohms. Essa resistência resulta da combinação em série da resistência efetiva devido aos processos químicos e da resistência do metal a granel nos coletores e terminais. A queda de tensão devido a essa resistência e à corrente da célula é chamada de potencial de polarização. A resistência não é a mesma que em circuitos convencionais, podendo ser calculada conforme a lei de Ohm ou ser medida diretamente com o multímetro. A resistência em questão é a dinâmica, que é diferente devido à presença de uma fonte de tensão em série com a mesma. A resistência dinâmica é definida como a razão da tensão delta sobre a corrente delta:

$$R = \frac{\Delta V}{\Delta I} \quad (1)$$

Com base nisso, Andrea (2010) faz estudos e conclui que a resistência varia conforme os dados do quadro 3.

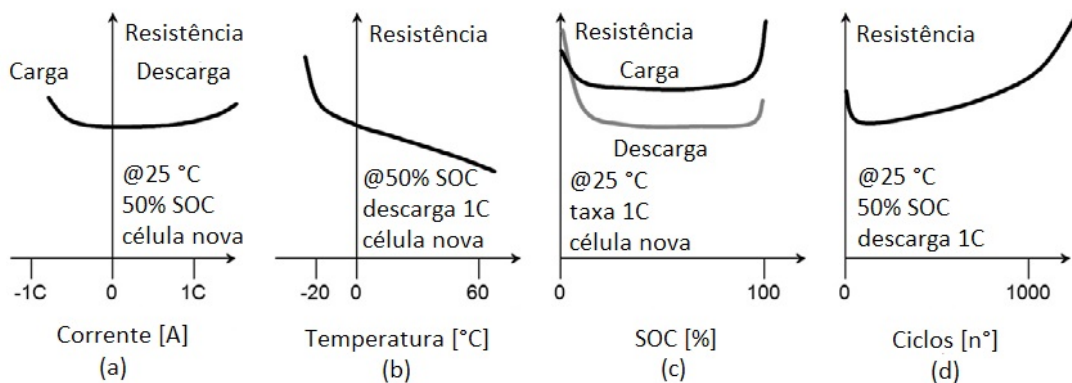
Quadro 3 – Variáveis que influenciam na resistência da célula

Variáveis	Definições
SOC	seu valor é maior nos níveis baixo e alto do SOC
Temperatura	seu valor é maior em temperaturas mais frias
Corrente	seu valor é maior em correntes maiores e durante o carregamento, comparando à mesma descarga de corrente
Ciclos	seu valor aumenta tempo de uso

Fonte: adaptado de Andrea (2010)

Na figura 7 pode-se ter uma noção melhor dos termos mencionados no quadro 3 e como eles variam em relação a diferentes parâmetros.

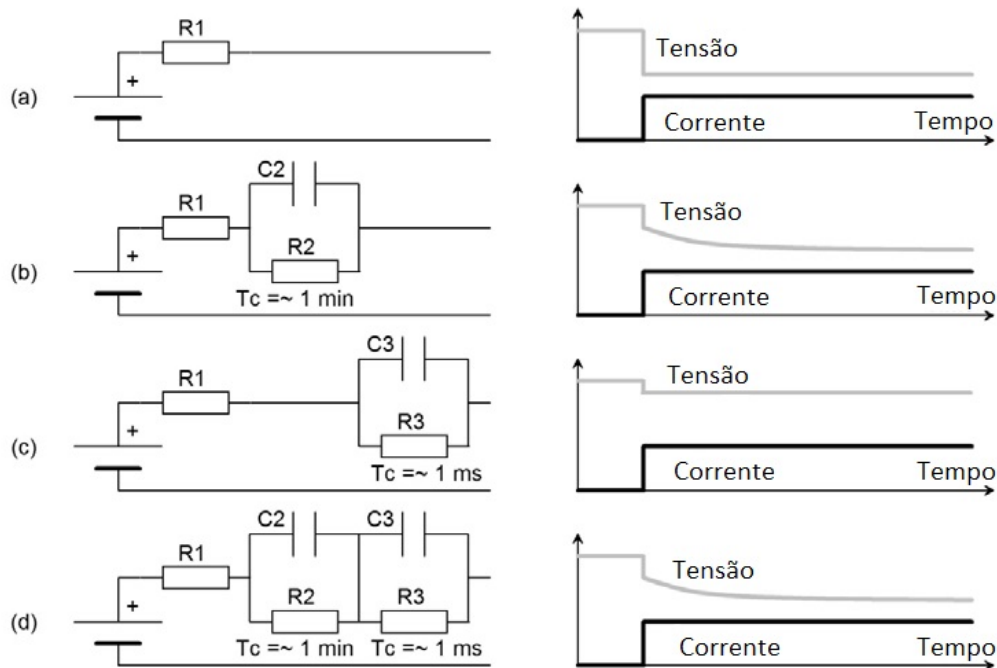
Figura 7 – Resistência da célula versus alguns parâmetros: (a) corrente, (b) temperatura, (c) SOC e (d) ciclos.



Fonte: adaptado de Andrea (2010)

O modelo mais simples de uma célula de Li-Ion é mostrado na figura 8(a), onde é possível perceber a utilização de uma fonte de tensão e uma resistência. Outro modelo de equação da célula é obtido dividindo a resistência em dois resistores e adicionando um capacitor grande em paralelo a um dos resistores, conforme a figura 8(b). Isso permite que o modelo emule corretamente o comportamento real de uma célula quando carregada repentinamente. Além disso, os fabricantes de células usam um modelo diferente, exposto na figura 8(c), que, embora inicialmente pareça ser o mesmo, usa um circuito RC, cuja constante de tempo é da ordem de 1 ms. Isso permite que o modelo emule corretamente a impedância CA. Em frequências na ordem de 1 kHz, a impedância CA permanece constante durante toda a vida útil da célula. Segundo Andrea (2010), os fabricantes de células declaram a parte real da impedância CA a 1 KHz como a resistência da célula.

Figura 8 – Modelos equivalentes elétricos (Li-Ion) e gráficos de tensão e corrente: (a) R simples, (b) RC, (c) RC de impedância CA e (d) ambos os circuitos RC.



Fonte: adaptado de Andrea (2010)

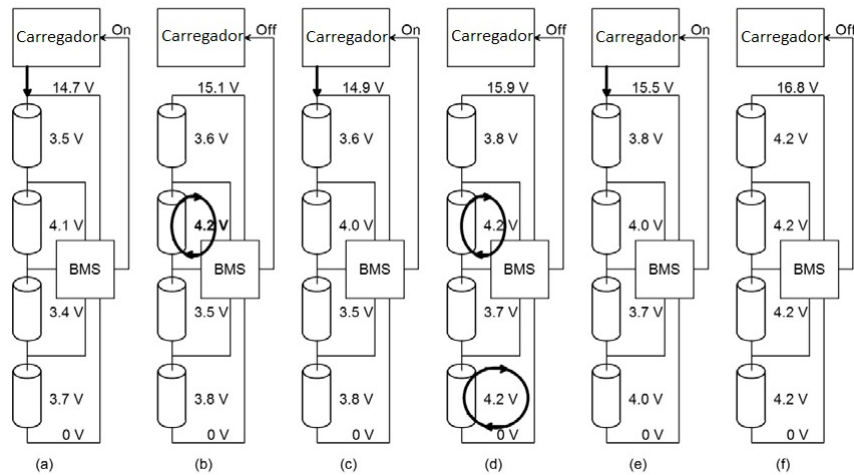
O autor ainda conclui que declarar a parte real da forma que foi abordada pelos fabricantes, não é uma verdade para o usuário que acaba confundindo esse valor com o valor da resistência das células. Portanto, a combinação dos dois modelos resulta em um modelo mais preciso com dois circuitos RC apresentado na figura 8(d), e servem tanto ao fabricante da célula como ao usuário.

2.3 BATTERY MANAGEMENT SYSTEM

Um BMS é fundamental ao carregar uma bateria de Li-Ion. Assim que qualquer série do pacote atinge sua tensão máxima, é necessário desligar o carregador. Com a necessidade de equilibrar a tensão das séries, isto pode ser feito removendo a carga da célula mais carregada até que sua tensão seja baixa o suficiente para que o carregador volte ao modo ativado. Após alguns ciclos desse processo, todas as séries estarão totalmente carregadas, o que significa que o pacote estará equilibrado.

Na figura 9(a) tem-se o carregador em modo ligado até que uma célula chegue na tensão de plena carga. Isso acontece na figura 9(b) assim, o carregamento é interrompido quando qualquer célula atinge a tensão de plena carga ou de corte superior. Na figura 9(c) o carregamento é reiniciado depois que a tensão da célula é ligeiramente reduzida pelo balanceamento. Na figura 9(d) o processo se repete até que na figura 9(e, f) o pacote de células esteja equilibrado.

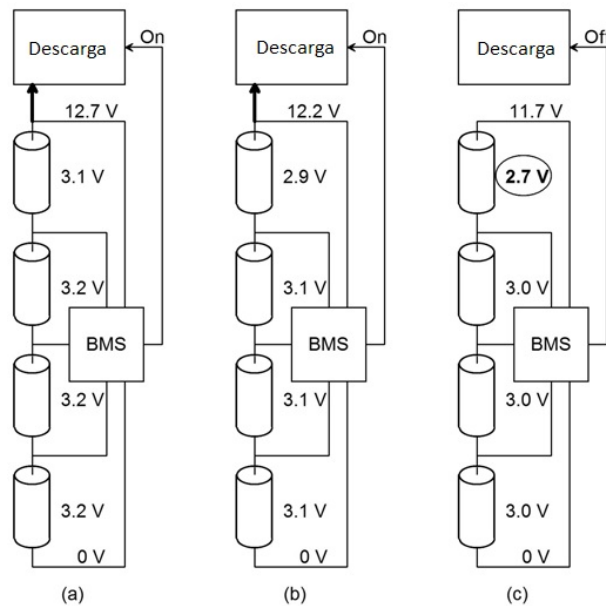
Figura 9 – Comportamento do BMS na carga



Fonte: adaptado de Andrea (2010)

Um BMS também é essencial ao descarregar uma bateria de Li-Ion. Assim que qualquer célula atinge uma tensão de corte inferior, ele desliga a carga conforme a figura 10. Na figura 10(a, b) observa-se a descarga normal das células, até que uma célula chega na tensão de corte inferior na figura 10(c) quando, então, a descarga é interrompida pelo BMS. Isso acontece para qualquer célula que cai para a tensão de corte inferior.

Figura 10 – Comportamento do BMS na descarga



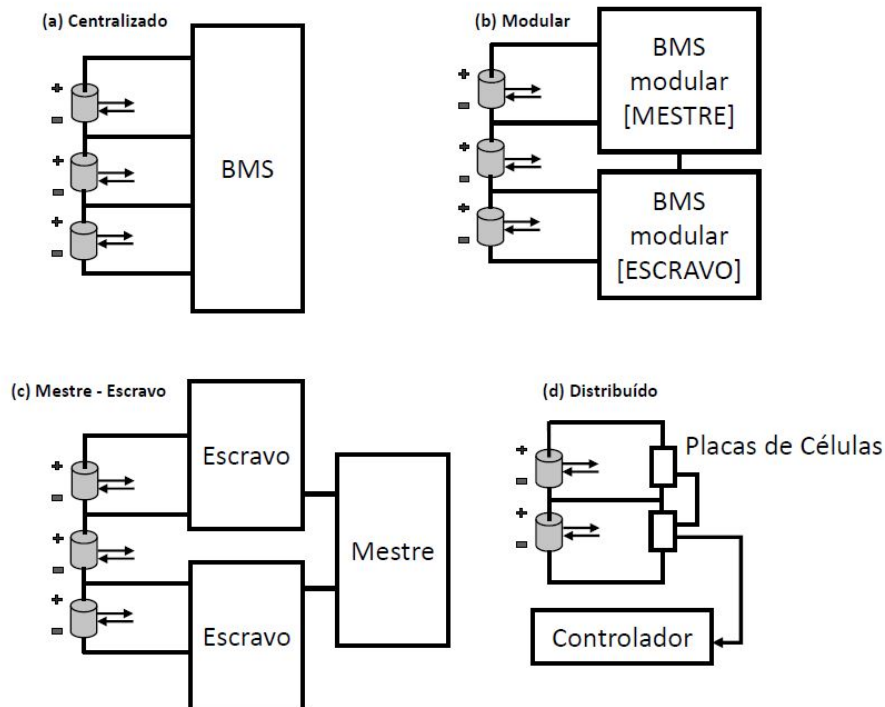
Fonte: adaptado de Andrea (2010)

2.3.1 Topologias

Um BMS pode ser classificado conforme sua montagem. Para Pop et al. (2008) podem ser montados separadamente e diretamente em cada célula, em um único dispositivo ou de alguma forma intermediária. A montagem é uma característica muito importante de um BMS, pois, de certo modo, afeta o custo, a confiabilidade, a facilidade de instalação, a manutenção, bem como a precisão de medição.

Segundo Andrea (2010), o BMS pode ser dividido em algumas topologias com relação a sua montagem, essas topologias são descritas na figura 11.

Figura 11 – Topologias de BMS



Fonte: adaptado de Andrea (2010)

2.3.1.1 BMS centralizado

Um BMS centralizado, exposto na figura 11(a), é um sistema inteiramente localizado em um único conjunto, a partir do qual um feixe de $N + 1$ filamentos vai para as células, considerando N células em série. O uso de apenas uma montagem tem várias vantagens: por ser compacto, por ser a abordagem mais barata (é mais barato agrupar eletrônicos em um único conjunto do que dividi-los em vários conjuntos), e pelo fato de que, se for necessária solução de problemas ou reparo, é mais fácil substituir apenas uma única montagem.

2.3.1.2 BMS modular

O BMS modular, apresentado na figura 11(b), é semelhante a um BMS centralizado. A principal diferença entre ambos é que BMS modular é dividido em vários módulos idênticos, cada qual com seu conjunto de filamentos indo para uma das baterias do pacote. Normalmente, um dos módulos é designado como mestre, i.e., o módulo que gerencia todo o arranjo e faz a comunicação com o restante do sistema, enquanto os outros módulos atuam como simples dispositivos remotos de medição. Nesse caso, são necessários alguns filamentos de derivação extras, pois as derivações atendidas por dois módulos precisam de dois filamentos, um para cada módulo.

A topologia modular tem quase as mesmas vantagens que a topologia centralizada. Com alguns acréscimos: os filamentos das células são mais fáceis de gerenciar (cada módulo pode ser colocado próximo à bateria que ele suporta), a expansão para pacotes maiores é simples e o custo do BMS é um pouco maior que o da topologia centralizada.

2.3.1.3 BMS mestre-escravo

Um BMS mestre-escravo, conforme aquele apresentado na figura 11(c), é semelhante a um sistema modular no sentido de usar vários módulos escravos idênticos, cada um medindo a tensão de algumas células. No entanto, o mestre é diferente dos módulos e não mede tensões, apenas lida com computação e comunicações. A topologia mestre-escravo possui as mesmas vantagens e desvantagens da topologia modular. Além disso, o custo de cada escravo tende a ser menor que o da topologia modular, pois é otimizado apenas para um trabalho: o de medir as tensões das células.

2.3.1.4 BMS distribuído

A última topologia descrita por Andrea (2010) é o BMS distribuído apresentado na figura 11(d). Ela é significativamente diferente das outras topologias, nas quais os componentes eletrônicos são agrupados e alojados separadamente das células. Em um BMS distribuído, os componentes eletrônicos estão contidos em placas que são colocadas diretamente nas células que estão sendo medidas. Ao invés de muitos filamentos de derivação entre células e eletrônica, um BMS distribuído usa apenas alguns filamentos de comunicação entre as placas de célula e um controlador BMS, que lida com computação e comunicações.

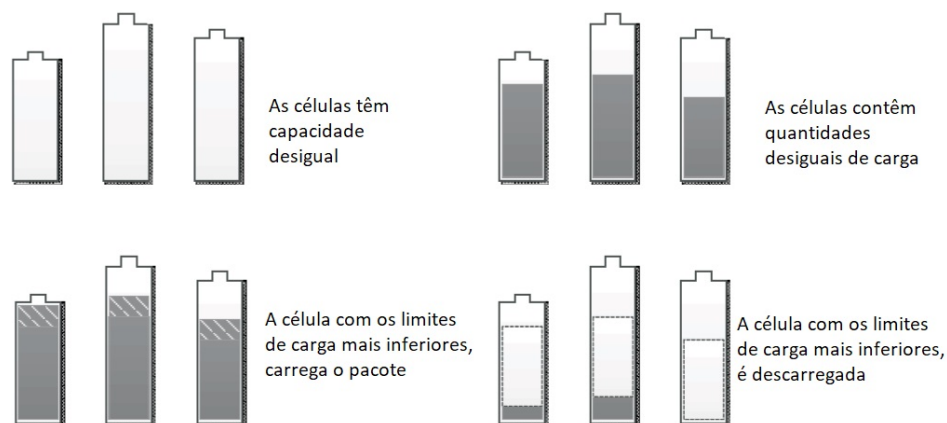
2.3.2 Balanceamento

Para manter o desempenho da bateria durante uma longa vida útil em um pacote de baterias de grande formato, geralmente é necessário implementar uma estratégia de balanceamento de carga devido às diferenças no desempenho de cada

célula. As baterias de Li-Ion não se “equilibram” como acontece em muitos outros tipos de baterias. Sem um gerenciamento adequado, o desequilíbrio da bateria não é corrigido automaticamente com o tempo. Na ausência de balanceamento e transferência de carga, a capacidade de toda a conexão em série será limitada à célula de menor capacidade. Também é necessário saber a diferença do estado de carga entre as células para um balanceamento eficaz.

As diferenças nas taxas de auto-descarga entre células são um dos principais fatores para o dimensionamento do circuito de balanceamento. Essas diferenças resultam de variações no processo de fabricação ou derivam de defeitos nas células. Um diagrama explicando os tipos de variação que podem ocorrer é mostrado na figura 12.

Figura 12 – Variação das células tendo em vista a necessidade de balanceamento



Fonte: adaptado de Weicker (2014)

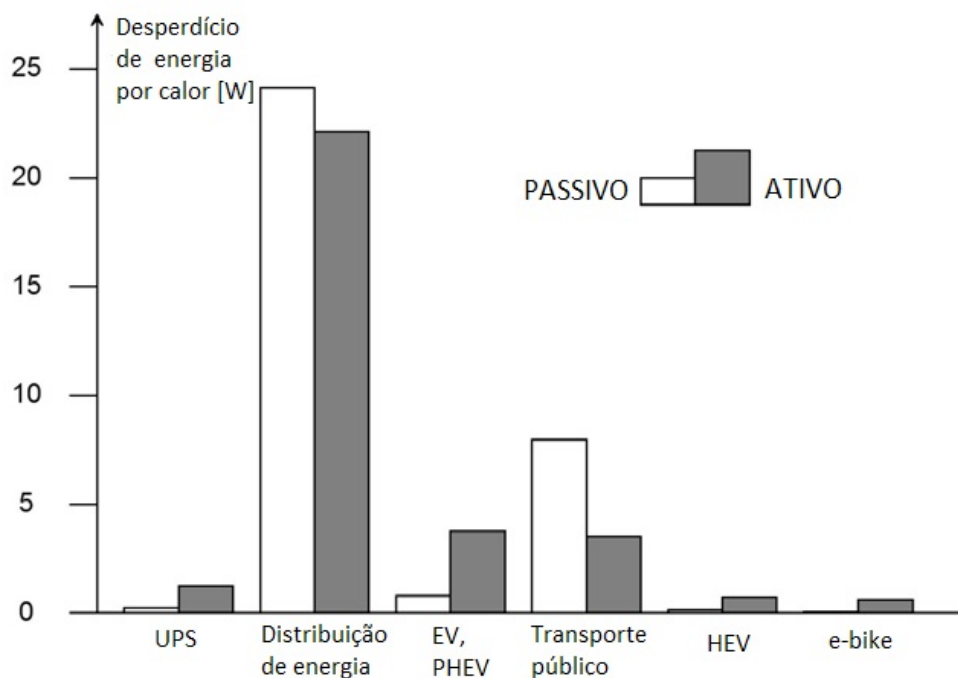
Nesse contexto, um sistema de balanceamento de células deve ser projetado para atender a um ou mais dos seguintes objetivos:

- Minimizar as diferenças de carga entre as células: a capacidade efetiva do pacote é reduzida pela diferença de carga entre as células mais e menos carregadas.
- Maximizar a energia da bateria disponível: células em diferentes SOC's têm diferentes recursos de energia devido à influência do SOC na impedância da célula. Se as células atingirem SOC alto ou baixo, elas limitarão a capacidade de energia da bateria.
- Maximizar a energia disponível da bateria: se as células não tiverem capacidade igual, as células com maior capacidade ainda conterão energia útil quando as células de menor capacidade atingirem a descarga total.

2.3.2.1 Balanceamento ativo e passivo

O balanceamento de um BMS pode ser de característica ativa ou passiva. No balanceamento passivo, a energia é removida da célula mais carregada e é dissipada por calor, enquanto no balanceamento ativo a energia é transferida entre as células e, portanto, não é dissipada (ANDREA, 2010). É possível comparar o calor residual dos dois métodos com alguns exemplos de aplicações. Esses exemplos são apresentados na figura 13.

Figura 13 – Energia desperdiçada por calor, passivo versus ativo, para algumas aplicações.



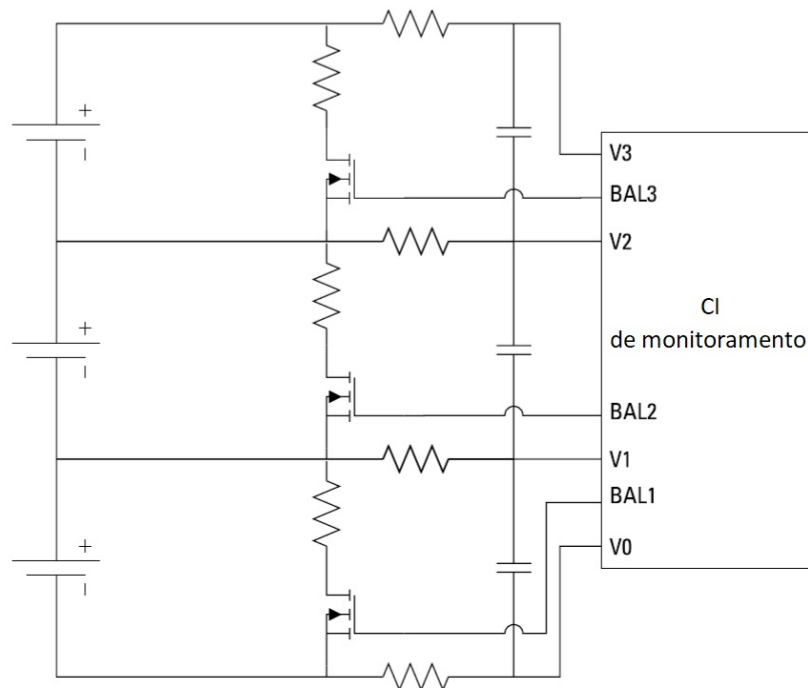
Fonte: adaptado de Andrea (2010)

Segundo Weicker (2014), uma estratégia de baixo custo empregada por projetistas de BMS é dissipar a energia das células que são determinadas como sendo muito altas perante o SOC. Para isso, utilizam um dispositivo resistivo. Mesmo parecendo um desperdício, os sistemas de balanceamento passivos oferecem um nível alto de simplicidade entre suas vantagens. Os comutadores nos sistemas de balanceamento passivo devem alternar em apenas uma tensão de célula por vez, minimizando o custo e o tamanho do comutador necessário para ativar o circuito de balanceamento. Apesar de seu grande número, os comutadores são pequenos em tamanho e ter um único comutador e resistor por célula é barato.

Muitos CIs de monitoramento de células servem para controlar o balanceamento passivo. Os comandos de balanceamento são fornecidos ao CI, que altera o nível do sinal de controle para uma tensão referenciada a um dos

terminais da célula a ser balanceada. Esse sinal de controle pode ser usado para acionar um transistor, geralmente um NMOS ou NPN, de modo a permitir que a corrente flua através do transistor e de um resistor de balanceamento. A figura 14 apresenta um circuito de balanceamento que faz uso de transistores e resistores de balanceamento, juntamente com um CI de monitoramento de célula (WEICKER, 2014).

Figura 14 – Típico circuito de um balanceamento passivo



Fonte: Adaptado de Weicker (2014)

O calor gerado pelos resistores de balanceamento deve ser tratado adequadamente. Se forem utilizados resistores montados em PCB, é provável que eles se tornem os componentes mais quentes na placa quando os circuitos de balanceamento estiverem em operação. Uma vez que somente os circuitos conectados às células que necessitam de descarga são energizados, a temperatura e a localização do aquecimento podem variar durante a operação do sistema.

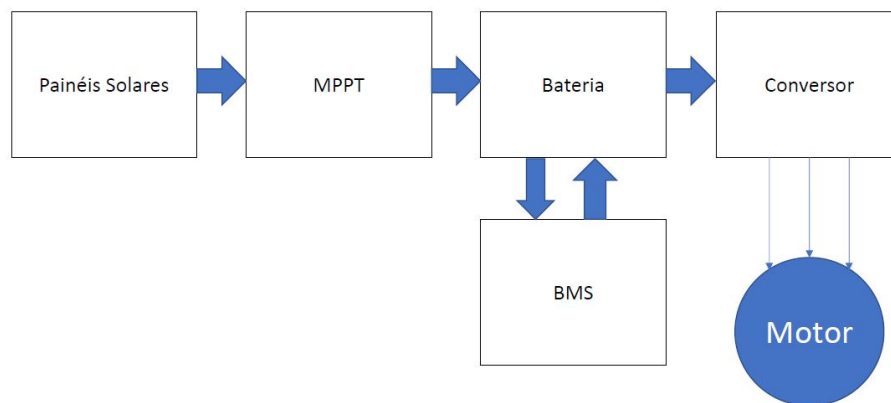
3 ANÁLISE E PROJETO DO BMS

Os conceitos apresentados na fundamentação teórica, somados aos fundamentos de circuito de Boylestad e Nashelsky (2013) e Alexander e Sadiku (2013), formaram a base para o delineamento do método de implementação do projeto do BMS aqui proposto. Considerando os limites impostos internamente ao Projeto Barco Solar Babitonga, os principais requisitos de desempenho que limitam o projeto do BMS estão diretamente ligados à energia total que o pacote de baterias deve ter. Tendo em vista essa situação, a energia do pacote de baterias que foi fornecido pela equipe Babitonga é de 2075Wh.

3.1 CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA

De modo a apresentar a posição do BMS no contexto da aplicação, o diagrama de blocos de todo o sistema de carregamento e potência da embarcação é apresentado na figura 15. Observe-se que o conversor do motor elétrico é quem limita a tensão de trabalho do pacote de baterias em 48V. Assim, é necessário que o pacote de baterias forneça essa tensão.

Figura 15 – Visão geral do sistema da embarcação



Fonte: Babitonga (2020)

Além dos sistemas de carregamento e potência apresentados, a embarcação conta com todo o sistema de controle de baixa potência que também deriva do mesmo pacote de baterias. Entretanto, uma vez que o sistema de controle não implica diretamente em um gasto de energia considerável, optou-se por omiti-lo da figura 15.

A figura 16, apresenta o pacote de baterias necessário para que a embarcação atenda à capacidade de 2075Wh, com tensão do pacote de baterias em 48,10V.

Figura 16 – Visão geral do subsistema: bateria



Fonte: Babitonga (2020)

Para uma melhor compreensão dessa figura, é necessário entender que o conversor do *powertrain* que a embarcação utiliza, necessita de alimentação de 48V. Tendo isso posto e considerando que cada célula de lítio desse pacote fornece a tensão média de 3,70V, basta multiplicar o número de séries pela tensão média da célula para, assim, chegar na tensão do pacote de baterias.

$$V_{pacote} = NumSeries \cdot V_{célula} \quad (2)$$

$$V_{pacote} = 48,10V \quad (3)$$

Para determinar a energia total do pacote de baterias, é necessário conhecer a capacidade de corrente que cada célula fornece. Para uma célula que fornece 2,20Ah de capacidade de corrente, resta apenas multiplicar o número de células em paralelo pela capacidade de corrente de cada célula e também pela tensão total do pacote, já calculada. Isso é demonstrado nas equações abaixo.

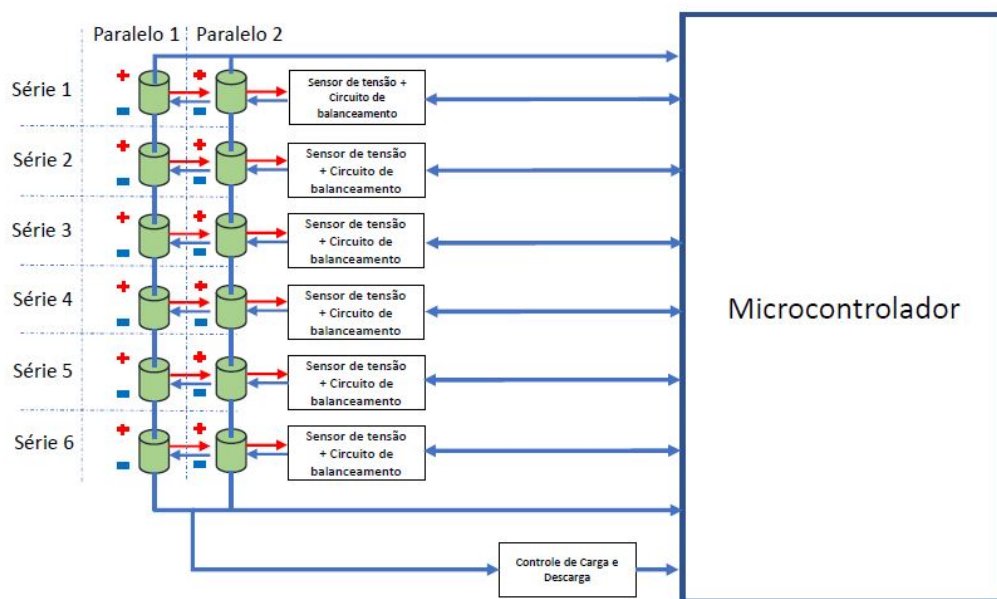
$$EnergiaPacote = NumParalelos \cdot I_{célula} \cdot V_{pacote} \quad (4)$$

$$EnergiaPacote = 2010,60Wh \quad (5)$$

3.2 REQUISITOS DE PROJETO

A figura 17 apresenta uma visão geral do sistema que será desenvolvido nesse projeto. Ela apresenta o circuito de balanceamento de cada série com os respectivos sensores de tensão e referencia o circuito responsável por ativar o carregamento e desativa-lo, seguindo com a mesma ideia para o descarregamento. A figura também evidencia o microcontrolador que vai tratar de todos esses subsistemas.

Figura 17 – Visão geral do sistema do projeto



Fonte: do autor (2020)

A validação desse projeto não requer a reprodução do sistema na capacidade máxima de potência do pacote de baterias que a equipe necessita. A validação do balanceamento passivo em casos como esse acontece em um número de séries reduzido, conforme descrito a seguir, e é posteriormente, adaptada para os requisitos específicos de tensão, corrente e potência do *powertrain* da embarcação. Os estudos feitos em conjunto com a equipe do Projeto Barco Solar Babitonga indicaram que 12 células consistiria no número ideal para validação do projeto aqui proposto. Partindo dessa ideia, optou-se por utilizar as células dispostas de maneira centralizada de modo que tenham um total de 6 séries e 2 paralelos.

Outra característica importante é que o balanceamento passivo e o circuito de controle devem funcionar de forma independente de fontes de alimentação que não sejam única e exclusivamente oriundas do pacote de baterias. Também vale ressaltar que o balanceamento passivo não visa uma melhor eficiência, apenas é necessário operar os componentes eletrônicos que o compõem de forma segura.

3.3 DEFININDO AS CÉLULAS A SEREM UTILIZADAS

Para prosseguir com o projeto do sistema, é necessário definir quais células serão utilizadas para validar o BMS. As células escolhidas foram fornecidas pela empresa EletroDC, já montadas na configuração para implementação do BMS centralizado, conforme abordado na seção 2.3.1.1. Ou seja, considerando $n = 6$ células em série, a montagem das mesmas já possui $n + 1$ fios de saída para utilização direta no projeto. As características das células são apresentadas na tabela 2. Vale ressaltar que não são células novas.

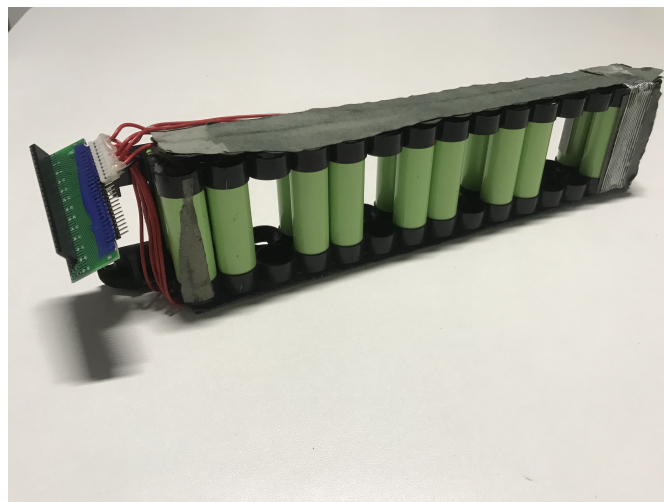
Tabela 2 – Dados de uma única célula

Tensão média	Tensão mínima e máxima	Capacidade de corrente	Rinterna
3,70V	2,50V e 4,20V	2,20Ah	152m Ω

Fonte: EletroDC (2020)

A figura 18 apresenta o pacote de baterias fornecido e que será utilizado. Neste pacote de baterias há um total de 10 séries e 2 paralelos. Porém, apenas 6 séries e 2 paralelos desse total serão utilizados para validação.

Figura 18 – Pacote de baterias



Fonte: do autor (2020)

Sendo assim, para calcular a tensão e energia que o pacote de baterias fornece, é possível utilizar as equações 2 e 4 e os valores da tabela 2. Dessa forma, chega-se na tensão de 22,20V e na energia de 97,68Wh.

3.4 ARQUITETURA PROPOSTA

Com base no conteúdo acima exposto, são projetados os subsistemas que compõem o BMS. Os dois subsistemas que necessitam de um projeto eletrônico são o

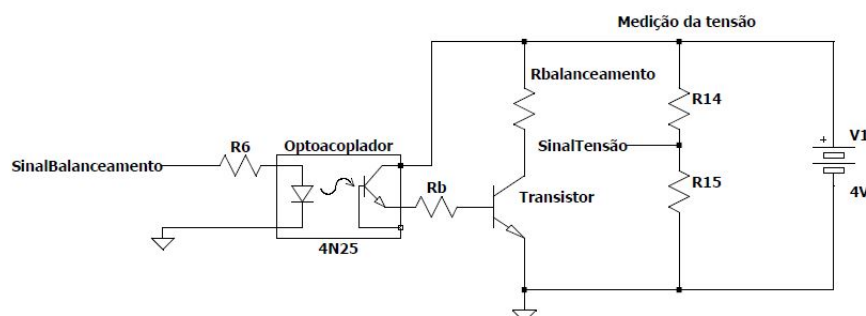
balanceamento passivo e o circuito de corte ou ativação da carga, e corte ou ativação da descarga. Por fim, é definido um microcontrolador para integrar esses sistemas. No Apêndice A - Projeto Completo com 6 Séries e 2 Paralelos, é encontrado o circuito com todos componentes definidos no decorrer desse capítulo.

3.4.1 Análise e projeto do circuito de balanceamento passivo

Para reduzir a tensão de cada série é proposto o circuito de balanceamento passivo. Será utilizado o projeto base de Weicker (2014), abordado na seção 2.3.2.1. Balanceamento Ativo e Passivo (Fig. 14). Esse projeto base é usado como referência, o que significa dizer que algumas adequações são feitas nele. Isso ocorre devido ao fato de que o balanceamento passivo proposto pelo autor utiliza um circuito integrado específico para o controle das funções do sistema, enquanto o balanceamento proposto por esse projeto, como um dos objetivos sugere, utiliza um microcontrolador para lógica do projeto.

O microcontrolador em questão, acionará apenas optoacopladores e receberá o sinal da leitura de tensão das séries. Os optoacopladores têm a função principal de isolar o sistema de maior potência em relação ao de menor potência. Quando acionados, os optoacopladores fornecerão energia para a base do transistor respectivo de cada série, liberando fluxo de corrente através do resistor de balanceamento. Este, por sua vez, dissipará a energia das células em forma de calor. Ou seja, este circuito não necessita que seus componentes trabalhem de forma eficiente. O sistema a ser desenvolvido segue conforme figura 19.

Figura 19 – Proposta de circuito eletrônico de balanceamento



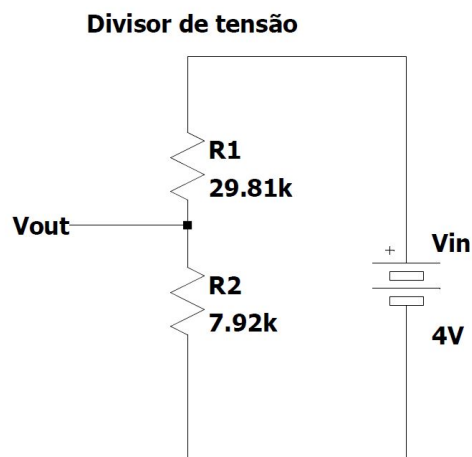
Fonte: do autor (2020)

Vale ressaltar que a figura apresenta o circuito de balanceamento passivo de apenas uma série. Uma vez que serão utilizadas seis séries, seis circuitos como o da figura são utilizados. Os capítulos seguintes apresentam o dimensionamento de todos esses componentes do balanceamento passivo.

3.4.1.1 Medição da tensão

Para mensurar a tensão de cada série, será aplicada a teoria de divisor resistivo, a mesma teoria aplicada a módulos de sensores de tensão comercialmente disponíveis. O divisor de tensão possui uma construção simplificada e é composto por dois resistores. Nesse trabalho serão utilizados os resistores de precisão com valores $29,81k\Omega$ e $7,92k\Omega$, ambos com tolerância de $\pm 1\%$ suportando potências de até $500mW$. Esses resistores são conectados em série e suas extremidades, superior e inferior, são conectadas nos polos positivo e negativo de uma série. O esquema elétrico do divisor resistivo é ilustrado na figura 20.

Figura 20 – Esquema elétrico do divisor resistivo



Fonte: do autor (2020)

Portanto, a tensão da célula deve ser a tensão de entrada (V_{in}), que é dividida em R_1 e R_2 , e V_{out} a tensão no pino conectado ao microcontrolador, assim, é obtida a seguinte equação:

$$V_{out} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{in} \quad (6)$$

Por fim, substituindo os valores de resistência encontra-se a relação abaixo:

$$V_{out} = 0,21 \cdot V_{in} \quad (7)$$

Ou seja, o sinal no microcontrolador será aproximadamente 5 vezes menor que a tensão da célula. Isso será tratado na programação do microcontrolador para converter o sinal em tensão real.

3.4.1.2 Dimensionando o resistor de Balanceamento

Os resistores que serão utilizados no projeto são, em sua maioria, de baixa potência. O resistor que vai possuir uma maior potência é o resistor de balanceamento, pois o mesmo é quem vai eliminar a carga das células quando o microcontrolador enviar o comando necessitando do balanceamento.

As células de Li-Ion em geral, trabalham com tensão a plena carga de 4,20V e tensão mínima de 2,50V. Assim, será definido um resistor igual em cada série para a descarga das células através do circuito de balanceamento até a tensão de 3,65V. Pode-se definir um fator de pior caso das células para o cálculo do tempo de descarga máximo. O fator é definido como a diferença da tensão em plena carga e a tensão mínima de balanceamento, ou seja:

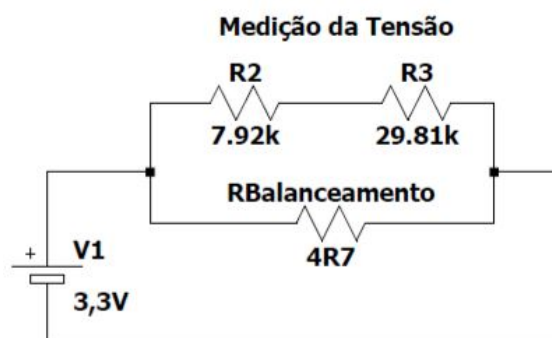
$$fator = 4,20V - 3,65V \quad (8)$$

$$fator = 0,55V \quad (9)$$

O fator calculado, é o valor máximo de tensão que vai ser descarregada em uma série, considerando o balanceamento. Para descarregar essa tensão máxima, é necessário determinar um resistor de balanceamento, esse resistor vai impactar diretamente no tempo de carregamento das células. Comercialmente, um resistor que supre a necessidade de potência é o de resistência igual a 4R7±5%, o resistor dissipa potências de até 5W.

É necessário entender como o circuito de balanceamento funciona de forma isolada. Tomando-se como base as informações apresentadas na figura 21, é possível compreender a configuração do circuito de balanceamento utilizando os divisores resistivos juntamente com o resistor de balanceamento. Chega-se a uma resistência equivalente de 4,69Ω.

Figura 21 – Circuito de balanceamento



Fonte: do autor (2020)

Levando em consideração que a tensão utilizada no circuito possui um decréscimo de 0,70V por conta do transistor, pode-se calcular a corrente de balanceamento aplicando a lei de Ohm, conforme equação abaixo.

$$I = \frac{3,30V}{4,69\Omega} \quad (10)$$

$$I = 703mA \quad (11)$$

Sendo a potência que o resistor dissipa, calculada na equação abaixo.

$$P = R \cdot i^2 \quad (12)$$

$$P = 2,32W \quad (13)$$

3.4.1.3 Dimensionamento do BJT

Um transistor bipolar de junção (BJT) é quem fará o acionamento do circuito de balanceamento passivo quando o microcontrolador enviar o sinal ao optoacoplador. Portanto, o transistor deve ser dimensionado para atender os requisitos de potência máxima dissipada e com ganho de corrente ideal para operar no modo ativo. Vale ressaltar que a operação desse transistor não necessita ser na saturação, pois o circuito de balanceamento não visa eficiência. Nesse caso, a corrente do coletor (I_c) do transistor é igual à corrente de balanceamento (I) anteriormente calculada. A I_c , é quem vai limitar a corrente de base (I_b), juntamente com o ganho que o transistor fornece (Fig. 22). Conforme equação abaixo, é possível utilizar um transistor que possua um ganho de corrente igual 100 vezes a sua I_b . Assim, a I_b pode ficar dentro de um valor aceitável para que o transistor opere no modo ativo.

$$I_c = 100 \cdot I_b \quad (14)$$

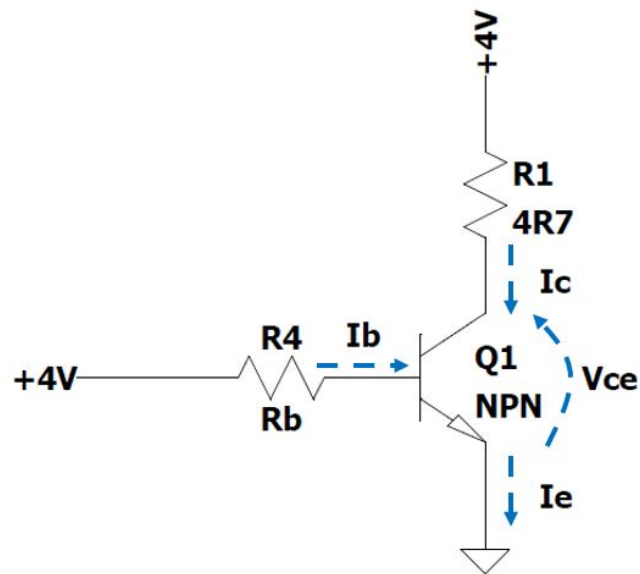
$$I_b = 7,03mA \quad (15)$$

Com a I_b calculada, é possível calcular o valor da resistência de base (R_b) simplesmente aplicando a lei de Ohm com I_b e a tensão aplicada.

$$R_b = \frac{3,30}{7,03m} = 470\Omega \quad (16)$$

O resistor de $470\Omega \pm 5\%$ que dissipa potências de até 500mW, é comercialmente disponível e foi o escolhido. Assim, com base nos cálculos efetuados, é preciso ter um transistor NPN que opere com ganho de corrente em torno de 100, em modo ativo, fornecendo uma I_C de 703mA.

Figura 22 – Circuito com BJT



Fonte: do autor (2020)

3.4.1.3.1 TIP31C

Conforme análise de requisitos do capítulo anterior, um transistor que consegue suprir todos os requisitos de desempenho é o TIP31C. Os principais dados desse transistor foram extraídos do seu *datasheet* e estão listados na tabela 3.

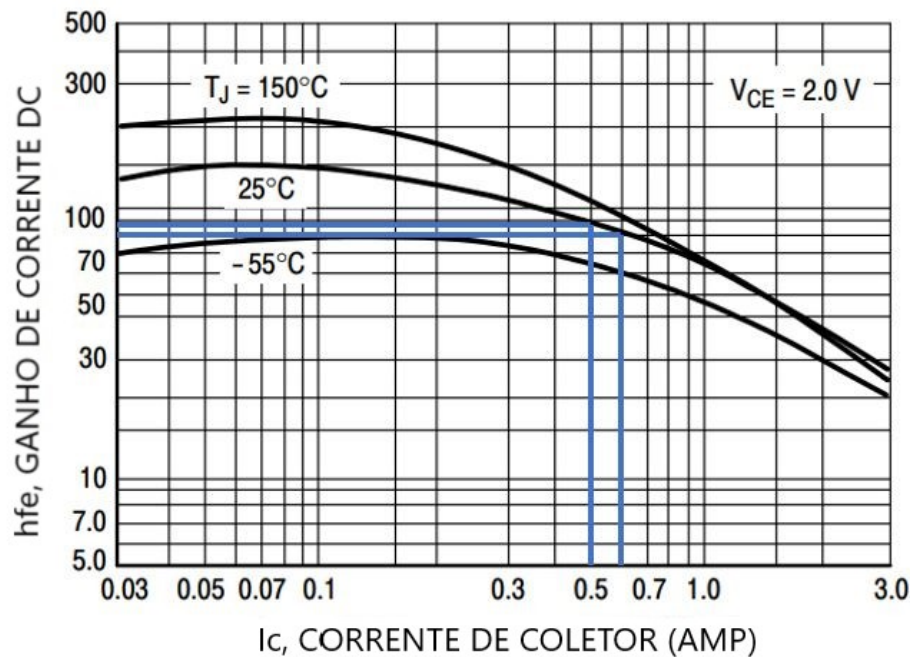
Tabela 3 – Características TIP31C

I_c - Nominal	3A
I_c - Pico	5A
I_b	1A
P_d	40W

Fonte: On (2008)

A figura 23 traz um mapeamento do ganho em relação a I_c do transistor TIP31C para uma temperatura de 25°C. É possível observar nas linhas com destaque em azul, traçadas a partir da I_c anteriormente calculada, que o transistor atende os requisitos de ganho previamente calculados. Ou seja, estará entre os valores 90 e 100 para operar na região ativa.

Figura 23 – Hfe Vs Ic @25°C



Fonte: adaptado de On (2008)

A potência dissipada pelo transistor segue a equação abaixo.

$$P_d = V_{ce} \cdot I_e \quad (17)$$

Onde V_{ce} é a queda de tensão entre o coletor e o emissor e I_e é a corrente no emissor do transistor, assume-se que para operar no modo ativo $V_{ce}=0,70V$ e $I_e=I_b+I_c$. V_{ce} extraído do datasheet e de experimentos práticos, logo:

$$P_d = 0,70 \cdot (7,03m + 703m) \quad (18)$$

$$P_d = 497mW \quad (19)$$

3.4.1.4 Dimensionamento do optoacoplador

O optoacoplador que vai ativar o BJT e o MOSFET (transistor de efeito de campo), também necessita atender certos requisitos, conforme cálculos já efetuados. A I_b do transistor é igual à corrente do emissor do optoacoplador (I_{e0}). Ou seja, o optoacoplador deve ser NPN e deve suprir um fluxo de corrente no emissor, na ordem de 7,03mA.

A tensão de circuito aberto também é uma variável importante. Quando o optoacoplador estiver inativo, ele deve conseguir suportar a tensão máxima do pacote de baterias entre os terminais do coletor e emissor (V_{ce0}).

3.4.1.4.1 4N25

O Optoacoplador 4N25 atende os requisitos analisados no capítulo anterior. Os principais dados desse componente são encontrados na tabela 4.

Tabela 4 – Características 4N25

I_{eo}	100mA
V_{ceo}	70V
P_{do}	150mW
V_{Led}	1,30V
I_{Led}	80mA

Fonte: Vishay (2019)

O led ativador do optoacoplador necessita de um resistor para limitar a sua corrente de trabalho. Um resistor de 100Ω será utilizado. Assim, sabendo que o microcontrolador envia um sinal de 3,30V, e que, a queda de tensão em cima do led (V_{Led}) é de 1,30V, pode-se calcular a corrente que o resistor está limitando ao led do optoacoplador.

$$I_{Led} = \frac{3,30V - 1,30V}{100\Omega} \quad (20)$$

$$I_{Led} = 20mA \quad (21)$$

3.4.2 Análise e projeto do circuito eletrônico de carga e descarga

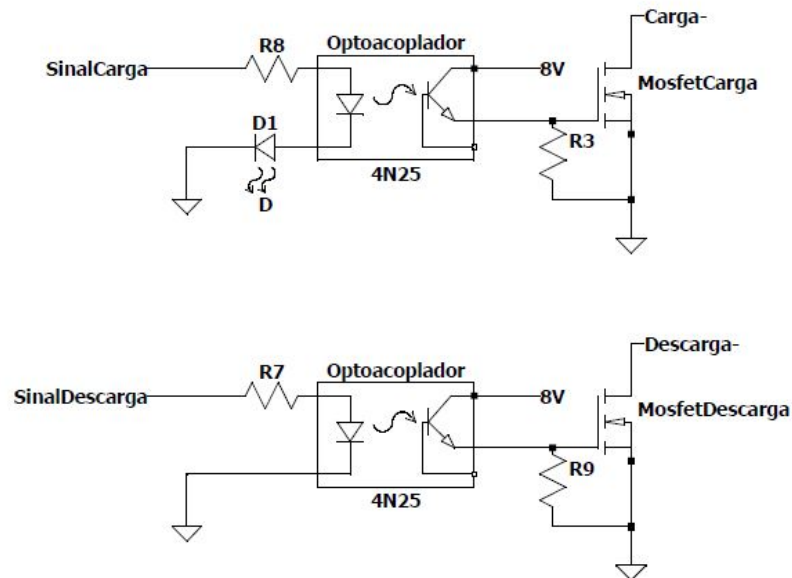
Diferentemente do circuito de balanceamento passivo, o circuito de controle de carga e descarga, utilizará MOSFETs. Porém, o funcionamento é similar ao do balanceamento passivo, utilizando optoacopladores para isolar o circuito e, nesse caso, acionar o MOSFET. Vale ressaltar que o MOSFET tem comportamento diferente do BJT. Enquanto o BJT é similar a uma fonte de corrente que é controlada por corrente, o MOSFET é similar a uma fonte de corrente controlada por tensão.

Dois MOSFETs serão necessários para o circuito de controle de carga e descarga projetado: um para o circuito de carga e outro para o circuito de descarga. Isso acontece devido ao fato de que, no instante em que o arranjo de baterias estiver totalmente carregado, o MOSFET de carga é desativado, impossibilitando que esse mesmo MOSFET atue em caso de necessidade de descarga. Da mesma forma, se o arranjo de baterias estivesse totalmente descarregado, o MOSFET de descarga estaria desativado e não poderia carregar o pacote de baterias.

Ao fazer uma análise do circuito de balanceamento, observa-se que o optoacoplador utilizado supre todas as necessidades para o circuito de carga e

descarga também. Assim, o optoacoplador 4N25 será utilizado neste circuito. Para o carregamento, foi adicionado um LED na entrada, que avisa quando o carregamento está ativo. O circuito proposto segue conforme figura 24.

Figura 24 – Circuito eletrônico de carga e descarga proposto



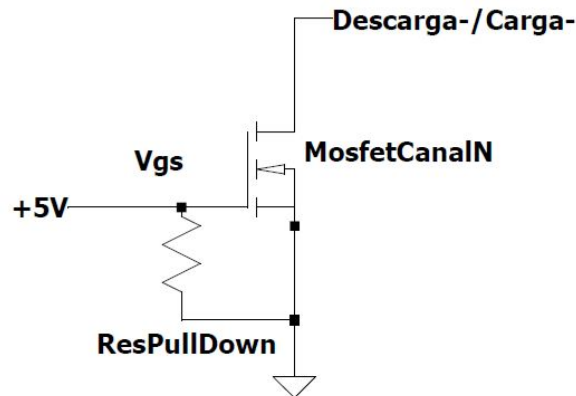
Fonte: do autor (2020)

3.4.2.1 Dimensionamento dos MOSFETS

Ambos os MOSFETs utilizados controlam o sentido negativo da corrente. Ou seja, funcionam na região de triodo ou chave com o negativo do carregador para o MOSFET de carregamento e com o negativo da carga para MOSFET de descarregamento. Para funcionar como chave, é necessário utilizar um resistor de *pull-down* entre o *gate* e o *source*, assim, garantindo zero volts no gate quando não circular corrente. O resistor que será utilizado é o de $10k\Omega \pm 5\%$ que dissipa potências de até 500mW. O MOSFET que acionará a carga vai ter o mesmo dimensionamento do MOSFET que acionará a descarga.

Um dos primeiros requisitos do MOSFET é que ele opere como chave e seja Canal-N, pois, como já foi abordado, o controle será via corrente no sentido negativo e será aplicada uma tensão positiva no seu *gate*, oriunda do pacote de baterias. Para operar como chave, o MOSFET deverá ter a tensão $V_{gs} > V_t$, onde V_{gs} é a tensão aplicada entre o pino do *gate* e do *source*, oriunda de duas séries, e V_t um parâmetro do *datasheet*. Considerando o pior caso de tensão de V_{gs} , tem-se 5V; esse valor é o mínimo ou pior caso de tensão que duas células podem fornecer. A figura 25 apresenta uma visão mais detalhada da aplicação do MOSFET.

Figura 25 – Circuito com MOSFET



Fonte: do autor (2020)

Outro requisito que deve ser analisado é a corrente máxima que o MOSFET deve ter. Vale ressaltar que para esse projeto, será apenas validado descarga e carga com correntes próximas a 2 amperes, considerando que a equipe Babitonga ainda não possui requisitos de corrente máxima, recomenda-se que sejam adicionados MOSFETs dos devidos limites quando esses requisitos estiverem consolidados.

3.4.2.2 IRF320

Conforme análise de requisitos apresentada na seção anterior, o MOSFET IRF320 canal N consegue suprir os requisitos de desempenho. Os principais dados desse transistor foram extraídos do seu *datasheet* e estão apresentados na tabela 5.

Tabela 5 – Características IRF320

Vt	2V - 4V
Vgs	20V
Id	3,30A
rds(on)	1,80Ω
Pd	50W

Fonte: Harris (1998)

Por fim é necessário calcular a potência que vai ser dissipada no IRF320. Essa potência é calculada conforme a equação abaixo.

$$Pd = rds(on) \cdot Id^2 \quad (22)$$

Onde $r_{ds(on)}$ é a resistência de condução fornecida no *datasheet* e I_d é a corrente que está sendo aplicada no *drain* do MOSFET para operar como chave, para isso vai ser considerado 2,20A, logo:

$$P_d = 8,72W \quad (23)$$

Considerando os cálculos efetuados nas equações acima e comparando com a potência fornecida no *datasheet*, constata-se que não será necessário dimensionar um dissipador de potência para essa aplicação.

3.4.3 Dimensionamento do microcontrolador

Para efetuar toda a lógica de carregamento e descarregamento, um microcontrolador será utilizado. O microcontrolador em questão deverá suprir necessidades com relação a seis entradas analógicas disponíveis para efetuar a leitura de tensão. Também deverá possuir um total de 8 saídas digitais para acionamento das seis séries e dos dois MOSFETs de carga e descarga.

3.4.3.1 ESP32

O microcontrolador utilizado vai ser o ESP32. Esse microcontrolador tem capacidade suficiente para atender os requisitos de entrada e saída do pacote total de baterias. Ou seja, para a validação desse projeto, o microcontrolador em questão foi sobredimensionado. Os dados técnicos do ESP32 podem ser observados na tabela 6.

Tabela 6 – Características ESP32

Leitura AD	0 até 4095
Tensão de Operação	3,30 VDC
GPIO	36
ADC	18
DAC	2

Fonte: Espressif (2020)

O ESP32 possibilita utilizar a IDE do arduino para programar e consequentemente permite o uso de suas bibliotecas. É possível aumentar o número de portas ADC (conversor analógico-digital), caso as 18 disponíveis não sejam suficientes. As 18 ADCs suportam medições de até 12 bits.

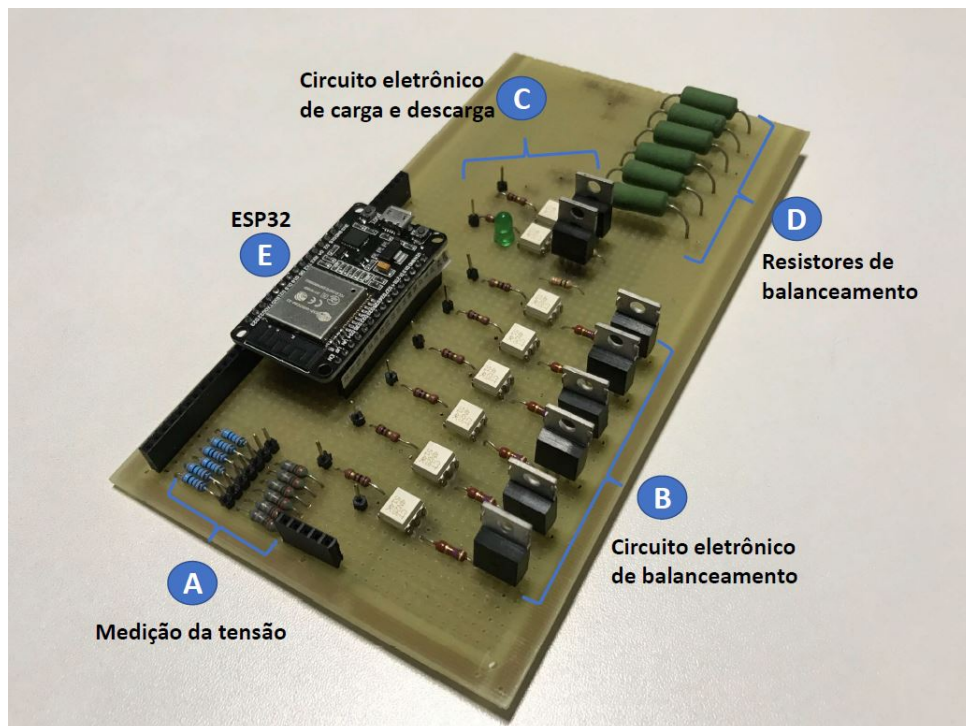
4 IMPLEMENTAÇÃO

Esse capítulo apresenta os tópicos a serem considerados para a implementação do hardware e do algoritmo que será desenvolvido no ESP32. O algoritmo pode ser encontrado no Apêndice B - Algoritmo Implementado no ESP32.

4.1 PROTÓTIPO CONSTRUÍDO

Com o objetivo de possibilitar o teste das funções desenvolvidas para o sistema, foi construído um protótipo do BMS projetado. O protótipo foi montado em uma placa de prototipagem rápida, utilizando os componentes especificados nos capítulos anteriores e, eventualmente, um componente ou outro a mais para facilitar os testes. Por conta desse tipo de construção, se faz necessário ter alguns *jumpers* por baixo da placa. A Figura 26 apresenta o protótipo do BMS.

Figura 26 – Protótipo do BMS projetado



Fonte: do autor (2020)

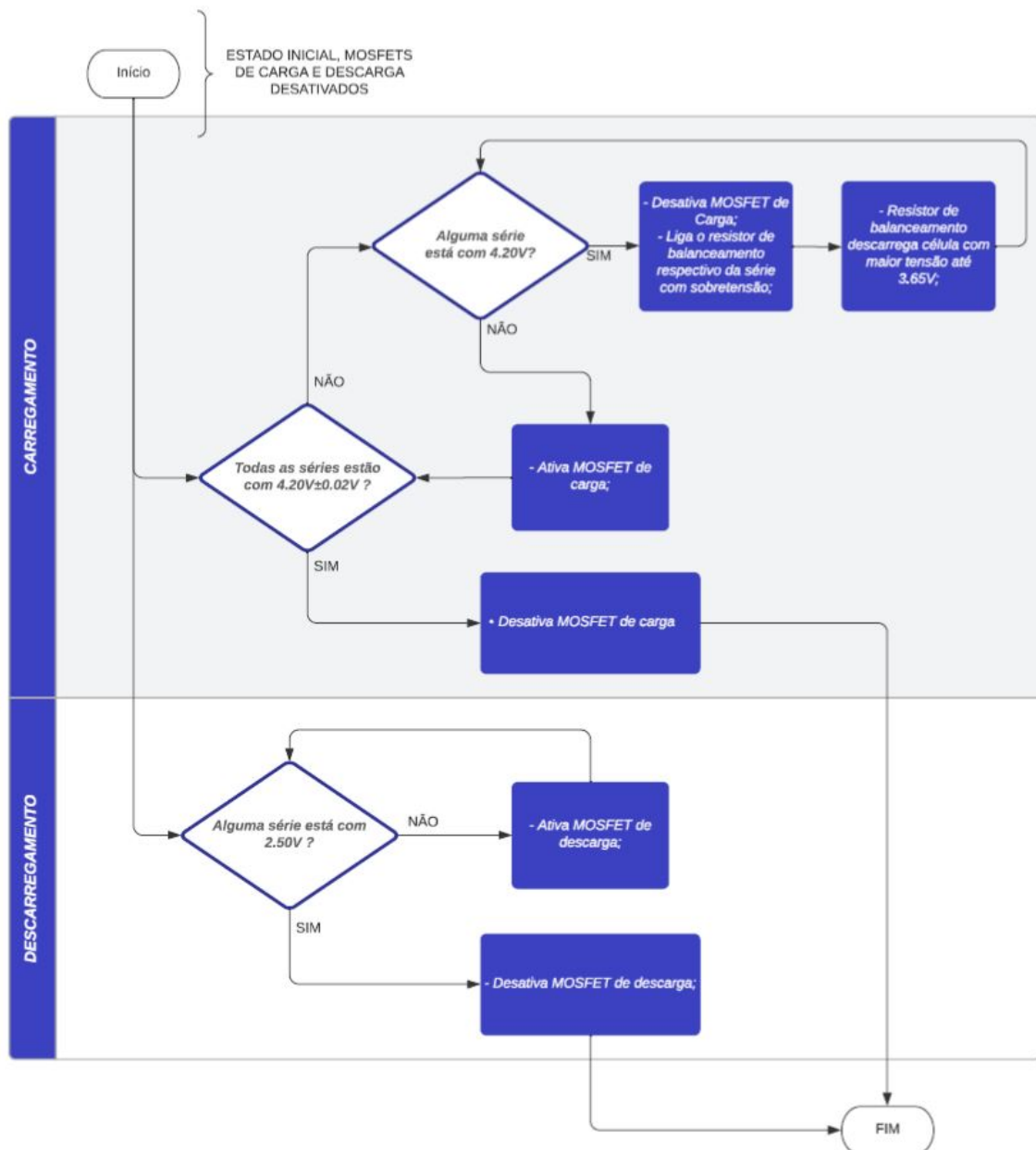
4.2 ALGORITMOS DE CONTROLE

O algoritmo aplicado ao ESP32 será desenvolvido visando os limites das células já apresentados. Seis portas analógicas do microcontrolador farão a leitura de

tensão conforme o divisor resistivo anteriormente apresentado. Outras 8 portas digitais farão o acionamento dos MOSFETs da carga ou descarga e também do circuito de balanceamento, ambos acionados por optoacopladores. Portanto, a partir da lógica de programação implementada, serão aplicados os limites para que as células se comportem de maneira segura dentro de sua AOS.

Para implementar os algoritmos de carga e descarga, foi desenvolvido um fluxograma, que auxilia na visualização das limitações de cada sistema. O fluxograma é representado na figura 27.

Figura 27 – Fluxograma do algoritmo de carga e descarga



Fonte: do autor (2020)

4.2.1 Algoritmos de carga

Na carga, o BMS deverá respeitar o limite máximo de 4,20V. Ou seja, no instante que o MOSFET de carga estiver no modo ativo, nenhuma das séries deve ter a tensão igual ou superior a 4,20V. A partir do instante que alguma série chegar em 4,20V, o BMS deverá interromper o carregamento através da desativação do MOSFET de carga. No instante em que o carregamento for interrompido, a série que chegou em 4,20V deverá ser imediatamente descarregada até a tensão de 3,65V. Isso será feito pelo acionamento do resistor de balanceamento da respectiva série. No instante em que a série chegar em 3,65V, o MOSFET de carga deverá ativar novamente e, com isso, o carregamento reestabelecido. Esse ciclo repetirá até que todas as células cheguem em tensão de $4,20V \pm 0,02V$. Assim, o carregamento estará completo e o MOSFET de carga será desativado.

Para que no estado final do carregamento, o BMS não fique chaveando entre 4,20V, será aplicada uma tolerância de 0,02V entre a célula com maior tensão e a célula com menor tensão, fazendo com que as células convirjam. É importante entender que *datasheets* de BMSs que possuem balanceamento, informam sempre um tolerância entre o valor final do carregamento. Caso contrário, é improvável que todas as células de um pacote de baterias, consigam convergir para a mesma tensão no final do carregamento.

4.2.2 Algoritmos de descarga

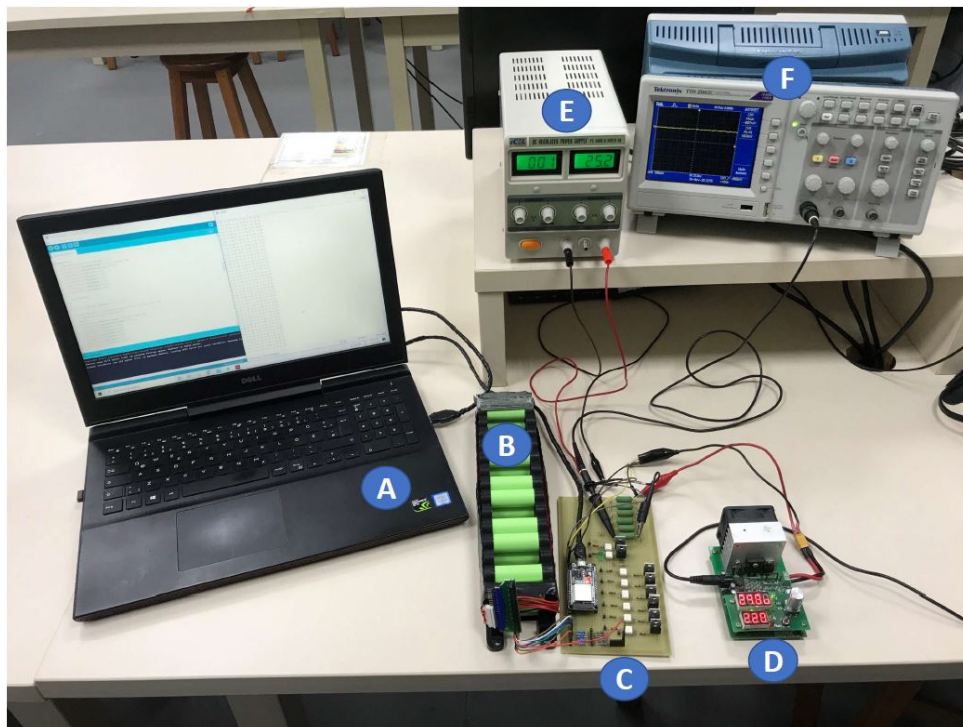
Em um pacote de baterias ideal com 6 séries é esperado que a tensão mínima de descarga seja de 15V, o que é um múltiplo de 2,50V pelas seis séries. Porém, nem toda bateria é ideal e, sendo assim, algumas das séries irão descarregar mais rapidamente que outras. Portanto, o BMS deve monitorar cada uma das séries individualmente e desligar a descarga assim que a primeira série atingir o valor mínimo de 2,50V. A tensão que sobra nas demais séries pode ser considerada como uma capacidade perdida já que o final da descarga de uma bateria de lítio é determinada pela série de menor capacidade ou série que não foi carregada completamente e acaba atingindo seu valor mínimo de tensão antes das demais.

Portanto, o BMS deverá respeitar o limite mínimo de 2,50V das células na descarga. Nesse cenário, todas as células do pacote estarão descarregando. O corte da descarga será feito quando o microcontrolador detectar a primeira série que chegar em 2,50V, momento em que desativará o MOSFET de descarga

5 RESULTADOS

Nesse capítulo são avaliados os resultados obtidos por meio do protótipo construído e dos algoritmos implementados, seguindo as especificações e componentes escolhidos nos capítulos 3 e 4. Os equipamentos utilizados para os testes, descritos na sequência, são apresentados na figura 28.

Figura 28 – Ambiente de testes do BMS



Fonte: do autor (2020)

Para plotar os gráficos de carga e descarga, utilizou-se os dados mensurados através do divisor resistivo. Esses dados eram enviados através do microcontrolador, pela porta de comunicação, assim interpretados através do algoritmo no notebook apresentado na figura 28A.

É importante observar que é possível fazer testes de séries em qualquer combinação. Ou seja, pode-se com muita facilidade carregar e descarregar células em separado, o pacote de baterias (Fig. 28B) e o protótipo (Fig. 28C) fornecem essa flexibilidade.

Para conduzir a descarga das células, foi utilizada a carga eletrônica apresentada na figura 28D. A carga eletrônica pode fornecer uma corrente de descarga até 10A, e uma tensão de descarga até 30V.

A fonte utilizada para efetuar a carga das células é apresentada na figura 28E, ela tem um limite de 30V e 3A, onde é possível extrair uma potência máxima de 90W.

Por fim, utilizou-se o osciloscópio para efetuar a medição de tensão quando o balanceamento era acionado (Fig. 28F). Porém, dele só era possível concluir esse fato, não sendo extraído outro tipo de dado.

5.1 TESTE DE CARGA

Nessa seção são apresentados os testes de carga realizados no protótipo considerando duas e seis séries, com um total de dois paralelos para cada série.

5.1.1 Teste de carga com duas séries

Nesse primeiro teste, o objetivo foi verificar se as células obedeciam o comportamento de carga esperado e se era necessário fazer algum tipo de ajuste no algoritmo, para posteriormente aplicá-lo ao pacote com seis séries. Portanto, para observar a carga de forma lenta, foi aplicado uma corrente de carga considerada baixa, com a intenção de observar partes específicas do carregamento.

Os dados iniciais de tensão nas séries um e dois, juntamente com a corrente de carga, são apresentados na tabela 7.

Tabela 7 – Estado inicial de carga para duas séries

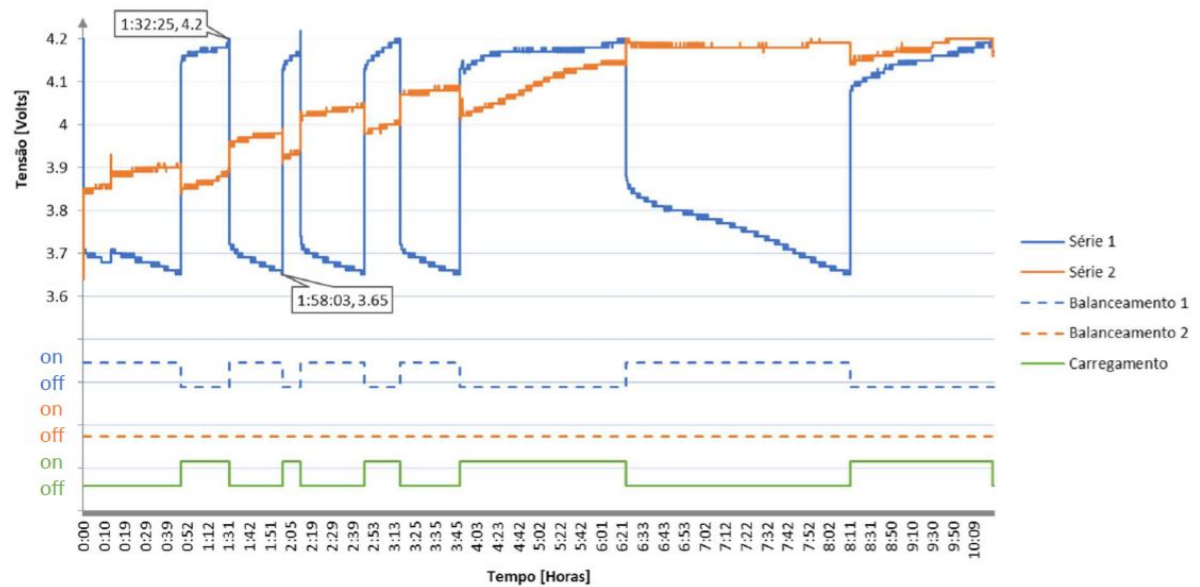
Tensão inicial série 1	4,20V
Tensão inicial série 2	3,78V
Corrente de carga	300mA

Fonte: do autor (2020)

Como o estado inicial da série um é de 4,20V, espera-se que a carga seja interrompida imediatamente quando o ciclo de carga iniciar. Quando a carga for interrompida, será necessário que o microcontrolador ative o resistor de balanceamento da série que possui a tensão de 4,20V e, com isso, comece a descarregar ela até a tensão de 3,65V. Posteriormente a alguns ciclos como esse, espera-se que as células converjam para o intervalo de tensão entre 4,18V e 4,20V.

Na figura 29 é possível observar como a carga foi conduzida em um período total de aproximadamente 10h10min após o início do ciclo. Abaixo da curva de carga, foram adicionados pequenos gráficos interativos, facilitando a interpretação da curva. Nos gráficos, observa-se com maior facilidade os intervalos onde a carga esteve ativa, juntamente com balanceamento 1, referente à série 1, e o balanceamento 2, referente à série 2.

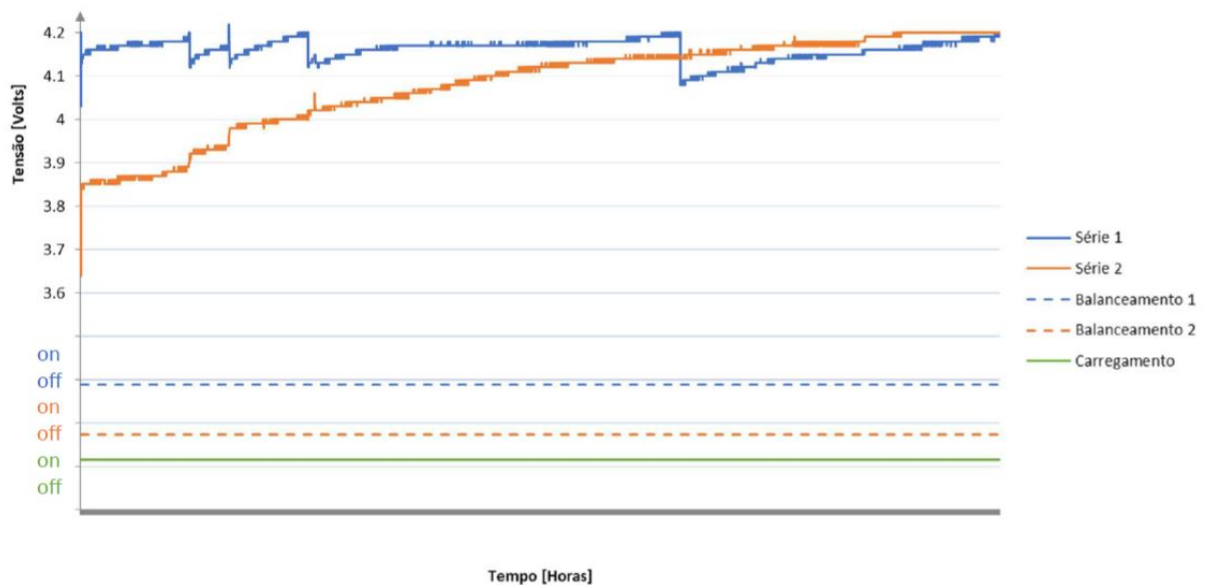
Figura 29 – Curvas de carga para duas séries



Fonte: do autor (2020)

O estudo foi aprofundado fazendo-se um filtro no estado em que o carregamento esteve ativo. Esse filtro facilitou observar como foi o comportamento das duas séries apenas no carregamento, desconsiderando o balanceamento e por conta disso o eixo de tempo não apresenta valores. A curva com relação ao filtro mencionado segue conforme figura 30.

Figura 30 – Filtro com curvas de carga para duas séries



Fonte: do autor (2020)

Por fim, o estado final das células segue conforme tabela 8. É possível observar que a medição da tensão nas séries após a carga ter sido interrompida, é inferior a 4,20V. Isso acontece devido à própria corrente de carregamento, que acaba por interferir na medição da tensão das séries.

Tabela 8 – Estado final de carga para duas séries

Tensão final série 1	4,17V
Tensão final série 2	4,16V

Fonte: do autor (2020)

5.1.2 Teste de carga com seis séries

Para efetuar a carga nas seis séries, foram considerados alguns fatos observados na carga de duas séries. Nas duas séries, o algoritmo para finalização da carga considerava uma tolerância de 0,02V para convergir e isso se mostrou eficaz nas duas séries. Porém, para seis séries é necessário que essa tolerância receba algum acréscimo, uma vez que com um maior número de séries é bem possível que ao final da carga o chaveamento entre a carga e o balanceamento seja um problema. Assim, foi considerada uma tolerância de 0,08V no algoritmo.

Para o teste de carga de seis séries foi aplicada uma corrente maior do que no de duas séries. Os dados iniciais de tensão nas seis séries, juntamente com a corrente de carga, são apresentados na tabela 9.

Tabela 9 – Estado inicial de carga para seis séries

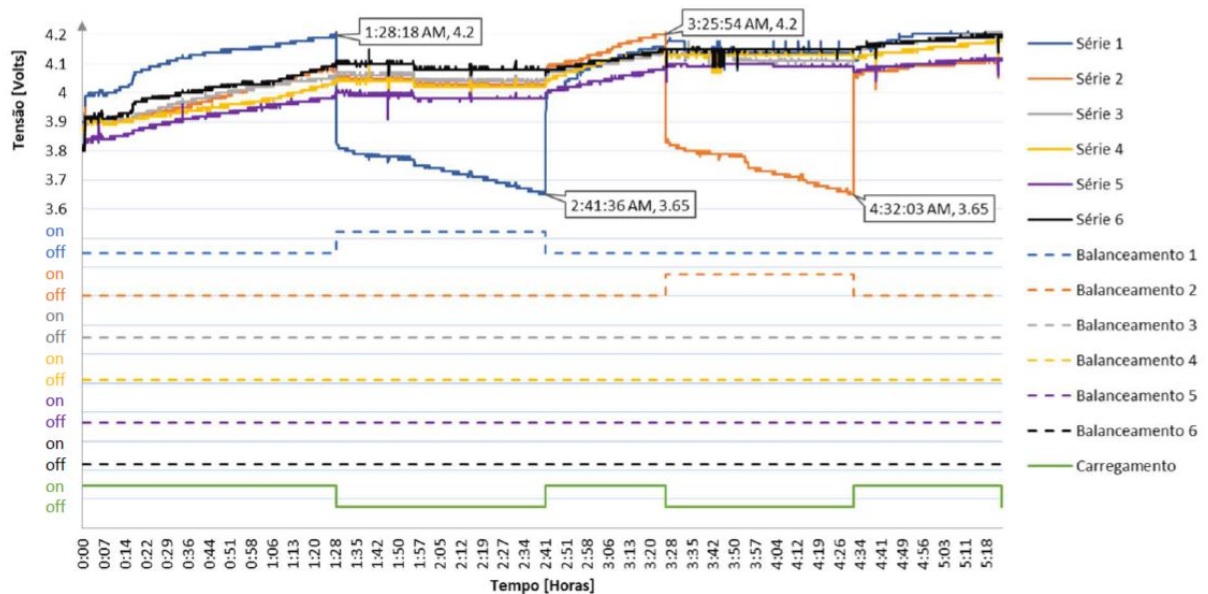
Tensão inicial série 1	3,90V
Tensão inicial série 2	3,85V
Tensão inicial série 3	3,88V
Tensão inicial série 4	3,86V
Tensão inicial série 5	3,82V
Tensão inicial série 6	3,81V
Corrente de carga	1A

Fonte: do autor (2020)

No estado inicial de carga, todas as seis séries estão com uma tensão bem próxima uma da outra. Espera-se então que a carga seja ativada no início e faça o ciclo com o balanceamento até a conversão para a tensão de $4,20V \pm 0,08V$.

A figura 31 traz a curva do comportamento da tensão nas seis séries após um período de aproximadamente 5h20min de carga. Essas curvas comprovam a eficácia do método de balanceamento implementado, mantendo as células balanceadas ao final do carregamento, sem ultrapassar os limites de operação das células de lítio. Vale ressaltar que nos instantes onde o balanceamento é ativado, observa-se um decréscimo de tensão, isso ocorre devido a corrente de balanceamento. Ou seja, se for preferível atenuar esse decréscimo, deve ser adicionado um resistor de balanceamento maior, baixando a corrente de balanceamento, porém, isso pode aumentar o tempo de carregamento final.

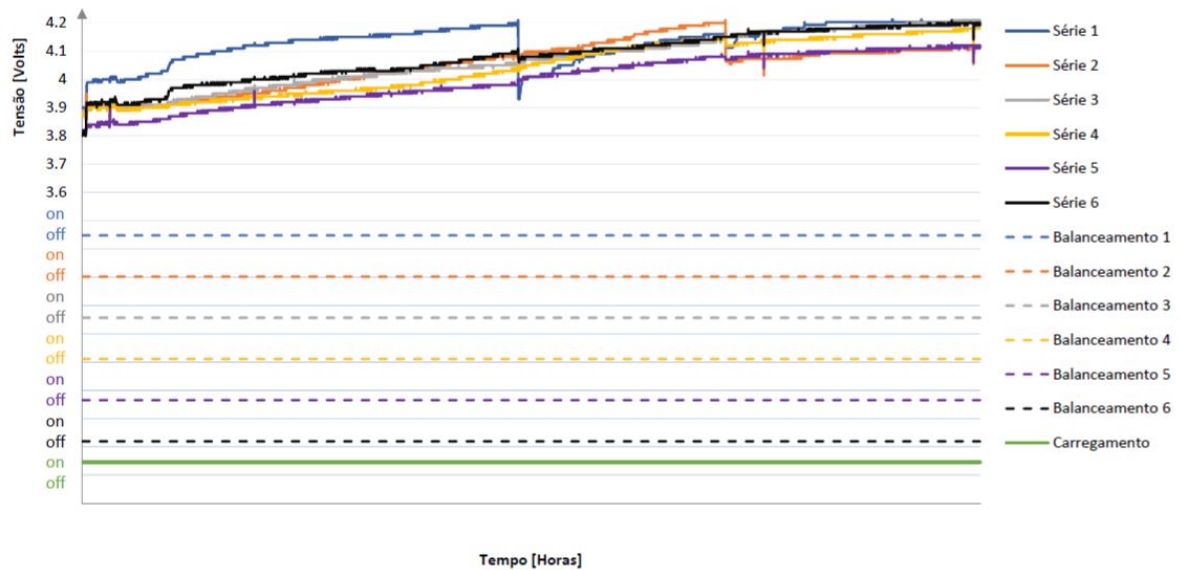
Figura 31 – Curvas de carga para seis séries



Fonte: do autor (2020)

Do mesmo modo que foi apresentado para duas séries, aqui também é possível analisar o comportamento da tensão das células apenas quando a carga esteve ativa. O comportamento é apresentado na figura 32, observa-se que a carga das células tem um comportamento bastante similar às curvas de carga de células individuais apresentadas na fundamentação teórica.

Figura 32 – Filtro com curvas de carga para seis séries



Fonte: do autor (2020)

Na tabela 10 é possível observar a tensão final após a carga ter sido interrompida.

Tabela 10 – Estado final de carga para seis séries

Tensão final série 1	4,20V
Tensão final série 2	4,12V
Tensão final série 3	4,20V
Tensão final série 4	4,18V
Tensão final série 5	4,13V
Tensão final série 6	4,19V

Fonte: do autor (2020)

5.2 TESTE DE DESCARGA

Nessa seção são apresentados os testes de descarga realizados no protótipo considerando duas, seis e quatro séries, com um total de dois paralelos para cada série. Como já foi mencionado, será utilizada uma carga eletrônica para impor corrente de descarga no pacote de baterias.

5.2.1 Teste de descarga com duas séries

Nesse primeiro teste, o objetivo foi verificar se as células obedeciam o comportamento de descarga esperado. O teste é de simples complexidade, tendo em

vista que é apenas necessário observar o corte da descarga quando a primeira série chegar em 2,50V. Os dados iniciais de tensão nas séries um e dois, juntamente com a corrente de descarga, são apresentados na tabela 11.

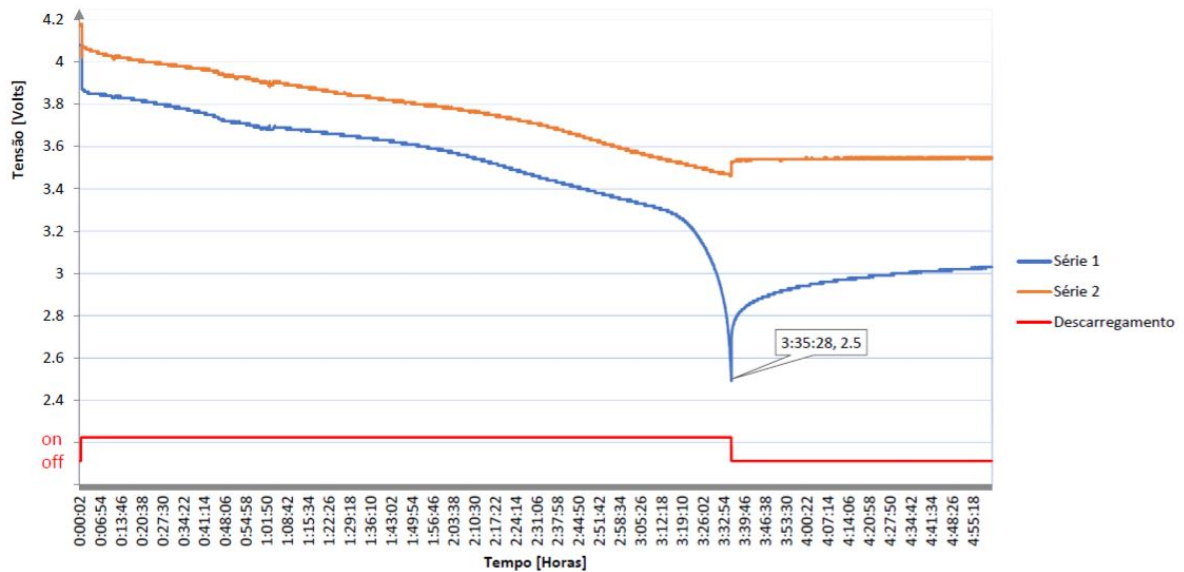
Tabela 11 – Estado inicial de descarga para duas séries

Tensão inicial série 1	4,08V
Tensão inicial série 2	4,18V
Corrente de descarregamento	800mA

Fonte: do autor (2020)

Após um período de aproximadamente 3h35min o BMS cortou a descarga nas duas séries por subtensão, ou seja, quando a primeira série chegou em 2,50V, nesse caso a série um. A figura 33 traz o comportamento descrito acima.

Figura 33 – Curvas de descarga para duas séries



Fonte: do autor (2020)

Por fim, o estado final das células, após ter sido interrompida a descarga, segue conforme tabela 12. Observa-se que após um período de relaxamento das células a tensão aumenta, como já abordado em capítulos anteriores.

Tabela 12 – Estado final de descarga para duas séries

Tensão final série 1	3.03V
Tensão final série 2	3.55V

Fonte: do autor (2020)

5.2.2 Teste de descarga com quatro séries

Para efetuar o teste com quatro séries foi aplicada uma corrente de descarga maior, quando comparada à descarga de duas séries. Os dados de tensão inicial de cada série, juntamente com a corrente de descarga aplicada, são apresentados na tabela 13.

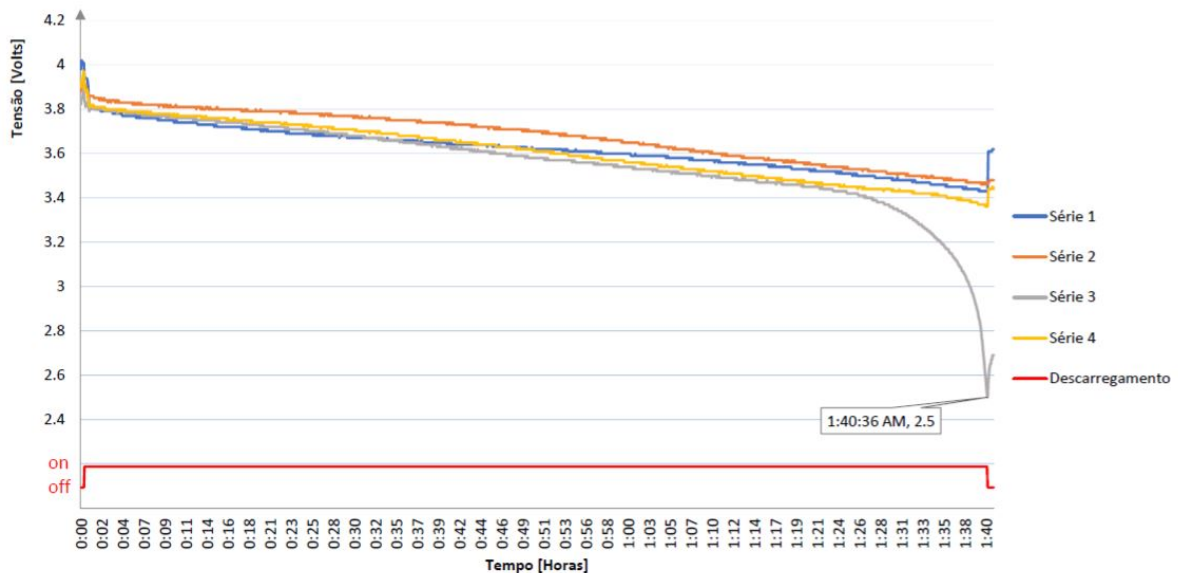
Tabela 13 – Estado inicial de descarga para quatro séries

Tensão inicial série 1	3,98V
Tensão inicial série 2	3,88V
Tensão inicial série 3	3,82V
Tensão inicial série 4	3,90V
Corrente de descarga	1A

Fonte: do autor (2020)

Após as séries terem sido submetidas à descarga apresentada, no período de aproximadamente 1h40min a série três chegou à tensão de corte inferior e a descarga foi interrompida. A curva de descarga é apresentada na figura 34.

Figura 34 – Curvas de descarga para quatro séries



Fonte: do autor (2020)

Por fim, o estado final das células, após ter sido interrompida a descarga, segue conforme tabela 14.

Tabela 14 – Estado final de descarga para quatro séries

Tensão final série 1	3,62V
Tensão final série 2	3,48V
Tensão final série 3	2,69V
Tensão final série 4	3,44V

Fonte: do autor (2020)

5.2.3 Teste de descarga com seis séries

Seguindo a mesma ideia apresentada nas seções anteriores, também foi aplicada uma corrente de descarga maior no teste de descarga com seis séries. Os dados iniciais, juntamente com a corrente de descarga, são apresentados na tabela 15.

Tabela 15 – Estado inicial de descarga para seis séries

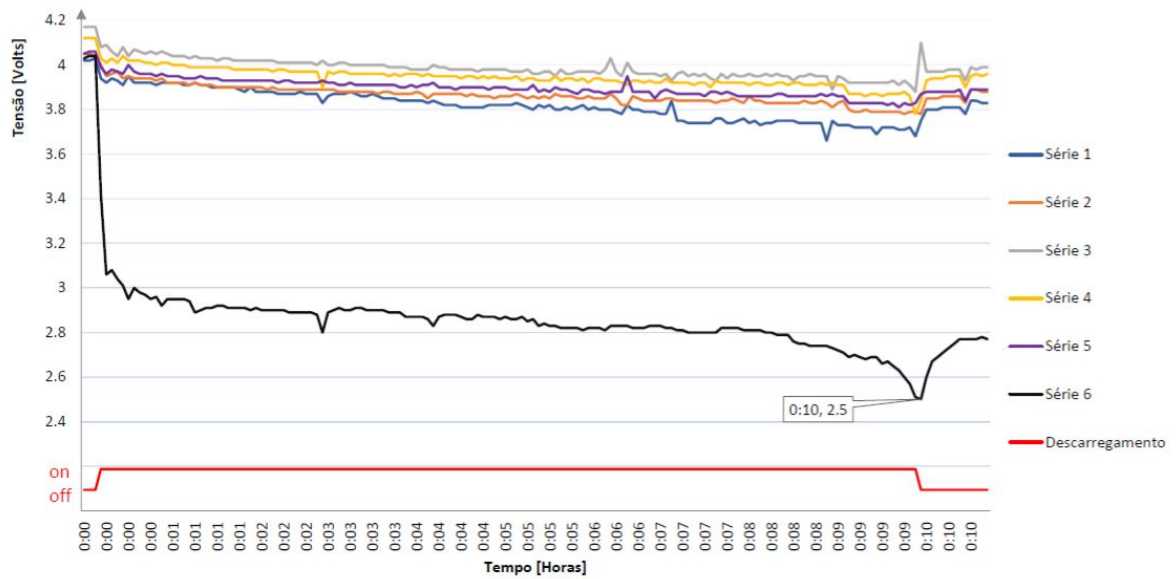
Tensão inicial série 1	4,02V
Tensão inicial série 2	4,05V
Tensão inicial série 3	4,17V
Tensão inicial série 4	4,12V
Tensão inicial série 5	4,05V
Tensão inicial série 6	4,03V
Corrente de descarga	2A

Fonte: do autor (2020)

O objetivo com os testes em diferentes combinações de células, foi analisar o comportamento do pacote de baterias em diferentes aplicações de corrente. Na descarga com 6 séries, o período total para descarregar a primeira série até 2,50V, foi de 10min. Assim, é possível observar que a série seis tem uma resistência interna muito maior que as demais séries, ou seja, teve muito mais ciclos de carga e descarga que as demais e por isso tem uma menor capacidade de corrente.

Também é possível concluir que essa série acaba por limitar o tempo de descarga de todo o pacote de baterias, pois, a partir do instante em que ela chega na tensão de corte inferior, nenhuma das outras células podem descarregar, pois o MOSFET de descarga é desativado. A figura 35 apresenta o comportamento da descarga de seis séries.

Figura 35 – Curvas de descarga para seis séries



Fonte: do autor (2020)

O estado final das seis séries após o corte da descarga e um curto período de relaxamento é apresentado na tabela 16.

Tabela 16 – Estado final de descarga para seis séries

Tensão final série 1	3,83V
Tensão final série 2	3,88V
Tensão final série 3	3,99V
Tensão final série 4	3,96V
Tensão final série 5	3,89V
Tensão final série 6	2,77V

Fonte: do autor (2020)

6 CONCLUSÕES

O presente trabalho oferece um guia para integração de diferentes elementos distintos da engenharia em um único sistema. O desenvolvimento do protótipo de BMS com balanceamento passivo aplicado em um pacote de baterias de lítio passa por desafios que vão desde a escolha das células individuais, até a implementação do algoritmo de controle de carga e descarga, e os requisitos e restrições encontrados no desenvolvimento e implementação desse sistema foram explorados ao longo desse texto.

Mesmo de forma limitada, os testes efetuados utilizando o protótipo construído, demonstraram características importantes para a aplicação, como o desempenho do balanceamento passivo e o uso de um microcontrolador dedicado. Como se trata de uma aplicação onde a carga e a descarga são imprescindíveis para validação, o tempo acaba sendo uma variável que tem bastante influência, pois, como observado, é necessário esperar sempre até o final de uma carga ou descarga.

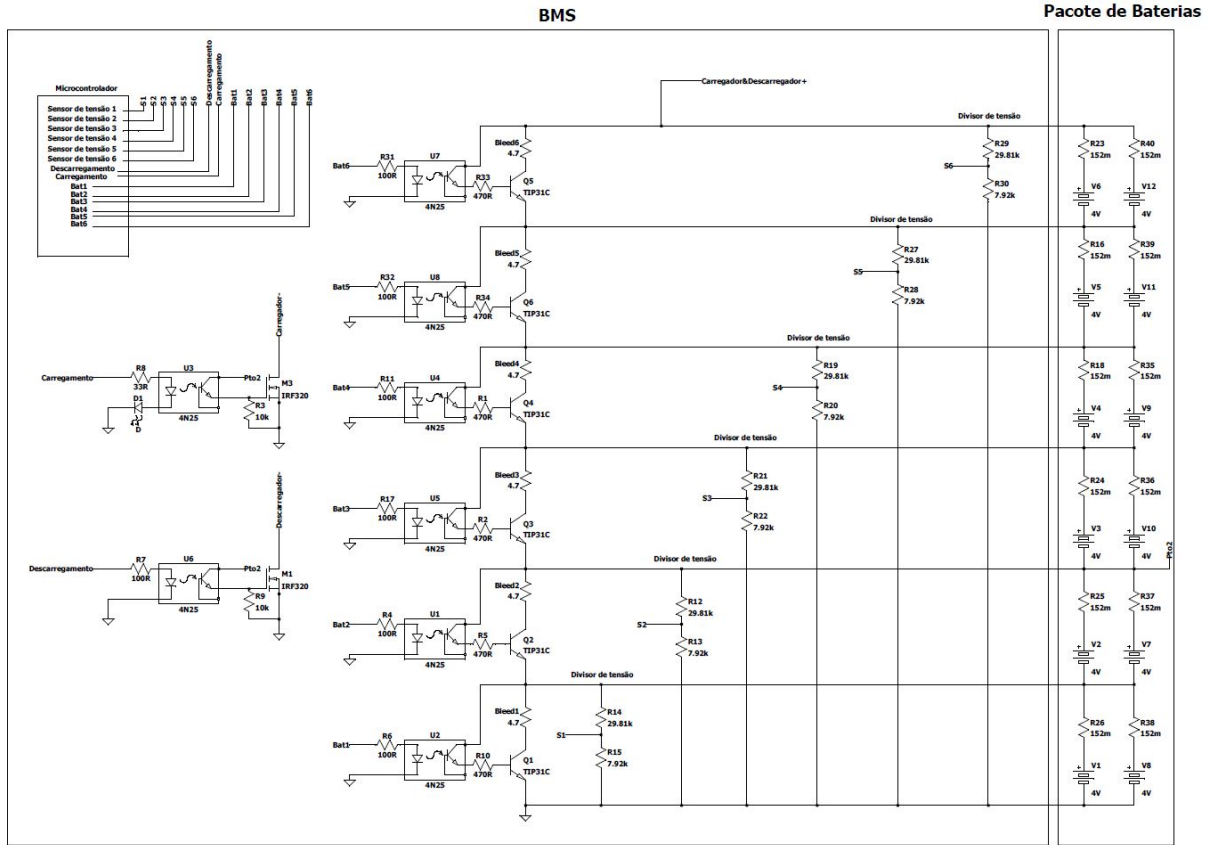
Ainda que o amplo escopo do projeto tenha dificultado a realização de testes finais mais conclusivos, é possível dizer que o projeto do sistema, construção dos protótipos e os testes realizados demonstram a possibilidade de construção de sistemas simples e acessíveis para o mais variado tipo de aplicações baseadas em sistemas pacote de baterias de lítio com necessidade de balanceamento passivo, como é o caso do Barco Solar Babitonga.

Para que futuras pesquisas aprofundem o conhecimento acerca da criação de um BMS aplicado a pacotes de baterias de lítio, recomenda-se o estudo de metodologias específicas para o balanceamento passivo e ativo. O aprofundamento de técnicas para isolamento de circuito, assim como simulações do pacote de baterias em que se queira aplicar o BMS, para posteriormente utilizar sensores de temperatura e consolidar a AOS. Por fim, validar este projeto para o número de células que a equipe necessita. Estes são eixos de pesquisa que podem contribuir para uma compreensão mais completa da aplicação e da função do sistema como um todo.

REFERÊNCIAS

- ALEXANDER, C. K.; SADIKU, M. N. O. **Fundamentos de circuitos elétricos**. 5. ed. Porto Alegre: AMGC, 2013.
- ANDREA, D. **Battery management system for large lithium-ion battery packs**. Boston: Artech House, 2010.
- BABITONGA. **Barco Solar**. 2020. Disponível em: <<https://babitonga.webnode.com/projetos-eletricos/>>. Acesso em: 16 nov. 2020.
- BOYLESTAD, R. L.; NASHELSKY, L. **Dispositivos eletrônicos e teoria de circuitos**. 11. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2013.
- ELETRODC. **Battery pack**. 2020. Disponível em: <<https://www.eletrcdc.com.br/index.php>>. Acesso em: 16 nov. 2020.
- ESPRESSIF. **ESP32 series**. 2020. Disponível em: <https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf>. Acesso em: 16 nov. 2020.
- HAN, J.; CHARPENTIER, J.-F.; TANG, T. An energy management system of a fuel cell/battery hybrid boat. **Energies**, v. 7, n. 5, p. 2799–2820, 2014.
- HARRIS. **IRF320, IRF 321, IRF 322, IRF 323**. 1998. Disponível em: <<https://datasheetspdf.com/pdf-file/831246/Harris/IRF320/1>>. Acesso em: 16 nov. 2020.
- MARCELINO, R. P. M. **Controlo de armazenamento de energia em barramento CC**. Monografia (Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores) — Universidade do Porto, Porto, 2013.
- ON. **Complementary silicon plastic power transistors**. 2008. Disponível em: <<https://datasheet.octopart.com/TIP31-ON-Semiconductor-datasheet-644152.pdf>>. Acesso em: 16 nov. 2020.
- PLETT, G. L. **Battery management systems: equivalent-circuit methods**. [S.l.]: Artech House, 2015. v. 2.
- POP, V. et al. **Battery management systems accurate atate-of-charge indication for battery-powered applications**. 9. ed. Eindhoven: Springer, 2008.
- ROSOLEM, M. F. et al. Desenvolvimento de bateria de lítio-íon nacional para sistemas fotovoltaicos. in: Congresso brasileiro de energia solar, 7., 2018, gramado. **Anais eletrônicos [...]**, Gramado: ABENS, 2018. Disponível em: <<<https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/295>>>. Acesso em: 16 nov. 2020.
- VISHAY. **Optocoupler, phototransistor output, with base connection**. 2019. Disponível em: <<https://www.vishay.com/docs/83725/4n25.pdf>>. Acesso em: 16 nov. 2020.
- WEICKER, P. **A systems approach to lithium-ion battery management**. Boston: Artech House, 2014.

APÊNDICE A - PROJETO COMPLETO COM 6 SÉRIES E 2 PARALELOS



Fonte: do autor (2020)

APÊNDICE B - ALGORITMO IMPLEMENTADO NO ESP32

```
1 float sensor1; // tensão da bat1
2 float sensor2;
3 float sensor3;
4 float sensor4;
5 float sensor5;
6 float sensor6;
7
8 float ct=4.76388889;
9 float aRef=3.3;
10
11 float aux1;
12 float aux2;
13 float aux3;
14 float aux4;
15 float aux5;
16 float aux6;
17
18 float relacaoA0=4.78;
19 float relacaoA1=4.74;
20 float relacaoA2=4.73;
21 float relacaoA3=4.73;
22 float relacaoA4=4.74;
23 float relacaoA5=4.83;
24
25 int tjb1 = 14;
26 int tjb2 = 13;
27 int tjb3 = 12;
28 int tjb4 = 11;
29 int tjb5 = 10;
30 int tjb6 = 9;
31
32 int mosfetCarga = 8;
33 int mosfetDescarga = 7;
34
35 int flag=0;
```

```

36
37 #define AMOSTRAS 100
38
39 void setup() { //Define as variáveis de saída
40     pinMode(tbjbat1,OUTPUT);
41     pinMode(tbjbat2,OUTPUT);
42     pinMode(tbjbat3,OUTPUT);
43     pinMode(tbjbat4,OUTPUT);
44     pinMode(tbjbat5,OUTPUT);
45     pinMode(tbjbat6,OUTPUT);
46     pinMode(mosfetCarga,OUTPUT);
47     pinMode(mosfetDescarga,OUTPUT);
48     Serial.begin(9600);           // setup serial
49 }
50
51 float lePorta(uint8_t portaAnalogica) { //Média de 100 amostras
52     float total=0;
53     for (int i=0; i<AMOSTRAS; i++) {
54         total += 1.0 * analogRead(portaAnalogica);
55         delay(5);
56     }
57     return total / (float)AMOSTRAS;
58 }
59
60 void loop() {
61     sensor1 = ((lePorta(1) * aRef) / 1023.0);
62     sensor2 = ((lePorta(2) * aRef) / 1023.0);
63     sensor3 = ((lePorta(3) * aRef) / 1023.0);
64     sensor4 = ((lePorta(4) * aRef) / 1023.0);
65     sensor5 = ((lePorta(5) * aRef) / 1023.0);
66     sensor6 = ((lePorta(6) * aRef) / 1023.0);
67
68     float val1 = (sensor1*relacaoA0);
69     float val2 = ((sensor2*relacaoA1)- val1) ;
70     aux2 = (sensor2*relacaoA1);
71     float val3 = ((sensor3*relacaoA2)- aux2) ;
72     aux3 = (sensor3*relacaoA2);
73     float val4 = ((sensor4*relacaoA3)- aux3) ;
74     aux4 = (sensor4*relacaoA3);

```



```

75  float val5 = ((sensor5*relacaoA4)- aux4) ;
76  aux5 = (sensor5*relacaoA4);
77  float val6 = ((sensor6*relacaoA5)- aux5) ;
78
79  //////////// ESTADO INICIAL, CARGA E DESCARGA ATIVAS ////////////
80
81
82  if(flag==0){
83      //Condição CARREGANDO ou DESCARREGANDO
84      digitalWrite(mosfetCarga,HIGH); // HIGH LOW
85      digitalWrite(mosfetDescarga,HIGH);
86      digitalWrite(tbjbat1,LOW);
87      digitalWrite(tbjbat2,LOW);
88      digitalWrite(tbjbat3,LOW);
89      digitalWrite(tbjbat4,LOW);
90      digitalWrite(tbjbat5,LOW);
91      digitalWrite(tbjbat6,LOW);
92
93      delay(1000);
94  }
95
96  //////////// TBJ DA SÉRIE 1 ////////////
97
98  if(val1>=4.20){
99      flag=1;
100     digitalWrite(mosfetCarga,LOW); // HIGH LOW
101     digitalWrite(mosfetDescarga,HIGH);
102     digitalWrite(tbjbat2,LOW);
103     digitalWrite(tbjbat3,LOW);
104     digitalWrite(tbjbat4,LOW);
105     digitalWrite(tbjbat5,LOW);
106     digitalWrite(tbjbat6,LOW);
107     digitalWrite(tbjbat1,HIGH);
108     delay(1000);
109 }
110
111 if(flag==1 && val1<=3.65){
112     //Serial.println("Condição 1 desfeita");

```

```
113     flag=0;
114     }
115
116     ////////// TBJ DA SÉRIE 2 //////////
117
118     if(val2>=4.20){
119         flag=2;
120         digitalWrite(mosfetCarga,LOW); // HIGH LOW
121         digitalWrite(mosfetDescarga,HIGH);
122         digitalWrite(tbjbat1,LOW);
123         digitalWrite(tbjbat3,LOW);
124         digitalWrite(tbjbat4,LOW);
125         digitalWrite(tbjbat5,LOW);
126         digitalWrite(tbjbat6,LOW);
127         digitalWrite(tbjbat2,HIGH);
128         delay(1000);
129     }
130
131     if(flag==2 && val2<=3.65){
132         flag=0;
133     }
134
135     ////////// TBJ DA SÉRIE 3 //////////
136
137     if(val3>=4.20){
138         flag=3;
139         digitalWrite(mosfetCarga,LOW); // HIGH LOW
140         digitalWrite(mosfetDescarga,HIGH);
141         digitalWrite(tbjbat1,LOW);
142         digitalWrite(tbjbat2,LOW);
143         digitalWrite(tbjbat4,LOW);
144         digitalWrite(tbjbat5,LOW);
145         digitalWrite(tbjbat6,LOW);
146         digitalWrite(tbjbat3,HIGH);
147         delay(1000);
148     }
149
150     if(flag==3 && val3<=3.65){
```

```
151 //Serial.println("Condição 2 desfeita");
152 flag=0;
153 }
154
155 //////////////// TBJ DA SÉRIE 4 ////////////////
156
157 if(val4>=4.20){
158     flag=4;
159     digitalWrite(mosfetCarga,LOW);// HIGH LOW
160     digitalWrite(mosfetDescarga,HIGH);
161     digitalWrite(tbjbat1,LOW);
162     digitalWrite(tbjbat2,LOW);
163     digitalWrite(tbjbat3,LOW);
164     digitalWrite(tbjbat5,LOW);
165     digitalWrite(tbjbat6,LOW);
166     digitalWrite(tbjbat4,HIGH);
167     delay(1000);
168 }
169
170 if(flag==4 && val4<=3.65){
171     //Serial.println("Condição 2 desfeita");
172     flag=0;
173 }
174
175 //////////////// TBJ DA SÉRIE 5 ////////////////
176
177 if(val5>=4.20){
178     flag=5;
179     digitalWrite(mosfetCarga,LOW);// HIGH LOW
180     digitalWrite(mosfetDescarga,HIGH);
181     digitalWrite(tbjbat1,LOW);
182     digitalWrite(tbjbat2,LOW);
183     digitalWrite(tbjbat3,LOW);
184     digitalWrite(tbjbat4,LOW);
185     digitalWrite(tbjbat6,LOW);
186     digitalWrite(tbjbat5,HIGH);
187     delay(1000);
188 }
```

```

189
190  if(flag==5 && val5<=3.65){
191     //Serial.println("Condição 2 desfeita");
192     flag=0;
193  }
194
195  //////////// TBJ DA SÉRIE 5 ////////////
196
197  if(val6>=4.20){
198     flag=6;
199     digitalWrite(mosfetCarga,LOW); // HIGH LOW
200     digitalWrite(mosfetDescarga,HIGH);
201     digitalWrite(tbjbat1,LOW);
202     digitalWrite(tbjbat2,LOW);
203     digitalWrite(tbjbat3,LOW);
204     digitalWrite(tbjbat4,LOW);
205     digitalWrite(tbjbat5,LOW);
206     digitalWrite(tbjbat6,HIGH);
207     delay(1000);
208  }
209
210  if(flag==6 && val6<=3.65){
211     //Serial.println("Condição 2 desfeita");
212     flag=0;
213  }
214
215  //////////// PACOTE DE BATERIAS CARREGADO ////////////
216
217  if(val1>=4.12 && val2>=4.12 && val3>=4.12 &&
218  val4>=4.12 && val5>=4.12 && val6>=4.12){
219     //Serial.println("Condição 3");
220     flag=7;
221     digitalWrite(tbjbat1,LOW);
222     digitalWrite(tbjbat2,LOW);
223     digitalWrite(tbjbat3,LOW);
224     digitalWrite(tbjbat4,LOW);
225     digitalWrite(tbjbat5,LOW);
226     digitalWrite(tbjbat6,LOW);
227     digitalWrite(mosfetCarga,LOW); // HIGH LOW

```

```
228     digitalWrite(mosfetDescarga,HIGH);
229     delay(1000);
230 }
231
232 ////////// CORTE POR SUBTENSÃO //////////
233
234     if(val1<=2.5 || val2<=2.5 || val3<=2.5 ||
235     val4<=2.5 || val5<=2.5 || val6<=2.5){
236         //Serial.println("Condição 3");
237         flag=8;
238         digitalWrite(mosfetDescarga,LOW);
239         digitalWrite(tbjbat1,LOW);
240         digitalWrite(tbjbat2,LOW);
241         digitalWrite(tbjbat3,LOW);
242         digitalWrite(tbjbat4,LOW);
243         digitalWrite(tbjbat5,LOW);
244         digitalWrite(tbjbat6,LOW);
245         digitalWrite(mosfetCarga,HIGH);// HIGH LOW
246         delay(1000);
247     }
248
249     Serial.print(val1);
250     Serial.print(" ");
251     Serial.print(val2);
252     Serial.print(" ");
253     Serial.print(val3);
254     Serial.print(" ");
255     Serial.print(val4);
256     Serial.print(" ");
257     Serial.print(val5);
258     Serial.print(" ");
259     Serial.println(val6);
260
261 }
```