

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA
CATARINA – CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETRÔNICA - DAELN
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELETRÔNICA**

GUIDO LOCKS MOMM

**DESENVOLVIMENTO DE UM BALANCEADOR ATIVO PARA
CÉLULAS DE LÍTIO APLICADO A UM BARCO MOVIDO À ENERGIA
SOLAR**

FLORIANÓPOLIS, 2025.

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA
CATARINA – CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETRÔNICA - DAELN
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELETRÔNICA**

GUIDO LOCKS MOMM

**DESENVOLVIMENTO DE UM BALANCEADOR ATIVO PARA
CÉLULAS DE LÍTIO APLICADO A UM BARCO MOVIDO À ENERGIA
SOLAR**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido
ao Instituto Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia de Santa Catarina como parte
dos requisitos para obtenção do título de
Engenheiro Eletrônico.

Orientador:
Prof. Flávio Alberto Bardemaker Batista, Dr

FLORIANÓPOLIS, 2025.

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor.

Momm, Guido

Desenvolvimento de um Balanceador Ativo para Células de Lítio Aplicado a um Barco Movido à Energia Solar / Guido Momm; orientação de Flávio Alberto Bardemaker Batista.
- Florianópolis, SC, 2025.

93 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) - Instituto Federal de Santa Catarina, Câmpus Florianópolis. Bacharelado em Engenharia Eletrônica. Departamento Acadêmico de Eletrônica.

Inclui Referências.

1. Baterias de Lítio. 2. Balanceadores Ativos. 3. Energia Solar. I. Bardemaker Batista, Flávio Alberto. II. Instituto Federal de Santa Catarina. III. Desenvolvimento de um Balanceador Ativo para Células de Lítio Aplicado a um Barco Movido à Energia Solar.

DESENVOLVIMENTO DE UM BALANCEADOR ATIVO PARA CÉLULAS DE LÍTIO APLICADO A UM BARCO MOVIDO À ENERGIA SOLAR

GUIDO LOCKS MOMM

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do título de Engenheiro em Eletrônica e aprovado na sua forma final pela banca examinadora do Curso Engenharia Eletrônica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.

Florianópolis, 04 de Setembro, 2025.

Banca Examinadora:

Documento assinado digitalmente
 **FLÁBIO ALBERTO BARDEMAKER BATISTA**
Data: 18/09/2025 17:32:16-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Flávio Alberto Bardemaker Batista, Dr

Documento assinado digitalmente
 **JOABEL MOIA**
Data: 19/09/2025 13:51:05-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Joabel Moia, Dr
Instituto Federal de Ciência e Tecnologia de Santa Catarina

Documento assinado digitalmente
 **MAURO TAVARES PERAÇA**
Data: 19/09/2025 11:32:42-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Mauro Tavares Peraça, Dr
Instituto Federal de Ciência e Tecnologia de Santa Catarina

Dedico este trabalho aos meus queridos avós, Guido e Maria de Lourdes, pelo amor incondicional, pelo apoio em cada etapa e por me acolherem com carinho em sua casa durante toda a minha jornada na faculdade.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço aos meus pais, Rafael e Mirela, por sempre terem me dado todo o apoio e conforto que precisava, permitindo que eu sonhasse alto, me proporcionando todas as condições necessárias para me tornar quem sou hoje. Ao meu irmão Tiago, pela presença constante, pelo apoio nos momentos difíceis e por celebrar comigo cada conquista. Aos meus avós, Guido e Maria de Lourdes, pela sabedoria transmitida e por me acolherem em sua casa durante toda a minha trajetória acadêmica, oferecendo um lar repleto de carinho, segurança e incentivo.

Estendo meus agradecimentos a todos os membros da minha família, que sempre me apoiaram e torceram por mim ao longo da minha graduação.

À minha namorada, Thaís, que esteve ao meu lado dentro e fora da faculdade, cuidando de mim em todos os momentos. Sem o seu apoio, paciência e carinho, chegar até aqui teria sido impossível.

Agradeço também aos professores do IFSC, que contribuíram para minha formação por meio do compartilhamento de conhecimentos, experiências e desafios. Em especial, aos orientadores da equipe Zênite Solar: Prof. Flávio e Prof. Humberto, que marcaram minha vida de forma profunda, tanto no aspecto profissional quanto pessoal.

Por fim, deixo minha gratidão aos amigos que fiz ao longo da minha graduação, especialmente André, Bruno, Gabriel, Pedro, Ramon e Victor que trouxeram leveza, motivação, diversão e companheirismo durante todos esses anos. Além de todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização desta etapa tão importante da minha vida.

*“Quem somos nunca muda, quem pensamos
que somos, sim.”*
(Star Wars – The Clone Wars)

RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um balanceador ativo para baterias de lítio LTO, aplicado a uma embarcação movida a energia solar fotovoltaica. Inicialmente, foi realizado um estudo sobre os principais tipos de baterias de lítio. Em seguida, analisaram-se os métodos de balanceamento de tensão entre células, abordando as diferenças entre técnicas passivas e ativas. A partir dessa análise, foi selecionada uma topologia de balanceamento ativo baseada no conversor Flyback com múltiplas saídas, visando conciliar eficiência, simplicidade e viabilidade prática. O projeto inclui simulações e testes experimentais com o objetivo de validar o funcionamento da técnica escolhida e compará-la com o balanceamento passivo.

Palavras-chave: Baterias de lítio; Balanceadores ativos; Energia solar.

ABSTRACT

This work presents the development of an active balancer for LTO lithium batteries, intended for use in a solar photovoltaic-powered boat. Initially, a study was conducted on the main types of lithium batteries. After that, methods for balancing voltage between cells were analyzed, addressing the differences between passive and active techniques. Based on this analysis, an active balancing topology based on the Multi Output Flyback converter was selected, aiming to combine efficiency, simplicity, and practical feasibility. The project includes simulations and experimental tests to validate the operation of the chosen technique and compare it with passive balancing.

Keywords: Lithium batteries; Active balancers; Solar energy.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Variação do SOC com (a) capacidade nominal e (b) depois de perder $\frac{1}{2}$ da sua capacidade	25
Figura 2 – Variação da resistência interna: (a) corrente, (b) temperatura, (c) SOC, (d) ciclos	26
Figura 3 – Ilustração dos componentes básicos e princípio de operação das LiBs ..	28
Figura 4 – Efeito do desbalanceamento com o tempo	31
Figura 5 – Redução da capacidade da bateria devido ao desbalanceamento das células	32
Figura 6 – Esquema de conexões do sistema de gerenciamento de bateria	34
Figura 7 – Comparação entre o balanceamento passivo e ativo.....	35
Figura 8 – Topologia típica do balanceamento passivo	36
Figura 9 – Topologia típica do balanceamento capacitivo.....	37
Figura 10 – Topologia típica do balanceamento indutivo	38
Figura 11 – Topologia de balanceamento por transformadores com núcleos individuais	40
Figura 12 – Balanceador ativo baseado em um conversor Flyback de múltiplas saídas	42
Figura 13 – Diagrama de blocos do barco solar Guarapuvú II	43
Figura 14 – Orion BMS 2.....	44
Figura 15 – Circuito de um conversor Flyback com múltiplas saídas.....	46
Figura 16 – <i>Layout</i> típico de um transformador	48
Figura 17 – Diodo V40D103C	55
Figura 18 – <i>Gate driver</i> escolhido	58
Figura 19 – Esquemático <i>driver</i> utilizado no projeto.....	58
Figura 20 – Placa de desenvolvimento STM32F103C8T6	60
Figura 21 – Esquemático da simulação do balanceador	62
Figura 22 – Simulação do balanceamento entre as células	63
Figura 23 – Esquemático da simulação do conversor Flyback.....	64

Figura 24 – Tensões e correntes de saída do conversor	65
Figura 25 – Tensão e corrente no MOSFET	65
Figura 26 – <i>Layout</i> da PCI	66
Figura 27 – PCI do projeto montada, <i>bottom</i>	67
Figura 28 – PCI do projeto montada, top	67
Figura 29 – Diagrama do teste com carga resistiva	68
Figura 30 – Tensão e corrente de saída do conversor	69
Figura 31 – Foto da bateria montada	70
Figura 32 – Diagrama da configuração dos testes	71
Figura 33 – Balanceamento ativo com bateria desbalanceada	72
Figura 34 – Balanceamento ativo com bateria desbalanceada, células descarregadas	73
Figura 35 – Balanceamento ativo com bateria desbalanceada, células carregadas	73
Figura 36 – Balanceamento ativo com bateria desbalanceada, tensão da bateria ...	74
Figura 37 – Corrente de balanceamento ativo nas células com menos energia	75
Figura 38 – Corrente de balanceamento ativo nas células com mais energia	75
Figura 39 – Balanceamento ativo com uma célula descarregada	76
Figura 40 – Balanceamento ativo com uma célula descarregada, células com mais energia	77
Figura 41 – Balanceamento ativo com uma célula descarregada, célula com menos energia	77
Figura 42 – Balanceamento ativo uma célula descarregada, tensão da bateria	78
Figura 43 – Curva de descarga das células de lítio com 40A	79
Figura 44 – Corrente de balanceamento ativo com uma célula descarregada	80
Figura 45 – Fonte CC bidirecional IT6006C-300-75	81
Figura 46 – Equipamentos usados no teste	81
Figura 47 – Corrente de balanceamento passivo com carga e descarga	82
Figura 48 – Balanceamento passivo com carga e descarga	82

Figura 49 – Corrente de balanceamento ativo com carga e descarga 83

Figura 50 – Balanceamento ativo com carga e descarga 83

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparação entre as principais químicas de baterias de lítio	30
Tabela 2 – Especificações técnicas do conversor	47
Tabela 3 – Núcleos de ferrite tipo E	49
Tabela 4 – Fios esmaltados	51
Tabela 5 – Parâmetros do diodo escolhido	56
Tabela 6 – Parâmetros do transistor escolhido	57
Tabela 7 – Comparação de valores teóricos e simulados	66
Tabela 8 – Principais características das células de lítio utilizadas.....	70
Tabela 9 – Valores de tensão iniciais e finais do teste 1	74
Tabela 10 – Tensões iniciais e finais do teste 2	78

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BMS	<i>Battery Management System</i> , Sistema de Gerenciamento de Bateria
LiFePO ₄	Lítio Ferrofosfato
LTO	Lítio Titanato
MOSFET	Transistor de Efeito de Campo de Óxido de Metal
UPS	<i>Uninterruptible Power Supply</i> , Fonte de Alimentação Ininterrupta
SOC	<i>State of Charge</i> , Estado de carga
LiBs	<i>Lithium-ion Batteries</i> , Baterias de ions de Lítio
SOH	<i>State of Health</i> , Estado de Saúde
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i> , Modulação por Largura de Pulso
CC	Corrente Contínua

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	Justificativa	18
1.2	Definição do Problema	18
1.3	Objetivo Geral.....	19
1.4	Objetivos Específicos	19
1.5	Estrutura do Trabalho.....	20
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	21
2.1	Nomenclaturas e Termos	21
2.1.1	Célula e Bateria.....	21
2.1.2	Capacidade Nominal	22
2.1.3	Tensão Nominal	22
2.1.4	Corrente de Carga/Descarga Máxima.....	23
2.1.5	Densidade de Energia e Densidade de Potência.....	23
2.1.6	Estado de Carga	24
2.1.7	Resistência Interna	25
2.1.8	Ciclo de Vida	27
2.2	Princípios de Baterias de Li-ion.....	27
2.2.1	Funcionamento	27
2.2.2	Principais Tecnologias de Células de Íon-Lítio.....	28
2.2.3	Desbalanceamento	30
2.3	Sistema de Gerenciamento de Bateria.....	32
2.4	Técnicas de Balanceamento	34
2.4.1	Balanceamento Passivo.....	35
2.4.2	Balanceamento Capacitivo.....	37
2.4.3	Balanceamento Indutivo.....	38
2.4.4	Balanceamento com Transformadores	39
2.4.5	Balanceamento Ativo com Conversor Flyback.....	40
3	METODOLOGIA	43
4	PROJETO DO CONVERSOR FLYBACK COM MULTIPLAS SAÍDAS	46
4.1	Transformador.....	47
4.1.1	Núcleo	48
4.1.2	Entreferro	49
4.1.3	Condutores.....	50
4.1.4	Indutância Magnetizante	53
4.1.5	Perdas no Transformador	53
4.2	Diodos	54
4.3	Especificações do Transistor	56
4.3.1	Resistor de Gate	57
4.3.2	Gate Driver.....	58
4.3.3	Perdas.....	58
4.4	Microcontrolador.....	59
5	APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS.....	61
5.1	Resultados Simulados.....	61
5.2	Protótipo	66
5.3	Testes com Carga Resistiva.....	68

5.4	Testes de Balanceamento com Células LTO	69
5.4.1	Testes do Balanceador Ativo	72
5.4.2	Teste de Balanceamento em Carga e Descarga	80
5.5	Análise e Discussão dos Resultados Obtidos	84
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	86
6.1	Sugestão para Trabalhos Futuros	86
	REFERÊNCIAS	88
	APÊNDICE A	91

1 INTRODUÇÃO

As baterias à base de lítio desempenham um papel fundamental em diversas aplicações modernas, como bicicletas elétricas, veículos elétricos e sistemas de energia ininterrupta (*Uninterruptible Power Supply* - UPS). Devido à sua elevada densidade de energia, baixo índice de autodescarga, menor peso, maior segurança e ausência de efeito memória, essas baterias tornaram-se o principal meio de armazenamento de energia elétrica em sistemas embarcados e de mobilidade elétrica (Moghaddam; Van Den Bossche, 2019). Apesar de suas vantagens, a tensão individual de uma célula de lítio é relativamente baixa, o que exige a conexão de diversas células em série para atender aos requisitos de tensão de sistemas mais complexos. No entanto, a tecnologia de fabricação atual não garante que todas as células sejam idênticas, resultando em desequilíbrios entre elas. Além disso, os processos de carga e descarga contribuem para a ampliação dessas diferenças de tensão. Esse desbalanceamento compromete diretamente o desempenho e a confiabilidade do banco de baterias, reduzindo a capacidade utilizável e acelerando o envelhecimento das células com menor tensão (Tian *et al.*, 2018).

Para mitigar esse problema, o uso de técnicas de balanceamento, ou equalização, torna-se essencial, garantindo que todas as células de um banco operem de forma uniforme. Essas técnicas podem ser classificadas em dois grupos: o balanceamento passivo, que dissipa o excesso de energia em forma de calor por meio de resistores, e o balanceamento ativo, que transfere energia das células com maior tensão para aquelas com menor tensão, reduzindo perdas e otimizando a eficiência do sistema (Moghaddam; Van Den Bossche, 2019).

Neste trabalho, propõe-se a implementação prática de uma técnica de balanceamento ativo baseada no conversor *Flyback*, aplicada a uma bateria de óxido de Titanato de lítio, LTO, utilizado em uma embarcação alimentada por energia solar, o Guarapuvú II. O objetivo é analisar o desempenho da técnica em comparação com o balanceamento passivo convencional, considerando aspectos como eficiência, tempo de equalização e viabilidade prática.

1.1 Justificativa

O avanço das tecnologias de armazenamento de energia e a crescente adoção de sistemas de propulsão elétrica impulsionam a necessidade de soluções mais eficientes para o gerenciamento de baterias, especialmente em aplicações onde a energia disponível é limitada e de difícil reposição. Em sistemas compostos por múltiplas células de íons de lítio conectadas em série, o desbalanceamento é um fenômeno inevitável, resultante de variações de capacidade, resistência interna e condições de operação. Esse problema reduz a capacidade utilizável do banco de baterias, compromete sua vida útil e pode afetar a segurança do sistema.

Em aplicações convencionais, o balanceamento passivo é a solução mais adotada devido ao seu baixo custo e simplicidade construtiva. Contudo, em situações nas quais o ciclo de carga e descarga não segue um padrão fixo, como ocorre no barco solar Guarapuvú II durante as competições, essa abordagem não é suficiente, pois implica no desperdício de parte da energia gerada e maior tempo para equalização das células. Além disso, durante as provas, caso o BMS proteja a bateria, o barco ficará sem energia para concluir a prova.

Nesse cenário, o balanceamento ativo se apresenta como alternativa mais eficiente, permitindo a transferência direta de energia entre células. A escolha do balanceamento ativo busca unir eficiência, velocidade de equalização e confiabilidade, tornando-se a solução mais adequada para maximizar o desempenho e a autonomia da embarcação durante as provas, onde cada unidade de energia aproveitada faz diferença no resultado final.

1.2 Definição do Problema

Em veículos elétricos, a abordagem mais comum para corrigir o desbalanceamento entre células de baterias de lítio é o balanceamento passivo, devido à sua simplicidade e, principalmente, ao baixo custo de implementação. No entanto, em aplicações onde os ciclos de carga e descarga não seguem um padrão definido, ou seja, quando o carregamento e o consumo de energia ocorrem simultaneamente e de forma irregular, essa solução torna-se insuficiente. Nessas situações, é necessário recorrer a técnicas de balanceamento ativo, capazes de

acelerar o processo de equalização entre as células e aumentar significativamente a eficiência do sistema.

No caso específico deste trabalho, a aplicação é o barco solar Guarapuvú II, uma embarcação projetada para competições. Durante as provas, a única fonte de recarga do banco de baterias, é a energia proveniente dos painéis solares. Assim, a adoção do balanceamento passivo implicaria no desperdício de parte dessa energia valiosa, já que ela seria dissipada em forma de calor durante o processo de equalização. Além disso, durante as competições, o barco opera em condições dinâmicas, nas quais o estado de carga das baterias varia constantemente em função de fatores como velocidade, maré, intensidade solar e posicionamento, reforçando a necessidade de uma solução de balanceamento mais rápida e eficiente.

1.3 Objetivo Geral

Desenvolver e implementar um sistema de balanceamento ativo baseado na topologia *Flyback* para uma bateria de óxido de Titanato de lítio (LTO), capaz de transferir energia das células com maior estado de carga para aquelas com menos energia.

1.4 Objetivos Específicos

- a) Realizar um estudo comparativo entre diferentes tecnologias de baterias de lítio;
- b) Analisar as principais técnicas de balanceamento de baterias, abordando vantagens e limitações das abordagens passivas e ativas;
- c) Selecionar e justificar a adoção da topologia *Flyback* como método de balanceamento ativo para o projeto;
- d) Projetar e dimensionar o circuito do balanceador ativo, incluindo a definição dos principais componentes e parâmetros elétricos;
- e) Implementar simulações do sistema para verificar o funcionamento da técnica de balanceamento e validar o dimensionamento realizado;

- f) Desenvolver e montar o protótipo físico do balanceador ativo, integrando-o à bateria LTO;
- g) Realizar testes experimentais para avaliar o desempenho do sistema, comparando-o com o método de balanceamento passivo;
- h) Analisar os resultados obtidos, identificando fatores como velocidade de balanceamento, redução de perdas e possíveis limitações da técnica implementada.

1.5 Estrutura do Trabalho

Este trabalho é estruturado em 6 capítulos, sendo eles os seguintes:

- **Capítulo 1:** Apresenta a contextualização do tema neste projeto, bem como os seus objetivos.
- **Capítulo 2:** Aprofundamento dos conceitos sobre baterias de lítio e estudo de técnicas de balanceamento.
- **Capítulo 3:** Explica o método adotado no desenvolvimento do projeto, incluindo simulações e projeto do circuito.
- **Capítulo 4:** Detalha a o dimensionamento e construção do hardware, incluindo layout da PCB, montagem e aspectos práticos do projeto.
- **Capítulo 5:** Mostra os resultados obtidos com as simulações e testes práticos, comparando a técnica ativa com o método passivo.
- **Capítulo 6:** Resume as conclusões, discute limitações e propõe possíveis melhorias e sugestões para futuros trabalhos.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O presente capítulo apresenta a base conceitual necessária para o entendimento e desenvolvimento do sistema de balanceamento ativo proposto. São abordados conceitos relacionados às tecnologias de baterias, suas aplicações em sistemas fotovoltaicos embarcados, a problemática do desbalanceamento de células e as principais técnicas para sua correção.

2.1 Nomenclaturas e Termos

A compreensão de termos e grandezas associadas a baterias de lítio é fundamental para o correto dimensionamento, operação e avaliação de desempenho de sistemas de armazenamento de energia. A seguir, são apresentados os principais conceitos e parâmetros utilizados na caracterização de células e bancos de baterias.

2.1.1 Célula e Bateria

O termo célula refere-se à menor unidade eletroquímica capaz de armazenar e fornecer energia elétrica de forma independente. Cada célula é formada por um conjunto de eletrodos (ânodo e cátodo), separados por um eletrólito, e encapsulados de forma a permitir reações eletroquímicas reversíveis, que convertem energia química em elétrica e vice-versa. O comportamento elétrico e as características operacionais de uma célula, como tensão nominal, capacidade, corrente máxima e ciclo de vida, são determinados principalmente pela sua composição química e pelo seu processo de fabricação (Andrea, 2010).

Uma bateria, por sua vez, é composta por uma ou mais células interligadas eletricamente, podendo estar dispostas em série, em paralelo ou em uma combinação série-paralelo, de forma a atender requisitos específicos de tensão, capacidade ou potência de uma aplicação. Quando conectadas em série, as tensões das células se somam, mantendo a mesma capacidade nominal. Já em conexões paralelas, a tensão se mantém constante, enquanto a capacidade nominal aumenta proporcionalmente ao número de células conectadas (Andrea, 2010).

Em aplicações práticas, como em sistemas de propulsão elétrica ou

armazenamento estacionário, as baterias são frequentemente formadas por dezenas ou centenas de células configuradas para alcançar os níveis de tensão e capacidade exigidos pelo projeto.

2.1.2 Capacidade Nominal

A capacidade nominal de uma célula corresponde à quantidade total de carga elétrica que pode ser fornecida sob condições padronizadas de descarga ou carga, normalmente expressa em ampère-hora (Ah). Essa medida é obtida por meio de testes com corrente constante até a tensão de corte, em ambiente controlado de temperatura.

No entanto, fatores como temperatura ambiente, taxa de carga e descarga (razão C ou *C-rate*) e envelhecimento eletroquímico podem influenciar diretamente o valor efetivo dessa capacidade, reduzindo o desempenho real da célula. Esse fenômeno, conhecido como *capacity fade*, é especialmente relevante em aplicações de longa duração, nas quais a autonomia do sistema está diretamente associada à preservação da capacidade da bateria ao longo do tempo (Andrea, 2010). Portanto, a capacidade nominal informada pelo fabricante deve ser entendida como um valor de referência, obtido em condições ideais de ensaio, não necessariamente representativo das condições reais de operação.

2.1.3 Tensão Nominal

A tensão nominal de uma célula é definida como o valor médio da tensão elétrica que a célula mantém durante o processo de descarga e carga sob condições padrão de operação. Esse valor é uma convenção que facilita a comparação entre diferentes tecnologias de baterias e é determinado com base no perfil de descarga da célula, tipicamente próximo ao ponto de inflexão da curva de tensão em função do estado de carga (Immonen; Hurri, 2021).

Nas baterias de íons de lítio, esse valor varia conforme a composição química da célula. Por exemplo, células com química de fosfato de ferro-lítio (LiFePO_4) geralmente possuem tensão nominal de 3,2 V, enquanto células de óxido de cobalto de lítio (LCO) têm cerca de 3,7 V. No caso das células de titanato de lítio (LTO), a

tensão nominal típica é de aproximadamente 2,3 V.

2.1.4 Corrente de Carga/Descarga Máxima

A corrente máxima de carga e descarga de uma célula é especificada com base na razão C, que representa a taxa de corrente em relação à capacidade nominal da célula. A razão C é uma unidade adimensional amplamente utilizada para caracterizar o desempenho das baterias. Por definição, 1 C representa a corrente necessária para carregar ou descarregar completamente a célula em uma hora. Por exemplo, para uma célula de 4 Ah, uma taxa de 1 C equivale a 4 A; já uma taxa de 10 C corresponde a 40 A.

Esses limites são definidos pelo fabricante com base em critérios térmicos, eletroquímicos e de segurança. A corrente máxima de carga é limitada para evitar o risco de formação de lítio metálico no ânodo e o aumento excessivo da temperatura. Já a corrente máxima de descarga é determinada pela capacidade de dissipação térmica do sistema e pela manutenção da tensão da célula acima do limite inferior de operação segura (Andrea, 2010).

2.1.5 Densidade de Energia e Densidade de Potência

A densidade de energia, também chamada de energia específica quando expressa em Wh/kg, representa a razão entre a quantidade total de energia que uma célula ou bateria pode armazenar e sua massa. Esse parâmetro é fundamental para aplicações em que peso e espaço são restrições relevantes, como veículos elétricos e sistemas embarcados, pois está diretamente relacionado à autonomia possível de um sistema energético para uma determinada carga ou volume.

Por outro lado, a densidade de potência expressa a capacidade da célula de fornecer energia rapidamente, sendo geralmente apresentada em W/kg. Este parâmetro é essencial em aplicações com demandas de alta corrente em curtos períodos de tempo, como sistemas de propulsão, frenagem regenerativa e partidas rápidas. Diferente da densidade de energia, que está associada à autonomia do sistema, a densidade de potência está relacionada à velocidade de entrega dessa energia.

2.1.6 Estado de Carga

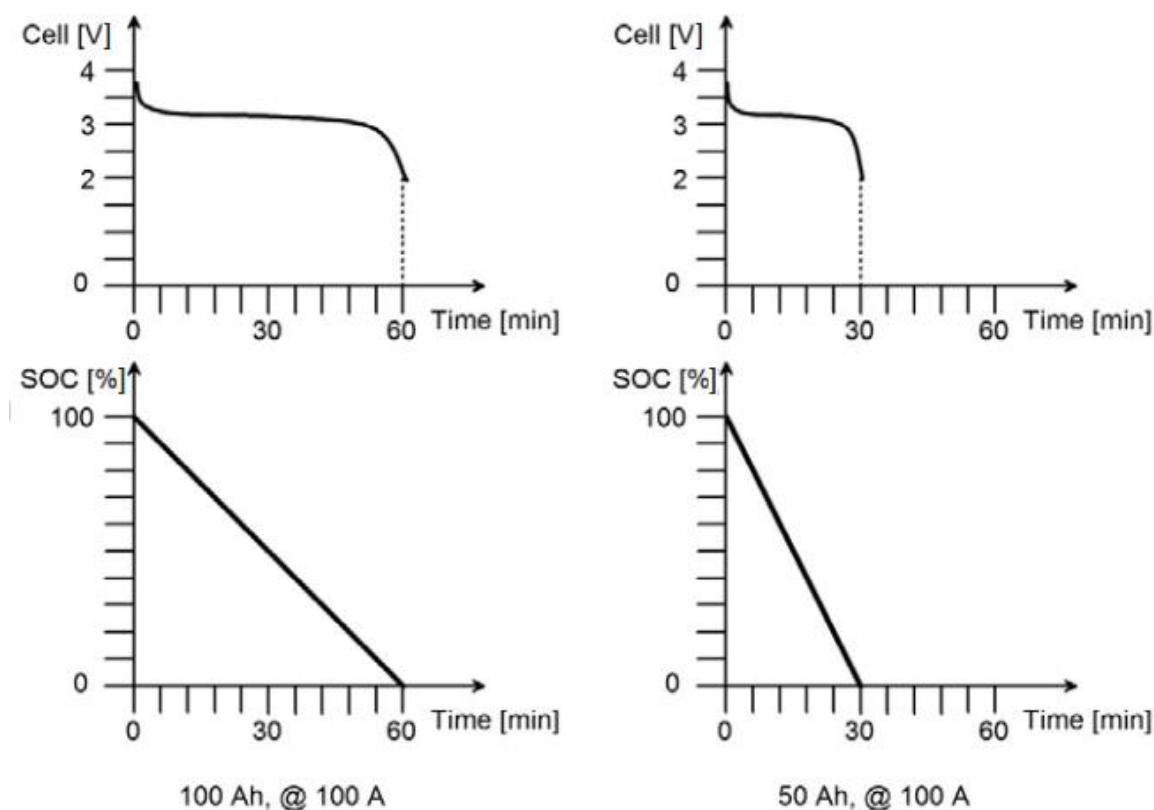
O Estado de Carga (*State of Charge – SOC*) é um dos parâmetros fundamentais no monitoramento e controle de baterias de íons de lítio. Ele representa a quantidade de energia disponível na célula em relação à sua capacidade total e é usualmente expresso em porcentagem, variando de 0% (totalmente descarregada) a 100% (totalmente carregada).

Ao contrário de variáveis como tensão e corrente, o SOC não é uma grandeza diretamente mensurável. Por isso, sua estimativa requer métodos indiretos. Os mais comuns são:

- Contagem de coulombs (*coulomb counting*): integra a corrente de carga e descarga ao longo do tempo;
- Estimativa por tensão terminal: estima o SOC por uma relação entre a curva de descarga da bateria;
- Modelos de circuito equivalente (*Equivalent Circuit Models - ECMs*): combinam tensão, corrente e temperatura para estimar o SOC com maior precisão.

A Figura 1 ilustra graficamente a relação entre a tensão da célula e a estimativa do Estado de Carga (SOC).

Figura 1 – Variação do SOC com (a) capacidade nominal e (b) depois de perder $\frac{1}{2}$ da sua capacidade



Fonte: Adaptado de Andrea (2010).

2.1.7 Resistência Interna

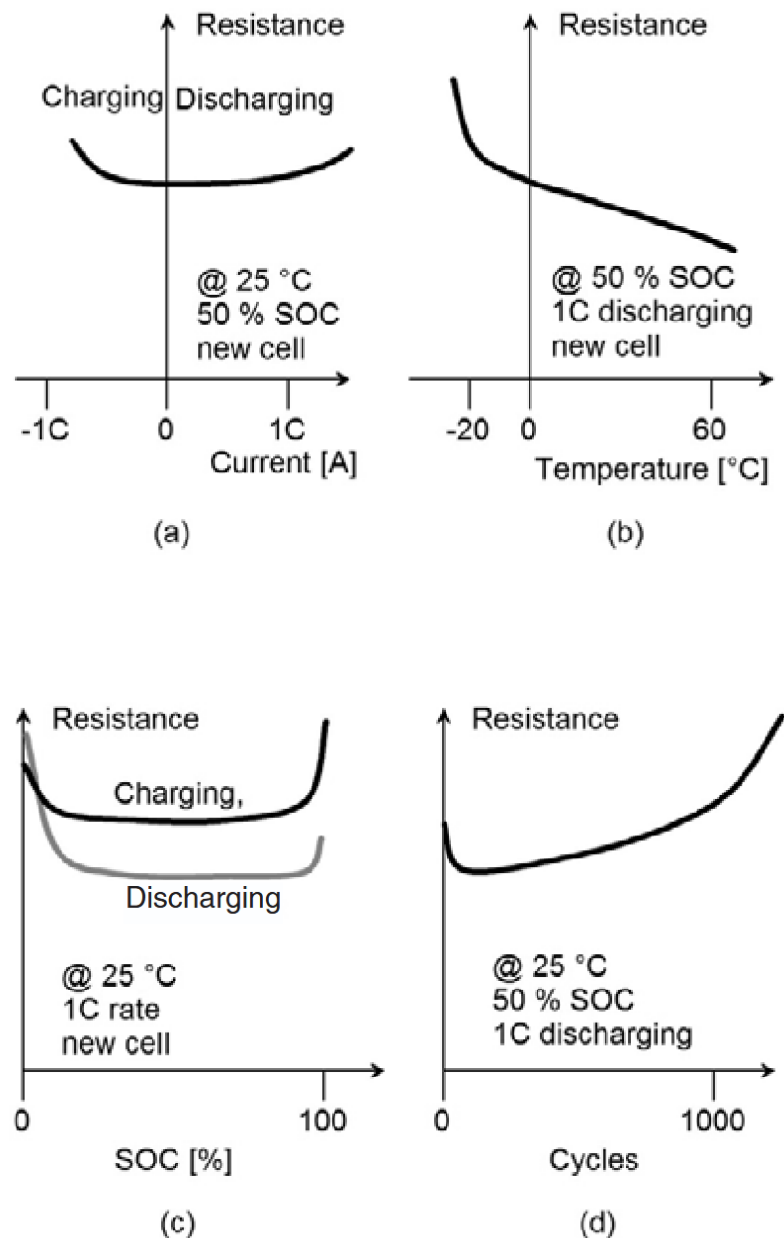
A resistência interna de uma célula representa a oposição ao fluxo de corrente elétrica em seu interior e é responsável pela queda de tensão que ocorre sob carga, bem como pela geração de calor devido ao efeito Joule. Essa resistência é composta por diversos elementos, incluindo a resistência dos condutores internos, eletrodos, separadores e contatos, além da resistência de transferência de carga nas interfaces eletroquímicas.

Esse valor de resistência não é fixo, ele varia conforme as condições operacionais da célula, como corrente aplicada, temperatura e estado de carga. A Figura 2 ilustra como a resistência interna se altera em função dessas variáveis, destacando seu comportamento dinâmico diante de diferentes regimes de operação.

“Não estamos falando de uma resistência simples (algo que se pode medir com um ohmímetro, ou calcular como $R=V/I$). Estamos, na verdade, tratando de uma resistência dinâmica, que é diferente devido à presença de uma fonte de tensão em série com essa resistência. [...] Essa resistência varia com o

estado de carga (SOC), sendo maior em níveis baixos e altos de SOC; com a temperatura, sendo mais alta em ambientes frios; com a corrente, sendo mais alta sob correntes elevadas e durante a carga; e com o uso, aumentando ao longo do tempo conforme a célula envelhece” (Andrea, 2010, tradução livre).

Figura 2 – Variação da resistência interna: (a) corrente, (b) temperatura, (c) SOC, (d) ciclos



Fonte: Adaptado de Andrea (2010).

2.1.8 Ciclo de Vida

O ciclo de vida de uma célula ou bateria refere-se ao número de ciclos completos de carga e descarga que ela pode suportar antes que sua capacidade residual caia para um valor considerado como fim de vida útil, geralmente 80% da capacidade nominal original. Esse parâmetro é fortemente influenciado pelas condições de operação, temperatura, corrente de carga/descarga e regime de uso.

A degradação da capacidade ao longo do tempo ocorre por dois mecanismos principais: o envelhecimento por tempo e o envelhecimento por ciclos. O primeiro está relacionado à degradação química em repouso, enquanto o segundo decorre do uso contínuo da bateria. O ciclo de vida também depende da profundidade média de descarga, baterias operadas com profundidades de descarga mais rasas tendem a apresentar maior longevidade (Akbarzadeh; De Smet; Stuyts, 2022).

2.2 Princípios de Baterias de Li-ion

Entre as tecnologias disponíveis, as baterias de lítio têm se destacado em relação às tradicionais de chumbo-ácido por apresentarem maior densidade de potência e energia, sendo capazes de oferecer um desempenho notável, maior eficiência e vida útil prolongada. É a escolha padrão para inúmeros produtos eletrônicos de consumo, como computadores portáteis e telefones celulares, e vem se consolidando como opção preferencial em veículos elétricos (Andrea, 2010).

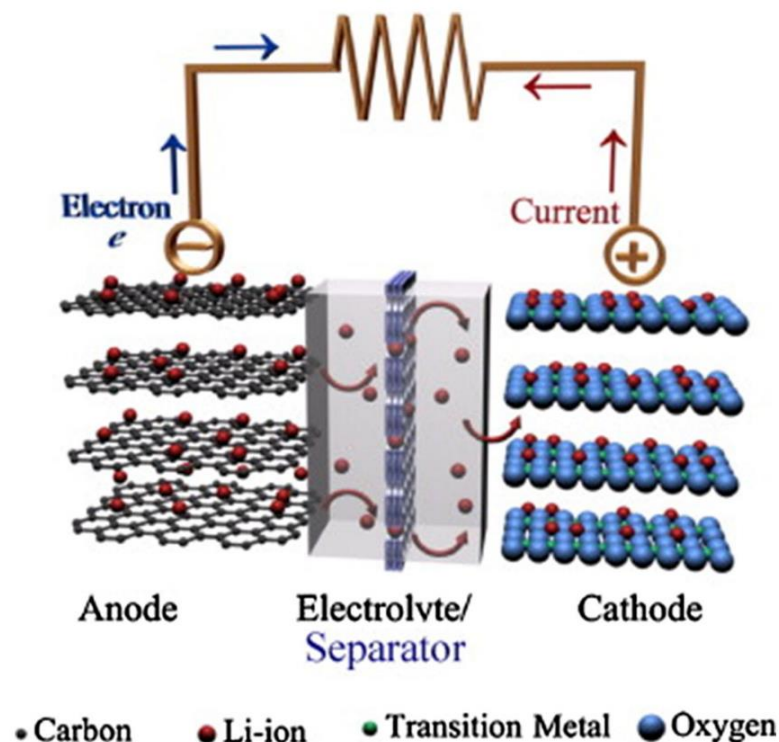
2.2.1 Funcionamento

De forma geral, as baterias de íon-lítio são compostas por três elementos: um eletrodo positivo (cátodo), um eletrodo negativo (ânodo) e um eletrólito. O eletrólito separa os dois eletrodos e contém uma solução de sais de lítio, permitindo a transferência de íons de lítio entre eles. No processo de descarga, os elétrons se movem do ânodo para o cátodo através da carga externa, enquanto os íons de lítio se deslocam simultaneamente do ânodo para o cátodo pelo eletrólito. No processo de carga, o movimento ocorre em sentido inverso, com elétrons indo do cátodo para o ânodo e íons de lítio migrando na mesma direção pelo eletrólito. Assim, a energia

externa é armazenada no ânodo e no cátodo sob a forma de energia química (Lyu; Ren; Li, 2018).

Durante o processo de carga, uma fonte externa aplica tensão à célula, provocando a migração dos íons de lítio do cátodo para o ânodo, onde se intercalam na estrutura cristalina do material ativo. Ao mesmo tempo, elétrons percorrem o circuito externo até o ânodo. No processo de descarga, ocorre o movimento inverso: íons retornam ao cátodo através do eletrólito, enquanto elétrons fluem pelo circuito externo para alimentar a carga. A Figura 3 ilustra de forma esquemática esse funcionamento.

Figura 3 – Ilustração dos componentes básicos e princípio de operação das LiBs



Fonte: Lyu, Ren e Li (2018).

2.2.2 Principais Tecnologias de Células de Íon-Lítio

As células de íon-lítio podem ser fabricadas a partir de diferentes composições químicas, cada uma apresentando características próprias que influenciam diretamente parâmetros como densidade de energia, potência específica, ciclo de vida, segurança operacional, custo e desempenho em diferentes condições. Entre os tipos mais relevantes estão:

- **LiFePO₄ (Lítio-Ferro-Fosfato):** Elevada estabilidade térmica e química, boa vida útil e boa segurança, porém com densidade energética inferior em relação a outras químicas de lítio.
- **LCO (Lítio-Cobalto-Óxido):** Alta densidade energética e uso consolidado em eletrônicos portáteis, mas apresenta ciclo de vida limitado, custo elevado e menor estabilidade térmica.
- **NMC (Lítio-Níquel-Manganês-Cobalto):** Combina alta densidade energética com boa vida útil e estabilidade razoável. É amplamente utilizada em veículos elétricos por oferecer um equilíbrio entre desempenho, custo e segurança.
- **LMO (Lítio-Manganês-Óxido):** Destaca-se pela segurança e capacidade de fornecer altas correntes de descarga, sendo comum em aplicações que demandam potência elevada. Contudo, apresenta densidade energética menor e ciclo de vida mais curto em comparação a outras químicas.
- **LTO (Lítio-Titanato):** Ciclo de vida extremamente longo, maior segurança, excelente desempenho em baixas temperaturas e capacidade de suportar altas taxas de carga e descarga, embora com densidade energética inferior às demais.

A seleção da composição química adequada depende do equilíbrio entre requisitos técnicos e restrições do projeto, como peso, volume, autonomia, tempo de recarga, expectativa de vida útil e perfil de uso do sistema. Em aplicações de tração elétrica, por exemplo, priorizam-se altas densidades de energia e potência, enquanto em sistemas estacionários de armazenamento a vida útil e a segurança tendem a ser fatores mais determinantes. A Tabela 1 mostra importantes características das principais tecnologias de células de íon-lítio.

Tabela 1 – Comparação entre as principais químicas de baterias de lítio

Química da célula	Tensão nominal (V)	Densidade de energia (Wh/kg)	Densidade de potência (W/kg)	Vida útil típica (ciclos)
LiFePO₄	3,2	90 – 120	1.000 – 3.000	2.000 – 7.000
LCO	3,7	150 – 200	200 – 400	500 – 1.000
NMC	3,6 – 3,7	150 – 220	300 – 1.000	1.000 – 2.000
LMO	3,7	100 – 130	500 – 1.500	500 – 1.000
LTO	2,3 – 2,4	50 – 80	2.000 – 5.000	15.000 – 30.000

Fonte: Elaboração própria (2025).

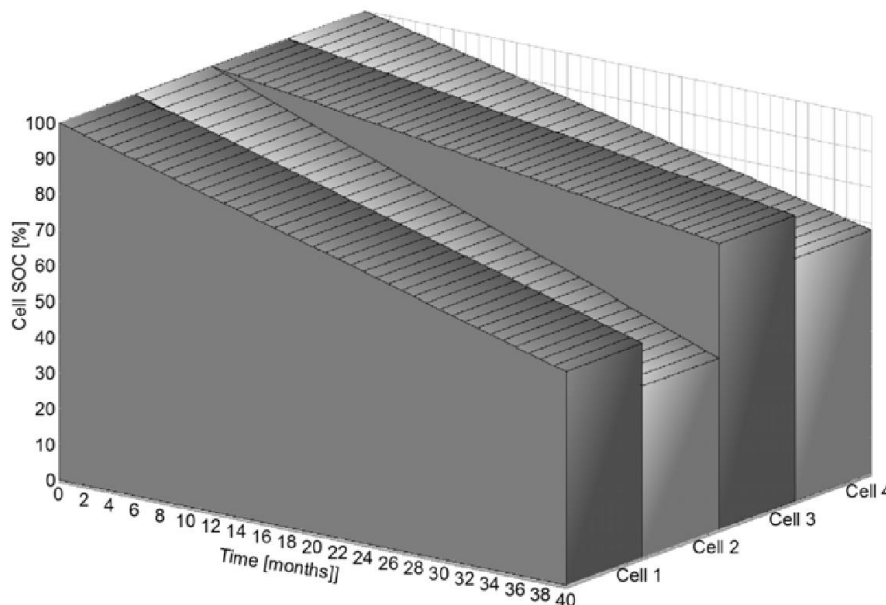
2.2.3 Desbalanceamento

Em um banco de baterias de íon-lítio, as células conectadas em série e/ou paralelo raramente apresentam características elétricas idênticas. Pequenas variações no processo de fabricação, diferenças na resistência interna, na temperatura de operação e no envelhecimento resultam em discrepâncias no SOC, na tensão e até na capacidade nominal de cada célula (Andrea, 2010). Ao longo dos ciclos de carga e descarga, essas diferenças tendem a se acumular, levando ao chamado desbalanceamento.

As células de Lítio inicialmente balanceadas, mesmo sem estarem sendo utilizadas, podem se tornar desbalanceadas com o tempo, devido a diferenças na corrente de fuga (*leakage current*), temperatura local, ciclos parciais de carga e variações entre células. A energia armazenada será gradualmente reduzida de forma assimétrica. Esse descarregamento desigual provoca divergência no estado de carga (SOC) entre as células, caracterizando um desbalanceamento progressivo. A Figura

4 representa graficamente esse comportamento utilizando um exemplo de quatro células conectadas em série.

Figura 4 – Efeito do desbalanceamento com o tempo

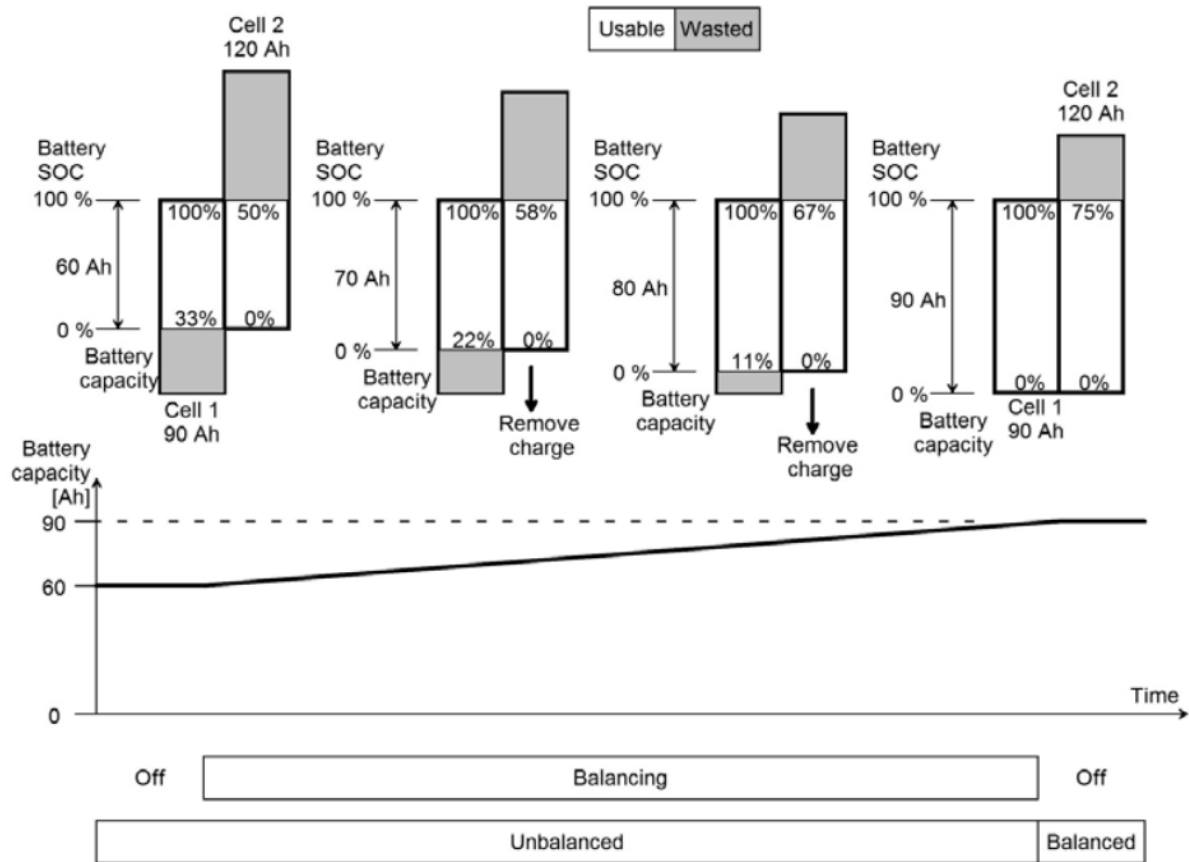


Fonte: Andrea (2010).

Durante o processo de carga, a capacidade da bateria em aceitar energia é limitada pela célula que atinge primeiro a carga completa. De forma semelhante, durante a descarga, o fornecimento de energia é limitado pela primeira célula que atinge o limite inferior de tensão. Assim, ao final da carga, uma célula pode atingir o limite superior de tensão, impedindo que o sistema continue carregando, enquanto outras ainda poderiam receber mais energia. Da mesma forma, durante a descarga, a célula mais fraca atinge o limite mínimo antes das demais, encerrando o processo mesmo que outras células ainda tenham energia disponível.

Esse descompasso reduz a eficiência do sistema e reforça a necessidade do balanceamento entre as células. A Figura 5 ilustra como o desequilíbrio entre as células impacta negativamente a capacidade total da bateria, limitando sua autonomia e desempenho energético.

Figura 5 – Redução da capacidade da bateria devido ao desbalanceamento das células



Fonte: Andrea (2010).

2.3 Sistema de Gerenciamento de Bateria

Embora as baterias de íon-lítio ofereçam alta densidade de energia e excelente desempenho em diversas aplicações, sua estabilidade química e térmica apresentam desafios que exigem atenção especial no projeto e operação. Diferentemente de tecnologias mais antigas, como chumbo-ácido ou níquel-cádmio, as células de íon-lítio são mais sensíveis a condições de sobrecarga, descarga profunda, correntes excessivas e temperaturas extremas. Nessas situações, podem ocorrer reações indesejadas no interior da célula, degradação acelerada dos materiais ativos e, em casos extremos, fuga térmica, fenômeno que leva ao aumento descontrolado da temperatura e pode resultar em incêndio ou explosão.

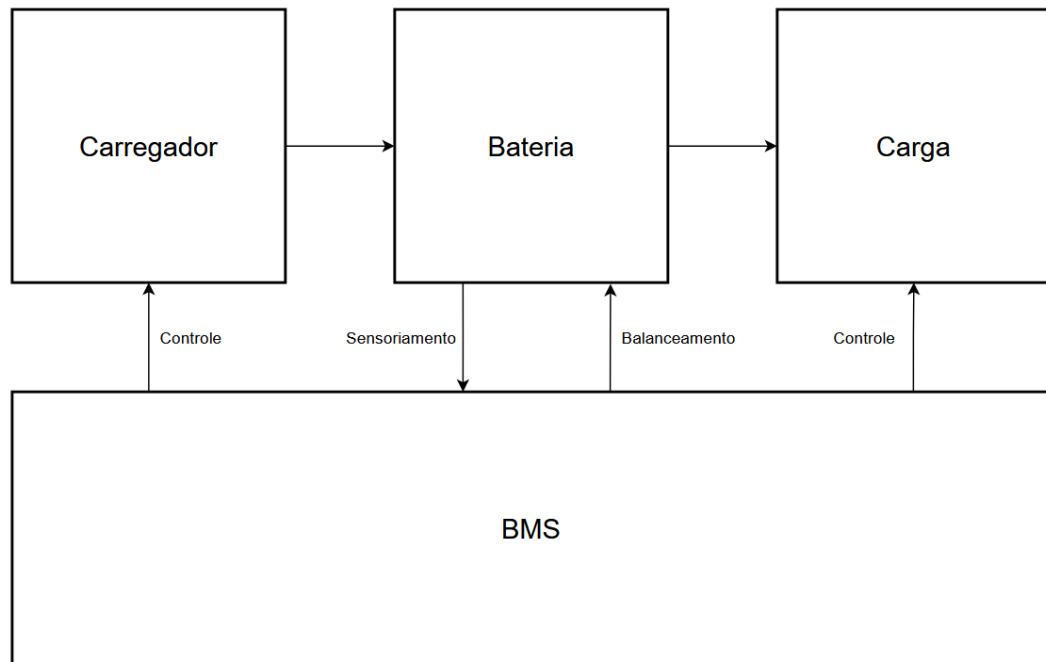
Para mitigar esses riscos e preservar a vida útil do sistema, é indispensável a utilização de um Sistema de Gerenciamento de Bateria (*Battery Management System - BMS*). Esse dispositivo monitora parâmetros críticos como tensão, corrente

e temperatura de cada célula, atuando de forma preventiva para manter as condições de operação dentro de limites seguros. Entre suas funções principais estão:

- Evitar sobrecarga das células: monitora constantemente a tensão de cada célula e interrompe o processo de carga quando algum elemento atinge o limite máximo especificado pelo fabricante. Isso previne degradação química, aquecimento excessivo e riscos de fuga térmica.
- Prevenir descarga excessiva: garante que a tensão de cada célula não caia abaixo do valor mínimo seguro. A descarga profunda pode causar perda irreversível de capacidade, alteração estrutural dos eletrodos e aumento da resistência interna, reduzindo drasticamente a vida útil.
- Limitar a corrente de operação: controla e, se necessário, interrompe a carga ou descarga quando as correntes excedem os limites seguros. Essa função evita aquecimento excessivo, degradação prematura dos materiais ativos e falhas nos condutores internos.
- Registrar dados para diagnóstico e manutenção: armazena informações históricas sobre tensões, correntes, temperaturas, ciclos de carga/descarga e eventos de falha. Esses registros permitem avaliar o estado de saúde (SOH) da bateria, planejar manutenções preventivas e otimizar estratégias de uso.
- Balancear a tensão entre as células: corrige desequilíbrios que ocorrem naturalmente entre as células de um mesmo pack. Isso é feito por meio de técnicas de balanceamento passivo ou ativo, garantindo que todas atinjam o mesmo estado de carga e evitando que células mais fracas determinem o limite operacional do conjunto.

A Figura 6 apresenta de forma simplificada as conexões típicas de um BMS. Ele é conectado individualmente a cada célula, permitindo o monitoramento de parâmetros críticos. Essas medições são utilizadas para garantir a operação segura e otimizada do conjunto.

Figura 6 – Esquema de conexões do sistema de gerenciamento de bateria



Fonte: Elaboração própria (2025).

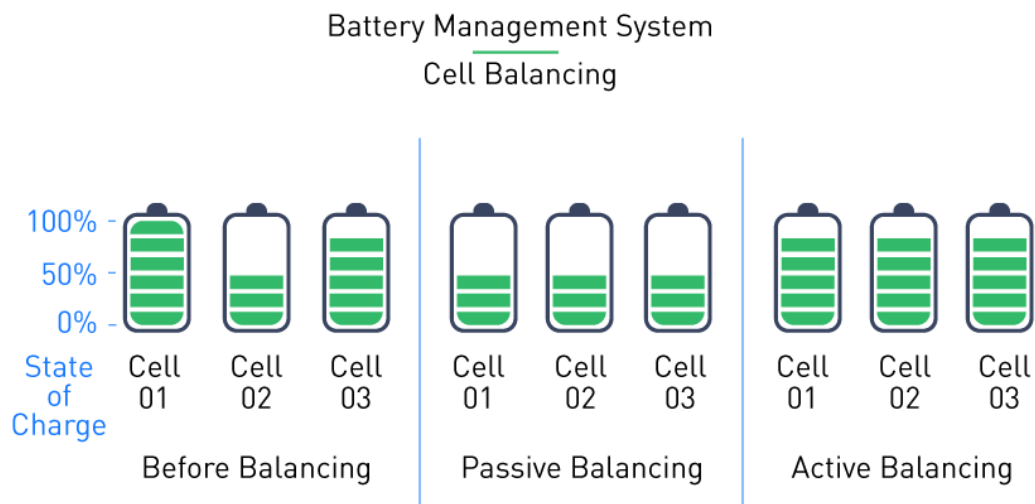
2.4 Técnicas de Balanceamento

Para mitigar o desbalanceamento e seus efeitos, são utilizadas técnicas de balanceamento que visam manter as células operando em níveis similares de SOC, garantindo o melhor aproveitamento energético e maior segurança. Tais técnicas são comumente divididas em duas categorias principais: balanceamento passivo e balanceamento ativo. No método passivo, o excesso de energia das células com maior carga é simplesmente dissipado em forma de calor por meio de resistores ou transistores, o que resulta na perda total dessa energia. Já os métodos de balanceamento ativo transferem carga das células com mais energia para aquelas com menor energia, promovendo uma redistribuição mais eficiente e aproveitando melhor a energia armazenada no sistema. Existem diferentes topologias de balanceamento ativo, que variam de acordo com os elementos utilizados para armazenamento temporário da energia, como capacitores ou componentes indutivos, e também com os tipos de interruptores ou conversores empregados no controle do circuito (Tian *et al.*, 2018).

A Figura 7 apresenta uma comparação entre os dois métodos de balanceamento. Observa-se que, no método passivo, a energia das células mais

carregadas é dissipada até que todas atinjam o nível da célula com menor carga. Já no método ativo, a energia excedente das células com maior SOC é transferida para aquelas com menor carga, promovendo um equilíbrio mais eficiente entre os elementos do banco.

Figura 7 – Comparação entre o balanceamento passivo e ativo



Fonte: CodyEnergy, 2024.

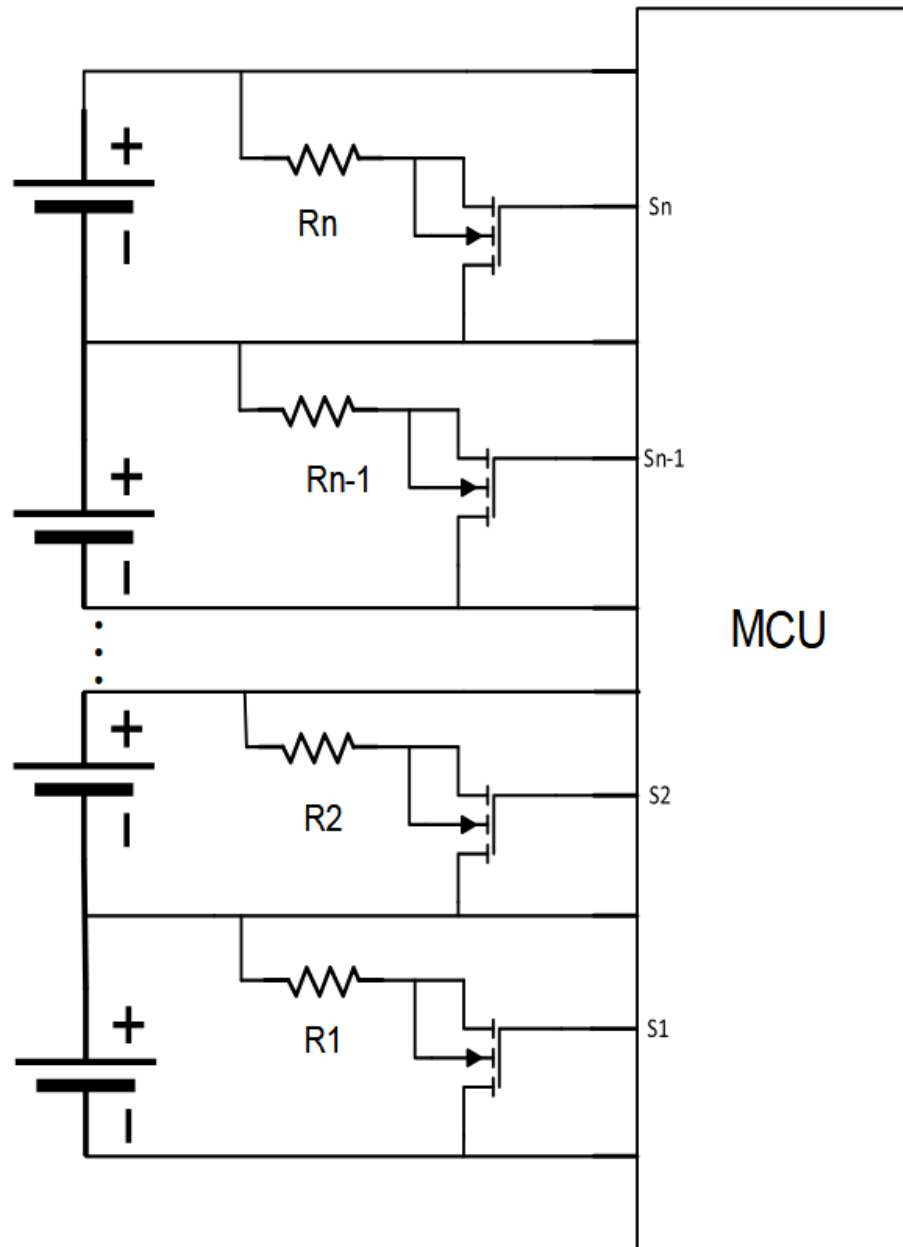
2.4.1 Balanceamento Passivo

O método de balanceamento passivo por resistor *shunt* é atualmente uma das abordagens mais utilizadas em sistemas de gerenciamento de baterias. Esse método consiste em remover o excesso de energia das células com maior tensão, desviando a corrente por resistores até que o nível de carga dessas células se iguale ao das células com menor tensão. Em outras palavras, as células mais carregadas têm sua energia "desperdiçada" até que todas atinjam o mesmo estado de carga. A principal vantagem desse método está na simplicidade do circuito e na facilidade de implementação do controle. No entanto, essa mesma simplicidade é acompanhada de desvantagens importantes: a energia excedente é dissipada sob a forma de calor, o que impõe desafios ao sistema de gerenciamento térmico da bateria, especialmente em aplicações com elevado número de células ou altas correntes de equalização (Tian *et al.*, 2018).

A Figura 8 apresenta a topologia típica do método de balanceamento passivo. Nessa configuração, o BMS monitora continuamente a tensão e/ou estado

de carga de cada célula. Quando é detectada uma diferença acima do limite programado, o sistema ativa os circuitos de derivação associados às células com maior carga, desviando o excesso de energia até que seus níveis se igualem ao da célula com menor SOC.

Figura 8 – Topologia típica do balanceamento passivo

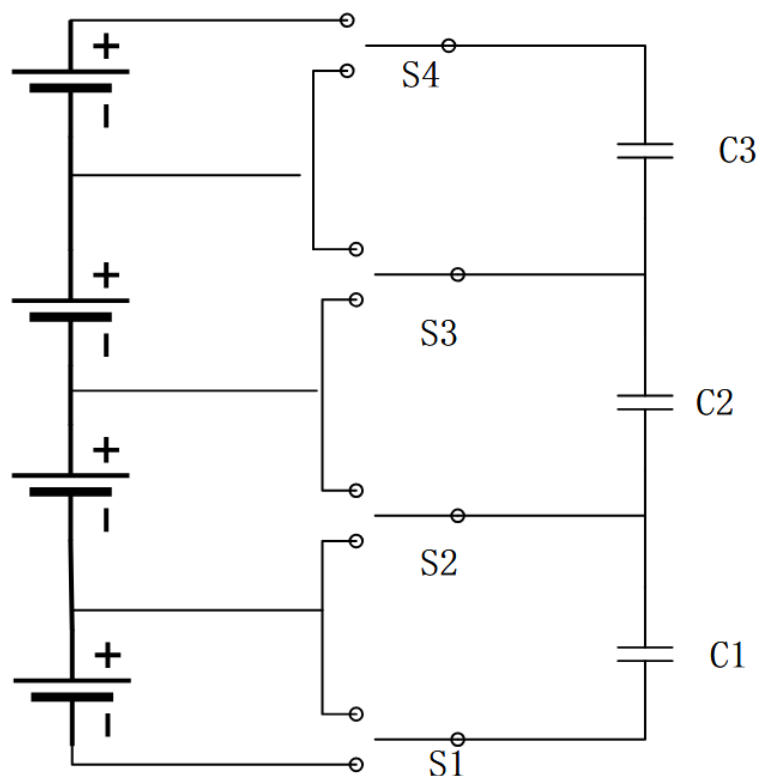


Fonte: Tian *et al.* (2018).

2.4.2 Balanceamento Capacitivo

O método de balanceamento capacitivo, utiliza capacitores para transferir a energia exedente de uma célula para outra. O funcionamento consiste em conectar um capacitor em paralelo a uma célula com maior tensão, fazendo com que sua carga se iguale gradualmente à tensão dessa célula. Em seguida, o capacitor é realocado para outra célula com menor tensão, transferindo parte da energia acumulada (Moghaddam; Van Den Bossche, 2019). Esse processo é repetido de forma cíclica entre pares de células, promovendo uma redistribuição contínua de carga até que todas atinjam níveis semelhantes de tensão, caracterizando o balanceamento. A topologia típica de método está ilustrada na Figura 9.

Figura 9 – Topologia típica do balanceamento capacitivo



Fonte: Tian *et al.* (2018).

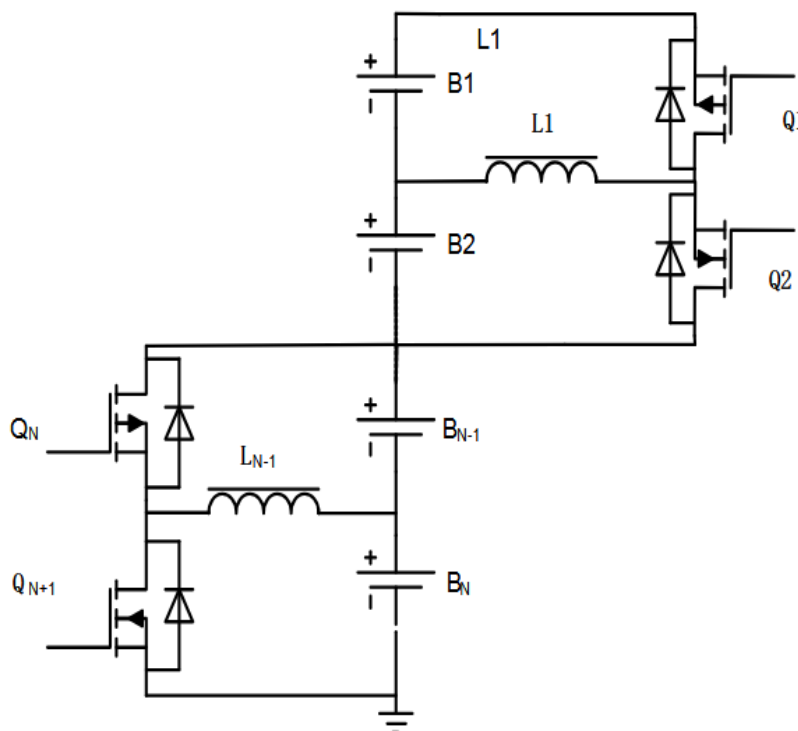
Entre as principais vantagens dessa técnica estão a simplicidade de controle e a capacidade de operar tanto durante a carga quanto durante a descarga do banco. No entanto, uma limitação importante é que a corrente de balanceamento diminui à medida que a diferença de tensão entre as células se reduz, o que torna o processo relativamente lento, especialmente quando o desequilíbrio inicial é pequeno (Tian *et al.*, 2018).

2.4.3 Balanceamento Indutivo

O método de balanceamento indutivo baseia-se na transferência de energia entre células por meio de um componente indutivo. Nesse sistema, a carga excedente de uma célula é temporariamente armazenada em um indutor e, em seguida, transferida para outra célula com menor estado de carga. Diferente do método capacitivo, que opera com transferência de tensão, o balanceamento indutivo utiliza a transferência de corrente, o que permite lidar com maiores potências em determinadas aplicações. A topologia típica desse método é ilustrada na Figura 10.

Durante o processo de balanceamento, a energia precisa ser transmitida sequencialmente entre as células. Por esse motivo, quando a diferença de carga ocorre entre células distantes no arranjo em série, a eficiência de transferência energética tende a ser significativamente reduzida. Dessa forma, o balanceamento indutivo é mais apropriado para sistemas com um número reduzido de células em série. Entre suas principais desvantagens estão a complexidade do circuito e a lentidão do processo de equalização, especialmente quando aplicado em bancos maiores (Tian *et al.*, 2018).

Figura 10 – Topologia típica do balanceamento indutivo



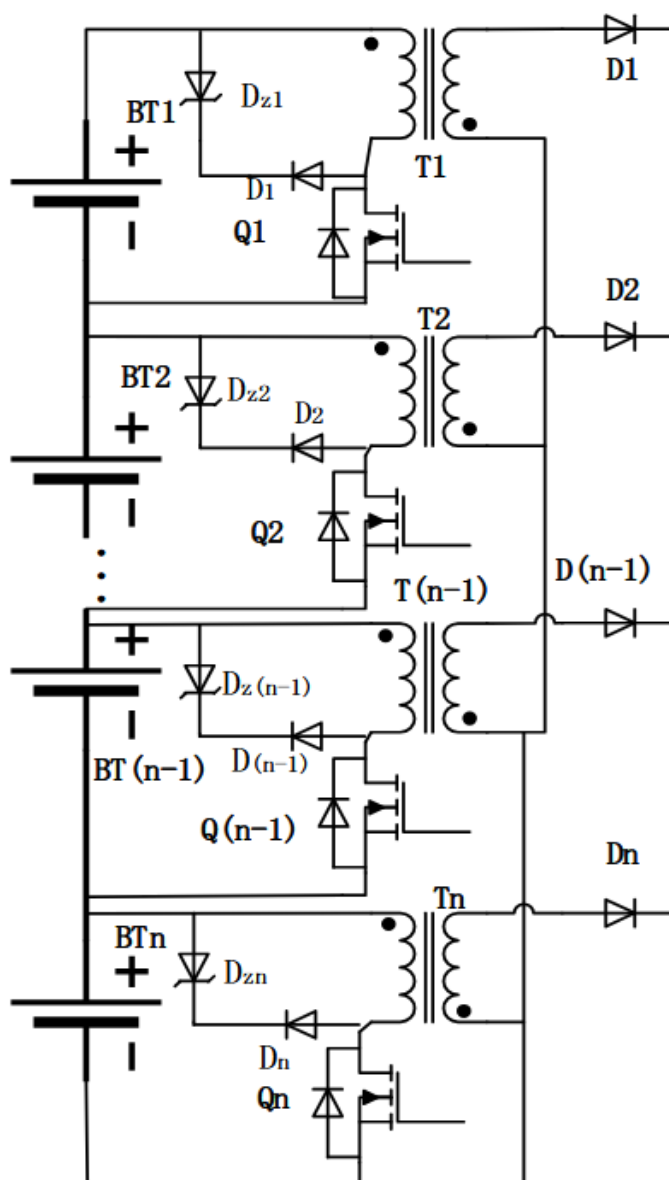
Fonte: Tian *et al.* (2018).

2.4.4 Balanceamento com Transformadores

O método de balanceamento por transformador apresenta funcionamento semelhante ao método indutivo, mas com diferenças estruturais importantes. Nesse caso, a transferência de energia entre as células é realizada por meio de um transformador, que pode operar armazenando energia no indutor de magnetização antes de transferi-la ou fazendo a transmissão direta através do acoplamento magnético entre os enrolamentos. A topologia apresentada na Figura 11 utiliza múltiplos transformadores, sendo um núcleo dedicado para cada célula.

Essa abordagem oferece vantagens relevantes em relação às técnicas baseadas em capacitância ou indutância simples. A principal delas é a maior eficiência de transferência de energia, já que a transmissão ocorre de forma mais direta. Como consequência, o tempo de balanceamento é reduzido, o que torna o método mais eficaz para aplicações que exigem equalização rápida. Além disso, o uso de transformadores favorece o projeto modular, possibilitando escalabilidade e integração em sistemas maiores com controle mais preciso entre os módulos (Tian *et al.*, 2018).

Figura 11 – Topologia de balanceamento por transformadores com núcleos individuais



Fonte: Tian et al. (2018).

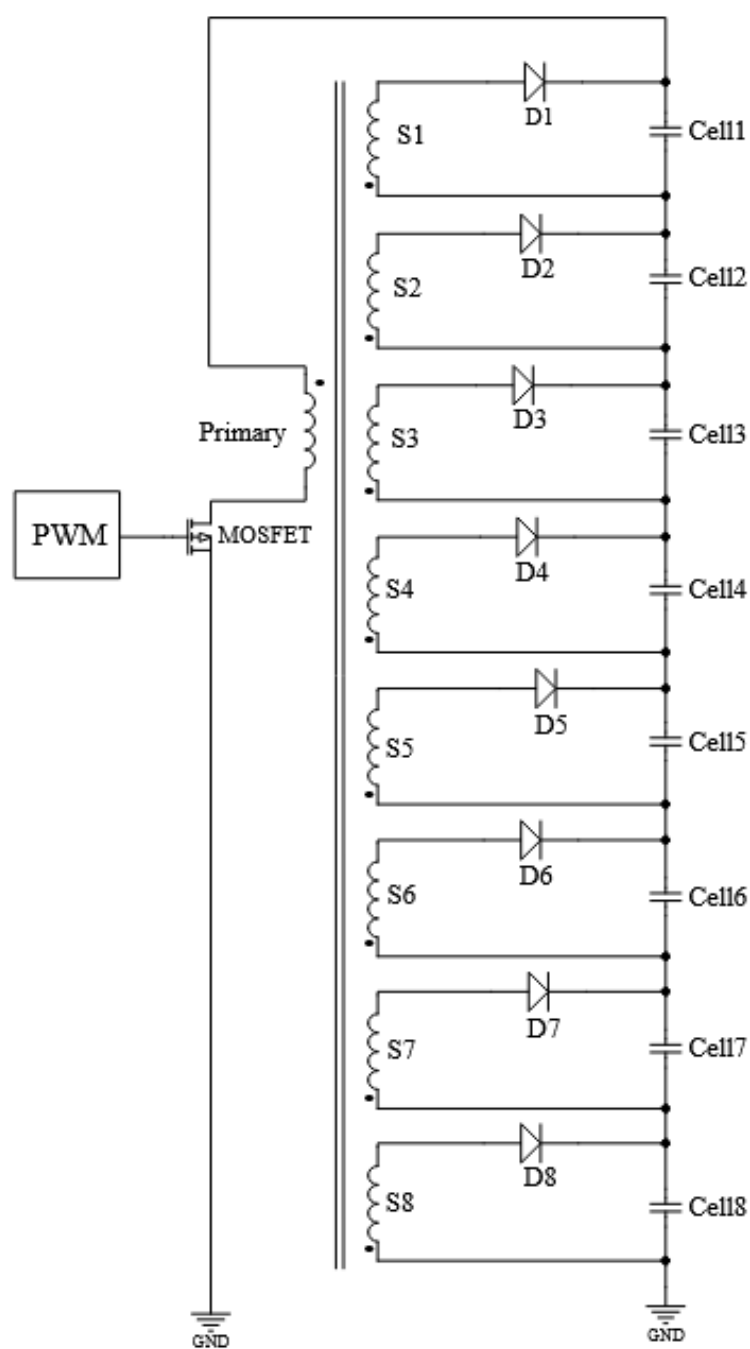
2.4.5 Balanceamento Ativo com Conversor Flyback

Diferente dos transformadores convencionais de rede, o transformador do conversor Flyback não apenas transfere, mas também armazena energia durante uma parte significativa do período de comutação. Isso é possível graças ao uso de núcleos de ferrite com entreferro, que aumenta a relutância do circuito magnético e, com isso, sua capacidade de armazenamento de energia magnética. Essa característica torna o Flyback especialmente adequado para aplicações de balanceamento, já que permite a regulação precisa da energia a ser transferida entre as células (Wei; Zhao; Dai,

2009).

Na configuração mostrada na Figura 12, o enrolamento primário do transformador é conectado ao banco de baterias completo, enquanto cada enrolamento secundário se conecta individualmente a uma célula por meio de um diodo. Os enrolamentos secundários são configurados de forma que suas polaridades sejam opostas em relação ao enrolamento primário. Quando o interruptor principal, um MOSFET, é acionado, a energia é armazenada no transformador sob a forma de fluxo magnético. Nesse estágio, a energia ainda não é transferida para os secundários, pois os diodos permanecem polarizados reversamente. No estágio seguinte, quando o interruptor é desligado, o fluxo armazenado é transferido para os enrolamentos secundários, permitindo que a energia alcance as células com menor carga.

Figura 12 – Balanceador ativo baseado em um conversor Flyback de múltiplas saídas

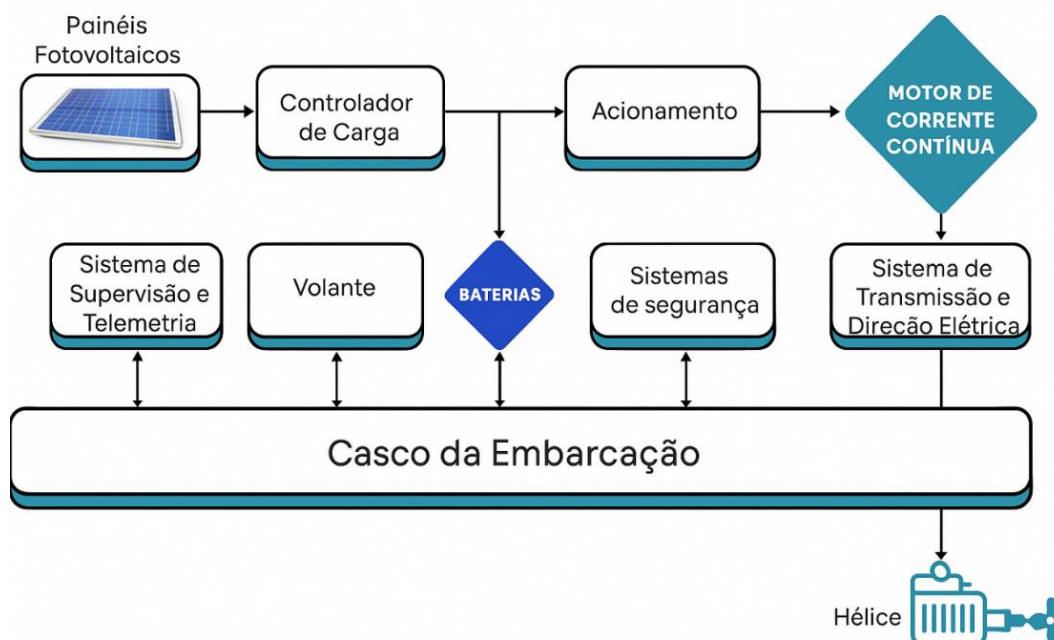


Fonte: Moghaddam e Van Den Bossche (2019).

3 METODOLOGIA

Este capítulo apresenta os procedimentos metodológicos adotados para o desenvolvimento, implementação e validação de um sistema de balanceamento ativo baseado em um conversor Flyback com múltiplas saídas. A escolha dessa abordagem foi motivada pela necessidade de garantir maior eficiência energética, segurança operacional e uniformidade no estado de carga entre as células da bateria, atendendo aos requisitos do Guarapuvú II, uma embarcação fotovoltaica projetada para participação em competições de barcos solares. A Figura 13 ilustra os principais componentes que integram o sistema da embarcação.

Figura 13 – Diagrama de blocos do barco solar Guarapuvú II



Fonte: Elaboração Própria (2025).

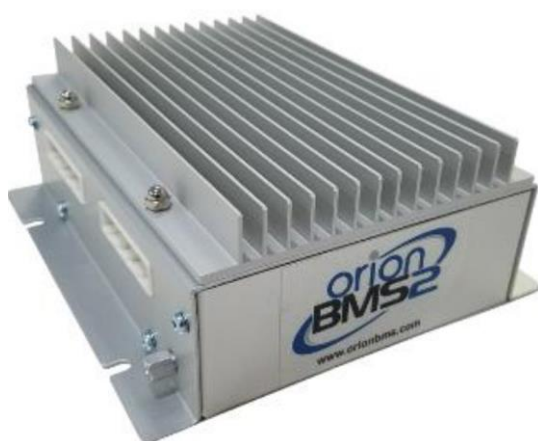
A metodologia adotada neste projeto teve início com um estudo aprofundado sobre baterias de íon-lítio, abordando suas características eletroquímicas, comportamento operacional e limitações associadas à sua utilização em sistemas de armazenamento de energia. Na sequência, foi conduzida uma pesquisa sobre técnicas de balanceamento ativo, com foco em topologias baseadas em conversores estáticos, especialmente aquelas mais adequadas para aplicações embarcadas e em sistemas alimentados por fontes renováveis. Com base nesse estudo, foi possível determinar a topologia mais adequada para o projeto.

A topologia Flyback foi escolhida por ser uma solução prática e eficiente para o balanceamento ativo de baterias. Entre suas vantagens, destaca-se a capacidade de isolar eletricamente os circuitos através do transformador, permitindo a transferência de energia entre as células de forma segura. Além disso, essa topologia possibilita carregar múltiplas células utilizando apenas uma chave no lado primário e elimina a necessidade de monitorar individualmente a tensão de cada célula para fins de controle, o que reduz significativamente a complexidade do projeto.

Foi necessário considerar também os requisitos de segurança exigidos pela competição. A competição obriga todas as equipes participantes a utilizarem um BMS juntamente com a bateria de lítio, sendo assim, optou-se pela utilização de um BMS comercial em conjunto com o sistema de balanceamento desenvolvido. O modelo escolhido foi o Orion BMS 2, ilustrado na Figura 14, amplamente utilizado em veículos elétricos, cuja função era monitorar a tensão, a temperatura e a corrente de cada célula de íon-lítio ao longo de todas as fases de teste.

O número de células adotado para a validação experimental do projeto foi definido com base nas especificações do próprio BMS, que recomenda um mínimo de 7 células para garantir o correto funcionamento do sistema de monitoramento. Além disso, o Guarapuvú II, estando dentro dos limites estabelecidos pela competição, prevê a utilização de 21 células em série. Dessa forma, seria possível utilizar uma estrutura modular com três balanceadores ativos. Isso impôs um critério técnico relevante para a configuração do banco de testes e, conseqüentemente, influenciou diretamente o circuito de balanceamento.

Figura 14 – Orion BMS 2



Fonte: OrionBMS (2019).

Durante os ensaios, foi possível monitorar as tensões individuais de cada uma das células da bateria utilizando a interface de configuração do BMS, que possui uma função de *datalogger*. Desse modo foi possível armazenar os dados em um arquivo .csv e plotar os gráficos posteriormente.

Com a topologia definida e o número de células estabelecido, foram iniciadas as etapas de projeto e simulação do circuito de balanceamento. O dimensionamento dos principais componentes, foi realizado com o apoio de uma planilha de cálculo elaborada no *Smath Studio*. As simulações foram feitas utilizando o software PSIM, a fim de validar o princípio de funcionamento do circuito e ajustes antes da implementação prática.

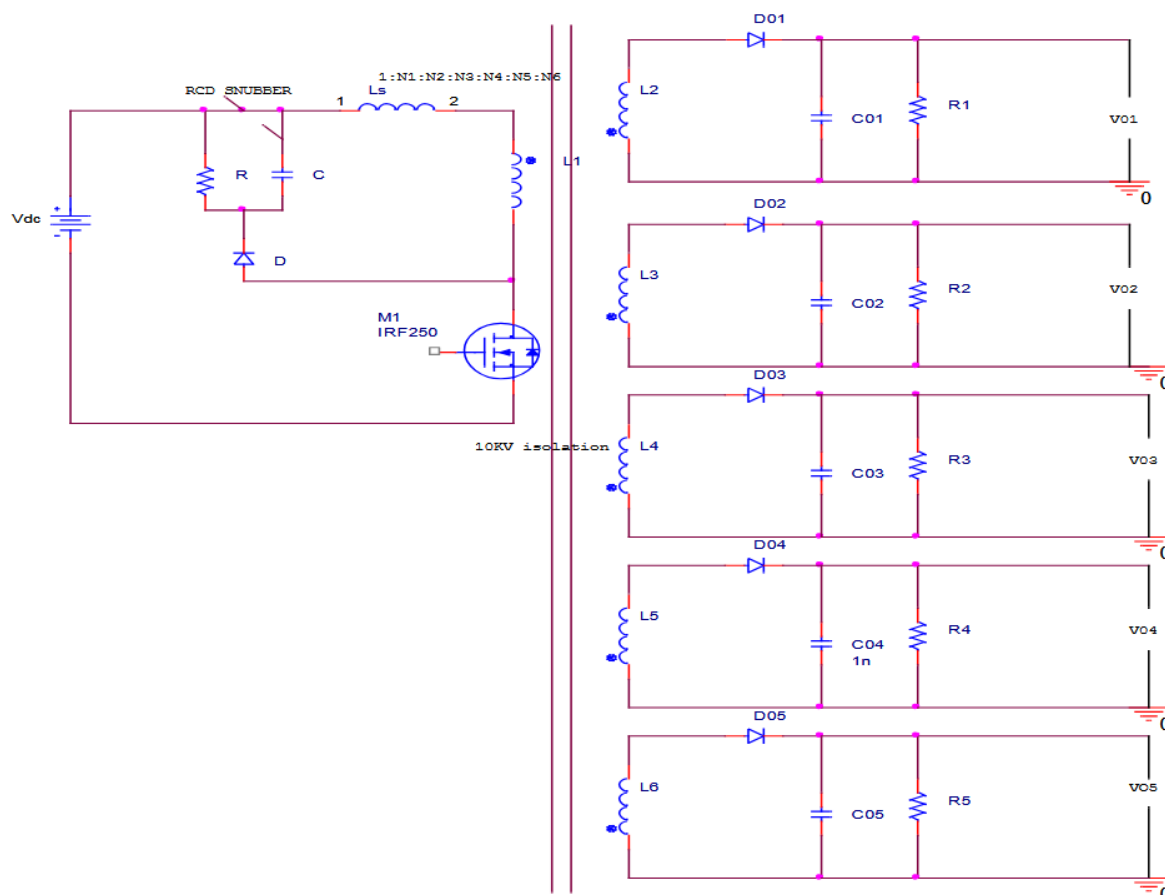
O *layout* da placa de circuito impresso (PCI) foi desenvolvido no *software* KiCad, considerando a organização dos componentes, o isolamento adequado entre as trilhas de sinal e potência, compatibilidade eletromagnética e a otimização do espaço físico disponível. O projeto também contemplou a integração do microcontrolador responsável por gerar o PWM para o acionamento da chave. O *firmware* foi feito em linguagem C, utilizando o ambiente STM32CubeIDE, da STMicroelectronics, utilizando o microcontrolador STM32F103.

Por fim, o protótipo foi montado e submetido a testes experimentais em bancada, utilizando fontes programáveis e um banco de bateria com sete células LTO em série. Durante os ensaios, foram monitorados parâmetros como tempo de equalização, tensões das células e eficiência de transferência de energia. Os resultados obtidos permitiram comparar o desempenho do sistema com o balanceamento passivo e validar a eficácia da solução proposta.

4 PROJETO DO CONVERSOR FLYBACK COM MULTIPLAS SAÍDAS

Este capítulo descreve o processo de dimensionamento e seleção dos componentes utilizados no desenvolvimento do conversor Flyback com múltiplas saídas, empregado no sistema de balanceamento ativo proposto, a Figura 15 demonstra a sua topologia convencional. A estrutura do conversor foi projetada especificamente para atender aos requisitos da técnica de balanceamento baseada na transferência de energia entre células de um banco de baterias de íon-lítio.

Figura 15 – Circuito de um conversor Flyback com múltiplas saídas



Fonte: Naresh, Umavathi e mohan (2014).

Para que a técnica de balanceamento ativa proposta funcione de maneira adequada, alguns requisitos específicos devem ser atendidos no projeto do conversor Flyback:

- A relação de transformação do transformador deve ser igual ao número de saídas, ou seja, ao número de células conectadas ao circuito. Essa configuração permite que a energia armazenada no primário seja

dividida proporcionalmente entre os secundários, respeitando a lógica de redistribuição de energia entre as células com diferentes estados de carga;

- A indutância do enrolamento primário deve ser suficientemente alta para armazenar a quantidade necessária de energia durante o tempo em que o interruptor permanece conduzindo.

O projeto tem como expectativa atender às seguintes especificações técnicas:

Tabela 2 – Especificações técnicas do conversor

Parâmetro	Valor	Unidade
Potência Nominal de Saída	32,2	W
Tensão nominal de Saída	2,3	V
Corrente Nominal de Saída	2	A
Frequência de Chaveamento	25	kHz
Relação de Transformação	1/7	---
<i>Duty Cycle</i>	50	%

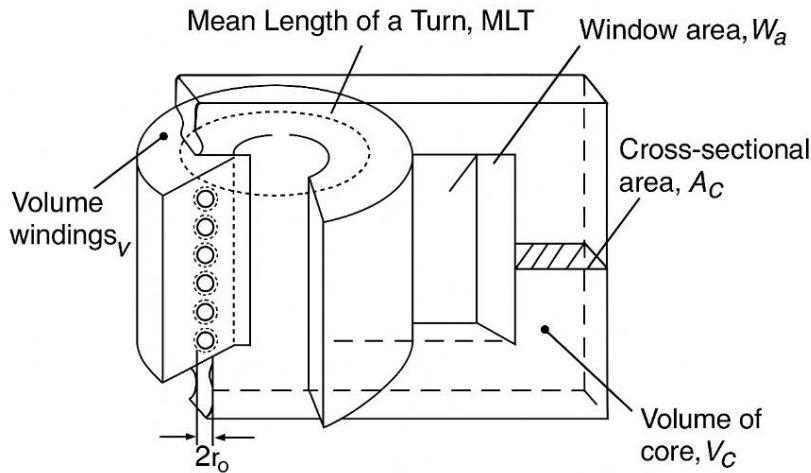
Fonte: Elaboração Própria (2025).

As equações apresentadas foram baseadas em Barbi (2007), Petry e Perin (2000).

4.1 Transformador

Para projetar um transformador de um conversor Flyback, é preciso definir uma série de parâmetros que assegurem o correto armazenamento e transferência de energia durante os ciclos de comutação. A imagem da Figura 16 ilustra os principais elementos físicos que compõem um transformador, os quais devem ser considerados no processo de dimensionamento.

Figura 16 – Layout típico de um transformador



Fonte: Adaptado de Hurley e Wölfle (2013).

4.1.1 Núcleo

Primeiramente, deve-se definir qual será o núcleo utilizado no transformador. Para isso foi considerado uma combinação de critérios elétricos, magnéticos e térmicos, que assegurem o funcionamento adequado do conversor Flyback na aplicação proposta. O núcleo precisa ser capaz de armazenar energia sem saturar e oferecer espaço suficiente para acomodar todos os enrolamentos.

Para a escolha do núcleo, é utilizada uma equação que relaciona a potência de saída com os parâmetros físicos do núcleo. A expressão adotada é:

$$A_e A_w = \frac{1.1 * P_o}{K_p * K_w * J * f_s * \Delta B} * 10^4 \quad (1)$$

Onde:

- A_e é a área da seção transversal do núcleo;
- A_w é a área da janela útil para enrolamento;
- K_p é o fator de utilização do enrolamento primário;
- K_w é o fator de utilização da área da janela;
- J é a densidade de corrente nos condutores;
- ΔB é a variação da densidade de fluxo magnético no núcleo.

Os valores utilizados de K_p , K_w , J e ΔB foram extraídos de valores típicos extraídos da literatura. Sendo assim:

$$A_e A_w = \frac{1.1 * 32,2}{0,5 * 0.4 * 300 * 25 * 10^3 * 0.20} * 10^4$$

$$A_e A_w = 1,1807 \text{ cm}^4$$

Este valor representa o tamanho mínimo que o núcleo precisa ter para suportar a potência desejada, considerando sua capacidade magnética e o espaço físico disponível para os enrolamentos. Para a escolha do núcleo, foram analisados os modelos de ferrite do tipo E disponíveis no mercado. A Tabela 3 apresenta algumas opções consideradas durante o processo de seleção, com destaque para suas principais características.

Tabela 3 – Núcleos de ferrite tipo E

Núcleo	A _e (cm ²)	A _w (cm ²)	L _e (cm)	V _e (cm ³)	A _e A _w (cm ⁴)
E-30/7	0,60	0,80	6,70	4,00	0,48
E-30/14	1,20	0,85	6,70	8,00	1,02
E-40/12	1,43	1,49	7,70	11,30	2,13
E-42/15	1,81	1,57	9,70	17,10	2,84
E-42/20	2,40	1,57	9,70	23,30	3,77
E-55	3,54	2,50	11,6	42,50	8,85

Fonte: Adaptado de Thornton, (2025).

Assim foi definido o NEE-40/17/12 da Thornton como o núcleo do transformador do projeto.

4.1.2 Entreferro

A energia acumulada no indutor acoplado do enrolamento primário é definida pela Equação 2. Para calcular o entreferro necessário, utilizou-se a Equação 3, que leva em consideração os parâmetros magnéticos do núcleo.

$$\Delta W = \frac{P_o}{\eta * f_s} \quad (2)$$

$$\Delta W = \frac{32,2}{7 * 25 * 10^3}$$

$$\Delta W = 1,431 \text{ mJ}$$

$$\delta = \frac{2 * \mu_o * \Delta W}{\Delta B^2 * A_e * 10^{-4}} \quad (3)$$

$$\delta = \frac{2 * 4\pi * 10^{-7} * 1,431 * 10^{-3}}{0,04 * 1,43 * 10^{-4}}$$

$$\delta = 0,31 \text{ mm}$$

Durante a construção do transformador, o entreferro foi distribuído igualmente entre os dois lados do núcleo, portanto o valor foi dividido por dois.

$$lg = \frac{\delta}{2} \quad (4)$$

$$lg = 0,15 \text{ mm}$$

4.1.3 Condutores

Devido as restrições do projeto, a relação de transformação deve ser igual a 7. Levando em consideração limites de tamanho do núcleo optou-se por utilizar 14 espiras no enrolamento primário e 2 espiras nos enrolamentos secundários.

A corrente pico no enrolamento primário e nos secundários é dada pelas Equação 5 e Equação 6.

$$I_p = \frac{2 * P_o}{\eta * V_{bat} * D} \quad (5)$$

$$I_p = \frac{2 * 32,2}{0,9 * 16,1 * 0,5}$$

$$I_p = 8,889 \text{ A}$$

$$I_s = \frac{I_p * \frac{N_p}{N_s}}{n_{saidas}} \quad (6)$$

$$I_s = \frac{8,889 * 7}{7}$$

$$I_s = 8,889 \text{ A}$$

A fim de determinar o diâmetro dos fios condutores do transformador, primeiramente foi definida a profundidade de penetração do campo, dada pela Equação 7, e o diâmetro máximo, dado pela Equação 8.

$$\Delta = \frac{2 * 7,5}{\sqrt{f_s}} \quad (7)$$

$$\Delta = 0,095 \text{ cm}$$

$$d_{max} = 2\Delta \quad (8)$$

$$d_{max} = 0,19 \text{ cm}$$

Após isso foram analisados diferentes modelos de fios esmaltados comumente utilizados como condutores de transformadores, demonstrados na Tabela 4.

Tabela 4 – Fios esmaltados

AWG	Diâmetro Cobre (cm)	Área Cobre (cm ²)	Diâmetro Isolamento (cm)	Área Isolamento (cm ²)	OHMS/CM 20°C
15	0,145	0,016504	0,156	0,019021	0,000104
16	0,129	0,013088	0,139	0,015207	0,000132
17	0,115	0,010379	0,124	0,012164	0,000166
18	0,102	0,008231	0,111	0,009735	0,000209
19	0,091	0,006527	0,100	0,007794	0,000264

Fonte: Adaptado de Barbi (2007).

A partir da Tabela 4, verifica-se que o fio AWG 17 satisfaz o diâmetro mínimo e máximo exigidos. O número de fios em paralelo no enrolamento primário é definido com base na corrente eficaz e a área transversal do condutor.

$$I_{p_{ef}} = I_p * \sqrt{\frac{D}{3}} \quad (9)$$

$$I_{p_{ef}} = 8,889 * \sqrt{\frac{0,5}{3}}$$

$$I_{p_{ef}} = 3,63 \text{ A}$$

$$S_p = \frac{I_{p_{ef}}}{J} \quad (10)$$

$$S_p = 0,0121 \text{ cm}^2$$

$$n_p = \frac{S_p}{A_{cu}} \quad (11)$$

$$n_p = \frac{0,0121}{0,010379} \approx 1$$

De mesmo modo, é possível determinar a quantidade de fios em paralelo nos secundários.

$$I_{s_ef} = I_s * \sqrt{\frac{1-D}{3}} \quad (12)$$

$$I_{s_ef} = 8,889 * \sqrt{\frac{1-0,5}{3}}$$

$$I_{s_ef} = 3,63 \text{ A}$$

$$S_s = \frac{I_{s_ef}}{J} \quad (13)$$

$$S_s = 0,0121 \text{ cm}^2$$

$$n_s = \frac{S_s}{A_{cu}} \quad (14)$$

$$n_s = \frac{0,0121}{0,010379} \approx 1$$

Após a definição do tipo e quantidade de fios utilizados nos enrolamentos primário e secundário, é necessário verificar se o conjunto de condutores pode ser fisicamente acomodado na janela do núcleo selecionado. Para isso, foi calculado o fator de ocupação, que representa a razão entre a área total dos condutores de cobre e a área útil disponível na janela do núcleo.

$$A_{wneces} = N_p * n_p * S_p + \sum_{k=1}^{n_{saidas}} (N_s * n_s * S_s) \quad (15)$$

$$A_{wneces} = 14 * 1 * 0,0121 + \sum_{k=1}^7 (2 * 1 * 0,0121)$$

$$A_{wneces} = 0,3406 \text{ cm}^2$$

$$K_{ocup} = \frac{A_{wneces}}{A_w} \quad (16)$$

$$K_{ocup} = \frac{0,3406}{1,49} = 0,2286$$

$$K_{ocup} < 0,3$$

A Equação 16, representado pela constante K_{ocup} , expressa a fração da área disponível na janela do núcleo que é efetivamente ocupada pelos condutores do transformador. Esse valor leva em consideração o isolamento dos fios, espaçamentos entre espiras e outras perdas de preenchimento. Normalmente, assume-se um valor máximo de 0,3 para transformadores produzidos manualmente.

4.1.4 Indutância Magnetizante

A indutância magnetizante do enrolamento primário é calculada com base na variação de densidade de fluxo magnético, na área efetiva do núcleo e no número de espiras do enrolamento primário.

$$L_m = \frac{N_p * \Delta B * A_e * 10^{-4}}{I_p} \quad (17)$$

$$L_m = \frac{7 * 0,20 * 1,49 * 10^{-4}}{8,889}$$

$$L_m = 45,05 \mu H$$

O valor obtido atende ao requisito mínimo de armazenamento de energia estabelecido pelo método de balanceamento ativo, garantindo que o transformador opere corretamente durante o ciclo de comutação, com tempo de carga e descarga equilibrados.

4.1.5 Perdas no Transformador

Para calcular as perdas no transformador, ela foi dividida em duas componentes: perdas no núcleo e perdas nos enrolamentos.

As perdas no núcleo foram estimadas utilizando a equação empírica,

Equação 18, baseada em ΔB , frequência de comutação e constantes do material. Sendo, K_H o coeficiente de perdas por histerese e K_E o coeficiente de perdas por correntes parasitas. Ambos os valores foram retirados da literatura.

$$P_C = \Delta B_m^{2,4} * (K_H * f + K_E * f^2) * V_e \quad (18)$$

$$P_C = 0,2^{2,4} * (4 * 10^{-5} * 25 * 10^3 + 4 * 10^{-10} * (25 * 10^3)^2) * 1,34$$

$$P_C = 0,2968 \text{ W}$$

As perdas nos condutores foram calculadas separadamente para os enrolamentos primário e secundários, com base na resistência dos fios e nas correntes eficazes. A resistência dos condutores foi obtida com as Equações 19 e 20.

$$R_p = N_p * \frac{\rho_p}{n_p} * l_t \quad (19)$$

$$R_p = 14 * \frac{0,000166}{1} * 7,7 = 0,018 \Omega$$

$$R_s = N_s * \frac{\rho_s}{n_s} * l_t \quad (20)$$

$$R_s = 2 * \frac{0,000166}{1} * 7,7 = 0,0026 \Omega$$

As perdas nos enrolamentos são então:

$$P_{Cu} = R_p * I_{p_{ef}}^2 + n_{saídas} * R_s * I_{s_{ef}}^2 \quad (21)$$

$$P_{Cu} = 0,018 * 3,63^2 + 7 * 0,0026 * 3,63^2$$

$$P_{Cu} = 0,4713 \text{ W}$$

A perda total no transformador é a soma das duas componentes.

$$P_{Total} = P_C + P_{Cu} \quad (22)$$

$$P_{Total} = 0,2968 + 0,4713$$

$$P_{Total} = 0,7681 \text{ W}$$

4.2 Diodos

Os diodos utilizados na saída de cada enrolamento secundário do transformador devem suportar as condições de corrente e tensão impostas pelo

processo de transferência de energia do conversor Flyback. O dimensionamento foi realizado com base nas correntes de pico, eficaz e média, além da tensão reversa máxima que o componente estará sujeito.

A corrente de pico e eficaz nos diodos equivalem à corrente de pico e eficaz dos enrolamentos secundários. A corrente média durante a condução do diodo foi calculada considerando o tempo de condução ativo T_{on} em relação ao período total de comutação.

$$I_{Dmed} = \frac{I_s * T_{on}}{2 * T} \quad (23)$$

$$I_{Dmed} = \frac{8,889 * 2 * 10^{-5}}{2 * 4 * 10^{-5}}$$

$$I_{Dmed} = 2,22 \text{ A}$$

A tensão de pico no diodo é determinada pela soma da tensão de saída com a tensão refletida da entrada.

$$V_{d_pk} = |V_o| + V_{in} * \frac{N_s}{N_p} \quad (24)$$

$$V_{d_pk} = |2,3| + 16,1 * \frac{2}{14}$$

$$V_{d_pk} = 4,6 \text{ V}$$

Com base nesses parâmetros, foi escolhido o diodo V40D103C, Ilustrado na Figura 17, devido à sua baixa tensão direta, o que contribui para reduzir as perdas. Cada encapsulamento possui dois diodos com o terminal do catodo em comum, sendo assim foi utilizado dois diodos em paralelo em cada saída. Os seus principais parâmetros estão listados na Tabela 5.

Figura 17 – Diodo V40D103C



Fonte: Mouser (2025).

Tabela 5 – Parâmetros do diodo escolhido

Parâmetro	Símbolo	Valor	Unidade
Tensão reversa máxima	V_{RRM}	100	V
Corrente de pico direta	I_{pd}	340	A
Tensão de direta	V_F	0,35	V
Temperatura máxima da junção	T_{jmax}	150	°C
Corrente média direta	I_F	20	A
Resistência de condução direta	r_t	25	mΩ

Fonte: Elaboração Própria (2025).

A partir disso, foi possível calcular as perdas nos diodos, utilizando a Equação 25.

$$P_d = 7 * (V_F * I_{d_{med}} + r_t * I_{d_{ef}}^2) \quad (25)$$

$$P_d = 7 * (0,32 * 2,22 + 25 * 10^{-3} * 3,63^2)$$

$$P_d = 7,28 \text{ W}$$

4.3 Especificações do Transistor

Com o dimensionamento do transformador concluído, é possível determinar a corrente média e a tensão máxima na chave. A corrente de pico da chave equivale à corrente de pico no enrolamento primário.

$$I_{T_med} = \frac{V_{bat} * D^2}{2 * f_s * L_m} \quad (26)$$

$$I_{T_med} = \frac{16,1 * 0,5^2}{2 * 25 * 10^3 * 45 * 10^{-6}}$$

$$I_{T_med} = 1,78 \text{ A}$$

$$V_{T_max} = V_{bat} + (V_o + V_d) * \frac{N_p}{N_s} \quad (27)$$

$$V_{T_max} = 16,1 + (2,3 + 0,35) * \frac{14}{2}$$

$$V_{T_max} = 34,65 \text{ V}$$

Com base nos valores calculados e na disponibilidade no laboratório, foi selecionado o MOSFET IRFP2907PbF da Infineon, seus principais parâmetros estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Parâmetros do transistor escolhido

Transistor	V _{DSS}	I _D	R _{DS(on)}	C _{iss}	T _r
IRFP2907PbF	75 V	209 A	4,5 mΩ	13000 pF	190 ns

Fonte: Elaboração Própria (2025).

4.3.1 Resistor de Gate

O resistor de *gate* é utilizado para controlar a velocidade de comutação do MOSFET, limitando a corrente de carga e descarga da capacitância interna da porta. O valor do resistor foi dimensionado com base na capacitância de entrada do MOSFET, na tensão de controle aplicada ao *gate* e no tempo de subida desejado.

$$R_g = \frac{t_r}{2,2 * C_{iss}} \quad (28)$$

$$R_g = \frac{190 * 10^{-9}}{2,2 * 13000 * 10^{-12}}$$

$$R_g = 6,64 \Omega$$

4.3.2 Gate Driver

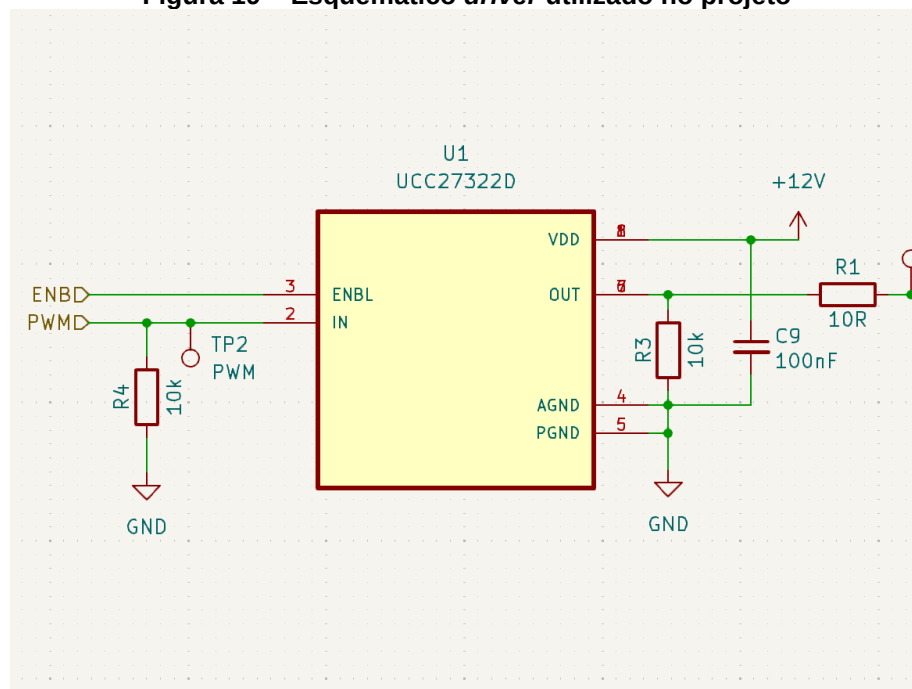
Para o acionamento do MOSFET foi utilizado o driver UCC27322D, fabricado pela Texas Instruments, ilustrado na Figura 18. O diagrama esquemático do driver que será utilizado é apresentado na Figura 19.

Figura 18 – Gate driver escolhido



Fonte: Mouser (2025).

Figura 19 – Esquemático driver utilizado no projeto



Fonte: Elaboração própria (2025).

4.3.3 Perdas

As perdas totais no transistor foram divididas em perdas por condução e perdas por comutação. A perda por condução ocorre durante o tempo em que o MOSFET permanece ligado, sendo determinada pela resistência de condução $R_{DS(on)}$.

$$P_{cond} = R_{DS(on)} * I_{S_{ef}}^2 \quad (29)$$

$$P_{cond} = 4,5 * 10^{-3} * 3,63^2$$

$$P_{cond} = 0,059 \text{ W}$$

A perda por comutação é calculada com base nos tempos de subida e descida do sinal, na frequência de chaveamento na corrente de pico e na tensão máxima no dreno, como representado na Equação 30.

$$P_{com} = \frac{f_s}{2} * (t_r + t_f) * I_p * V_{T_{max}} \quad (30)$$

$$P_{com} = \frac{25 * 10^3}{2} * (190 + 130) * 10^{-9} * 8,889 * 34,65$$

$$P_{com} = 1,23 \text{ W}$$

Com as perdas calculadas separadamente, é possível determinar a perda total no MOSFET.

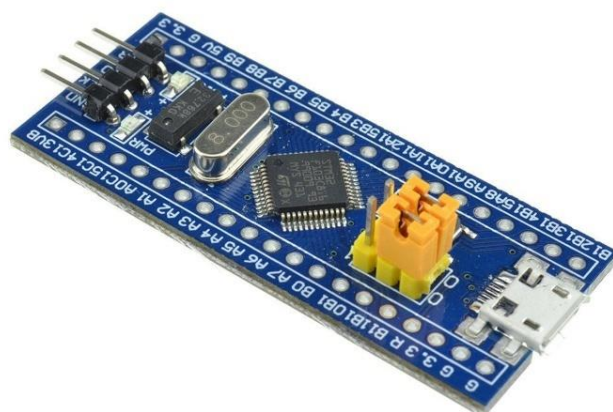
$$P_{total} = P_{cond} + P_{com} \quad (31)$$

$$P_{total} = 1,30 \text{ W}$$

4.4 Microcontrolador

O microcontrolador utilizado no projeto foi o STM32F103C8T6, da STMicroelectronics, baseado no núcleo ARM Cortex-M3. Para facilitar a integração com a placa de circuito impresso (PCI), foi empregado na placa de desenvolvimento, ilustrada na Figura 20, para reduzir a complexidade de soldagem e montagem do protótipo.

Figura 20 – Placa de desenvolvimento STM32F103C8T6



Fonte: Stm32 (2025).

A função do microcontrolador no sistema é exclusivamente gerar o sinal PWM para acionamento do conversor Flyback, além de controlar o sinal de habilitação (enable) do *gate driver*. Não foram implementadas rotinas de controle dinâmico ou leitura de sensores, visto que o objetivo do protótipo é validar o funcionamento do circuito de balanceamento com um *Duty Cycle* fixo.

5 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos durante o desenvolvimento e validação do balanceador ativo baseado no conversor Flyback com múltiplas saídas. Inicialmente, são demonstrados os resultados obtidos por meio de simulações computacionais, realizadas com o objetivo de verificar o funcionamento da técnica proposta e validar os principais parâmetros do projeto.

Na sequência, é descrito o processo de construção do protótipo físico, incluindo a fabricação da placa de circuito impresso e a montagem dos componentes. Por fim, são apresentados os testes experimentais realizados em bancada com células de íon-lítio do tipo LTO, visando simular o funcionamento da técnica em condições reais de operação.

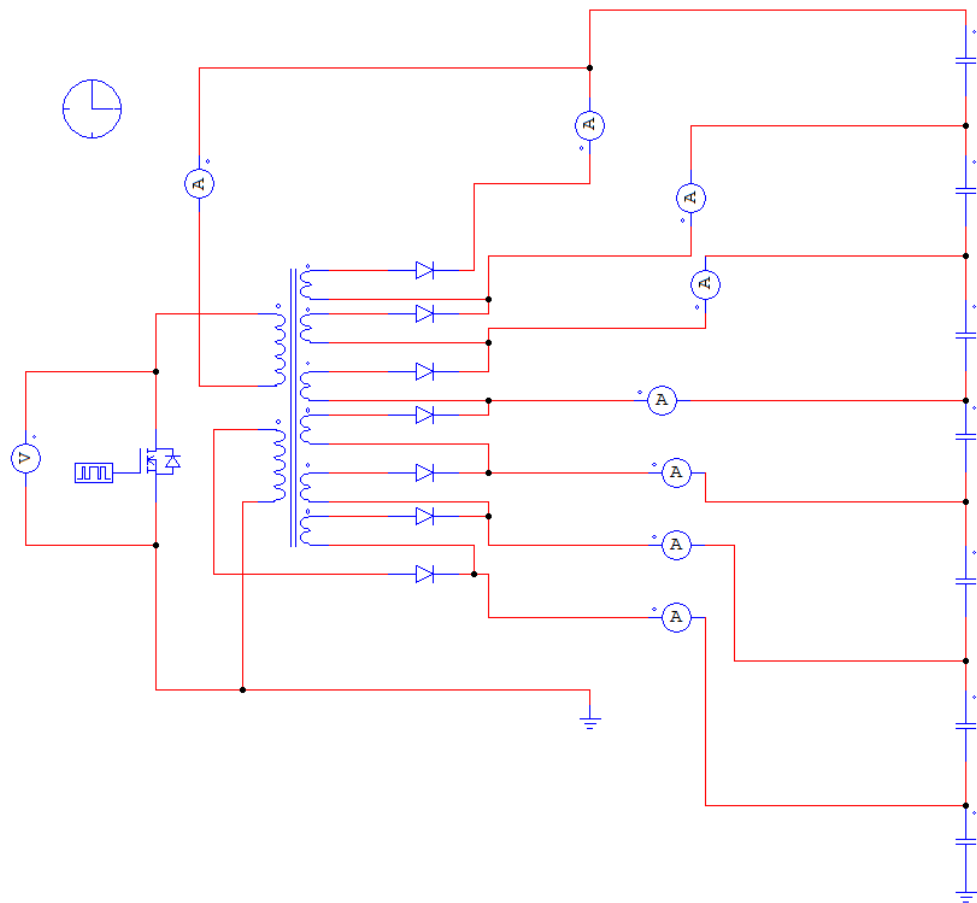
5.1 Resultados Simulados

Antes de fazer o protótipo físico, foram realizadas simulações computacionais com o objetivo de verificar o funcionamento da técnica de balanceamento ativo proposta e validar o comportamento do conversor Flyback de múltiplas saídas. Ambas as simulações foram desenvolvidas utilizando o software PSIM.

A primeira simulação teve como objetivo validar o princípio de funcionamento da técnica de balanceamento ativo. Inicialmente, tentou-se modelar as células de íon-lítio no PSIM, porém, devido às limitações nos modelos matemáticos disponíveis no *software* e a complexidade de criar um modelo matemático das células especificamente para o projeto, não foi possível realizar a simulação com células de lítio.

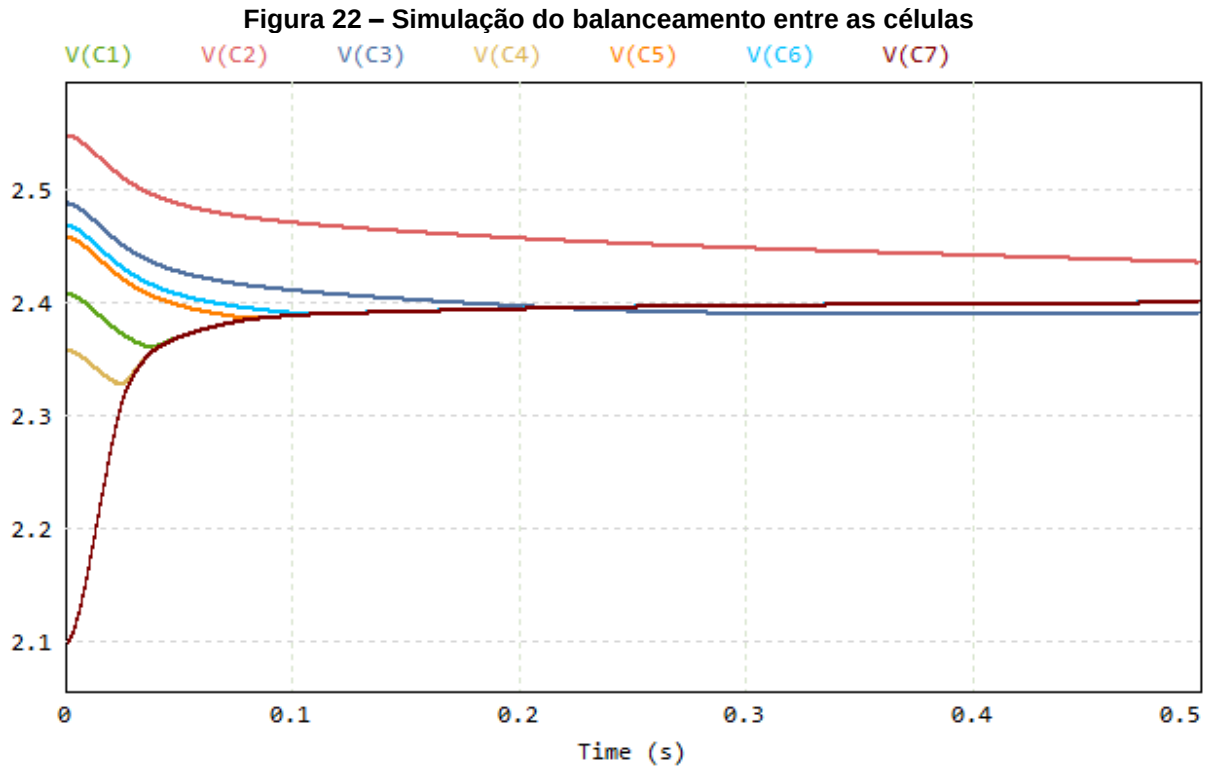
Como alternativa, optou-se por utilizar capacitores de 10 F no lugar das células, representando a capacidade de armazenamento de energia, o esquemático da simulação está representado na Figura 21. Essa abordagem permitiu demonstrar a redistribuição de energia entre os capacitores, comprovando o funcionamento básico da técnica.

Figura 21 – Esquemático da simulação do balanceador



Fonte: Elaboração própria (2025).

Os resultados da simulação indicaram que a energia dos capacitores mais carregados era transferida para os com menos, proporcionalmente ao nível de carga de cada capacitor, resultando no balanceamento progressivo das tensões, como mostra a Figura 22.



Fonte: Elaboração própria (2025).

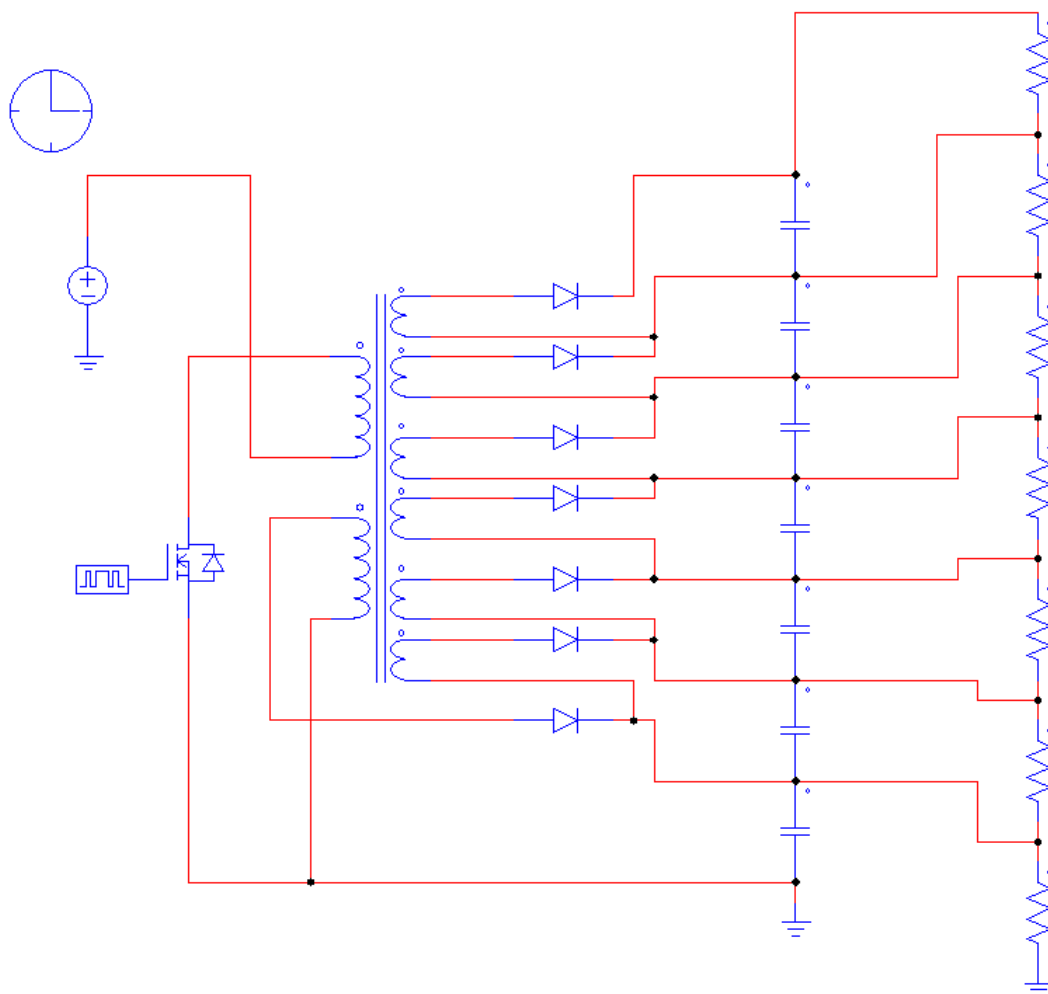
A segunda simulação teve como finalidade a validação do conversor Flyback projetado. Nesse modelo, foi utilizada uma fonte de tensão contínua de 16,1 V, sete células de 2,3 V em série, conectada a entrada do conversor, enquanto eram usadas cargas resistivas nas saídas, ilustrado na Figura 23. Foram calculados também, os valores dos capacitores de saída, para um *ripple* de 15% utilizando a Equação 32.

$$C_o = \frac{I_o * D}{f_s * \Delta V\%} \quad (32)$$

$$C_o = \frac{2 * 0,5}{25 * 10^3 * 0,15}$$

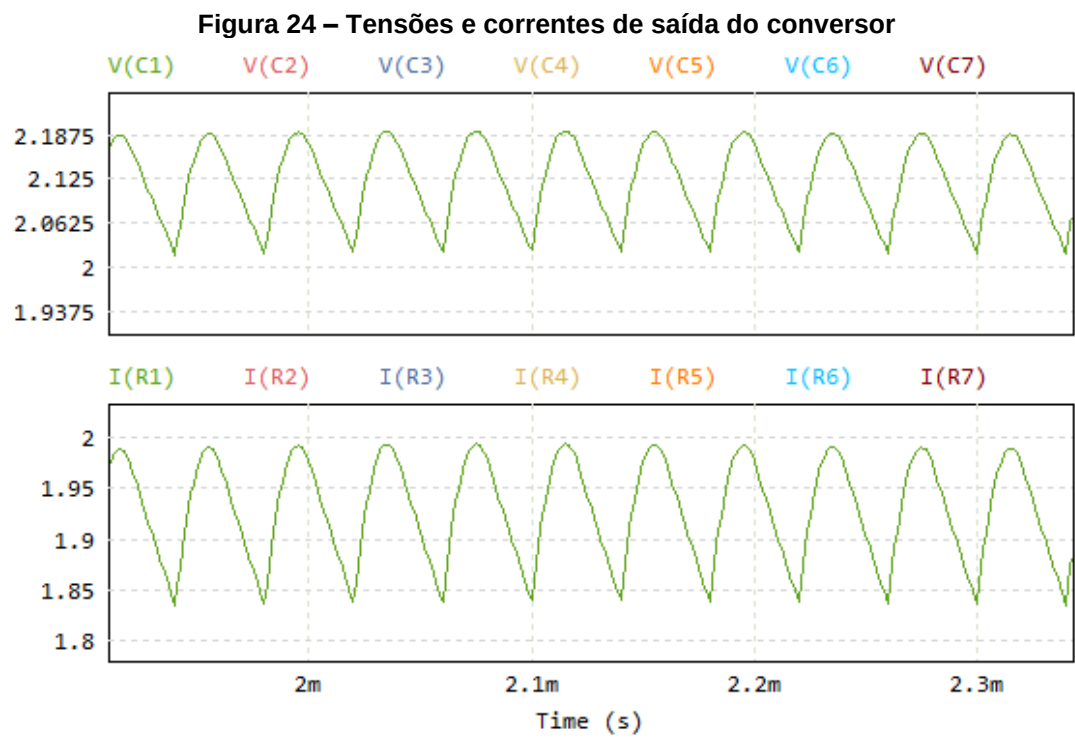
$$C_o = 266,67 \mu F$$

Figura 23 – Esquemático da simulação do conversor Flyback

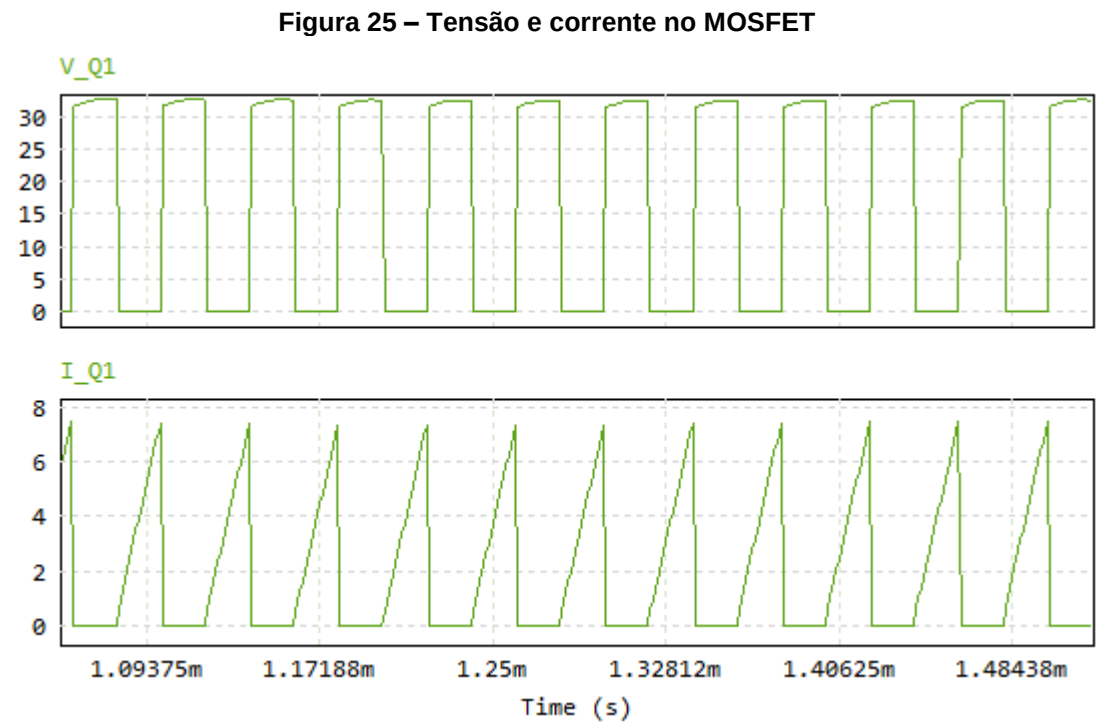


Fonte: Elaboração própria (2025).

Os resultados obtidos da simulação do conversor, ilustrados nas Figuras 24 e 25, apresentaram um comportamento e valores próximos aos teóricos previamente calculados, a Tabela 7 traz uma comparação entre esses valores.



Fonte: Elaboração própria (2025).



Fonte: Elaboração própria (2025).

Tabela 7 – Comparação de valores teóricos e simulados

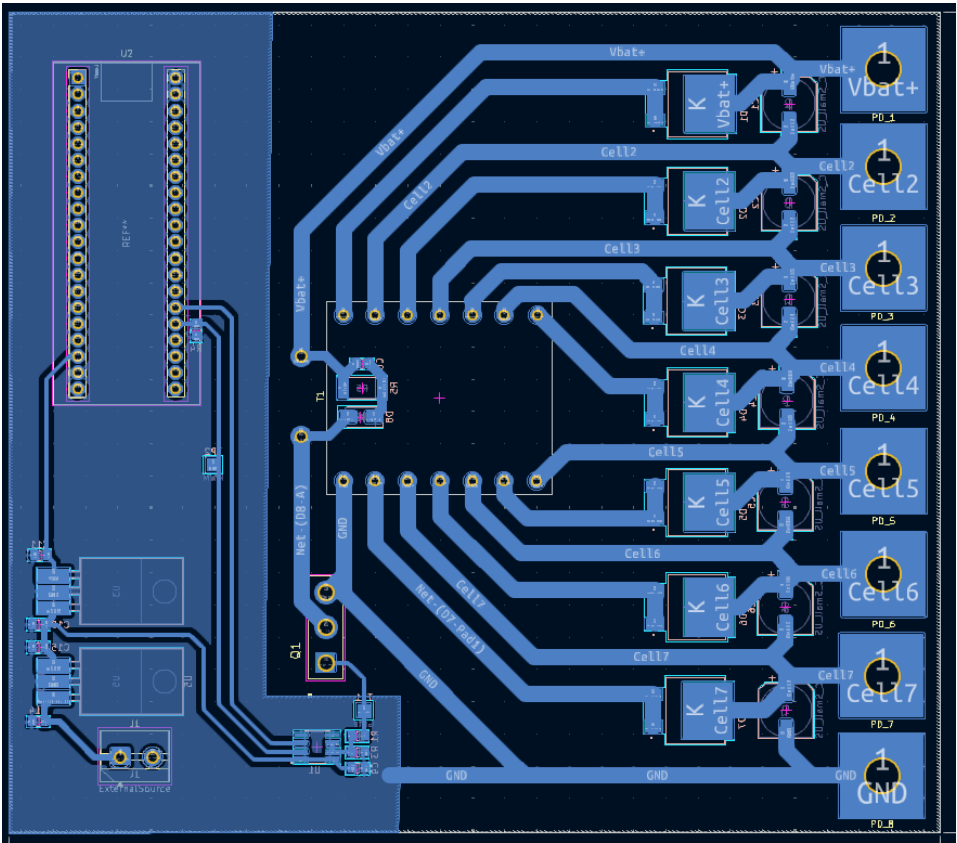
Parâmetro	Calculado	Simulado	Erro
Tensão Med. de Saída	2,3 V	2,12 V	7,83 %
Corrente Med. de Saída	2,22 A	1,93 A	13,06 %
Tensão Max. no MOSFET	34,65 V	32,25 V	6,93 %
Corrente Med. no MOSFET	1,78 A	2 A	12,36 %

Fonte: Elaboração Própria (2024).

5.2 Protótipo

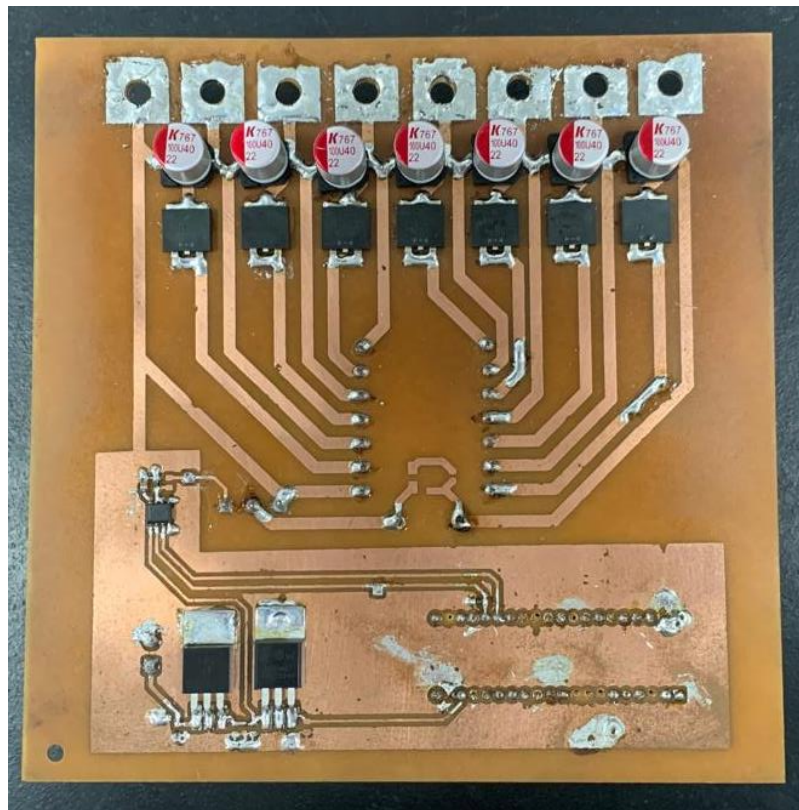
Para a implementação do projeto, o *layout* da PCI, foi desenvolvido utilizando o *software* KiCad, conforme ilustrado na Figura 26. O projeto da placa considerou aspectos como facilidade de soldagem, isolamento adequado entre trilhas e compatibilidade eletromagnética. As Figuras 27 e 28, representam o resultado do protótipo montado.

Figura 26 – Layout da PCI



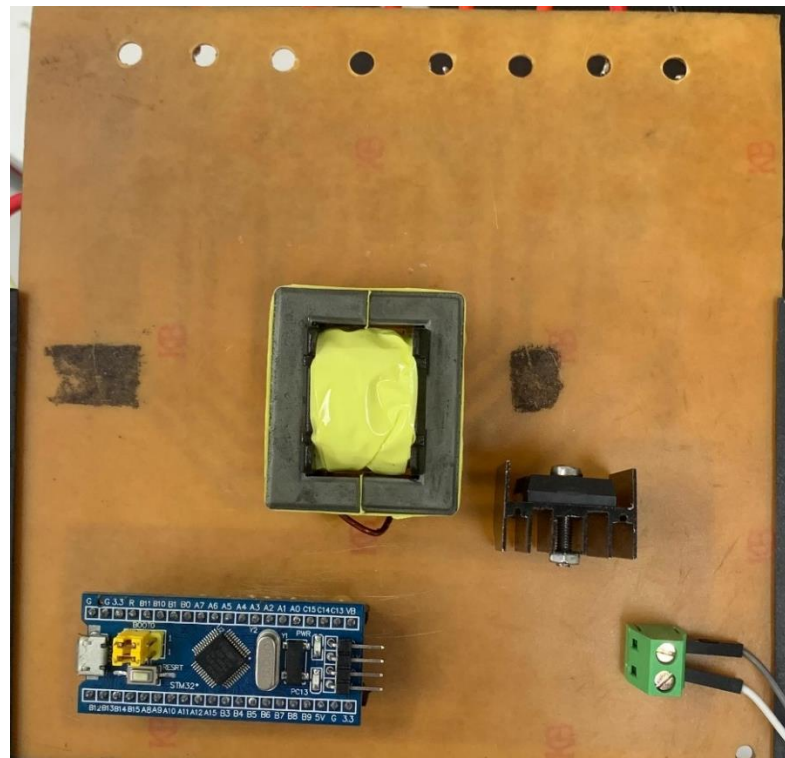
Fonte: Elaboração própria (2025).

Figura 27 – PCI do projeto montada, *bottom*



Fonte: Elaboração própria (2025).

Figura 28 – PCI do projeto montada, *top*



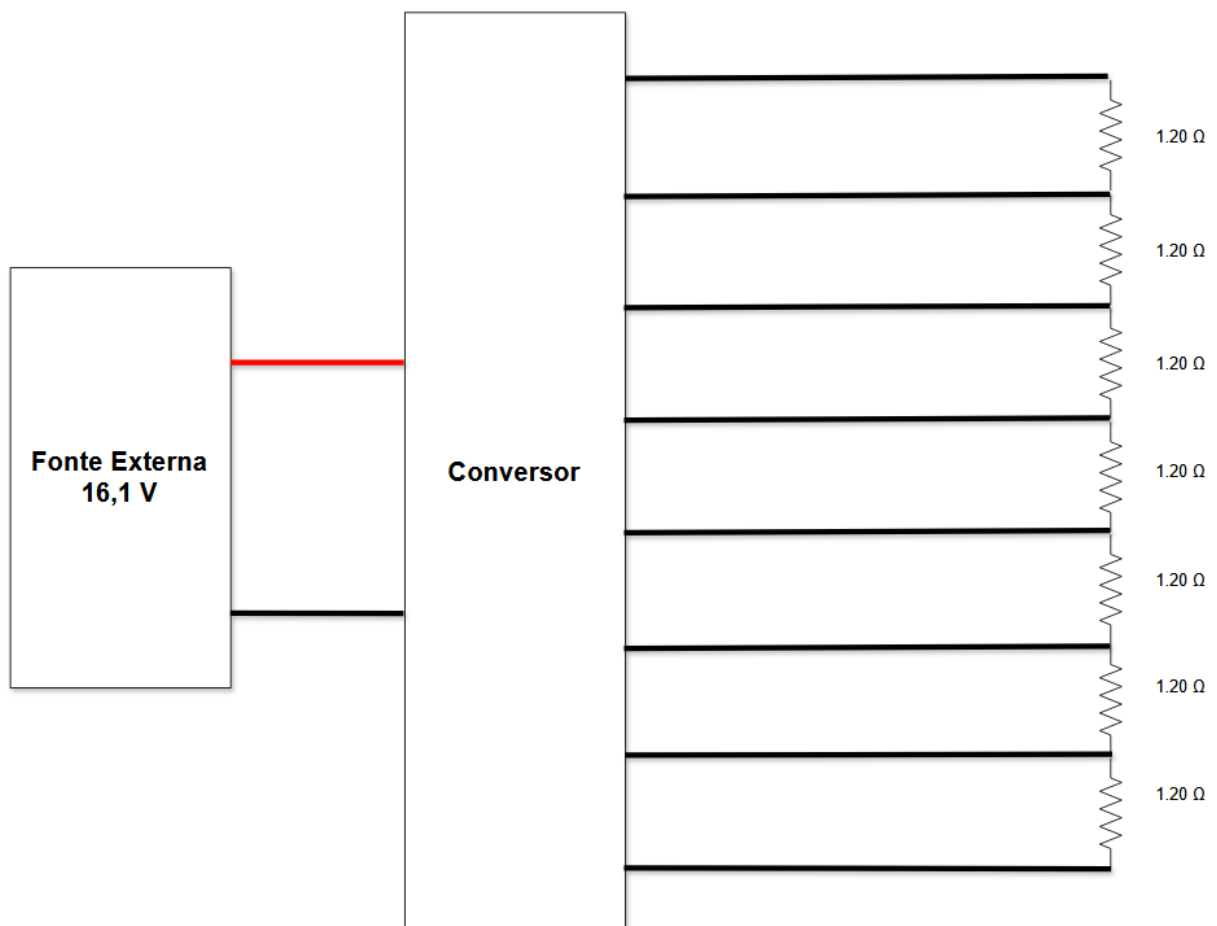
Fonte: Elaboração própria (2025).

5.3 Testes com Carga Resistiva

Com o protótipo montado, o primeiro teste prático realizado teve como objetivo validar o funcionamento do conversor Flyback operando sob as condições nominais para as quais ele foi projetado.

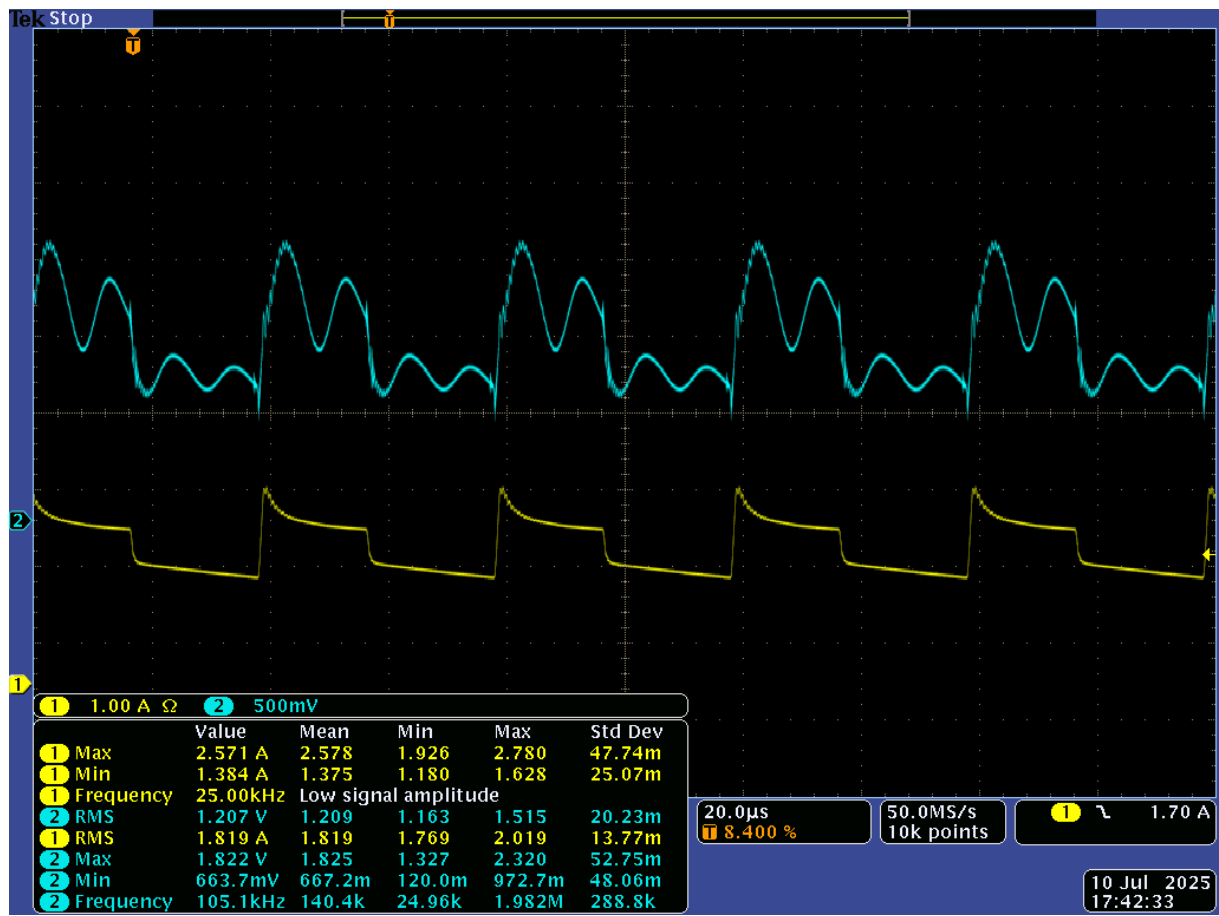
Cada saída foi conectada uma carga resistiva equivalente à $1,2\ \Omega$ (valor calculado para representar a carga nominal correspondente a aproximadamente 2,3 V de saída com corrente média de 2 A). Na entrada do conversor, foi utilizada uma fonte externa em 16,1 V. O diagrama do circuito de teste encontra-se representado na Figura 29. As correntes e as tensões nas saídas do conversor foram medidas utilizando um osciloscópio e estão representadas na Figura 30.

Figura 29 – Diagrama do teste com carga resistiva



Fonte: Elaboração Própria (2025).

Figura 30 – Tensão e corrente de saída do conversor



Fonte: Elaboração própria (2025).

Apesar dos valores de corrente de saída estarem próximos aos estimados no projeto, observou-se que a tensão de saída é significativamente inferior ao valor teórico de 2,3 V, com média de aproximadamente 1,2 V em cada saída. Como resultado, a eficiência do conversor ficou em torno de 52%, indicando que há perdas consideráveis no conversor, possivelmente associadas à queda de tensão nos diodos, perdas no transformador ou limitações na comutação.

5.4 Testes de Balanceamento com Células LTO

O objetivo desta série de testes foi validar experimentalmente a técnica de balanceamento ativo proposta, avaliando seu desempenho em diferentes condições de operação, bem como compará-la com o método de balanceamento passivo.

Para isso primeiramente foi preciso montar a bateria utilizada durante os testes. Foram selecionadas 7 células de LTO da marca Yinlong de 40 AH, as

características dessa célula estão listadas na Tabela 8. Elas foram associadas em série utilizando conectores de cobre e suportes modulares feito com impressão 3D, mostrado na Figura 31.

Tabela 8 – Principais características das células de lítio utilizadas

Tensão Nominal	Tensão Máxima	Tensão Mínima	Peso	Cyclos de Vida
2,3 V	2,8 V	1,5 V	1,25 Kg	30.000
Corrente Máx. de Carga	Corrente Máx. de Descarga	Faixa de temperatura	Capacidade Nom	Resistência Interna
10C (400 A)	10C (400 Ah)	-50 °C a 65 °C	40 AH	< 1 mΩ

Fonte: Adaptado de YinLong ([S.d.]).

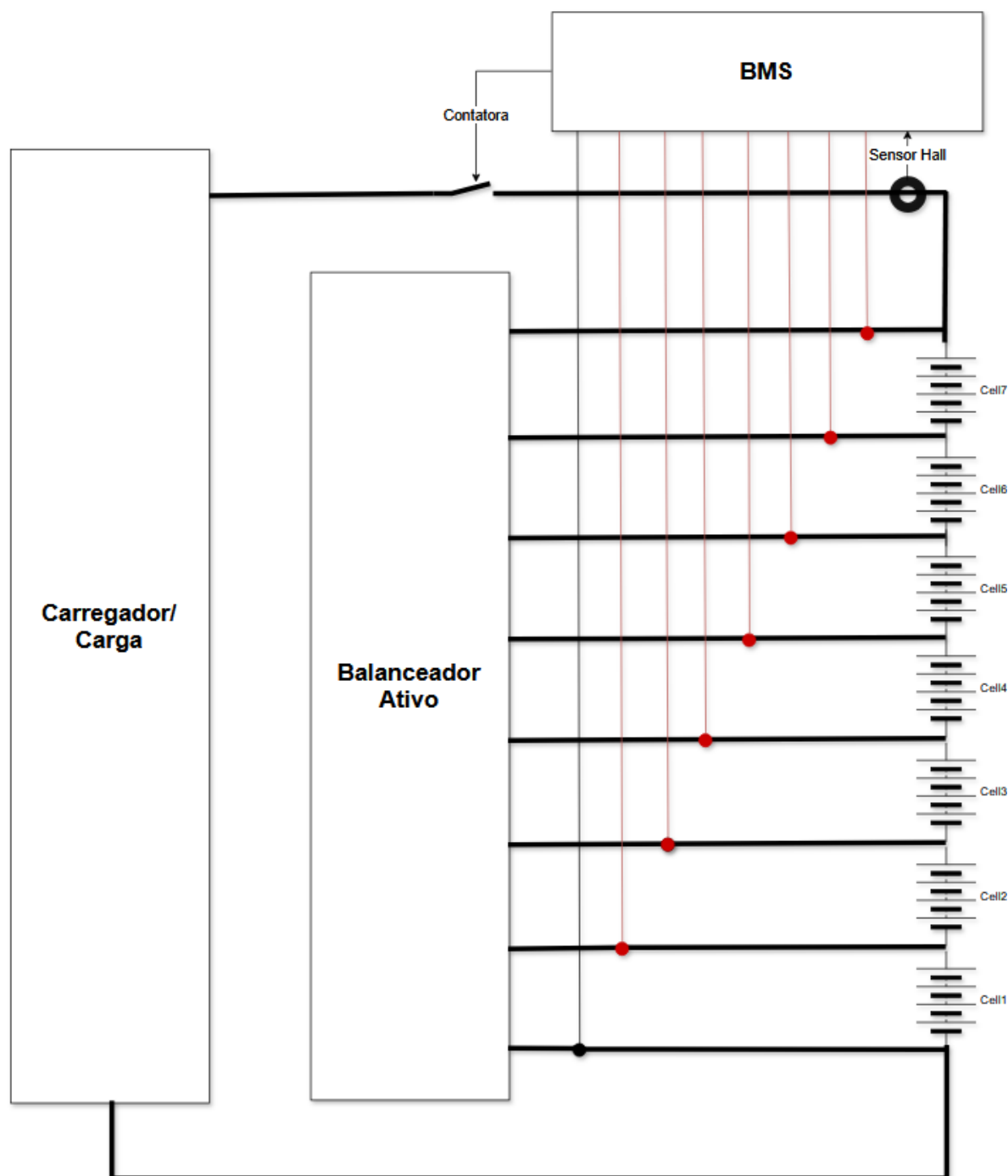
Figura 31 – Foto da bateria montada



Fonte: Elaboração própria (2025).

Durante os testes o BMS sempre foi utilizado tanto para o sensoriamento quanto para a proteção do sistema. A Figura 32 mostra um diagrama que representa a configuração dos componentes utilizados nos testes feitos.

Figura 32 – Diagrama da configuração dos testes



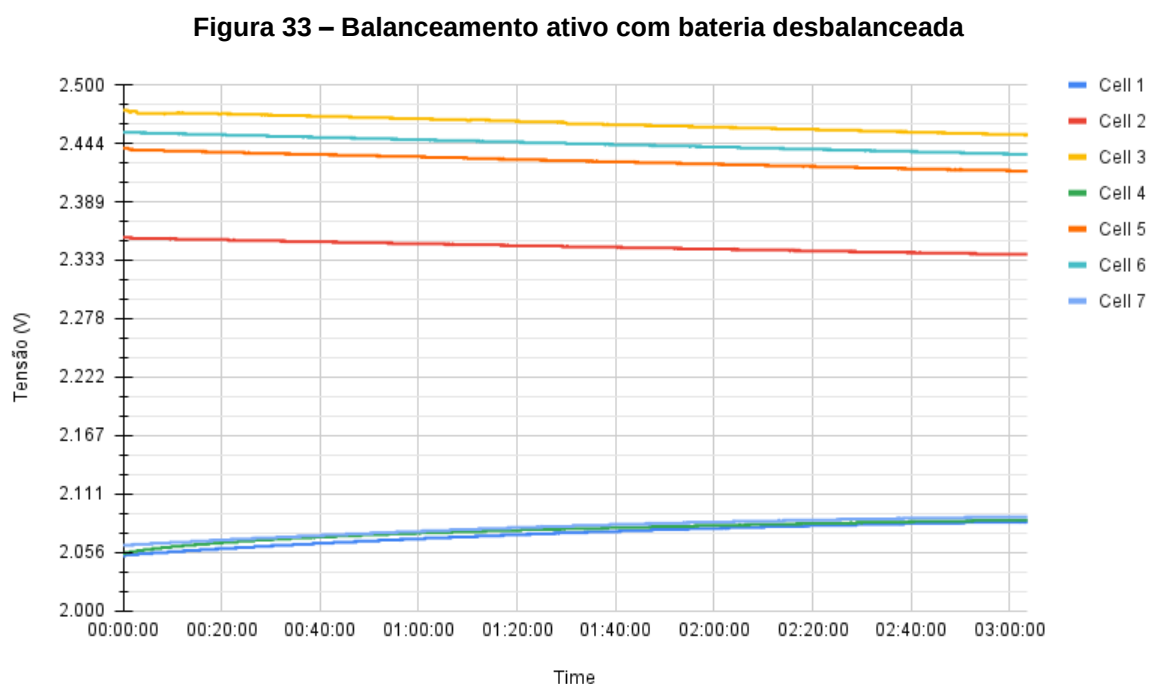
Fonte: Elaboração Própria (2025).

As células foram numeradas de 1 a 7, sendo a célula 1 e a célula 7, a mais negativa e a mais positiva da bateria, respectivamente. O BMS monitora constantemente as tensões das células e a corrente de carga e descarga. Dessa forma, caso o BMS detecte que algum desses parâmetros está fora dos limites pré-definidos, a contatora será desacionada e assim o banco será protegido.

5.4.1 Testes do Balanceador Ativo

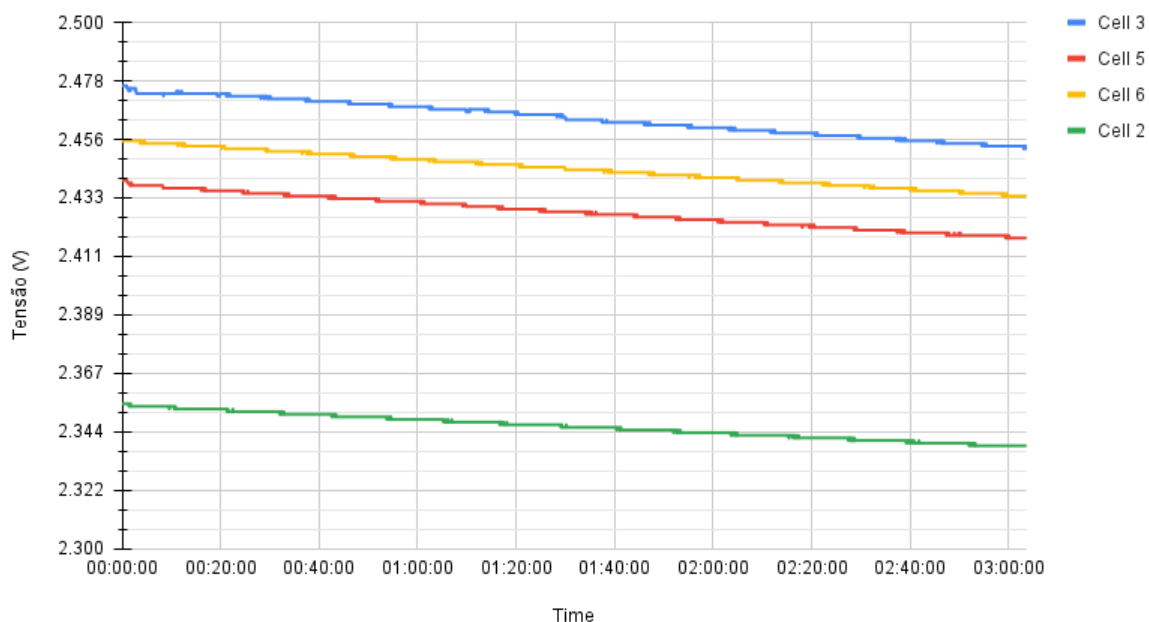
Estes ensaios correspondem aos testes iniciais realizados com o balanceador ativo, cujo objetivo principal era verificar se o sistema era capaz de redistribuir energia entre as células. Por esse motivo, o bloco "Carregador/Carga", representado anteriormente na Figura 33, não foi utilizado nesta etapa.

O teste foi dividido em dois cenários, no primeiro cenário criou-se um desbalanceamento exagerado, distribuindo as tensões de forma assimétrica entre as células. Foram configuradas três células com tensão elevada, uma próxima da tensão nominal e três com carga reduzida. A Figura 33 apresenta o resultado depois de 3 horas de balanceamento.

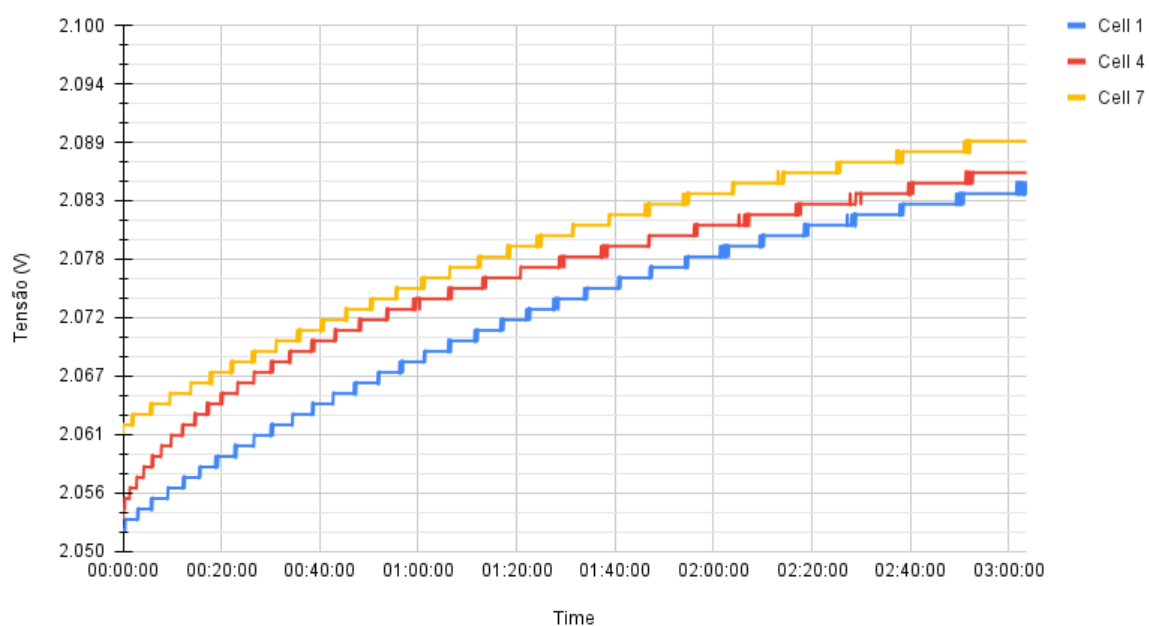


Fonte: Elaboração própria (2025).

Separando as células carregadas e descarregadas, obtém-se dois gráficos ilustrados nas Figuras 34 e 35.

Figura 34 – Balanceamento ativo com bateria desbalanceada, células descarregadas

Fonte: Elaboração própria (2025).

Figura 35 – Balanceamento ativo com bateria desbalanceada, células carregadas

Fonte: Elaboração própria (2025).

Pode-se observar que os gráficos de tensão das células ao longo do tempo demonstraram que as células com maior tensão apresentaram queda gradual, enquanto as células com menor tensão foram carregadas, conforme esperado para a técnica utilizada. As tensões iniciais e finais de cada uma estão listadas na Tabela 9.

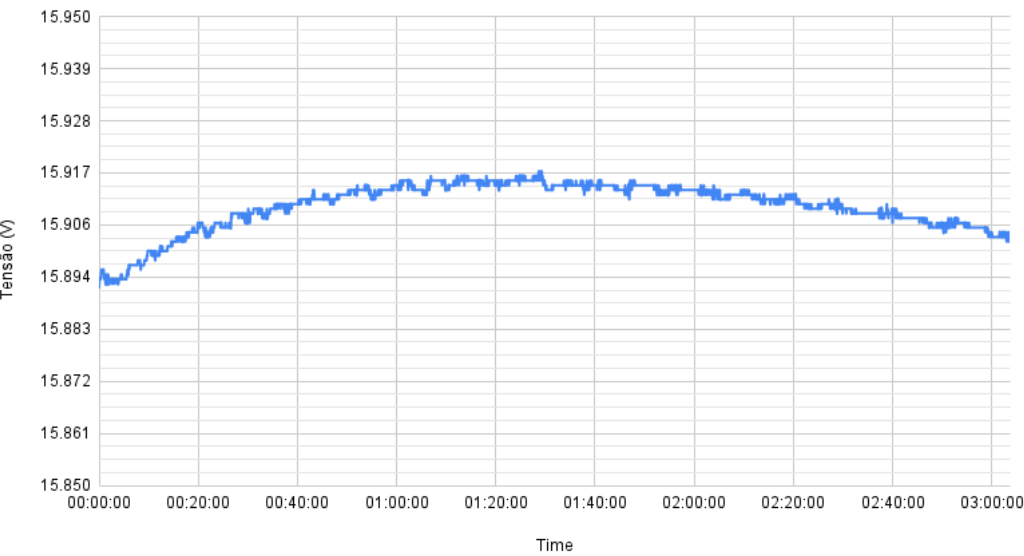
Tabela 9 – Valores de tensão iniciais e finais do teste 1

	Tensão Inicial	Tensão Final	Diferença
Cell 1	2,052 V	2,085 V	0,033 V
Cell 2	2,355 V	2,339 V	-0,016 V
Cell 3	2,476 V	2,452 V	-0,024 V
Cell 4	2,053 V	2,086 V	0,033 V
Cell 5	2,440 V	2,418 V	-0,022 V
Cell 6	2,455 V	2,434 V	-0,021 V
Cell 7	2,061 V	2,089 V	0,028 V
Bateria	15,892 V	15,903 V	0,011 V

Fonte: Elaboração própria (2025).

Ao analisar os valores apresentados na Tabela 9, observa-se que a tensão final de cada célula está de acordo com o esperado. No entanto, a tensão total da bateria apresentou um leve aumento. Isso pode ser explicado pelo comportamento não linear das curvas de carga e descarga das células de lítio, o que significa que a tensão não reflete com exatidão o estado real de carga da bateria. Esse fenômeno é evidenciado no gráfico da Figura 36, que mostra o valor da tensão total da bateria ao longo do tempo, tornando perceptível essa característica.

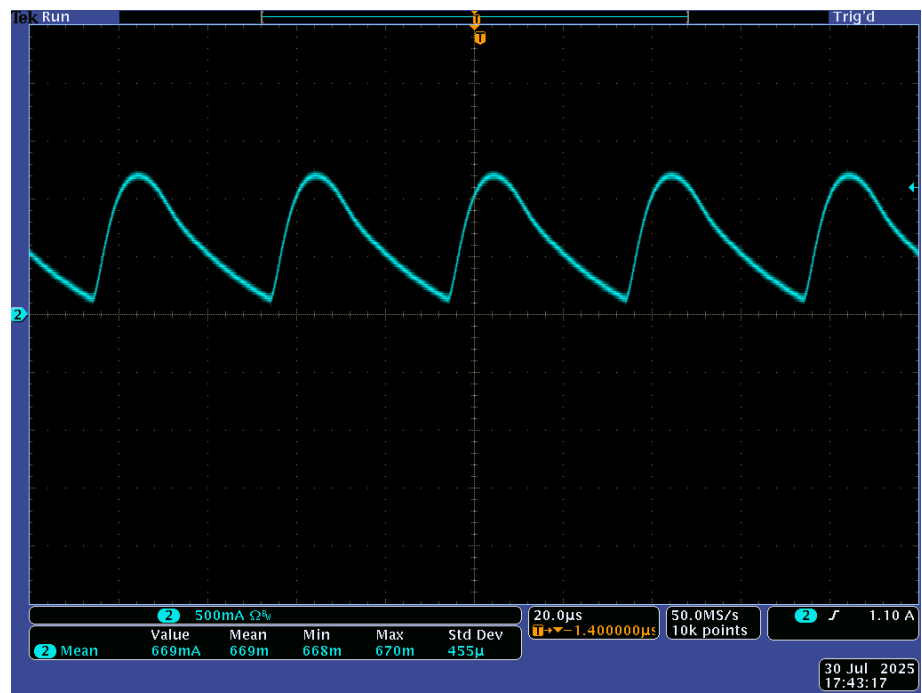
Figura 36 – Balanceamento ativo com bateria desbalanceada, tensão da bateria



Fonte: Elaboração própria (2025).

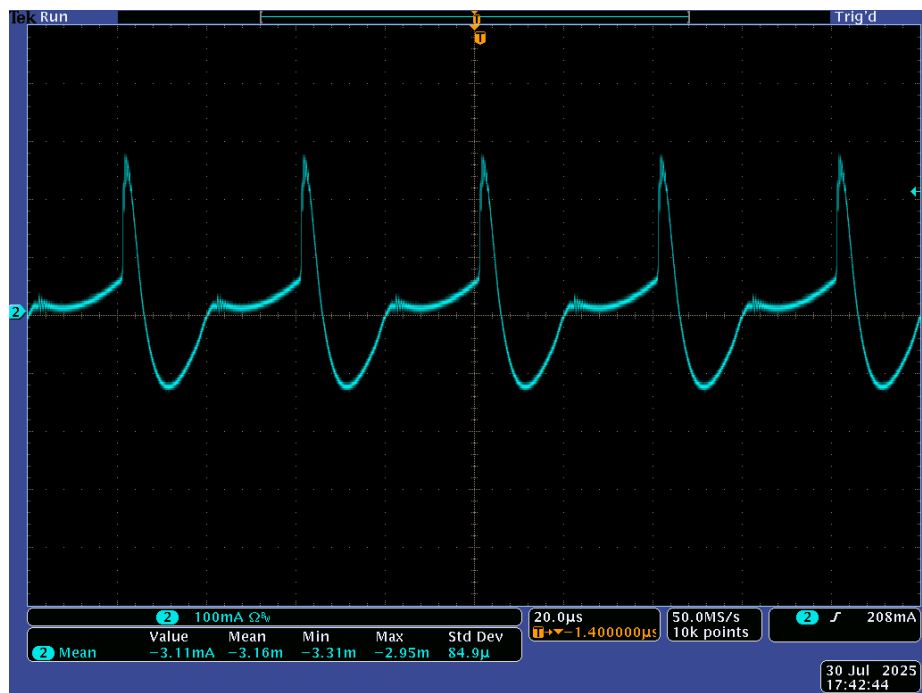
Além disso, foi possível realizar a medição da corrente de balanceamento durante o teste, utilizando um osciloscópio e uma ponteira de corrente. As Figuras 37 e 38 ilustram, respectivamente, a forma de onda da corrente observada em uma célula durante os processos de carga e descarga.

Figura 37 – Corrente de balanceamento ativo nas células com menos energia



Fonte: Elaboração própria (2025).

Figura 38 – Corrente de balanceamento ativo nas células com mais energia

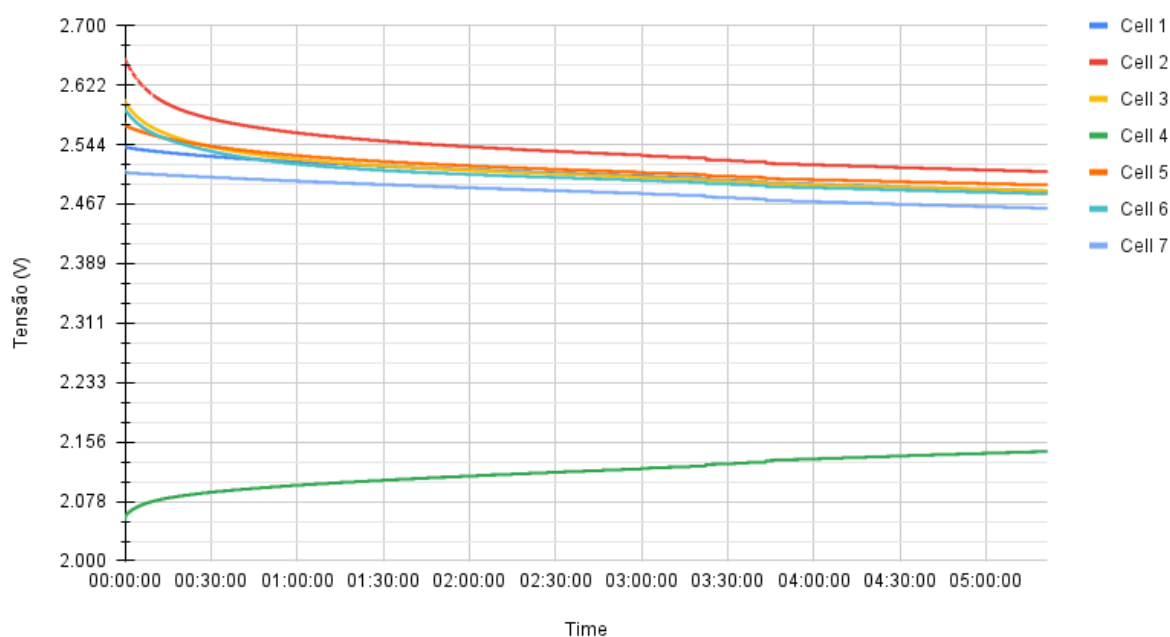


Fonte: Elaboração própria (2025).

Pode-se observar que o valor médio da corrente de balanceamento das células de carga inferior foi de 670 mA, enquanto as células nas células de carga superior esse valor foi próximo de 0 A, consideravelmente menor.

Já no segundo cenário, criou-se um cenário extremo de desbalanceamento, em apenas uma célula. Enquanto seis células estavam carregadas, uma outra estava descarregada. A Figura 39 mostra o resultado ao decorrer de 5 horas de balanceamento.

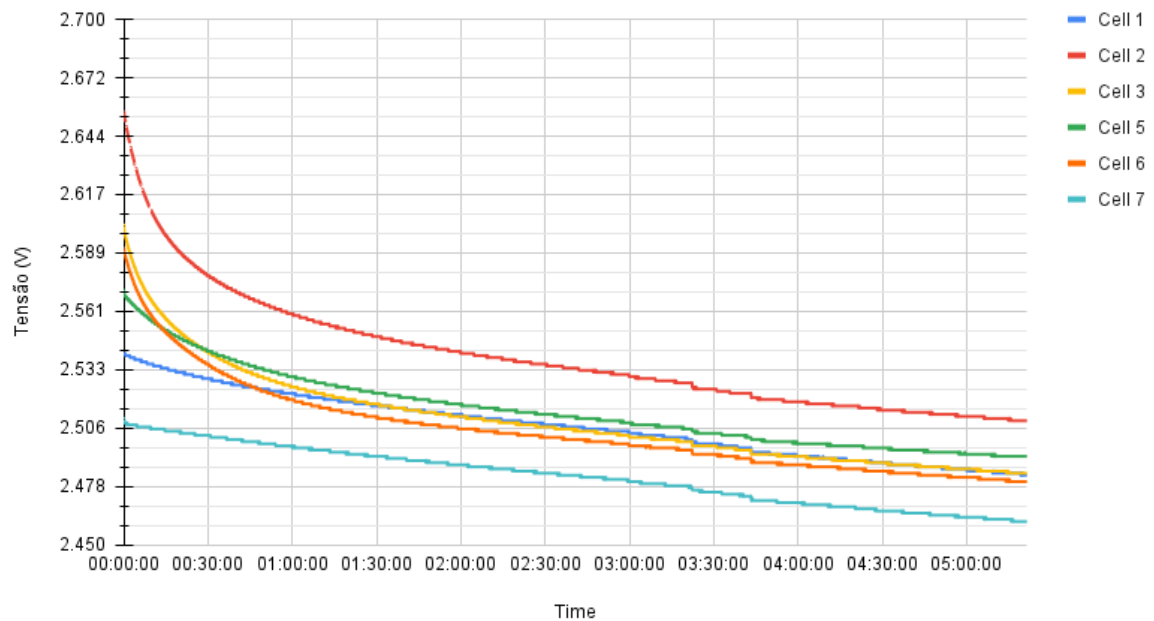
Figura 39 – Balanceamento ativo com uma célula descarregada



Fonte: Elaboração própria (2025).

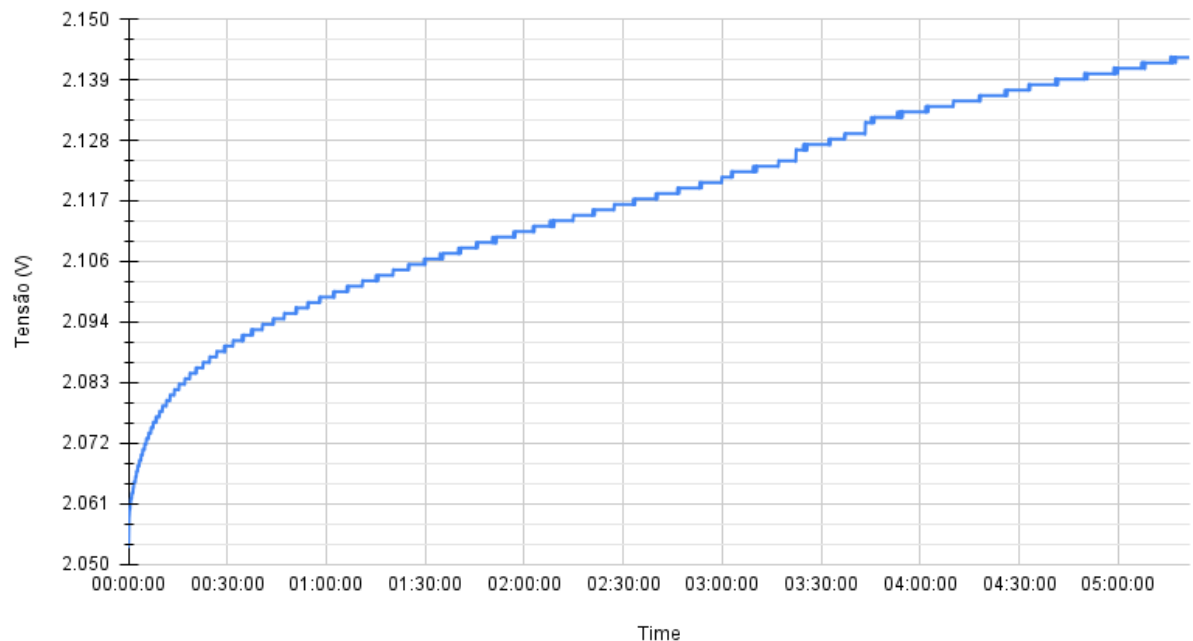
Para ilustrar melhor o comportamento nas células foi feito outros dois gráficos separando a célula carregada das demais, representados nas Figuras 40 e 41.

Figura 40 – Balanceamento ativo com uma célula descarregada, células com mais energia



Fonte: Elaboração própria (2025).

Figura 41 – Balanceamento ativo com uma célula descarregada, célula com menos energia



Fonte: Elaboração própria (2025).

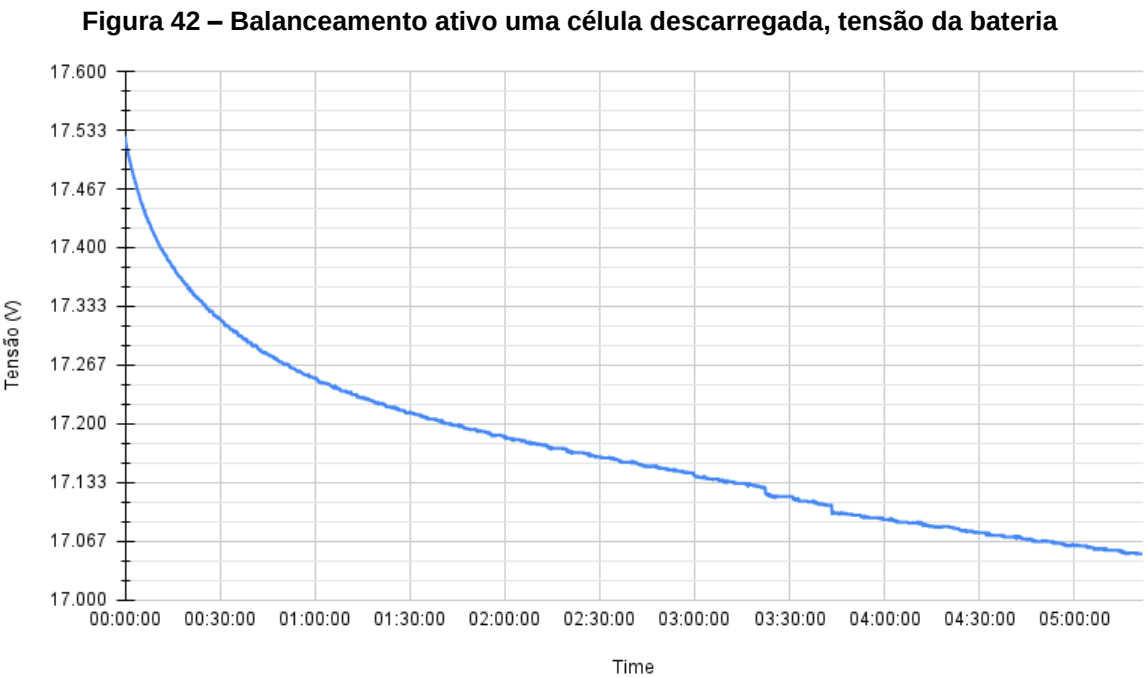
Observa-se que a velocidade de balanceamento da célula que foi carregada mostrou-se superior à do cenário anterior. Esse comportamento se deve ao maior número de células inicialmente carregadas, o que aumentou a energia excedente disponível, ao mesmo tempo que se reduziu a divisão dessa energia,

acelerando o processo de equalização. A comparação entre as tensões iniciais e finais é mostrada na Tabela 10.

Tabela 10 – Tensões iniciais e finais do teste 2			
	Tensão Inicial	Tensão Final	Diferença
Cell 1	2,541 V	2,483 V	-0,058 V
Cell 2	2,656 V	2,509 V	-0,147 V
Cell 3	2,602 V	2,484 V	-0,118 V
Cell 4	2,053 V	2,143 V	0,09 V
Cell 5	2,570 V	2,492 V	-0,078 V
Cell 6	2,591 V	2,480 V	-0,111 V
Cell 7	2,510 V	2,461 V	-0,049 V
Bateria	17,523 V	17,052 V	-0,471 V

Fonte: Elaboração própria (2025).

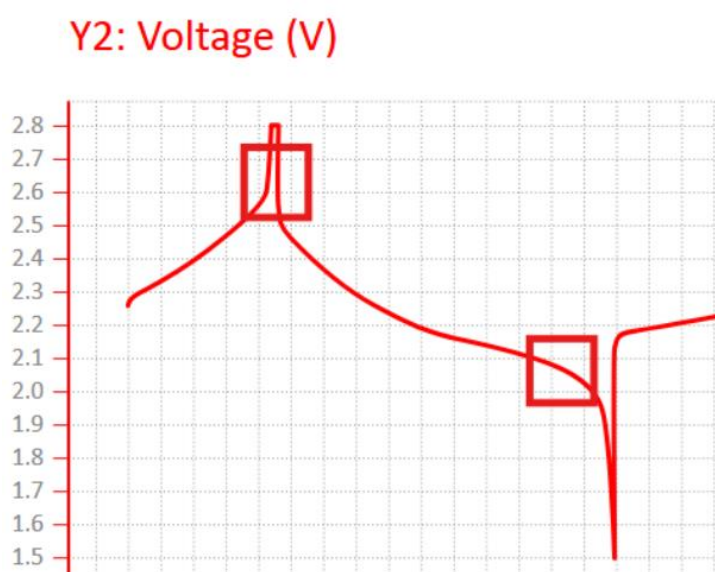
Assim como no teste anterior, os resultados obtidos estiveram de acordo com o comportamento esperado. No entanto, ao se observar a tensão total da bateria, nota-se uma redução significativa de 471 mV. A Figura 42 apresenta o gráfico da tensão da bateria durante o balanceamento.



Fonte: Elaboração própria (2025).

Nesse cenário, as células com maior nível de carga inicial estavam operando em uma região próxima à zona exponencial da curva de descarga, característica das células LTO. Isso explica o fato de a tensão ter apresentado uma queda acentuada, mesmo que a quantidade de carga removida tenha ocorrido de forma aproximadamente linear. Esse comportamento pode ser visualizado na Figura 43, que mostra a curva de descarga fornecida pelo fabricante. Os retângulos destacados representam, à esquerda, o grupo de células mais carregadas, e à direita, a célula inicialmente descarregada.

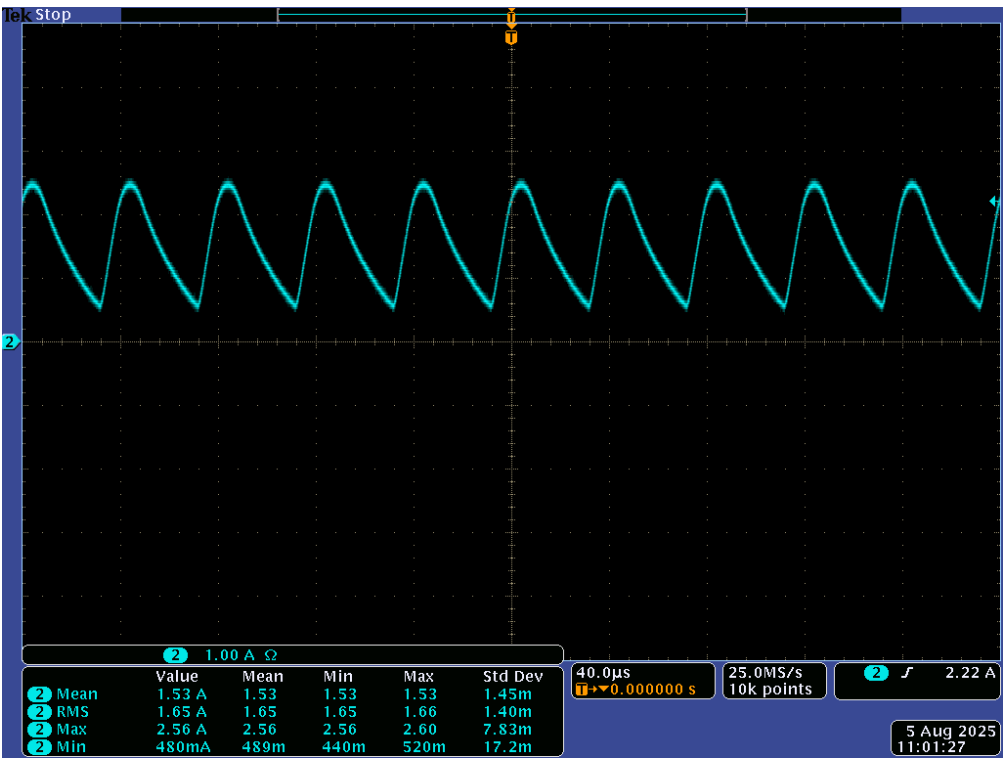
Figura 43 – Curva de descarga das células de lítio com 40A



Fonte: Yinlong (2025).

A Figura 44 apresenta a corrente de balanceamento da célula 4, célula desbalanceada. Observa-se que o valor da corrente média foi de 1,53 A, muito superior ao registrado no cenário anterior, o que justifica a maior velocidade de balanceamento.

Figura 44 – Corrente de balanceamento ativo com uma célula descarregada



Fonte: Elaboração própria (2025).

5.4.2 Teste de Balanceamento em Carga e Descarga

Após a validação inicial do funcionamento do balanceador ativo em condições estáticas, sem a presença de carga ou carregador, foram conduzidos testes mais robustos com o objetivo de avaliar o desempenho do sistema em ciclos dinâmicos de carga e descarga. Esses ensaios buscaram simular condições reais de operação, nas quais a bateria está levemente desbalanceada e é carregada e descarregada repetidamente em curtos intervalos de tempo. Para fins comparativos, os mesmos testes também foram realizados utilizando o balanceamento passivo, permitindo analisar de forma direta as diferenças de desempenho entre as duas abordagens.

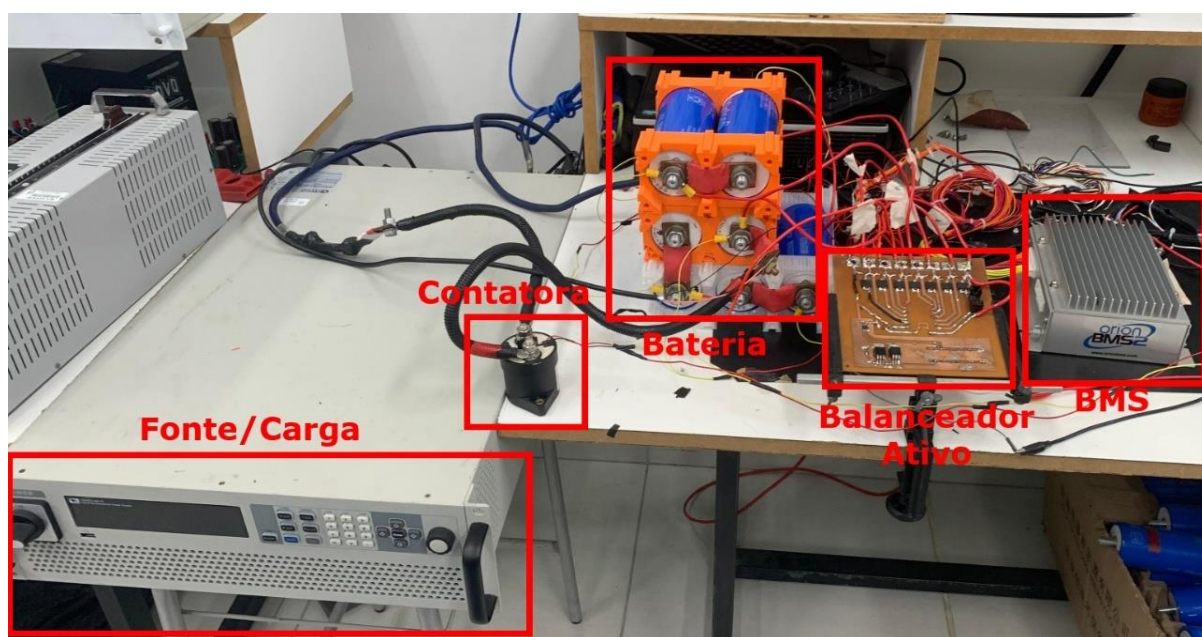
Para isso, foi utilizada uma fonte CC bidirecional programável, modelo IT6006C-300-75, capaz de operar tanto como carregador quanto como carga eletrônica. A fonte, ilustrada na Figura 45, dispõe de um modo específico para testes com baterias, permitindo o controle de parâmetros como corrente de carga/descarga e tempo de operação além de proteções. A Figura 46 apresenta os equipamentos utilizados na bancada de testes.

Figura 45 – Fonte CC bidirecional IT6006C-300-75



Fonte: ITECH ([S.d]).

Figura 46 – Equipamentos usados no teste

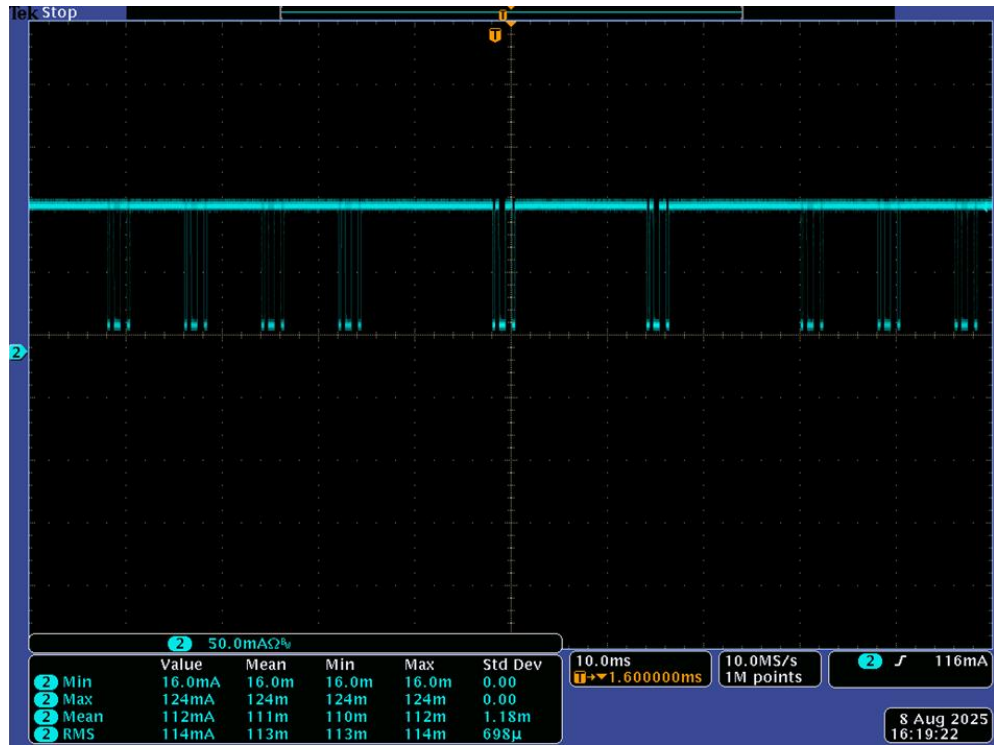


Fonte: Elaboração própria (2025).

Inicialmente, os testes foram realizados apenas o balanceamento passivo do BMS, a fim de verificar seu comportamento e eficácia sob variações rápidas de carga. O procedimento consistiu em descarregar o banco de baterias a 15 A por 15 minutos, seguido de uma carga também de 15 A por mais 15 minutos, repetindo esse ciclo por aproximadamente 3 horas.

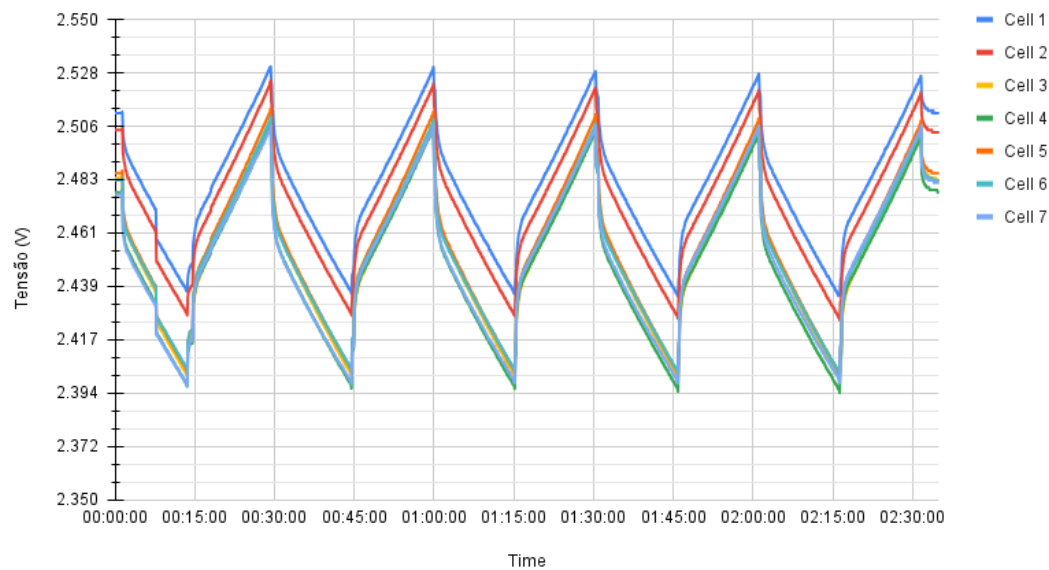
A corrente de balanceamento passivo registrada durante os testes, teve um valor médio de 100 mA, apresentado na Figura 47, enquanto as tensões individuais das células ao longo do tempo são apresentadas na Figura 48.

Figura 47 – Corrente de balanceamento passivo com carga e descarga



Fonte: Elaboração própria (2025).

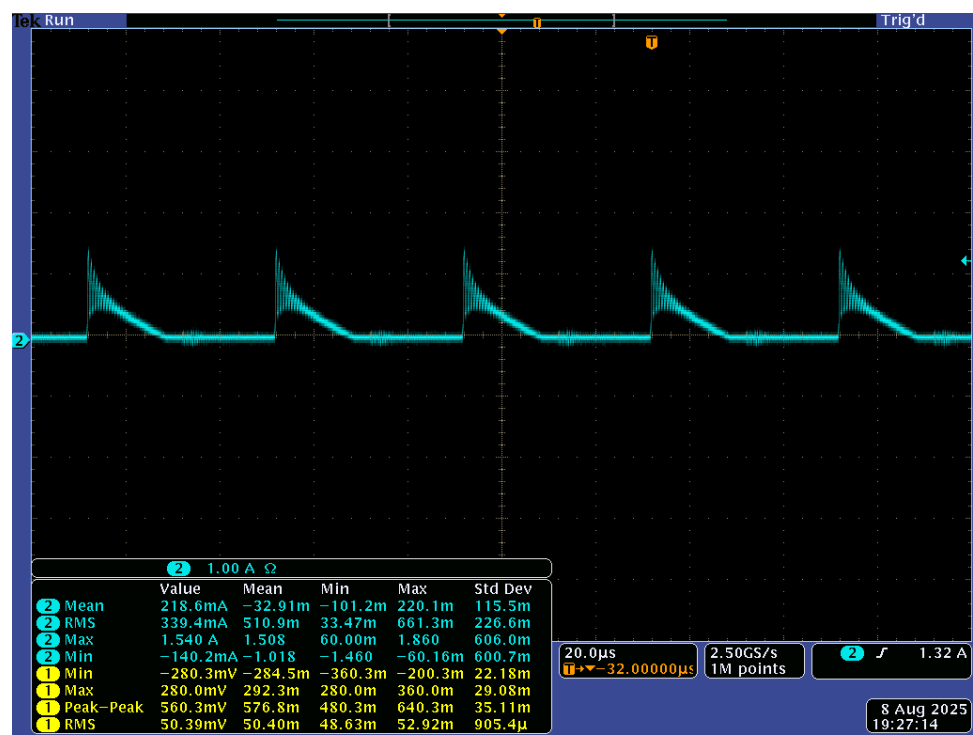
Figura 48 – Balanceamento passivo com carga e descarga



Fonte: Elaboração própria (2025).

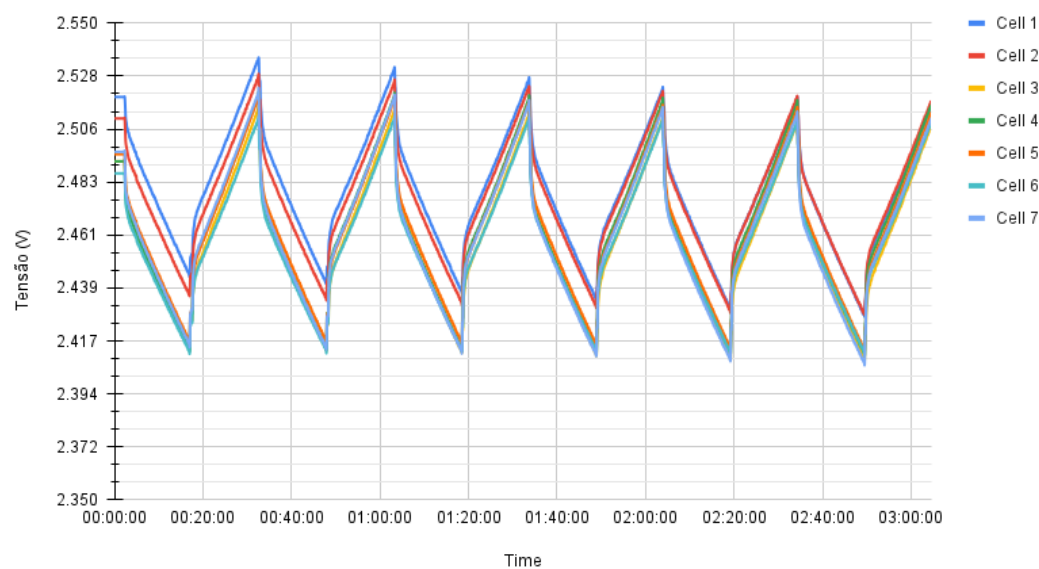
Na sequência, o balanceamento passivo do BMS foi desativado e o balanceador ativo foi acionado, mantendo-se exatamente as mesmas condições e procedimentos do teste anterior. A Figura 49 apresenta a corrente de balanceamento ativa registrada durante o ensaio, enquanto a Figura 50 exibe as tensões individuais de cada célula ao longo do tempo.

Figura 49 – Corrente de balanceamento ativo com carga e descarga



Fonte: Elaboração própria (2025).

Figura 50 – Balanceamento ativo com carga e descarga



Fonte: Elaboração própria (2025).

Comparando as Figuras 49 e 50, os resultados do balanceamento passivo e ativo, é possível perceber que o balanceamento passivo não foi muito efetivo, foi muito lento e reduziu pouca a diferença entre as cargas das células, enquanto o ativo conseguiu equalizar as tensões no tempo do teste.

5.5 Análise e Discussão dos Resultados Obtidos

Os resultados apresentados neste capítulo permitiram verificar o funcionamento da técnica de balanceamento ativo proposta, bem como compará-la com a técnica de balanceamento passivo integrada ao BMS Orion 2, utilizado nos testes.

A partir das simulações, foi possível verificar os valores calculados no projeto do conversor Flyback. Apesar de que não tenha sido possível fazer a simulação utilizando modelos de células de lítio, ela foi importante para validar a ideia de transferência de energia entre as células. Porém devido ao fato de terem sido utilizados capacitores, o tempo de equalização foi muito menor do que o real.

Nos testes com carga resistiva, apesar de não ser a aplicação do projeto, observaram-se problemas relacionados à eficiência do conversor. Esses resultados indicam que o dimensionamento e a construção do transformador tiveram influência direta no desempenho. Como um dos requisitos do projeto era manter uma relação de transformação igual ao número de saídas, isso limitou a quantidade de espiras no primário e nos secundários, considerando as restrições físicas do núcleo escolhido.

Os ensaios realizados com as células de lítio demonstraram o funcionamento esperado da técnica de balanceamento ativo. Verificou-se que as células com maior tensão inicial tiveram sua energia gradualmente reduzida, enquanto as células com menor tensão foram carregadas. Esse comportamento confirma que a energia foi de fato transferida entre as células. Além disso, quando o número de células descarregas é reduzido, a energia excedente é consequentemente aumentada e dividida entre menos células, aumentando a corrente de balanceamento e, por consequência, a velocidade de equalização também.

Como o projeto ainda é um protótipo, não foi possível testá-lo em um caso real de utilização, reserva de energia do barco solar. Dessa forma o teste de Carga e

Descarga, teve como intuito realizar uma simulação do caso de uso, onde a bateria é submetida a uma variação rápida entre carga e descarga. E ao mesmo tempo, fazer uma comparação dos métodos de balanceamento passivo e ativo. O balanceamento passivo, provou-se insuficiente para corrigir as diferenças de tensão entre as células de lítio, em um tempo que fosse razoável para a aplicação. Já o balanceamento ativo mostrou-se mais veloz, pois além da corrente de balanceamento ser maior, as células descarregadas também ganham energia, desse modo o tempo de equalização é reduzido.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve como objetivo desenvolver, simular e validar experimentalmente uma técnica de balanceamento ativo de células de baterias à base de lítio, com base na topologia Flyback. A proposta foi aplicada a uma bateria de LTO utilizado em uma embarcação movida à energia solar, com o intuito de melhorar a eficiência energética e a uniformidade das tensões entre as células do banco de baterias.

Ao longo do projeto, foram realizadas etapas de fundamentação teórica, projeto do conversor, seleção de componentes, simulações computacionais, montagem de protótipo e ensaios práticos. As análises obtidas permitiram compreender o comportamento da técnica desenvolvida em diferentes condições de operação e comparar seu desempenho com o balanceamento passivo convencional.

Em síntese, este trabalho contribuiu para o desenvolvimento de uma solução técnica viável e eficiente para o balanceamento ativo de baterias de lítio, que irão ser utilizadas na embarcação solar Guarapuvú II, destacando-se pela simplicidade da implementação e pelo potencial de aplicação. Os resultados obtidos podem servir como base para a otimização de projetos futuros e para o desenvolvimento de novas abordagens de balanceamento ativo que operem de forma mais eficiente e confiável, promovendo a melhoria contínua dos sistemas de gerenciamento de baterias em aplicações embarcadas e de armazenamento de energia.

6.1 Sugestão para Trabalhos Futuros

Como forma de dar continuidade a este trabalho, sugere-se melhorar a construção e dimensionamento do transformador utilizado no projeto. Isso poderia ser feito utilizando softwares de simulação específicos para transformadores de alta frequência, como o Ansys Maxwell. Também se sugere a implementação do balanceador ativo em condições reais de operação, aplicando-o diretamente no sistema de armazenamento da embarcação fotovoltaica para a qual o projeto foi idealizado.

Além disso, poderiam ser avaliados outros métodos de balanceamento ativo, como os baseados em capacitores, indutores ou conversores bidirecionais, a fim de verificar alternativas que apresentem maior eficiência, menor complexidade de implementação ou melhor desempenho em aplicações com diferentes quantidades de células e perfis de carga.

REFERÊNCIAS

- AKBARZADEH, Mohsen; DE SMET, Jasper; STUYTS, Jeroen. Cost assessment of battery hybrid energy storage system for full-electric marine applications. *In: 2022 22nd INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE ON ELECTRIC POWER ENGINEERING (EPE)*. 22., 2022. Kouty nad Desnou, Czech Republic. **Proceedings** [...]. Kouty nad Desnou, Czech Republic: IEEE, 08-10 June 2022. DOI: 10.1109/EPE54603.2022.9814114
- ANDREA, Davide. **Battery management systems for large lithium-ion battery packs**. 2. ed. Norwood: Artech House, 2010.
- BARBI, Ivo. **Projeto de fontes chaveadas**. 2. ed. Florianópolis: Editora da UFSC, 2007.
- BURKE, A. Batteries and ultracapacitors for electric, hybrid, and fuel cell vehicles. **Proceedings of the IEEE**, v. 95, n. 4, p. 806-820, abr. 2007. DOI: 10.1109/JPROC.2007.892490.
- CODI ENERGY. **Active and passive battery pack balancing methods**. Codi Energy, June 2024. Disponível em: <https://codienergy.com/blogs-detail/active-and-passive-battery-pack-balancing-methods/>. Acesso em: 15 jul. 2025.
- EHSANI, M.; GAO, Y.; EMADI, A. **Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles: fundamentals, theory, and design**. 2. ed. Boca Raton: CRC Press, 2009.
- HURLEY, W. G.; WÖLFLE, W. H. **Transformers and inductors for power applications**. Hoboken: John Wiley & Sons, 2013.
- IMMONEN, Eero; HURRI, Jussi. Equivalent circuit modeling of a high-energy LTO battery cell for an electric rallycross car. *In: 2021 IEEE 30th INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON INDUSTRIAL ELECTRONICS (ISIE)*. 30., 2021. Kyoto. **Proceedings** [...]. Kyoto: IEEE, 2021. p. 1–6. DOI: 10.1109/ISIE45552.2021.9576401.
- ITECH. **IT6000C bidirectional programmable DC power supply**. ITech, [s.d.]. Disponível em <https://www.itechate.com/en/product/dc-power-supply/IT6000C.html>. Acesso em: 20 ago. 2025.
- LI, Chen; LIU, Zhaodong; MA, Lei; CHENG, Shijie. A study on low-temperature model parameter identification of LTO battery by cuckoo search. **IEEE Access**, v. 8, p. 96724–96735, 2020.
- LYU, Dandan; REN, Bo; LI, Shaofan. Failure modes and mechanisms for rechargeable lithium-based batteries: a state-of-the-art review. **Acta Mechanica**, v. 230, p. 701–738, 2018.
- MEI, J.; CHENG, Eric K. W.; FONG, Y. C. Lithium-titanate battery (LTO): a better choice for high current equipment. *In: 2017 7th INTERNATIONAL CONFERENCE ON POWER ELECTRONICS SYSTEMS AND APPLICATIONS - SMART MOBILITY, POWER TRANSFER & SECURITY (PESA)*, 7., 2017. Hong Kong, China. **Proceedings** [...]. Hong Kong, China: IEEE, 2017, p. 1-6.

MOGHADDAM, Ali Farzan; VAN DEN BOSSCHE, Alex. Flyback converter balancing technique for lithium based batteries. *In: 8th INTERNATIONAL CONFERENCE ON MODERN CIRCUITS AND SYSTEMS TECHNOLOGIES (MOCASST)*, 8., 2019. Thessaloniki, Grécia. **Proceedings** [...]. Thessaloniki, Grécia: IEEE, 2019, p. 1–4.

MOUSER. **Semiconductors**. Mouser Electronics, 2025. Disponível em <https://br.mouser.com/c/semiconductors/>. Acesso em: 20 jun. 2025.

NARESH, K. M.; UMAVATHI, M.; MOHAN, H. R. Multi output Flyback converter with switching/linear post regulators. **International Journal of Recent Development in Engineering and Technology**, v. 2, n. 6, p. 21–26, jun. 2014. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/357737145>. Acesso em: 7 mai. 2025.

NOVAK, Martin; NOVAK, Zdenek. Modeling and experimental validation of a LTO battery cell for a hydrogen hybrid bus. *In: IEEE 32nd INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON INDUSTRIAL ELECTRONICS (ISIE)*. 32., 2023. **Proceedings** [...]. [S. l.]: IEEE, 2023. p. 1–6.

ORION BMS. **Orion 2 wiring & installation manual**. Orion Bms, 2019. Disponível em <https://www.orionbms.com/products/orion-bms-standard/>. Acesso em: 21 jun. 2025.

PETRY, Clóvis Antônio; PERIN, Arnaldo José. **Projeto de um conversor Flyback e de um conversor forward isolados com retificador e filtro capacitivo**. Florianópolis, SC: Universidade Federal de Santa Catarina, Agosto de 2000.

STM32. **Blue pill STM32F103C8T6**. STM32-base, 2025. Disponível em <https://stm32-base.org/boards/STM32F103C8T6-Blue-Pill.html>. Acesso em: 20 jul 2025.

TIAN, Liyong; HONG, Ming; HE, Zhiwei; GAO, Mingyu. Active battery balancing circuit based on optimized flyback converter for large lithium-ion battery packs. *In: IEEE 4th INTERNATIONAL CONFERENCE ON CONTROL SCIENCE AND SYSTEMS ENGINEERING (ICCSSE)*. 4., 2018. **Proceedings** [...]. [S. l.]: IEEE, 2018. p. 6–11.

THORNTON. **Catálogo Thornton**. Thornton Eletrônica, 2008. Disponível em <https://www.thornton.com.br/home.htm>. Acesso em: 11 de mai. 2025.

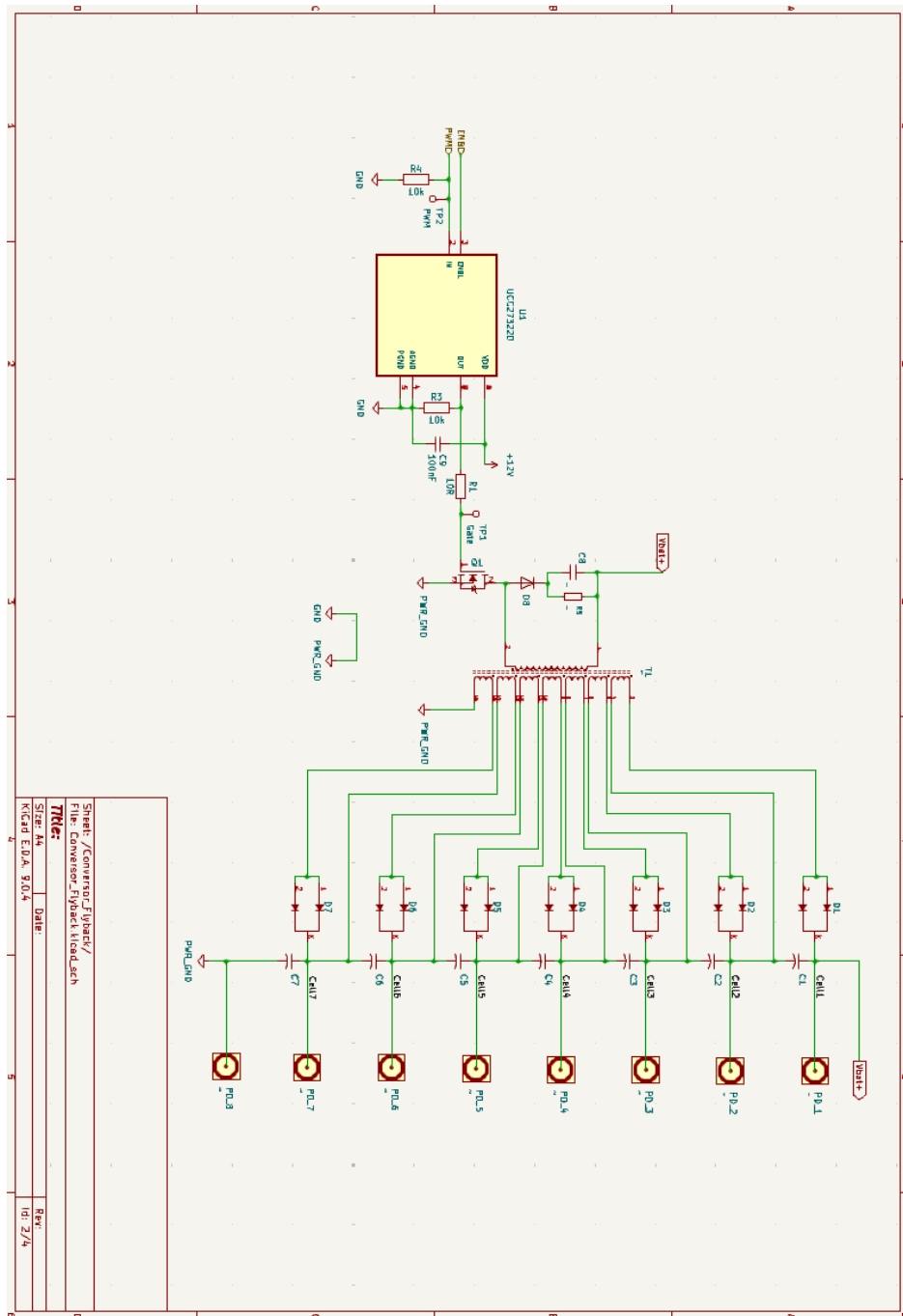
WEI, Xuezhe; ZHAO, Xiaopeng; DAI, Haifeng. The application of flyback DC/DC converter in Li-ion batteries active balancing. *In: IEEE VEHICLE POWER AND PROPULSION CONFERENCE (VPPC)*, 2009. Dearborn, MI, USA. **Proceedings** [...]. Dearborn, MI, USA: IEEE, 07-10 September 2009, p. 1654–1656. DOI: 10.1109/VPPC.2009.5289663.

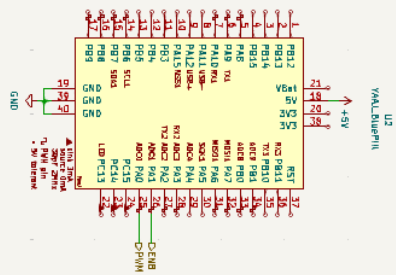
XU, C.; et al. A study on low-temperature model parameter identification of LTO battery by cuckoo search. **Energies**, v. 13, n. 12, p. 3109, jun. 2020. DOI: 10.3390/en13123109.

YINLONG. **Yinlong LTO batteries**. Yinlong, [s.d.]. Disponível em <https://www.yinlong.energy/yinlong-battery>. Acesso em: 12 dez. 2024.

APÊNDICES

APÊNDICE A – DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DO BALANCEADOR ATIVO





Sheet /MCU/ Eingetragt in Nachsch.	
Träger:	
Size: A4	Date:
Standard E.D.A. 9.0.4	Rev: 3/4

