

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ
CAMPUS DE FOZ DO IGUAÇU
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA ELÉTRICA E COMPUTAÇÃO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

SISTEMA DE GERENCIAMENTO DE BATERIAS PARA APLICAÇÕES EM SEGUNDA
VIDA CONSIDERANDO DIFERENTES ARRANJOS DE BATERIAS DO TIPO ZEBRA

HENRIQUE PERON

FOZ DO IGUAÇU
2025

Henrique Peron

Sistema de Gerenciamento de Baterias para Aplicações em Segunda
Vida Considerando Diferentes Arranjos de Baterias do Tipo ZEBRA

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Computação como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica. Área de concentração: Sistemas Dinâmicos e Energéticos.

Orientador: Prof. Dr. Diogo Marujo

Coorientador: Prof. Dr. Adriano Batista de Almeida

Foz do Iguaçu
2025

Ficha de identificação da obra elaborada através do Formulário de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da Unioeste.

Peron, Henrique

Sistema de Gerenciamento de Baterias para Aplicações em Segunda Vida Considerando Diferentes Arranjos de Baterias do Tipo ZEBRA / Henrique Peron; orientador Diogo Marujo; coorientador Adriano Batista de Almeida . -- Foz do Iguaçu, 2025.

162 p.

Dissertação (Mestrado Acadêmico Campus de Foz do Iguaçu) -- Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Centro de Engenharias e Ciências Exatas, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Computação, 2025.

1. Sistema de Gerenciamento de Bateria. 2. Arquitetura de Software. 3. Baterias de segunda vida. 4. Bateria ZEBRA. I. Marujo, Diogo, orient. II. Batista de Almeida , Adriano , coorient. III. Título.

Sistema de Gerenciamento de Baterias para Aplicações em Segunda Vida Considerando Diferentes Arranjos de Baterias do Tipo ZEBRA

Henrique Peron

Esta Dissertação de Mestrado foi apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Computação e aprovada pela Banca Examinadora assim constituída:

Prof. Dr. **Diogo Marujo** - (Orientador)

Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UTFPR/ UNIOESTE/PGEEC

Prof. Dr. **Cassius Rossi de Aguiar**

Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UTFPR/UNIOESTE/PGEEC

Prof. Dr. **Denisson Queiroz Oliveira**

Universidade Federal do Maranhão – UFMA.

Data da defesa: 29 de agosto de 2025

Resumo

O cenário energético atual demanda soluções sustentáveis para o reaproveitamento de baterias de veículos elétricos e o desenvolvimento de aplicações estacionárias para atendimento sistêmico de geração e distribuição de energia elétrica. Neste contexto, o objetivo desta pesquisa foi projetar e validar o *software* de um BMS capaz de se adaptar a diferentes topologias de sistemas de armazenamento utilizando baterias de segunda vida. Para isso, foi adotada uma arquitetura modular, baseada no sistema operacional de tempo real FreeRTOS, com uma estrutura de dados centralizada que permite a reconfiguração dinâmica dos parâmetros de operação a partir dos protocolos Modbus RTU e CANopen sem a necessidade de reprogramação do dispositivo. A validação experimental envolveu testes de comunicação, proteção, controle de temperatura, detecção de falhas de isolamento e avaliação da precisão das medições de tensão e corrente, todos realizados em bancada. Adicionalmente, módulos de balanceamento ativo foram desenvolvidos e testados com baterias ZEBRA e com baterias de lítio, nas quais se demonstrou a viabilidade técnica da solução, evidenciando a capacidade do BMS de operar com diferentes tecnologias de baterias. A versatilidade do sistema também foi comprovada por sua aplicação em diversos projetos no Itaipu Parquetec, incluindo iniciativas de armazenamento de energia para emergências, backup energético residencial ou em microrrede para produção de hidrogênio verde. O *software* desenvolvido pôde ser aplicado em duas versões do *hardware* do BMS flexível: o BMS-IoT, com capacidade de monitoramento de múltiplas strings e conectividade IoT, e o BMS-1S, uma solução mais compacta destinada ao monitoramento de uma única string; além disso o mesmo modelo de *software* foi usado no projeto de um BMS para baterias de lítio. Assim, este trabalho representa uma contribuição significativa para a viabilização da reutilização de baterias ZEBRA e de outras tecnologias em segunda vida, oferecendo uma ferramenta valiosa para pesquisa e desenvolvimento de novas aplicações.

Palavras-chave: Sistema de Gerenciamento de Bateria, Arquitetura de *Software*, Baterias de segunda vida, Baterias ZEBRA.

Abstract

The current energy scenario demands sustainable solutions for the reuse of electric vehicle batteries and the development of stationary applications for systemic energy generation and distribution services. In this context, the objective of this research was to design and validate the *software* for BMS capable of adapting to different topologies of storage systems using second-life batteries. To this end, a modular architecture was adopted, based on the FreeRTOS real-time operating system, with a centralized data structure that allows the dynamic reconfiguration of operating parameters from the Modbus RTU and CANopen protocols without the need to reprogram the device. The experimental validation involved tests of communication, protection, temperature control, insulation fault detection and evaluation of the accuracy of voltage and current measurements, all performed on the bench. Additionally, active balancing modules were developed and tested with ZEBRA batteries and lithium batteries, in which the technical feasibility of the solution was demonstrated, evidencing the ability of the BMS to operate with different battery technologies. The versatility of the system was also proven by its application in several projects at Itaipu Parquetec, including emergency energy storage initiatives, residential energy backup or microgrids for green hydrogen production. The developed *software* could be applied to two versions of the flexible BMS *hardware*: the BMS-IoT, with multiple string monitoring capabilities and IoT connectivity, and the BMS-1S, a more compact solution designed for monitoring a single string; in addition, the same *software* model was used in the design of a BMS for lithium batteries. This work represents a significant contribution to enabling the reuse of ZEBRA and other second-life batteries, offering a valuable tool for research and development of new applications.

Keywords: Battery Management System, *Software* Architecture, Second-Life Batteries, ZEBRA Batteries.

Agradecimentos

Alguém disse que se pode ver mais longe é porque estava sobre os ombros de gigantes. Eu tenho a sorte de viver sobre os ombros de gigante. À minha família devo todas as minhas conquistas, pois sem o suporte deles eu não seria nada.

Ainda sinto que preciso mencionar mais alguns atores importantes nessa jornada aos quais sou grato.

Ao meu amigo Fernando, por me incentivar nos momentos difíceis e me convencer a seguir em frente, mesmo quando pensei em desistir. Aos orientadores Diogo e Adriano, pelo direcionamento do trabalho, sobretudo, pela empatia demonstrada ao respeitarem o tempo que precisei para me recompor e retomar o projeto.

Aos colegas e professores que encontrei de alguma forma durante essa caminhada e que de alguma forma contribuíram para minha formação. Em especial aos meus amigos Anderson e Alex, que colocaram grande esforço em compreender profundamente o *software* e me ajudaram a planejar e implementar as melhorias no BMS e no procedimento de CCDC.

À minha companheira Amabile, que me incentivou durante a fase final do trabalho, renovando minha motivação sempre que eu desanimava me apoiando e auxiliando a dar os últimos passos dessa etapa.

Ao Itaipu Parquetec, em específico o Centro de Competências e Gestão Energética, pelo apoio técnico, financeiro e pela disponibilização da infraestrutura e equipamentos necessários para o desenvolvimento deste trabalho. Agradeço também as instituições financiadoras dos projetos dos quais recebi bolsa:

- Itaipu Binacional, durante o período de 05/09/2022 a 12/05/2023 no projeto intitulado “Desenvolvimento de protótipos de Sistemas de gerenciamento de Bateria (BMS) empregando células de segunda vida”.
- PETROGAL Brasil S.A, durante o período de 16/05/2023 a 25/10/2023 no projeto intitulado “Sistema modular híbrido de baterias de primeira e segunda vida com diferentes SOH (State of Health) para fornecimento ininterrupto de energia - SAE-H”.

Sumário

Resumo	5
Abstract.....	6
Agradecimentos	7
Sumário.....	8
Lista de Figuras	10
Lista de Tabelas	13
Capítulo 1 Introdução.....	14
Capítulo 2 Referencial Teórico	18
2.1. Baterias de Sódio (ZEBRA).....	18
2.2. Estado da Arte de BMS.....	20
2.2.1. Trabalhos Acadêmicos	20
2.2.2. Arquitetura de <i>Software</i>	22
2.2.3. Estimativa de Estados	24
2.2.4. Balanceamento de Células	26
2.2.5. Medições de Grandezas.....	29
2.2.6. Conectividade.....	31
2.3. Soluções Comerciais para BMS.....	32
2.3.1. BMS Elithion Lithiumate Pro	32
2.3.2. BMS Orion	32
2.3.3. Fox BMS	33
2.4. Monitoradores de Células	34
2.4.1. LT8584	34
2.4.2. BQ76PL455.....	35
2.5. Conclusões	36
Capítulo 3 Métodos	38
3.1. <i>Software</i> do BMS	39
3.1.1. Estruturas de Dados e Gerenciamento de Memória.....	41
3.1.2. Tarefa de Controle da Bateria	45
3.1.3. Monitoramento de Grandezas	50

3.1.4.	Controle de Temperatura da Bateria	54
3.1.5.	Protocolos de Comunicação	55
3.1.6.	Modo Manual	58
3.2.	Expansão das Funcionalidades do BMS	58
3.2.1.	Substituição do Sensor de Corrente e Tensão	59
3.2.2.	Monitoramento de Células BMS-IoT.....	59
3.2.3.	Expansão da Conectividade BMS-IoT.....	60
3.2.4.	Configuração BMS-1S	61
3.3.	Interface Gráfica de Operação.....	61
3.4.	Métodos para Validação das Funcionalidades do BMS.....	62
3.4.1.	Comunicação e Interface.....	63
3.4.2.	Sistema de Leitura e Controle de Temperatura.....	63
3.4.3.	Medição de Grandezas da Bateria.....	65
3.4.4.	Proteção e Controle da Bateria.....	66
3.4.5.	Módulos de Balanceamento de Células	67
Capítulo 4	Resultados	69
4.1.	Validação das Funcionalidades do BMS.....	69
4.1.1.	Testes de Comunicação e Interface.....	69
4.1.2.	Testes do Sistema de Leitura e Controle de Temperatura.....	70
4.1.3.	Testes de Medição de Grandezas da Bateria.....	73
4.1.4.	Teste de Proteção e Controle da Bateria	75
4.1.5.	Testes dos Módulos de Balanceamento de Células.....	78
4.2.	Aplicação do BMS em Projetos de Armazenamento de Energia.....	82
Capítulo 5	Conclusões	87
Referências	89
Apêndice A	Tabelas de Procedimentos e Resultados.....	93
Apêndice B	Descrição do Hardware do BMS Flexível.....	111
Apêndice C	Manual de Usuário do BMS de Lítio	123
Apêndice D	Lista de Registradores	137

Lista de Figuras

Figura 2.1: Diagrama de célula do tipo ZEBRA.....	19
Figura 2.2: Comparação entre o <i>software</i> e execução usando RTOS.....	23
Figura 2.3: Modelo de dados e isolamento entre as tarefas.	24
Figura 2.4: Princípio de funcionamento dos métodos de balanceamento ativo.....	27
Figura 2.5: Diagrama genérico para algoritmo de balanceamento.....	28
Figura 2.6: Comparação da incerteza na estimativa do SOC por tensão.	30
Figura 2.7: Ambientes de conectividade do BMS.....	31
Figura 2.8: Diagrama de bloco do balanceamento ativo baseado no LT8584.....	34
Figura 2.9: Diagrama de blocos do balanceamento ativo da Texas Instruments.	35
Figura 3.1: Evolução do desenvolvimento do BMS.	38
Figura 3.2: Tarefas implementadas no BMS e seus eventos de disparo.	40
Figura 3.3: Comparação entre a estrutura de dados do Fox BM e do BMS Flexível.	41
Figura 3.4: Fluxograma da tarefa de gerenciamento de memória.....	42
Figura 3.5: Modelo das tarefas do BMS.	44
Figura 3.6: Múltiplas instâncias de tarefa executando o mesmo código.....	44
Figura 3.7: Fluxograma de funcionamento da tarefa de controle da bateria.....	45
Figura 3.8: Fluxograma do sistema de proteção com múltiplas strings do BMS.....	47
Figura 3.9: Zona segura de operação para tensão e corrente.	48
Figura 3.10: Fluxograma para critérios de fim de descarga e fim de carga.	49
Figura 3.11: Fluxograma de operação das tarefas de medição de grandezas.....	50
Figura 3.12: Circuitos simplificados da medição da resistência de isolamento.....	51
Figura 3.13: Fluxograma de medição da resistência de isolamento.....	53
Figura 3.14: Fluxograma da sequência de medição da resistência de isolamento.	53
Figura 3.15: Fluxograma da tarefa de monitoramento do processador.....	54
Figura 3.16: Algoritmo da tarefa de controle de temperatura.	54
Figura 3.17: Diagrama de controle de temperatura.....	55

Figura 3.18: Tarefas implementadas na expansão do BMS.	58
Figura 3.19: Diagrama de comunicação com os módulos de balanço.	59
Figura 3.20: Algoritmo da tarefa de monitoramento das células.	60
Figura 3.21: Diagrama das interfaces de comunicação do BMS-IoT	61
Figura 3.22: Algoritmo da Interface de Monitoramento.	62
Figura 3.23: Circuito para validação do controlador PI.	64
Figura 3.24: Simulação do aquecimento da bateria.	65
Figura 3.25: Diagrama de teste da medição de resistência de isolamento.	65
Figura 3.26: Diagrama de testes de proteção por sobrecorrente do BMS.....	66
Figura 3.27: Diagrama de testes do balanço de células em bancada.....	67
Figura 4.1: Tela de monitoramento da interface do BMS.....	70
Figura 4.2: Teste da leitura de temperatura: a) Diferentes resistências conectadas ao BMS-1S. b) Diagrama elétrico do teste realizado.	71
Figura 4.3: Resultado do controle da tensão no capacitor.....	72
Figura 4.4: Resultado do controle de temperatura na bateria.....	72
Figura 4.5: Teste de falha no isolamento: a) Aplicação do teste no BMS-1S. b) Diagrama elétrico do teste de isolamento.....	73
Figura 4.6: Teste dos sensores de tensão e corrente com uso da interface.	73
Figura 4.7: Ajuste de curva para calibração dos sensores de tensão e de corrente.	75
Figura 4.8: Teste de sobrecorrente realizado na string 1.....	75
Figura 4.9: Teste de sobrecorrente realizado na string 2.....	76
Figura 4.10: Teste de sobrecorrente realizado na string 1 sem alimentação pela rede CA.....	76
Figura 4.11: Teste de sobrecorrente realizado na string 2 sem alimentação pela rede CA.....	77
Figura 4.12: Teste de queda da rede CA durante a descarga da bateria.....	77
Figura 4.13: Queda na tensão de alimentação do CI LT8584.....	78
Figura 4.14: Bateria de sódio utilizada para teste dos módulos de balanço.....	79
Figura 4.15: Bateria de lítio utilizada para teste dos módulos de balanço.	80
Figura 4.16: Tensões de célula durante o balanceamento no modo delta para média.	80
Figura 4.17: Tensões de célula durante o balanceamento no modo delta para mínima.	81
Figura 4.18: Esquemático simplificado para o projeto BMS.	82
Figura 4.19: Bancada de testes montada para o projeto BMS.	83

Figura 4.20: Esquemático simplificado para o projeto SSEM.	84
Figura 4.21: Esquemático simplificado para o projeto CIGE.	84
Figura 4.22: Esquemático simplificado para o projeto SAE-H.	85
Figura 4.23: Montagem do quadro do projeto SAE-H.	86
Figura A.1: Tela de monitoramento da interface do BMS.	98
Figura B.1: Estrutura de Hardware do BMS.	111
Figura B.2: Diagrama simplificado dos circuitos do BMS e da bateria de segunda vida.	112
Figura B.3: Circuito de pré-carga da bateria.	115
Figura B.4: Circuito de medição da isolação da bateria.	116
Figura B.5: Circuito de medição da tensão e corrente com INA260.	117
Figura B.6: Circuito para medição de temperatura com sensor PT1000.	117
Figura B.7: Circuito de aquecimento CC.	118
Figura B.8: Circuito de aquecimento CA.	119
Figura B.9: Circuito de redundância do BMS.	120
Figura B.10: Circuito de medição da tensão e corrente com AmpOp.	120
Figura B.11: Módulos de balanço de célula do BMS-IoT.	121
Figura B.12: BMS-IoT.	122
Figura B.13: BMS-1S montado na estrutura física do BMS original.	122
Figura C.1: Representação do sistema de bateria de segunda vida e seu BMS.	123
Figura C.2: Módulo da bateria.	124
Figura C.3: Battery Junction Box.	125
Figura C.4: Placa do BMS secundário e seus sinais.	126
Figura C.5: Placa de um BMS primário e seus pontos de destaque.	127
Figura C.6: Representação do BMS primário com suas conexões.	128
Figura C.7: Quadro Modbus para passar o BMS para o estado de operação (Ready).	130
Figura C.8: Conexão entre o BMS e o dispositivo remoto no modo Operacional.	134

Lista de Tabelas

Tabela 2.1: Comparação entre os BMSs Comerciais.	33
Tabela 2.2: Características dos sistemas de balanceamento ativo.....	36
Tabela 3.1: Elementos para cálculo da resistência de isolamento.....	52
Tabela 3.2: Tipos de pacotes aceitos em cada estado CAN Open.	57
Tabela 3.3: Modelo da tabela de apresentação de resultados.	63
Tabela 3.4: Valores referência para teste de leitura de temperatura do BMS.	64
Tabela 4.1: Resultados dos testes de medição de temperatura.	71
Tabela 4.2: Resultados dos testes de medição de tensão e corrente com sensor INA260.....	74
Tabela A.1: Procedimentos e Resultados dos Testes de Comunicação Modbus RTU.	93
Tabela A.2: Procedimentos e Resultados dos Testes da Interface.	96
Tabela A.3: Procedimentos e Resultados dos Testes de Comunicação CAN Open.	99
Tabela A.4: Procedimentos e Resultados dos Testes de Controle de Temperatura.	103
Tabela A.5: Procedimentos e Resultados dos Testes de Resistência de Isolamento.....	104
Tabela A.6: Procedimentos e Resultados de Medição de Tensão e Corrente.	104
Tabela A.7: Testes de medição de tensão com amplificadores operacionais.....	105
Tabela A.8: Testes de medição de corrente com amplificadores operacionais.....	106
Tabela A.9: Procedimentos e Resultados dos Testes de Proteção e Controle da Bateria.	107
Tabela A.10: Procedimentos e Resultados de Balanceamento das Tensões de Célula.	109
Tabela B.1: Descrição dos sinais principais do BMS.	112
Tabela C.1: Registradores utilizados para monitorar as condições da bateria.	130
Tabela C.2: Quadros autônomos enviados pelo BMS no modo Operacional.....	134

Capítulo 1

Introdução

A capacidade de armazenamento de baterias descartadas de veículos elétricos no mundo todo chegará a 185 GWh em 2025, aproximando-se de 1000 GWh em 2030 (Haram, et al., 2021). Já Safari (2025) estima que, em 2030, a demanda anual por sistemas de armazenamento deve alcançar aproximadamente 200 GWh, valor que poderá ser suprido pela repotencialização de aproximadamente 100 a 200 GWh de baterias provenientes de veículos elétricos desativadas.

Grande parte destas baterias ainda possuem de 70% a 80% de sua capacidade original, podendo ser reaproveitadas em outras aplicações, sendo então considerada uma bateria de segunda vida ou segundo uso (Strickland, Stone, Foster, & Price, 2014), (Casals, García, & Cremades, 2017) e (Hossain, et al., 2019).

Empresas como *Renault* (com o projeto *Advanced Battery Storage*¹), *Nissan* (através da *4R Energy*²), e *startups* como *B2U Storage Solutions*³, *RePurpose Energy*⁴ e *Connected Energy*⁵ já contribuem para o desenvolvimento da economia circular no setor através da reutilização de baterias veiculares em aplicações estacionárias para: redução de picos de demanda de energia elétrica e acompanhamento das flutuações de carga, integração de fontes de energia renovável ou em estações de carregamento rápido para veículos elétricos conforme abordado por (Ahmadi, et al., 2014), (Haram, et al., 2021) e (Shahjalal, et al., 2022).

A tecnologia de baterias de íons de lítio é muito popular no setor de armazenamento de energia sendo amplamente utilizada em dispositivos eletrônicos, celulares, veículos elétricos e sistemas estacionários. No entanto, a escassez, o preço e a poluição dos métodos de extração

¹ *Advanced Battery Storage*

² *4R Energy*

³ *B2U Storage Solutions*

⁴ *Repurpose Energy*

⁵ *Connected Energy*

do lítio têm estimulado o estudo de tecnologias de armazenamento que utilizam elementos menos raros e mais baratos.

As baterias baseadas em íons de sódio são uma alternativa viável, uma vez que muito do conhecimento adquirido no desenvolvimento das baterias de lítio pode ser adaptado (Delmas, 2018). A abundância e a disponibilidade a baixo custo do sódio oferecem uma vantagem econômica significativa para esses tipos de baterias, além de serem mais seguras. Porém, com uma densidade de energia inferior às de íon de lítio, elas são mais competitivas para aplicações estacionárias.

Outra tecnologia de armazenamento promissora é o hidrogênio verde, produzido a partir da eletrólise da água utilizando energia de fontes renováveis. Esse hidrogênio pode ser armazenado e posteriormente convertido de volta em eletricidade por meio de células a combustível, ou até mesmo utilizado em processos industriais ou em veículos de grande e pequeno porte como combustível.

A capacidade de armazenamento por longos períodos, sem perdas significativas, e a versatilidade para sua utilização, são os principais pontos fortes dessa tecnologia. Porém, o alto custo dos eletrolisadores e células combustíveis aliados à sua baixa eficiência fazem com que esta tecnologia não seja tão competitiva atualmente (Yue, et al., 2021).

Antes de serem reaproveitadas em uma aplicação de segunda vida, é preciso realizar uma avaliação nas baterias veiculares, verificando se estão em condições de serem adequadas para operação com segurança. Essa avaliação pode ser feita na bateria como um todo ou pode ser feito através da desmontagem da bateria, teste das células - determinando características como a capacidade remanescente e a impedância interna - e reconstrução de uma nova bateria. Esta nova bateria é construída utilizando as células com características mais semelhantes, agrupando-as em série e paralelo, de forma a atingir os requisitos de tensão e potência conforme sua aplicação (Casals, García, & Cremades, 2017), (Hossain, et al., 2019), (Strickland, Stone, Foster, & Price, 2014), (Martinez-Laserna, et al., 2018).

Ao considerar o segundo cenário, com a mudança na bateria, o Sistema de Gerenciamento da Bateria (BMS - em inglês *Battery Management System*) original pode não ser mais compatível com o novo arranjo. Assim é necessário a adaptação ou substituição do BMS de acordo com a nova configuração da bateria (Shahjalal, et al., 2022), (Börner, et al., 2022). As principais limitações percebidas durante a análise da literatura são relacionadas a restrições do uso das baterias veiculares para aplicação em sistemas estacionários, relacionados principalmente aos limites de carregamento máximo e mínimo. A falta de flexibilidade do BMS representa um desafio significativo nesse contexto, fazendo com que seja necessária a substituição do BMS original ou mesmo o desenvolvimento de um novo BMS adaptado às novas características da bateria reconstruída.

O BMS é o dispositivo responsável por monitorar e controlar o uso da bateria, protegendo-a para minimizar sua degradação e evitar danos. Entre as principais funções do

BMS estão: monitoramento de parâmetros da bateria; estimativa de estados de carga, saúde e temperatura; proteção contra níveis de carga prejudiciais; proteção contra faltas e operação insegura; balanceamento de células; gerenciamento térmico; registro de dados; comunicação e interface com os demais componentes do sistema de armazenamento (Tan, et al., 2022), (Lelie, et al., 2018), (Yang, Liu, Li, & Zhang, 2022), (Gabbar, Othman, & Abdussami, 2021).

Em seu trabalho, Tong, et al. (2013) estudam a viabilidade de instalar um banco de baterias veiculares para armazenar a energia produzida por painéis fotovoltaicos, nessa aplicação a bateria é utilizada para alimentar um sistema de carregamento de veículos utilizando um BMS comercial modular. Neste trabalho as baterias atuam sem conexão com a rede elétrica, diminuindo a demanda sobre o sistema de distribuição e facilitando a instalação de estações de carregamento em locais remotos.

Uma abordagem mais flexível é apresentada por Sylvestrin (2020), com um BMS modificável que permite a operação de até 10 células, compatível com duas tecnologias de baterias diferentes. Outra possibilidade é o uso de um Sistema de Gerenciamento de Bateria Reconfigurável (R-BMS), esse sistema permite a reconfiguração das conexões em série ou paralelo a nível de células, módulos ou bancos de bateria. Uma revisão das topologias de R-BMS presentes na literatura foi realizada por Viswanathan, Palaniswamy, & Leelavinodhan (2019). Ainda, Giegerich, et al. (2016) apresentam o projeto Fox BMS, uma plataforma de código aberto para desenvolvimento de BMS para baterias de íon de lítio.

No contexto do Itaipu Parquetec, localizado em Foz do Iguaçu-PR, diversos projetos vêm sendo desenvolvidos com foco na utilização de baterias de segunda vida em soluções de armazenamento de energia elétrica⁶ (Itaipu Parquetec, 2025). Essa iniciativa está diretamente ligada à trajetória da Itaipu Binacional, que em 2006 iniciou o Programa Veículo Elétrico⁷, com objetivo promover a eletromobilidade no Brasil (Itaipu Binacional, 2012). Dentro desse programa, diversos veículos foram desenvolvidos em caráter experimental, incluindo utilitários elétricos equipados com baterias de sódio do tipo ZEBRA.

Essa tecnologia de bateria, chamada de ZEBRA, foi inventada e patenteada na África do Sul em 1975 (Dustmann, 2004), e já foi objeto de diversos estudos, desde aplicações veiculares (Dixon, Nakashima, Arcos, & Ortúzar, 2009) e (Veneri, Capasso, & Patalano, 2017), quanto para aplicações estacionárias (Shamim, Reed, Sprenkle, & Li, 2021). Ela foi escolhida na época pelo seu desempenho promissor em aplicações de longa duração e pela busca de alternativas à dependência de baterias importadas, visando nacionalizar a tecnologia⁷.

Com o passar dos anos, essas baterias, agora fora de uso nos veículos, passaram a demandar uma destinação adequada. Diante desse cenário, a área de Gestão Energética do Itaipu Parquetec passou a utilizar essas baterias em diferentes projetos de P&D. Alguns dos

⁶ Portais [Itaipu Parquetec Soluções](#) e [Energias Renováveis](#)

⁷ [Programa Veículo Elétrico](#)

quais demandaram o desenvolvimento de um BMS personalizado devido às limitações na operação permitida pelo BMS original.

Uma vez que existe bastante sobreposição nos algoritmos de controle e gerenciamento das baterias nas diferentes aplicações, o desenvolvimento do *software* para um BMS Flexível se torna interessante para diminuir os esforços de desenvolvimento em diferentes projetos. Assim o principal questionamento que motiva este trabalho é: Como desenvolver um *software* de BMS flexível para baterias do tipo ZEBRA, que permita a utilização de diferentes baterias de segunda vida em aplicações estacionárias, superando as limitações operacionais do BMS original?

Portanto, o objetivo deste trabalho é desenvolver um modelo de *software* para BMS aplicado a baterias do tipo ZEBRA de segunda vida, que seja flexível para se adaptar a diferentes projetos, diminuindo significativamente a necessidade de mudanças no *software* devido a variações de requisitos entre projetos ou variações no *hardware* do BMS. Para atingir este objetivo, são definidos os seguintes objetivos específicos:

1. Determinar as funcionalidades do BMS para aplicação em segunda vida, com base na análise de BMS comerciais e no estado da arte;
2. Desenvolver o modelo de *software* do BMS, com uma estrutura modular e flexível;
3. Desenvolver um programa para computador com interface gráfica de usuário para operação e monitoramento do BMS;
4. Implementar protocolos de comunicação industriais para maior compatibilidade com sistemas de gestão energética;
5. Validar o funcionamento técnico testando as proteções, comunicações e operacionalidade do BMS.

Capítulo 2

Referencial Teórico

Este capítulo traz uma base teórica relacionada às baterias de sódio, com ênfase nas características da tecnologia ZEBRA e suas principais aplicações (Seção 2.1), além disso, discute o panorama atual dos BMS, compreendendo as soluções aplicadas em baterias de segunda vida, baseada na revisão da literatura em bases científicas (Seção 2.2) e uma análise das funcionalidades de BMSs comerciais (Seção 2.3), com o objetivo de identificar os requisitos essenciais e as tendências para o futuro no gerenciamento de baterias em aplicações estacionárias e de segunda vida.

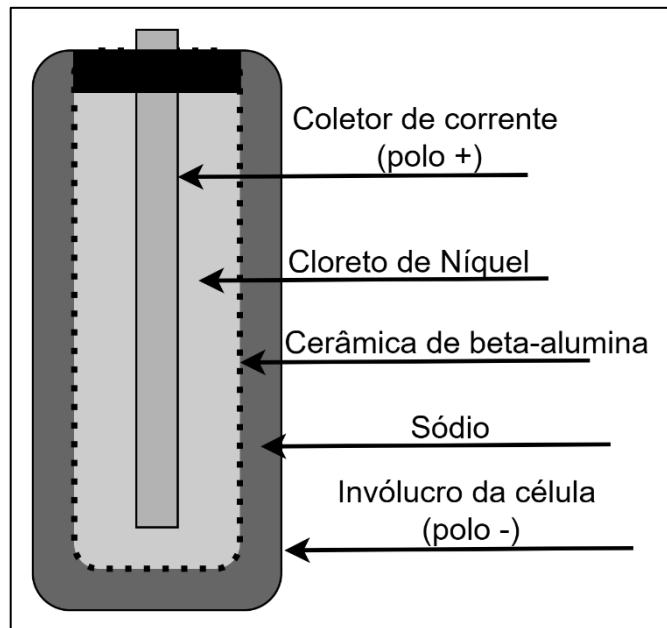
2.1. Baterias de Sódio (ZEBRA)

As baterias do tipo ZEBRA pertencem a uma classe de sistemas de armazenamento que utiliza sal fundido, portanto elas devem operar com temperatura elevada, para que o sal esteja no estado líquido. Quando este tipo de bateria está a temperatura ambiente seus componentes ficam sólidos impedindo que as reações ocorram, essencialmente desabilitando a bateria. Por este motivo as baterias de sal fundido podem ser armazenadas de forma mais segura que outras tecnologias, como lítio por exemplo, porém possuem a desvantagem de precisar de um controle térmico para manter a temperatura de operação entre 270°C à 350°C (Armand, Ortiz-Vitoriano, Olarte, Salazar, & Ferret, 2023).

A tecnologia sódio-metal cloreto foi patenteada em 1975 por John J. Werth da empresa *ESB Incorporated*, e começou a ser desenvolvida em 1978 pelo *Council for Scientific and Industrial Research* (CSIR), em Pretoria, África do Sul. Inicialmente células foram desenvolvidas com ferro (Na/Fe-FeCl₂). E em 1985, na mesma instituição, uma nova célula foi desenvolvida no âmbito do projeto *Zeolite Battery Research Africa* (ZEBRA), com um eletrólito de estado sólido (cerâmica de beta-alumina) e o uso de níquel (Na-NiCl₂) ao invés de

ferro, a nova célula tem tensão mais elevada, e maior durabilidade comparada a sua antecessora (Armand, Ortiz-Vitoriano, Olarte, Salazar, & Ferret, 2023).

A célula da bateria do tipo ZEBRA é formada por um tubo cerâmico de beta-alumina preenchido com níquel e cloreto de sódio (NaCl_2) e tetracloroaluminato de sódio (NaAlCl_4) formando o catodo, o tubo cerâmico é abrigado em um invólucro metálico preenchido com sódio, de acordo com o diagrama apresentado pela Figura 2.1.



Fonte: Adaptada de Sudworth (2001).

Figura 2.1: Diagrama de célula do tipo ZEBRA.

De maneira geral as baterias ZEBRA possuem densidade de energia similar as de lítio, porém com densidade de potência consideravelmente inferior (Armand, Ortiz-Vitoriano, Olarte, Salazar, & Ferret, 2023). Além disso, esta tecnologia de baterias é muito segura, podendo operar com até 5% das células conectadas em serie em estado de falha, dispensando a necessidade de monitoramento individual das tensões das células. Esse monitoramento é essencial quando se utiliza tecnologia de íons de lítio, pois a falha de uma única célula pode gerar superaquecimento no módulo, podendo causar incêndio ou até mesmo a explosão da bateria (Sudworth, 2001), (Benato, et al., 2015) e (Feng, et al., 2018).

Outra característica importante da bateria ZEBRA é que devido ao seu eletrólito cerâmico de beta-alumina, que bloqueia a passagem de qualquer outro material exceto íons de sódio entre os polos positivo e negativo da bateria, ela possui eficiência Coulombométrica de 100% (Shamim, Reed, Sprenkle, & Li, 2021), portanto, o estado de carga da bateria pode ser calculado apenas contabilizando a carga em Amper-hora que passa pela bateria (Sudworth, 2001).

Alguns anos após o desenvolvimento da tecnologia ZEBRA, o grupo *Daimler-Benz* da Alemanha, juntamente com a empresa *Anglo-American Corporation*, da África do Sul, formou uma empresa conjunta chamada *AEG Anglo Batteries* para comercializar baterias destinadas a

veículos elétricos (Sudworth, Zebra batteries, 1994). Posteriormente, a empresa *MES-DEA*, adquiriu a tecnologia ZEBRA e iniciou a produção industrial, alcançando em 2004 a capacidade de produzir 2000 baterias por ano (Dustmann, 2004).

Em 2011, a *General Electric* iniciou a comercialização de baterias ZEBRA nos EUA, visando aplicações em larga escala para redes elétricas, mas devido a pequena demanda no setor a produção destas baterias foi encerrada em 2015. Atualmente, a única empresa que fabrica baterias ZEBRA é a suíça *FzSoNick*, com suas baterias usadas principalmente como backup para antenas de comunicação (Armand, Ortiz-Vitoriano, Olarte, Salazar, & Ferret, 2023).

A comparação com as baterias de íon-lítio revela que sua segurança e durabilidade as tornam uma escolha ideal para ambientes extremos e sistemas de armazenamento de energia estacionária. No entanto, a menor densidade energética e a necessidade de um controle térmico robusto, podem limitar sua aplicação em veículos elétricos e dispositivos portáteis. Portanto, o nicho das baterias ZEBRA reside em aplicações estacionárias, aliviando a demanda por baterias de lítio e proporcionando uma alternativa mais sustentável.

2.2. Estado da Arte de BMS

Esta seção apresenta e discute o estado da arte em BMS aplicado para baterias de segunda vida. Embora existam diversos estudos voltados a tecnologias de lítio e chumbo-ácido, observa-se uma escassez significativa de pesquisas direcionadas especificamente às baterias de sódio, como as do tipo ZEBRA. Diante disso, a abordagem adotada neste trabalho consistiu em revisar técnicas e soluções, independentemente da tecnologia da bateria, avaliando sua aplicabilidade e adaptando-as ao desenvolvimento de um sistema de gerenciamento voltado às particularidades das baterias ZEBRA.

2.2.1. Trabalhos Acadêmicos

Um dos principais desafios ao se trabalhar com baterias de segunda vida é realizar a integração da bateria com o novo sistema onde ela irá operar. Isso ocorre pois o BMS da bateria veicular nem sempre possui uma forma de comunicação compatível com os inversores comerciais disponíveis.

O trabalho de Castillo-Martínez, et al. (2022), apresenta o desenvolvimento de um dispositivo baseado em um Arduino® que é responsável por realizar a comunicação entre o BMS de uma bateria lítio-íon veicular retirada de um *Nissan® LEAF*, com um inversor híbrido comercial *Ingecon® Sun Storage IPlay*. O Arduino coleta informações e envia comandos para a bateria e para o inversor, controlando o sistema e determinando a carga e descarga da bateria. O trabalho também inclui uma Interface Gráfica de Usuário (GUI – do inglês *Graphical User*

Interface) desenvolvida em LabVIEW®, por meio da qual são exibidas as informações da bateria e é possível enviar comandos de carga e descarga.

Esta abordagem utiliza toda a estrutura física das baterias e do BMS original, não sendo necessária intervenções nas baterias, configuração ou desenvolvimento de um BMS. O dispositivo criado, executa a função de coordenar o uso dos equipamentos além de executar a função de um gestor energético, tomando decisões quanto à estratégia para o uso da energia armazenada, papel que foge ao escopo do BMS.

Em alguns casos, a bateria não pode ser utilizada diretamente, seja pelo protocolo de comunicação usado pelo BMS não ser conhecido, ou mesmo por falha de módulos do banco de baterias. Nesses casos, a bateria precisa passar por modificações, reutilizando parte das células ou módulos da bateria, como foi realizado por Tong, et al. (2013).

No seu trabalho, é realizada a instalação de uma microrrede isolada, integrando um banco de baterias veiculares de segunda vida com um sistema fotovoltaico para atender um sistema de carregamento de veículos elétricos. São utilizadas 135 células organizadas com 9 em paralelo e 15 em série, totalizando uma capacidade de 289,75 Ah com tensão de 48 V.

Para monitorar e fazer a proteção da bateria, um BMS eLithiuron Lithiumate Pro com um módulo escravo monitorando a tensão de cada banco de 9 células paralelas foi utilizado. O BMS foi configurado para que a bateria opere entre as tensões de célula de 4V e 2,8V.

Vemos que aqui foi possível utilizar um BMS comercial, mas estes aparelhos nem sempre são aplicáveis, principalmente considerando as baterias do tipo ZEBRA, uma vez que eles não realizam o controle térmico necessário para a operação adequada destas baterias.

Assim para aplicações com baterias ZEBRA pode ser necessário o desenvolvimento de um novo BMS, quando o original não puder ser utilizado. Mudança da topologia da bateria, incompatibilidade das características de operação da bateria veicular com a aplicação estacionária ou falta de documentação na comunicação são alguns fatores que podem dificultar a integração da bateria com os outros dispositivos do sistema.

Considerando a baixa densidade de potência e a alta densidade de energia das baterias ZEBRA, Dixon, et al. (2009) realizam um estudo para avaliar a viabilidade do uso de super capacitores em conjunto com uma bateria ZEBRA em um veículo elétrico experimental. Observou-se que o sistema utilizando baterias de sódio e supercapacitores era aproximadamente três vezes mais barato que um sistema similar com baterias de lítio na época do estudo.

Além disso, a capacidade de aceleração e frenagem do sistema era comparável à do sistema de lítio. No entanto, foi verificado desempenho inferior em longas subidas ou descidas, uma vez que a bateria de sódio não pode fornecer grandes potências e os supercapacitores possuem uma capacidade de armazenamento limitada. Em subidas prolongadas, o veículo perde potência e deve subir lentamente, enquanto em descidas longas é necessária a dissipação resistiva da energia de frenagem.

Shamim, et al. (2021) fazem uma análise de um módulo de bateria 48TL200 (tecnologia ZEBRA) da fabricante FzSoNick aplicado para realização de redução de demanda de energia. No estudo foi verificado 80,9% de eficiência global do módulo para um ciclo de carga e descarga, incluindo a energia gasta pelo módulo para manter a bateria aquecida.

Ao utilizar o módulo para realização da redução de demanda com ciclos de descarga de 6 horas, a eficiência global do módulo caiu para 71% devido aos períodos de espera entre carga e descarga. Em conclusão os autores ressaltam que apesar da perda de eficiência devido ao aquecimento, o módulo apresentou bom desempenho e baixa degradação depois de 150 ciclos.

Outra motivação para o desenvolvimento do BMS para uma aplicação em segunda vida pode ser a necessidade de maior flexibilidade em relação às soluções comerciais, seja na configuração de conexão das baterias, na definição dos parâmetros de operação, calibração dos sensores, nas interfaces de comunicação, nos algoritmos executados pelo BMS ou em um conjunto dessas e outras razões.

Em seu trabalho de mestrado, Sylvestrin (2020) descreve o desenvolvimento de um sistema embarcado adaptável para gestão de baterias, utilizando tecnologias abertas. O objetivo foi desenvolver um protótipo capaz de monitorar parâmetros como temperatura, corrente e tensão, e estimar o estado de carga. O trabalho explora diferentes métodos de estimação do estado de carga, como a contagem de Coulomb e o uso de filtros de Kalman estendidos (EKF), comparando a eficácia destes métodos.

Notavelmente o BMS projetado por Sylvestrin (2020) apresenta a capacidade de operar com até 10 células de dois tipos distintos: íons de lítio 18650 e baterias ZEBRA. Essa flexibilidade decorre de fatores como diferentes entradas I2C e SPI para sensores, a adaptabilidade a diferentes níveis de tensão e a utilização de Software *Open Source* FoxBMS, permitindo que os algoritmos fossem adaptados para operação com ambos os tipos de bateria.

Tendo em vista a possibilidade de falhas nas baterias de segunda vida, a abordagem do Sistema de Gerenciamento de Bateria Reconfigurável (R-BMS) oferece maior tolerância a falhas e aumenta a vida útil das baterias ao permitir que as conexões em série ou paralelo a nível de células, módulos ou bancos de bateria sejam realizadas durante a operação das baterias.

Apesar de seus benefícios, a capacidade de alterar a conexão das baterias torna o R-BMS bastante complexo e de alto custo, sendo viáveis apenas para aplicações com baterias em larga escala aplicadas no sistema de potência, nas quais há necessidade de redundância nas formas de atendimento à carga e a tolerância a falhas é menor. Uma revisão das topologias de R-BMS presentes na literatura é feita por Viswanathan, et al. (2019).

2.2.2. Arquitetura de *Software*

A forma como o *software* de qualquer sistema é organizada e implementada interfere na capacidade de executar as suas funções. Portanto, é preciso dedicar algum esforço no

planejamento do *software* e na implementação do código do BMS, garantindo que as suas funções sejam executadas da forma esperada.

Embora as funções executadas por um BMS (leitura dos sensores, acionamento das chaves de conexão, verificação dos limites de operação) sejam em sua maioria, simples, a quantidade de ações a serem realizadas trazem dificuldade na coordenação dependendo da arquitetura de *software* escolhida.

De acordo com Hossain, et al. (2019), a utilização de um sistema operacional de tempo real (RTOS, do inglês *Real Time Operating System*) permite a execução de diferentes tarefas simultaneamente. Na realidade, a maioria dos microcontroladores realizam a execução das tarefas de forma sequencial, mas o uso de um sistema operacional permite que o *software* seja desenvolvido e planejado como se as tarefas acontecessem de forma paralela enquanto o sistema operacional se encarrega da coordenação da execução das tarefas.

A Figura 2.2 ilustra como o *software* é implementado em comparação com a execução pelo microprocessador. No quadro à esquerda, é ilustrada quais tarefas o BMS deve executar, estas tarefas podem ser implementadas como se fossem programas separados, chamados internamente de tarefas.

Diversas tarefas podem ser criadas com diferentes prioridades. Durante a execução do programa, o sistema operacional escolhe qual tarefa estará executando, considerando seu nível de prioridade e garantindo que todas sejam executadas, conforme ilustrado no quadro da direita.

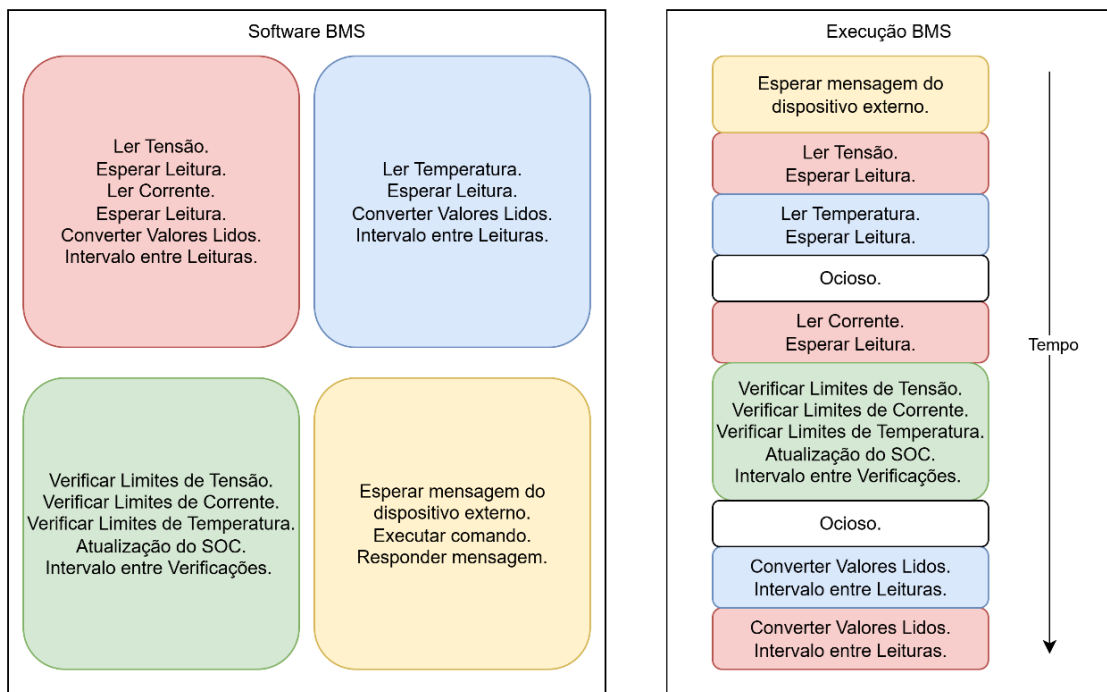
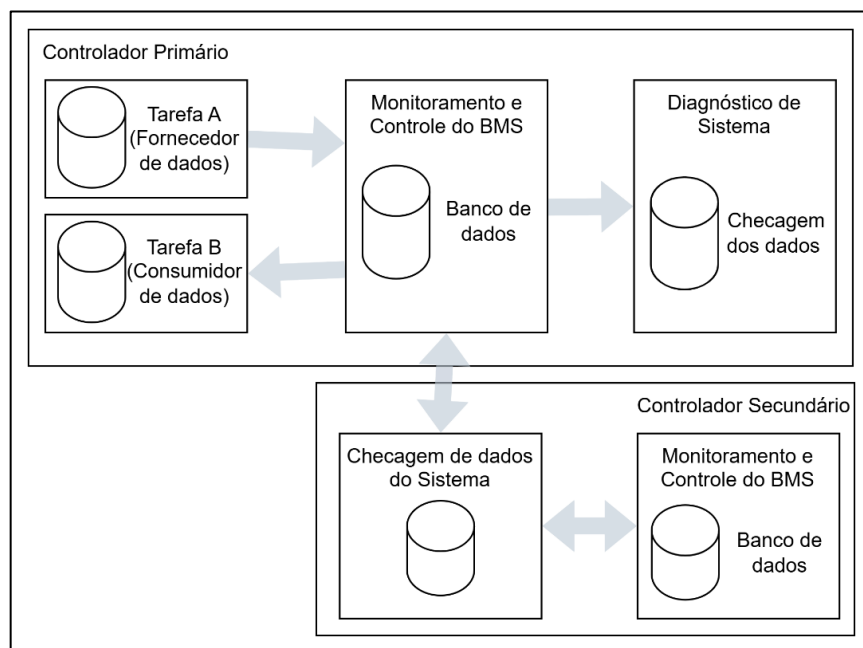


Figura 2.2: Comparação entre o *software* e execução usando RTOS.

O uso de um sistema operacional, no caso do BMS, faz com que as diversas ações que ele deve executar possam ser implementadas individualmente, facilitando consideravelmente o projeto do *software*. Porém algumas tarefas precisam de informações que são responsabilidade de outras tarefas, por exemplo, para estimativa do estado de carga são necessárias informações como o valor lido dos sensores de corrente e de tensão da bateria.

Uma solução para o compartilhamento de informações entre as tarefas é a utilização de um banco de dados centralizado, no qual todas as tarefas podem consumir as informações que precisem, e fornecer as informações pelas quais são responsáveis. Este modelo de estrutura de dados é utilizado por Akdere, et al (2016) no Fox BMS. Nesta arquitetura, além de servir como central de dados para as tarefas do BMS, o banco de dados também é compartilhado com um segundo microcontrolador, que serve como redundância em caso de falha do primeiro.

A Figura 2.3 apresenta como o banco de dados permite que diferentes tarefas interajam a partir de trocas de informações, que são indicadas pelas flechas, sem a necessidade de comunicação direta, diminuindo o acoplamento entre as tarefas, o que facilita manutenções ou alterações no código.



Fonte: Adaptado de Akdere, et al (2016).

Figura 2.3: Modelo de dados e isolamento entre as tarefas.

2.2.3. Estimativa de Estados

Os principais estados calculados pelo BMS são o *State of Charge (SOC)*, o *State of Health (SOH)* e o *Depth of Discharge (DOD)*, estes valores variam entre 0 e 1, e geralmente são expressos como um percentual, de acordo com a Equação 2.1.

$$\begin{cases} SOC = \frac{C}{C_{nom}} \\ DOD = 1 - SOC \\ SOH = \frac{C_{max}}{C_{nom}} \end{cases} \quad 2.1$$

O SOC pode ser definido como a razão entre a quantidade de carga atual da bateria (C) pela sua capacidade nominal de carga (C_{nom}), e representa quanto da carga total a bateria ainda possui, já o DOD representa quanto do total de carga da bateria já foi consumido. Enquanto o SOH é a razão entre a capacidade máxima de carga atual da bateria (C_{max}) pela sua capacidade máxima nominal da bateria (C_{nom}), e representa quanta capacidade a bateria ainda possui quando comparada ao momento da sua fabricação (Dini, Colicelli, & Saponara, 2024).

Diversos métodos foram desenvolvidos para estimar estes estados de baterias, desde métodos simples, que se baseiam diretamente nas suas definições, até métodos mais elaborados, que levam em conta modelos elétricos equivalentes das baterias ou usam técnicas de *machine learning*. Uma vez que o DOD é diretamente calculado a partir do SOC, na revisão apresentada a seguir, só serão abordados métodos aplicados a estimativa do SOC e SOH.

Contagem de Coulomb: É o método mais simples para estimar o SOC de uma bateria, ele se baseia na medição e cálculo da integral da corrente que flui pela bateria ao longo do tempo para determinar a quantidade de carga transferida. Enquanto o SOH pode ser determinado monitorando a capacidade máxima de carga que a bateria possui quando carregada completamente (Dini, Colicelli, & Saponara, 2024), a formulação da contagem de Coulomb é apresentada pela Equação 2.2.

$$\begin{cases} SOC(t) = SOC(t_0) + \frac{\int_{t_0}^t I(t)dt}{C_{nom}} \\ SOH = \frac{C_{max}}{C_{nom}} \end{cases} \quad 2.2$$

Esse método é simples e possui fácil implementação, porém necessita do valor inicial de carga da bateria e é sensível ao acúmulo dos erros de medição durante a operação.

Open Circuit Voltage (OCV): a estimativa do SOC através da tensão de circuito aberto é um método bastante utilizado e se baseia na existência de uma relação entre o OCV da bateria e o seu SOC (Zhou, Zheng, Pan, & Lu, 2021). A partir de ensaios de descarga na bateria, é possível obter os valores que relacionam as duas grandezas, eles são utilizados para encontrar uma equação ou uma tabela de referência.

A desvantagem do método é que ele somente tem validade quando a bateria está em repouso, assim durante a carga ou descarga ele não pode ser utilizado. Portanto é comum que seja utilizada uma abordagem híbrida para estimar o SOC usando a tensão OCV quando a bateria está em repouso, e durante a sua operação o método de contagem de Coulomb é aplicado, de acordo com a Equação 2.3.

$$\begin{cases} C_0 = SOC(OCV) * C_{nom} \\ \Delta C = \int_0^t I(t) dt \\ SOC = \frac{C_0 + \Delta C}{C_{nom}} \end{cases} \quad 2.3$$

Filtro de Kalman: É um algoritmo que combina medições da bateria com uma previsão do sistema baseado em algum modelo eletroquímico ou modelo elétrico equivalente para obter uma estimativa mais precisa do estado do sistema (Dini, Colicelli, & Saponara, 2024). A adaptabilidade é sua principal vantagem, porém sua implementação depende de um modelo da bateria e dos parâmetros do modelo, o que o torna bastante complexo. Diversas variações do método são discutidas por (Zhou, Zheng, Pan, & Lu, 2021).

Aprendizado de Máquina: Os métodos de *machine learning* (ML) têm aumentado em popularidade para estimativa de SOC e SOH. Isto deve-se à sua capacidade de aprender padrões complexos a partir de grandes conjuntos de dados sem depender de modelos detalhados da bateria, porém este tipo de abordagem necessita de muitos dados operacionais da bateria, o que representa um grande desafio para esse tipo de técnica. Entre as técnicas utilizadas estão as Redes Neurais, as Máquinas de Vetores de Suporte e *Deep Learning*. Uma revisão mais aprofundada destes métodos é apresentada nos trabalhos de Lipu, et al. (2022), Dini, et al. (2024) e Zhou, et al. (2021).

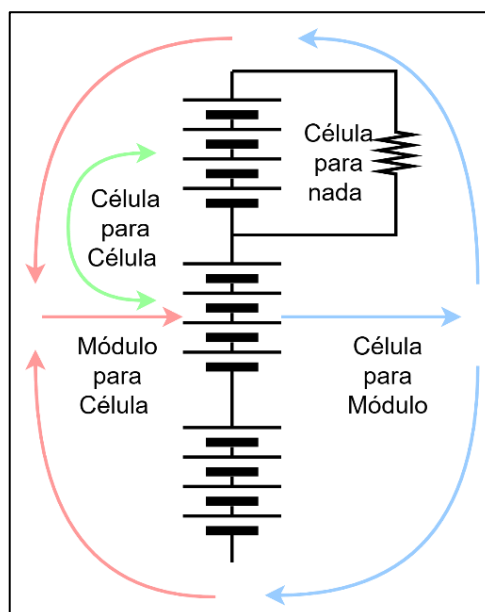
Digital Twin (DT): É uma representação virtual de um ativo físico, como uma bateria, que pode ser utilizada para simular e analisar o comportamento desse ativo. Um gêmeo digital completo de bateria exige a criação de modelos complexos que representem diferentes aspectos do comportamento da bateria, incluindo suas características elétricas, térmicas e de envelhecimento. Dados reais de tensão, corrente, temperatura são enviados ao gêmeo digital através de Internet das Coisas (IoT) e o modelo virtual é atualizado continuamente na nuvem. Uma análise mais detalhada é apresentada por Wang, et al. (2021).

2.2.4. Balanceamento de Células

Ao longo da sua operação, as células das baterias tendem a apresentar envelhecimento e pequenas diferenças de capacidade e resistência interna, essas diferenças se acumulam e podem causar aceleração na degradação e perda da capacidade, especialmente em baterias de segunda vida (Lee, Seonwoo, Lee, & Bae, 2016).

Para diminuir o efeito desses problemas são aplicadas técnicas de balanceamento passivo, que descarregam as células dissipando a energia na forma de calor, e técnicas de balanceamento ativo, que transferem a energia entre as células. O balanceamento ativo é mais eficiente e rápido que o passivo, pois reaproveita a energia das células e pode atingir correntes de balanceamento

maiores; porém, é mais complexo e caro. A Figura 2.4 ilustra diferentes formas de realizar o balanceamento de células, de acordo com a forma de distribuição de energia entre elas.



Fonte: Traduzido de Raeber, Heinzelmann, & Abdeslam (2020).

Figura 2.4: Princípio de funcionamento dos métodos de balanceamento ativo.

Métodos de transferência de energia de uma célula para outra (C2C do inglês *Cell-to-Cell*) correspondem às técnicas de balanceamento nas quais a energia excedente de uma célula é transferida para células adjacentes com menor energia. Embora esses métodos possuam alta eficiência, eles podem ser inviáveis em algumas aplicações devido ao tempo necessário.

Já as técnicas que transferem a energia de uma célula para o módulo (C2P do inglês *Cell-to-Pack*), causam menos diferenças térmicas dentro da bateria, uma vez que a energia é distribuída para todo o módulo. Por outro lado, as técnicas que carregam uma célula com a energia do módulo (P2C do inglês *Pack-to-Cell*), são mais eficientes em manter as células mais fracas com carga equilibrada (Omariba, Zhang, & Sun, 2019). A seguir serão detalhadas algumas das principais técnicas.

Balanceamento passivo: É realizado com a conexão de resistências em paralelo com as células de uma bateria (Lee, Seonwoo, Lee, & Bae, 2016). A energia dissipada nos resistores é proporcional a corrente de balanço e o tempo de acionamento ($E = RI^2 * t$), este é o método mais simples, barato e o menos eficiente.

Balanceamento por capacitor: Consiste em carregar e descarregar capacitores para transferir energia entre as células. A transferência é obtida conectando um capacitor a uma célula carregando-o e depois descarregando-o ao conectá-lo a uma outra célula mais fraca.

É possível utilizar apenas um ou múltiplos capacitores para realizar o balanceamento entre as células, permitindo diferentes possibilidades para seleção das células que participam

do balanço. A quantidade de chaves e a complexidade do controle são os fatores determinantes para seleção do método.

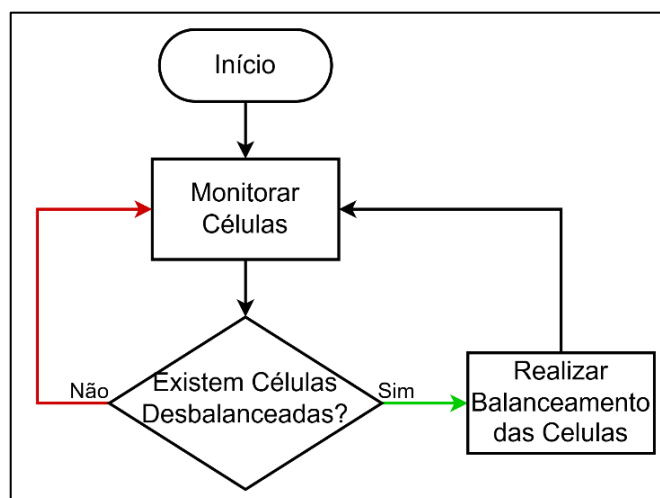
Apesar de ser um circuito simples e barato, uma desvantagem desta técnica é a quantidade de energia transferida em um ciclo de carga e descarga do capacitor, que depende da diferença de tensão entre as células ($E = 1/2 C\Delta V^2$). A diferença entre as células geralmente não é muito alta, fazendo com que o circuito não atue da forma mais eficiente durante grande parte da operação da bateria (Barsukov, 2009) e (Hemavathi, 2020).

Balanciamento por Indutor: Seu funcionamento é semelhante ao do balanceamento por capacitores, existindo topologias com apenas um indutor, ou com múltiplos indutores. Ao controlar o chaveamento para conectar os indutores a diferentes células é possível realizar a transferência de energia entre as células vizinhas. Topologias de chaves e indutores mais complexas permitem que sejam realizadas transferências entre células mais distantes ou entre grupos de células, com a desvantagem de adicionar complexidade e custo ao projeto.

A principal vantagem dos indutores em relação aos capacitores é que a energia transferida depende da corrente de balanço que circula pelo indutor ($E = 1/2 LI^2$), o que permite maior transferência de energia durante todas as etapas de operação da bateria. Porém, os indutores tendem a serem maiores e mais caros (Hemavathi, 2020) e (Barsukov, 2009).

Balanciamento por Conversores chaveados: Utilizando topologias de conversores chaveados é possível realizar a troca de energia entre o módulo de bateria e uma célula da bateria (C2P ou P2C). Esse tipo de topologia utiliza transformadores e possui maior eficiência de balanceamento, controle simples, porém o uso de transformadores aumenta o tamanho e o custo da aplicação (Xiangwei, Jiahao, Zhen, Kang, & Xiaozhuo, 2020) e (Barsukov, 2009).

Assim como as técnicas anteriores existem diversos circuitos para balanceamento de células baseado em conversores chaveados, alguns trabalhos que abordam esse tipo de técnica são Xiangwei, et al. (2020), Raeber, Heinzelmann, & Abdeslam (2020) e Yu, et al. (2019).



Fonte: Adaptado de Cadar, Petreus, Patarau, & Palaghita (2010).

Figura 2.5: Diagrama genérico para algoritmo de balanceamento.

A forma como o balanceamento das células da bateria é realizada está diretamente ligada à topologia utilizada. Porém, de maneira geral, os algoritmos de balanceamento se baseiam na diferença de tensão ou na diferença do SOC das células.

O diagrama na Figura 2.5 apresenta a ideia fundamental desses algoritmos: inicialmente, a tensão ou o SOC de todas as células são analisados; se um critério mínimo de desequilíbrio for alcançado, o processo de balanceamento é iniciado, sendo suspenso quando todas as células atingem o equilíbrio desejado (Cadar, Petreus, Patarau, & Palaghita, 2010).

2.2.5. Medições de Grandezas

Para o bom desempenho do BMS é fundamental realizar medições precisas de grandezas como tensão, corrente e temperatura, a esse respeito serão discutidas nesta seção algumas considerações apresentadas na literatura. Em seu trabalho Lelie, et al. (2018) explora detalhadamente os aspectos relevantes para a medição dessas grandezas.

Quanto a tensão, é destacada a importância do monitoramento de cada célula, em se tratando de baterias de lítio, para evitar sobrecarga ou descarga excessiva que podem degradar a bateria e causar o efeito de avalanche térmica. Já nas baterias de sódio essa funcionalidade não é crucial, pela característica mais estável destas baterias.

Ainda a precisão da medida pode afetar consideravelmente a estimativa do SOC. Quando a relação entre OCV e SOC é utilizada e a bateria possui um perfil de tensão muito achatado, a precisão do sensoriamento pode influenciar consideravelmente no resultado. A Figura 2.6 apresenta o perfil de tensão por SOC de dois tipos distintos de baterias de lítio: Óxido de Lítio-Níquel-Manganês-Cobalto (NMC) e Fosfato de Ferro-Lítio (LFP). Demonstrando como a precisão de 1mV na leitura da tensão afeta a estimativa de SOC dependendo do tipo de bateria.

Uma forma simples para medir a tensão da bateria é a utilização de um divisor de tensão resistivo para reduzir a tensão do módulo a um nível adequado para leitura por um conversor analógico-digital (ADC).

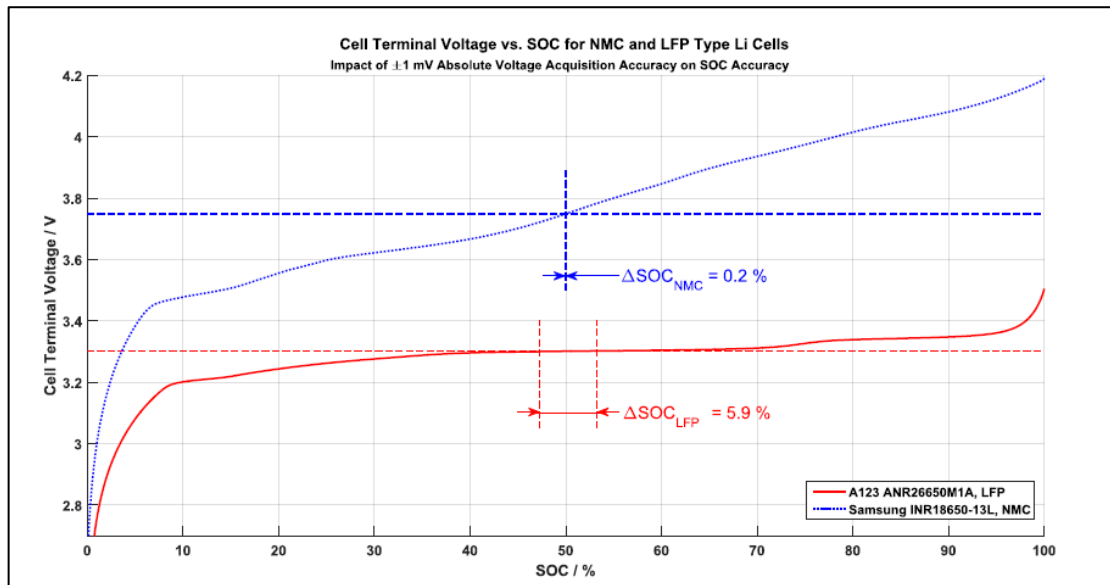
Também é possível medir a tensão total da bateria através do monitoramento individual das células, utilizando circuitos integrados (CI), específicos para monitoramento de células. Alguns exemplos desse tipo de dispositivos são: BQ79656-Q1⁸ da fabricante *Texas Instruments* e LT6804⁹ da fabricante *Linear Technology*.

Monitoradores de células de baterias trazem a vantagem de possuir diversos canais de leitura (8 a 24 dependendo do modelo), além de geralmente incluir a capacidade de acionamento

⁸ [BQ79656-Q1](#)

⁹ [LTC680412](#)

de balanço passivo das células monitoradas e capacidade de conexão de diversos dispositivos em um mesmo barramento de comunicação, possibilitando a leitura de centenas de células.



Fonte: Retirado de Lelie, et al. (2018).

Figura 2.6: Comparação da incerteza na estimativa do SOC por tensão.

A aquisição da corrente que circula pela bateria tem importância não somente para proteção da bateria, mas também para o cálculo de SOC durante a operação. Porém existe uma relação direta entre a precisão do sensor com o erro acumulado no SOC ao longo do tempo, logo o tipo de sensor usado influencia diretamente na eficácia da estimativa do SOC.

Os principais métodos a leitura da corrente através de uma resistência shunt, que é uma opção barata, porém com menor precisão devido à baixa tensão no resistor, e sensores de efeito Hall, que medem o campo magnético gerado pela passagem de corrente tendem a ser mais precisos e fornecem isolamento galvânica, porém com custo maior (Lelie, et al., 2018).

Outra grandeza muito importante para a operação de baterias é a temperatura, o uso de uma bateria fora dos limites de operação pode diminuir significativamente sua vida útil ou mesmo causar falhas deixando a bateria inoperável, em casos mais extremos (Feng, et al., 2018).

De acordo com Lelie, et al. (2018), os métodos mais comuns de leitura de temperatura são baseados no uso de sensores que mudam sua resistência de acordo com a temperatura (NTC ou PTC). Também existem opções de sensores digitais que se comunicam diretamente com o microcontrolador como por exemplo o DS18B20¹⁰ da marca *Maxin* ou o LM75¹¹ da *Analog Devices*.

¹⁰ [DS18B20](#)

¹¹ [LM75](#)

2.2.6. Conectividade

A capacidade do BMS de se comunicar com outros equipamentos é essencial para a sua integração em sistemas reais, seja para permitir o monitoramento e envios de comandos para o BMS por um sistema de controle e gestão de energia (Lelie, et al., 2018). A conexão com outros sistemas permite técnicas de estimativa de estados mais elaboradas como digital Twin e aprendizagem de máquina, que geralmente demandam poder computacional e volume de armazenamento que só pode ser atingido em execução na nuvem (Tran, et al., 2022).

Percebe-se a divisão entre dois ambientes de integração distintos, conforme ilustrado pela Figura 2.7. O primeiro diz respeito à conectividade com dispositivos físicos do sistema, na qual protocolos de comunicação industriais representam a técnica já estabelecida para redes de controle local. O segundo diz respeito à conectividade com a internet, permitindo execução de algoritmos mais precisos e armazenamento de grandes quantidades de dados em nuvem.

A ligação à internet pode levar a custos de implementação mais elevados. Além disso, a divisão das funções entre a unidade BMS local e a plataforma na nuvem deve ser considerada com cautela. Funções críticas de segurança, como detecção de falhas, devem ser executadas localmente, enquanto funções não críticas que exigem maior poder computacional, como estimativa de estado e visualizações em interface gráfica podem ser executadas em nuvem (Tran, et al., 2022).

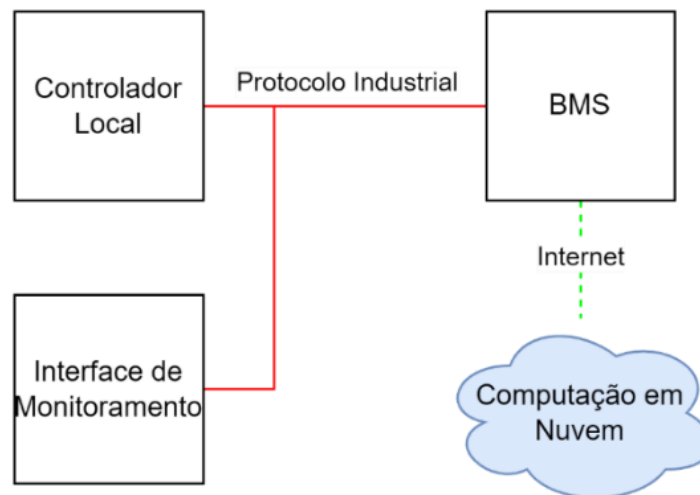


Figura 2.7: Ambientes de conectividade do BMS.

2.3. Soluções Comerciais para BMS

Esta seção apresenta algumas soluções comercializadas de BMS que possuem flexibilidade, alguns já citados anteriormente, trazendo mais detalhes sobre as suas características e funcionalidades.

2.3.1. BMS Elithion Lithiumate Pro

É um BMS para baterias de lítio que permite o monitoramento e controle de 2 a 256 células em série, realizado por módulos com sensores de tensão e temperatura instalados em cada célula, as informações dos módulos são concentradas em uma unidade central e que é responsável pela leitura da corrente e controle da conexão da bateria. As placas utilizadas para monitoramento individual das células, monitoram tensão, temperatura e possuem capacidade de balanceamento passivo com corrente de até 200 mA.

O BMS Elithion Lithiumate Pro¹² utiliza o método de contagem de coulombs para calcular o SOC no centro da operação e relação linear entre tensão e SOC nos extremos (SOC > 97 e SOC < 15). O SOH é calculado a partir da resistência interna da célula, calculada pelo BMS e da capacidade restante monitorada. O BMS possui interfaces de comunicação CAN e RS232 e é projetado para ser flexível, adaptável a diferentes quantidades de células podendo ser aplicado em diversos cenários com diferentes níveis de potência.

2.3.2. BMS Orion

O BMS Orion¹³ é projetado para oferecer flexibilidade e desempenho em uma ampla gama de aplicações de baterias de íon de lítio. Com a capacidade de monitorar e controlar até 180 células em série, utilizando uma abordagem centralizada para medir tensão, temperatura e corrente das células e gerenciar a conexão da bateria.

O BMS utiliza o método de contagem de coulombs para calcular o SOC da bateria e utiliza um método de correção baseado em desvios observados nas medições de tensão e corrente. O SOH é calculado a partir da resistência interna da célula calculada pelo BMS e da capacidade restante monitorada. O balanceamento passivo do Orion BMS possui capacidade de corrente de até 200mA. O BMS Orion possui duas interfaces CAN, para a integração com dispositivos externos e permite personalizar até 10 mensagens a serem transmitidas periodicamente da necessidade da aplicação.

¹² [BMS Elithion Lithiumate Pro](#)

¹³ [BMS Orion](#)

2.3.3. Fox BMS

O Fox BMS¹⁴, é o resultado de um ambiente de pesquisa e desenvolvimento gratuito e aberto para o design de BMS desenvolvido pelo *Fraunhofer IISB* na Alemanha, projetado para controlar sistemas complexos de armazenamento de energia elétrica, como baterias de íon de lítio (Giegerich, et al., 2016).

A arquitetura desse sistema é modular, composto por vários módulos escravos ligados diretamente à bateria, cada um responsável pelo monitoramento de 18 células. Um módulo mestre concentra todas as informações recebidas e realiza todas as funcionalidades de proteção e monitoramento da bateria.

Por ser uma plataforma aberta, é possível desenvolver e adaptar todos os algoritmos do BMS, permitindo que o desenvolvedor tenha total controle sobre como o sistema irá operar. Apesar de ser uma plataforma aberta, a empresa alemã oferece alguns serviços que incluem fabricação de kits de desenvolvimento, design e otimização de *hardware* BMS, desenvolvimento de *software* embarcado, modelagem de células de bateria e consultoria.

O módulo principal possui interfaces de comunicação CAN e uma placa de extensão RS485 para integração com outros dispositivos, além de uma interface USB para monitoramento, configuração e depuração via computador. A Tabela 2.1 apresenta um resumo comparativo dos BMSs abordados nesta seção.

Tabela 2.1: Comparação entre os BMSs Comerciais.

	Elithion Lithiumate Pro	Orion BMS	Fox BMS
Número de células	2 a 256	Até 180	Módulo com 18 células
Arquitetura	Modular	Centralizada	Modular
Balanceamento	Passivo 200mA	Passivo 200mA	Passivo
Cálculo de SOC	Couloumb + Relação linear de tensão/SOC	Couloumb + Correção de desvios	Personalizável
Cálculo de SOH	Resistência Interna e Capacidade Restante	Resistência Interna e Capacidade Restante	Personalizável
Interfaces de comunicação	CAN, RS232	2x CAN	CAN, USB, RS485

¹⁴ Fox BMS

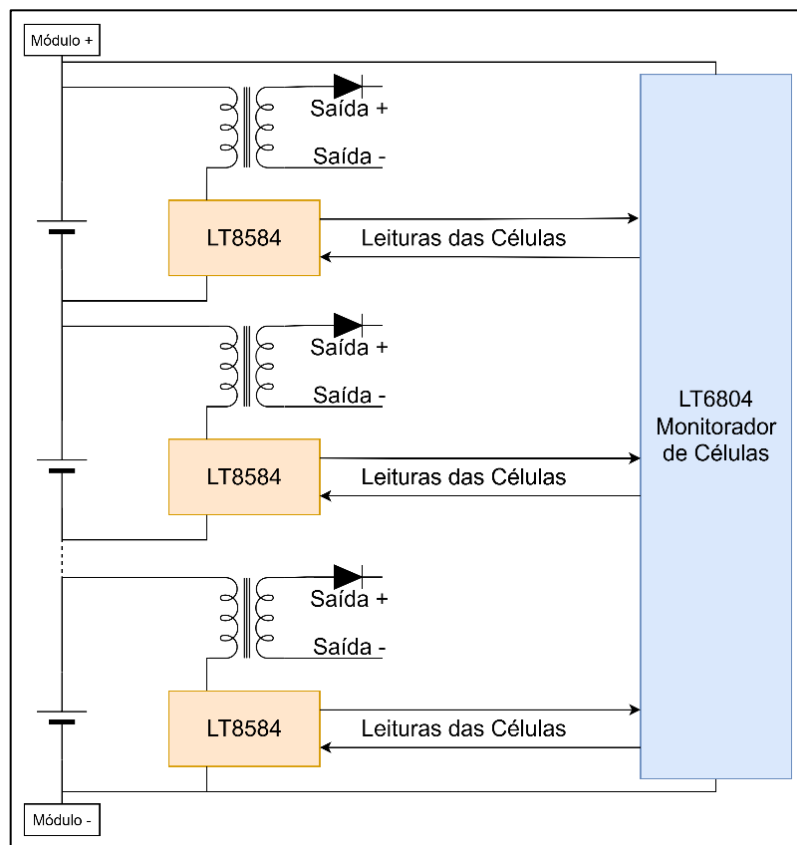
2.4. Monitoradores de Células

Monitoradores de células são dispositivos projetados para ler as tensões das células e realizar balanceamento passivo de um módulo de bateria. Alguns destes componentes podem ser integrados a circuitos externos que realizam o balanceamento ativo das células.

2.4.1. LT8584

O *chip* LT8584¹⁵ é um conversor *flyback* projetado para realizar o balanceamento ativo em baterias com muitas células. Ele foi projetado para uso com os monitoradores de células da família LTC68xx.

Os sinais gerados para balanço pelo monitorador de células podem ser usados diretamente como comando para o chip LT8584, que é responsável por descarregar uma célula no módulo de bateria através de um transformador.



Fonte: Adaptado de Linear Technology¹⁵.

Figura 2.8: Diagrama de bloco do balanceamento ativo baseado no LT8584.

¹⁵ [LT8584](#)

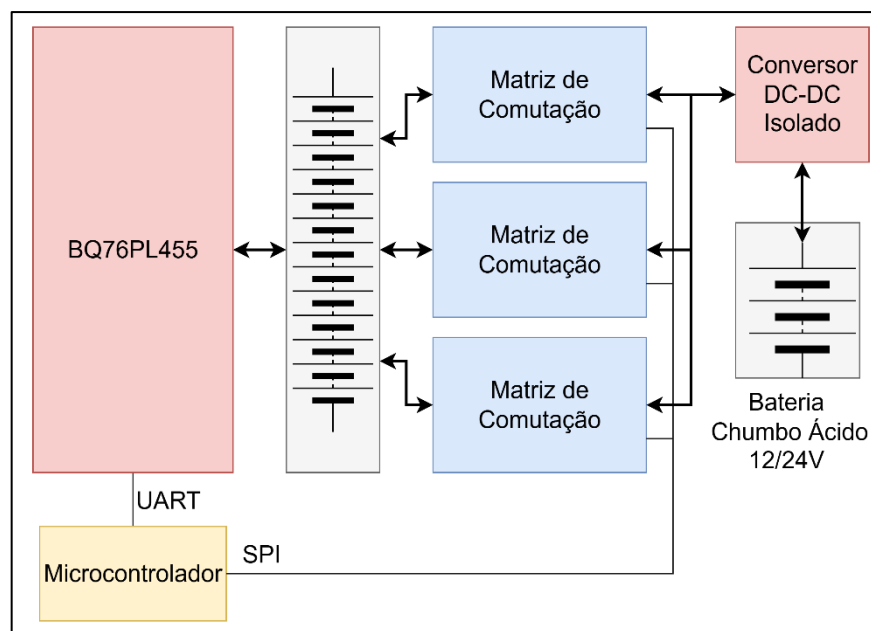
A Figura 2.8 apresenta um diagrama de blocos simplificado da conexão entre os dois dispositivos, é usado um LT8584 por célula do módulo. O monitorador realiza a leitura das tensões das células e passa as informações para o BMS através de comunicação SPI.

O BMS então é responsável por determinar quais as células que devem ser descarregadas e enviar os comandos para que os monitoradores acionem o balanceamento. Vários monitoradores de células podem ser conectados em cadeia, formando um BMS com vários módulos capaz de monitorar até centenas de células.

2.4.2. BQ76PL455

O dispositivo BQ76PL455¹⁶, é um monitorador de até 16 células de lítio e balanceamento passivo. Através da comunicação em cadeia UART isolada, esse dispositivo permite formar um BMS com até 16 módulos.

De acordo com o documento técnico de referência de projeto¹⁷, pode-se utilizar o chip para realizar o balanço ativo das células do módulo, conforme apresentado na Figura 2.9. As células a serem balanceadas são selecionadas a partir de matrizes de chaveamento sendo conectadas a um conversor bidirecional, que permite carregar ou descarregar as células em uma bateria externa.



Fonte: Adaptado de Texas Instruments¹⁷.

Figura 2.9: Diagrama de blocos do balanceamento ativo da Texas Instruments.

¹⁶ [bq76PL455A-Q1](#)

¹⁷ [16-Cell Li-Ion Battery Active Balance Reference Design](#)

Os módulos são controlados pelo BMS através de comunicação UART para monitoramento das células e a comunicação SPI é usada para a seleção das células. A Tabela 2.2 apresenta uma comparação entre as principais características dos dois sistemas para balanceamento ativo discutidos nesta seção.

2.5. Conclusões

Nesta seção, foi explorado o estado da arte em relação a BMS e foram identificadas as principais tendências para os algoritmos aplicados na área. Observa-se a tendência de incorporação de técnicas de aprendizagem de máquina e computação em nuvem, principalmente para a estimativa de SOC e SOH das baterias, bem como para a caracterização dos modelos equivalentes.

No entanto, para que esses métodos sejam eficazes, é essencial a coleta contínua de grandes volumes de dados operacionais, demandando um BMS com capacidade avançada de monitoramento e comunicação. Apesar da crescente conectividade, é importante ressaltar a necessidade de que as funções de proteção sejam executadas localmente, visto que uma resposta rápida do BMS é um requisito fundamental para garantir a segurança do sistema.

Tabela 2.2: Características dos sistemas de balanceamento ativo.

	LT8584	BQ76PL455
Células por Módulo	Até 12 células	Até 16 células
Corrente de Balanceamento	2,5A	2A a 5A
Eficiência do Balanceamento	80% a 83%	80% a 93%
Temperatura de Operação	-40°C a 85°C	-30°C a 60°C
Tensão de Balanço das Células	2,5V a 5,3V	1,17V a 4,5V
Tensão de Saída Máxima	400V	60V
Direção de Balanço	Descarga	Carga e Descarga
Interface de Comunicação	SPI	UART + SPI
Topologia	Flyback	Conversor Bidirecional
Complexidade do Controle	Média	Alta

No que se refere à arquitetura do *software*, observa-se o uso de sistemas operacionais de tempo real (RTOS) como a melhor alternativa para o desenvolvimento de BMS, pois permite a coordenação da execução de múltiplas tarefas sem comprometer a confiabilidade do sistema.

Apesar dos BMS comerciais avaliados serem aplicáveis em baterias de segunda vida, eles são projetados para baterias de íon-lítio, o que dificulta a sua aplicação em outros tipos de baterias, que demandem funcionalidades específicas.

Em especial, os BMS comerciais analisados não contemplam o gerenciamento do aquecimento, que é essencial para a operação das baterias ZEBRA. Contudo, grande parte das técnicas, algoritmos e circuitos estudados podem ser utilizadas ou adaptadas para a aplicação no BMS para baterias ZEBRA.

Com isso, se reforça a necessidade do desenvolvimento de um BMS, capaz de atender às particularidades das baterias de sódio, ampliando assim as possibilidades de aproveitamento dessas baterias em sistemas estacionários

Assim, as informações reunidas neste capítulo fornecem a base teórica para a definição, o projeto e a adaptação das estratégias para o BMS flexível para baterias de sódio, tema do Capítulo 3.

Capítulo 3

Métodos

Este capítulo apresenta os métodos adotados no desenvolvimento do BMS flexível, desde as etapas de concepção, planejamento da validação até o aprimoramento do sistema, conforme apresentados na Figura 3.1, que destaca a contribuição realizada em cada componente.

Baseado no estudo realizado do *hardware*, desenvolvido pelo Itaipu Parquetec (apresentado no Apêndice B), foi desenvolvida a primeira versão do *Software* do BMS flexível, que permite o monitoramento e proteção de duas strings conectadas em paralelo.

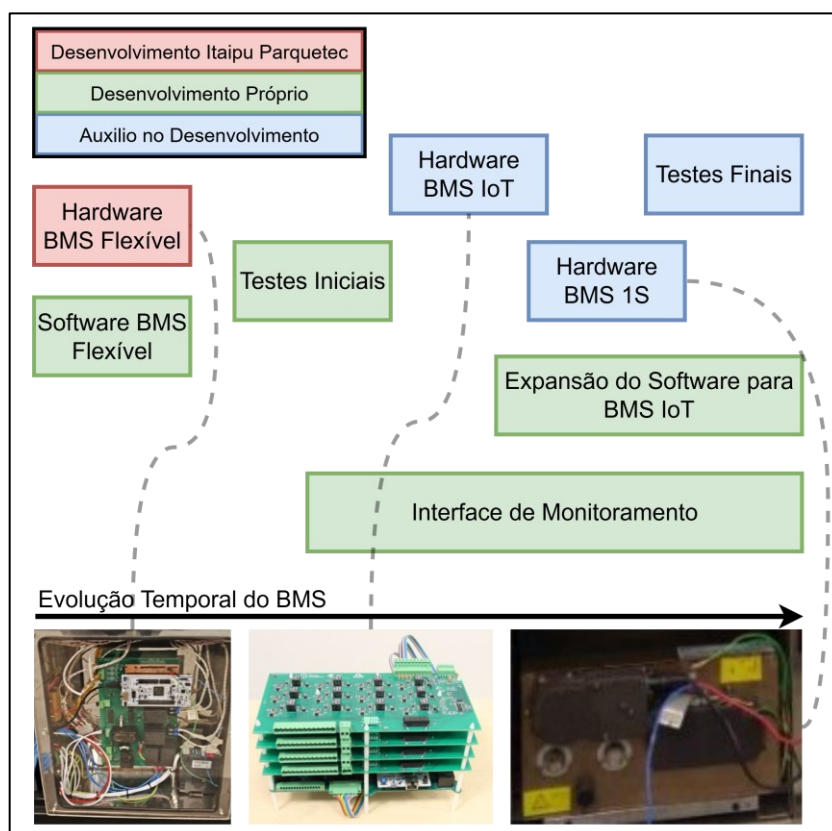


Figura 3.1: Evolução do desenvolvimento do BMS.

Durante os primeiros ciclos de operação, células previamente testadas e selecionadas e para compor uma nova bateria, apresentaram falhas, inviabilizando a sua operação. Como na primeira versão o monitoramento era realizado a nível de string, foram desenvolvidos módulo de monitoramento da tensão de células.

Estes módulos, com capacidade de balanceamento ativo, têm como objetivo identificar e impedir que as células sejam danificadas por operar fora dos seus limites de tensão. Além disso, os estudos do estado da arte motivaram a adição de capacidade de monitoramento dos dados de operação do BMS através de comunicação IoT, esta versão será chamada de BMS-IoT.

A falta de documentação e a baixa flexibilidade operacional do BMS automotivo (como carga e descarga máxima, baseados nas características de veículos elétricos), motivou a adoção de uma nova versão do BMS flexível, denominada BMS-1S, projetada para o monitoramento de uma string e utilizando as mesmas conexões e montagem do BMS original, sendo ideal para aplicações em que as baterias não são desmontadas.

Neste capítulo são detalhados aspectos da arquitetura de *software*, da expansão das funcionalidades do sistema, do desenvolvimento da interface de monitoramento de células e são definidos os testes conduzidos para validação do desempenho do BMS.

3.1. *Software* do BMS

O *software* foi desenvolvido com base no sistema operacional para tempo real FreeRTOS¹⁸, através da integração disponibilizada pelo fabricante do microcontrolador na plataforma de programação STM32CubeIDE¹⁹, permitindo assim que se desenvolva uma arquitetura de *software* modular e simplificada.

A principal função do BMS é garantir a proteção da bateria, prevenindo condições operacionais inadequadas. Ainda, ele também deve desempenhar outras funções, entre elas:

- Gerenciar a conexão da bateria ao sistema por meio das chaves de conexão;
- Calcular os estados de carga e saúde;
- Registrar e armazenar dados operacionais;
- Realizar leituras de sensores diversos;
- Calcular a resistência de isolamento das *strings*;
- Verificar parâmetros operacionais em relação aos limites especificados;
- Controlar a temperatura da bateria;
- Permitir a comunicação com dispositivos externos.

¹⁸ [FreeRTOS](#)

¹⁹ [STM Cube IDE](#)

A divisão do *software* em tarefas permite que cada função do sistema seja executada de forma independente, sempre que um evento de disparo acontecer. Esses eventos podem ser internos, como temporizações, ou externos, como interrupções geradas por periféricos de comunicação. A Figura 3.2 ilustra a relação entre as tarefas implementadas no BMS e seus eventos de disparo.

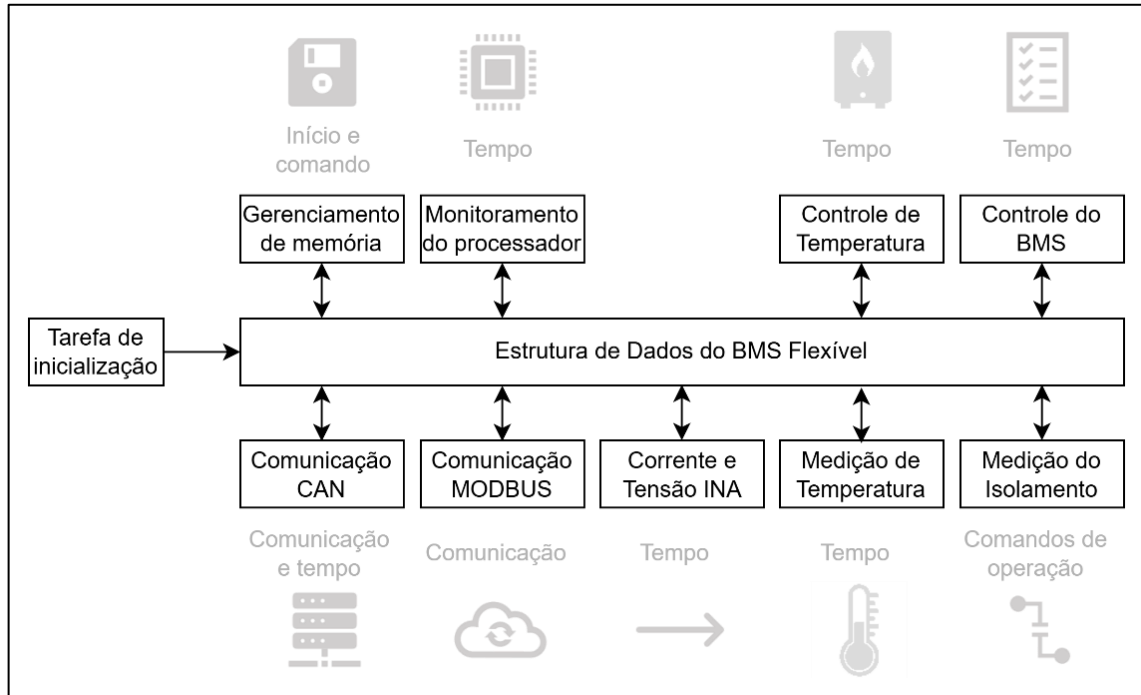


Figura 3.2: Tarefas implementadas no BMS e seus eventos de disparo.

Durante a inicialização do BMS, a estrutura de dados central é criada, o sistema operacional é configurado e todas as tarefas são inicializadas.

A primeira tarefa iniciada é a de gerenciamento da memória, responsável por restaurar os valores armazenados na estrutura de dados a partir das informações salvas na memória não volátil do microcontrolador, essas informações incluem parâmetros de configuração e limites de operação da bateria.

Em seguida, é iniciada a tarefa de monitoramento do processador, as tarefas associadas aos sensores da bateria e as tarefas de comunicação CAN e Modbus, permitindo que as informações do BMS sejam acessadas por dispositivos externos.

Por fim, é criada a tarefa de controle do BMS, que desempenha as funções de verificação dos limites operacionais, a estimativa do SOC e do SOH e o gerenciamento da conexão das strings de células.

Se algum erro ocorrer durante a inicialização, o *software* entra em estado de erro. Caso contrário, o sistema segue para a operação normal, onde realiza o monitoramento contínuo da bateria. As próximas seções detalham a estrutura de dados e os algoritmos das funcionalidades implementadas.

3.1.1. Estruturas de Dados e Gerenciamento de Memória

A forma de organizar e utilizar os dados do sistema desempenha um papel essencial no funcionamento do BMS, pois determina como cada tarefa do programa influencia e interage com as demais. Nesta seção, é apresentada a estrutura principal dos dados do BMS, os métodos de armazenamento e recuperação das configurações e limites operacionais, bem como o registro de eventos de falha e a estrutura básica das tarefas.

As estruturas de dados foram projetadas considerando a natureza flexível do BMS, permitindo que cada tarefa opere de maneira independente, sempre que possível, criando uma abordagem modular que possibilita a incorporação de novas funcionalidades com mínima interferência nos algoritmos já desenvolvidos no BMS.

Os registradores são os elementos que compõe a estrutura de dados e a modificação dos seus valores permite que o usuário configure os parâmetros de operação do sistema. Através dos registradores²⁰, é possível definir limites de tensão, corrente, temperatura, envio de comandos e verificação de informações do sistema, permitindo que o BMS se adapte a distintos tipos de baterias e condições operacionais.

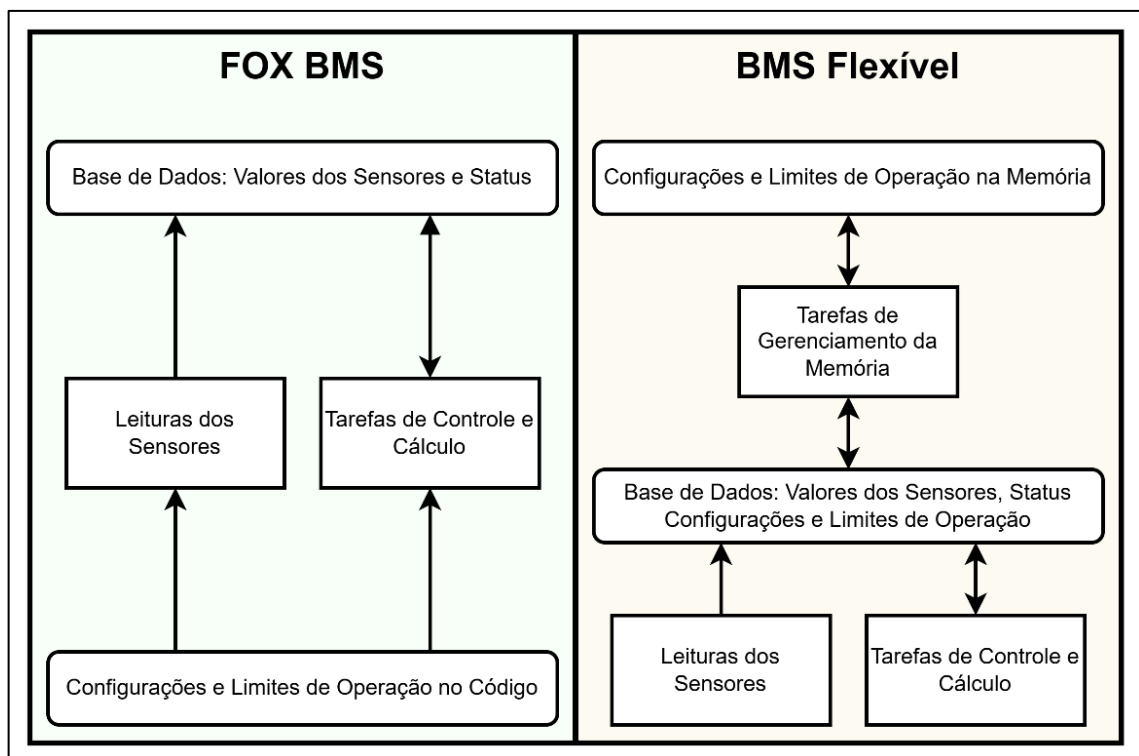


Figura 3.3: Comparação entre a estrutura de dados do Fox BM e do BMS Flexível.

²⁰ A Lista de Registradores é apresentada de forma completa no Apêndice D.

Dessa forma, o BMS não impõe restrições fixas, mas disponibiliza um conjunto abrangente de ferramentas que permitem configurar a estratégia de controle de acordo com as exigências específicas da aplicação. Essa estrutura de informações foi implementada baseando-se na forma como o Fox BMS (Giegerich, et al., 2016) foi implementado. Na Figura 3.3 é ilustrada a diferença entre a arquitetura de dados do Fox BMS e a do BMS Flexível.

No Fox BMS, os parâmetros de configuração e limites de operação estão diretamente no código-fonte, o que significa que qualquer modificação nesses valores exige alterações no *software* e um novo processo de programação. Já no BMS Flexível, esses parâmetros são armazenados na memória, permitindo ajustes em tempo de execução sem necessidade de reprogramação do BMS.

Já no BMS Flexível o armazenamento de dados é realizado na memória flash do microcontrolador, que é compartilhada com o código executável do sistema. Portanto, o esse recurso deve gerenciado com cautela, a fim de evitar a escrita em regiões indevidas.

A tarefa de gerenciamento da memória é responsável pela interface entre a base de dados do BMS e a memória permanente do microcontrolador. É esta tarefa que as ações de guardar e recuperar os dados de operação da bateria, dos limites de operação e dos registros de eventos com informações relevantes em situações de falha e outros momentos importantes na operação, permitindo a análise do sistema pós-evento.

Cada registrador da base de dados possui um comprimento fixo de 32 bits e pode ser acessado por diferentes tarefas do BMS. Apenas uma tarefa é a responsável por manter o valor de cada registrador atualizado, as demais tarefas somente consomem a informação registrada. Além disso, cada registrador possui um tipo de acesso definido como "somente leitura" ou "leitura e escrita", referindo-se ao tipo de acesso que dispositivos externos tem a essas informações.

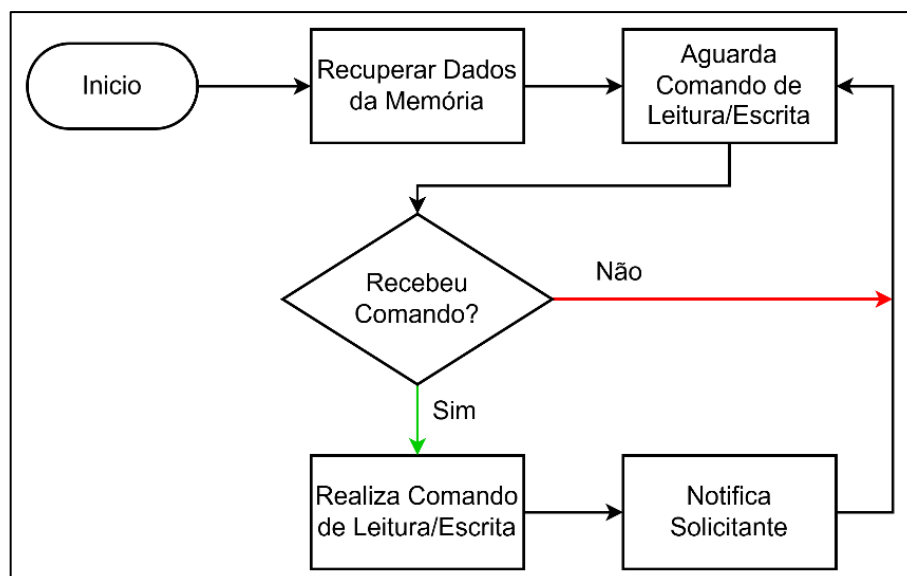


Figura 3.4: Fluxograma da tarefa de gerenciamento de memória.

Após a inicialização da estrutura de dados, a tarefa de gerenciamento da memória aguarda comandos da tarefa de controle do BMS para realizar ações de leitura ou escrita, conforme ilustra o fluxograma da Figura 3.4. Após a execução de cada comando, a tarefa de gerenciamento da memória envia uma notificação à tarefa solicitante, indicando o sucesso ou a falha da operação.

Registro de Eventos

Um sistema de registro de eventos foi implementado para rastreamento de condições anômalas, permitindo a análise do comportamento do sistema ao longo do tempo e possíveis melhorias. Os registros são armazenados na memória do microcontrolador pela tarefa de gerenciamento da memória.

Cada registro possui 128 bytes e até 1024 registros podem ser armazenados simultaneamente. Um registro é identificado por um índice correspondente à sua posição na memória e que é utilizado para acesso via rede de comunicação usando uma função especial implementada para o protocolo Modbus do BMS.

Quando a capacidade máxima de registros é atingida, o BMS realiza a limpeza da memória, preservando os 64 registros mais recentes, enquanto os registros mais antigos são descartados.

A criação dos registros é acionada exclusivamente pela tarefa de controle, garantindo que apenas eventos relevantes sejam armazenados. Para otimizar o uso da memória e reduzir a complexidade dos registros, foram definidos quatro tipos de eventos:

- **Registro de falta por potência:** Indica que um dos limites operacionais de potência, tensão ou corrente da bateria foi excedido.
- **Registro de falta por temperatura:** Ocorre quando qualquer sensor de temperatura detecta valores fora da faixa segura de operação.
- **Registro de falta por isolamento:** Registra falhas no isolamento elétrico da bateria, que gera riscos à segurança operacional.
- **Registro de evento de carga:** Armazena informações quando uma *string* de células atinge carga completa ou descarregamento total.

Todos os registros de eventos seguem um formato padronizado, com dados comuns a todos os tipos e dados específicos do tipo de evento, sendo:

- Tipo do evento;
- Data e hora da ocorrência;
- Registradores de erro;
- Temperatura média da bateria.

Enquanto os dados específicos por tipo de evento são:

- **Falta por potência:** Valores de corrente, tensão e potência de cada string;
- **Falta por temperatura:** As leituras individuais de cada sensor de;
- **Falta por isolamento:** As medições de resistência de isolamento de cada string;
- **Evento de carga:** O SOC, SOH e a contagem de ciclos de cada string.

Modelo das Tarefas

Cada tarefa do BMS segue o modelo apresentado na Figura 3.5. Elas são compostas por três elementos principais: uma função responsável pela execução do algoritmo da tarefa e suas funções auxiliares; uma função de configuração e inicialização, que define os parâmetros operacionais e registra a tarefa no sistema; uma estrutura de dados, que armazena as informações essenciais para o funcionamento da tarefa.

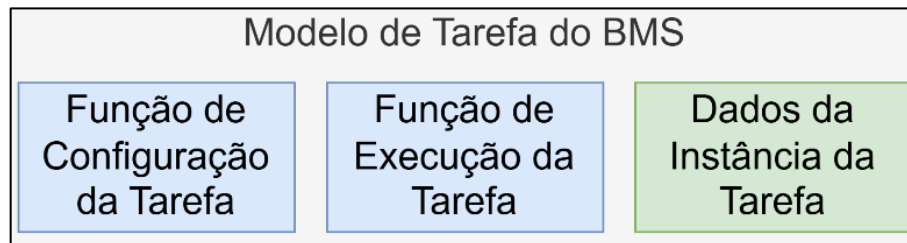


Figura 3.5: Modelo das tarefas do BMS.

Destes, apenas a estrutura de dados deve ser única para cada tarefa, de forma que é possível que duas tarefas executem o mesmo código utilizando dados diferentes. A estrutura de dados associada a cada tarefa contém variáveis internas, temporizadores, os registradores relevantes para a tarefa e identificadores de acesso aos periféricos.

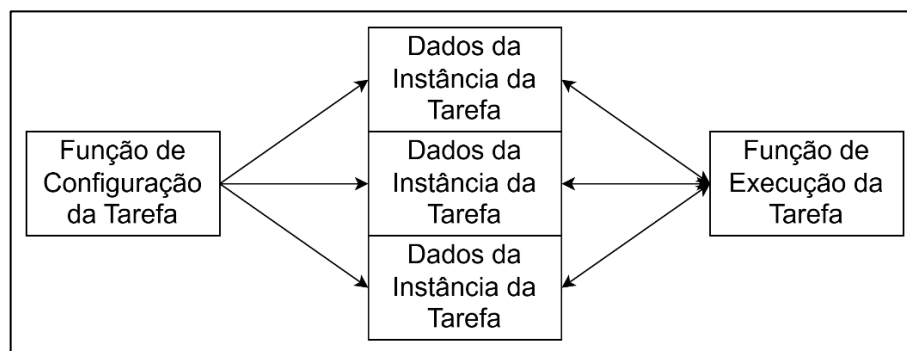


Figura 3.6: Múltiplas instâncias de tarefa executando o mesmo código.

O uso dessas estruturas para armazenar os dados das tarefas permite a criação de múltiplas instâncias de uma tarefa que executam as mesmas funções sem interferências entre elas, assim como ilustrado na Figura 3.6.

Dessa forma, o mesmo código pode ser utilizado por diferentes instâncias de tarefas. Essa abordagem é particularmente útil para o monitoramento das *strings* da bateria, em que uma única lógica de aquisição dos dados pode ser aplicada a diferentes conjuntos de sensores.

3.1.2. Tarefa de Controle da Bateria

A tarefa de controle é a principal rotina do *software* do BMS, sendo responsável pelo gerenciamento da bateria como um todo. Ela controla o acionamento das chaves de conexão das *strings*, define o modo de medição das grandezas, monitora os limites de operação da bateria, determina o registro de eventos e faz os cálculos dos estados SOC e SOH da bateria.

O ciclo de execução da tarefa se inicia com a verificação de todos os sensores antes da operação da bateria. Seguido do acionamento da tarefa de controle térmico, para aquecimento da bateria até a temperatura configurada. Depois é feita a verificação da resistência de isolamento das *strings* e, caso alguma não passe no teste, ela é mantida desconectada. Finalmente, o sistema entra no estado *Ocioso*, permanecendo pronto para operação e mantendo a temperatura da bateria.

Quando um comando de operação é recebido, através de uma das interfaces de comunicação, os contadores principais de conexão da bateria são fechados, ligando a bateria à carga ou carregador.

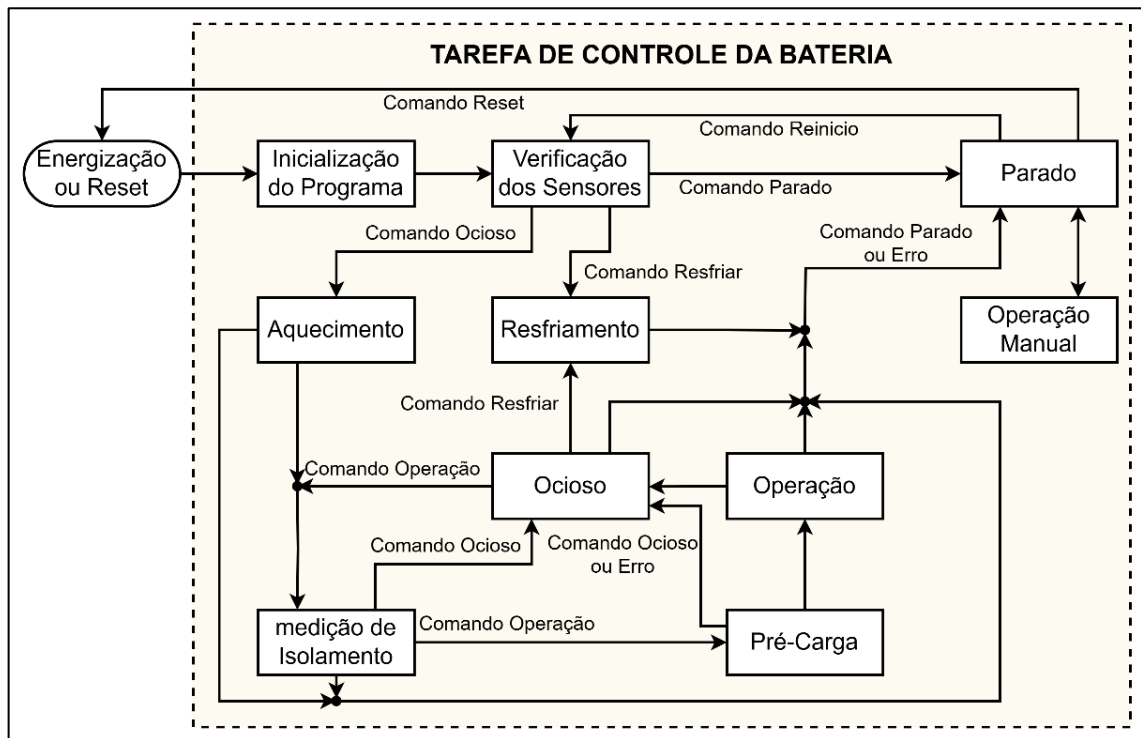


Figura 3.7: Fluxograma de funcionamento da tarefa de controle da bateria.

Durante a operação, são monitoradas grandezas elétricas e térmicas, além da atualização do SOC e do SOH da bateria. Caso algum limite operacional seja excedido, a bateria é imediatamente desconectada e o sistema retorna ao estado ocioso.

Em situações de falhas críticas, como perda de comunicação com sensores ou falha na isolação, o sistema entra no estado desligado, desativando todas as saídas e interrompendo a leitura dos sensores. Após esse tipo de falha, o BMS executa até três tentativas automáticas de retorno a operação, sendo também possível a retomada da operação via comando externo.

O algoritmo de controle do BMS foi estruturado na forma de uma máquina de estados, onde cada estado determina as ações realizadas. A transição entre essas fases pode ser acionada por comandos via rede de comunicação, por violações dos limites operacionais ou pela conclusão de determinada etapa. Os estados de operação e os critérios para sua transição são representados no fluxograma da Figura 3.7.

Durante a operação da bateria as principais ações da tarefa de controle são o monitoramento da zona segura de operação e a estimativa dos estados da bateria. Essas ações são executadas sempre que a tarefa está nos estados *Ocioso*, *Pré-carga* ou *Operação*. As próximas seções detalham a implementação dessas funcionalidades.

Monitoramento da Zona de Operação Segura

A proteção da bateria é realizada por meio do monitoramento contínuo das variáveis operacionais, garantindo elas permaneçam dentro da zona de operação segura, que é definida a partir dos registradores de limites de operação. Os valores lidos pelos sensores são comparados a esses limites para identificar possíveis condições de risco.

Caso algum dos valores monitorados ultrapasse os limites definidos, a *string* correspondente é desconectada. Se, durante o funcionamento do sistema, um evento ocorrer quando apenas uma *string* estiver conectada, os contactores principais do sistema são abertos, a fim de preservar a energia do BMS e do sistema de aquecimento, garantindo assim que o sistema continue em pleno funcionamento. O fluxograma apresentado na Figura 3.8 ilustra o sistema de proteção do BMS de múltiplas *strings*. A proteção da bateria ocorre em dois níveis:

- O *Nível de Aviso* é quando uma grandeza monitorada se aproxima do limite operacional, o sistema emite um alerta, através do registrador de erros, assim medidas corretivas podem ser tomadas antes que a operação seja interrompida.
- O *Nível de Alarme* indica que a grandeza já ultrapassou o limite de segurança, o BMS realiza a desconexão da bateria para evitar falhas mais graves e riscos à segurança.

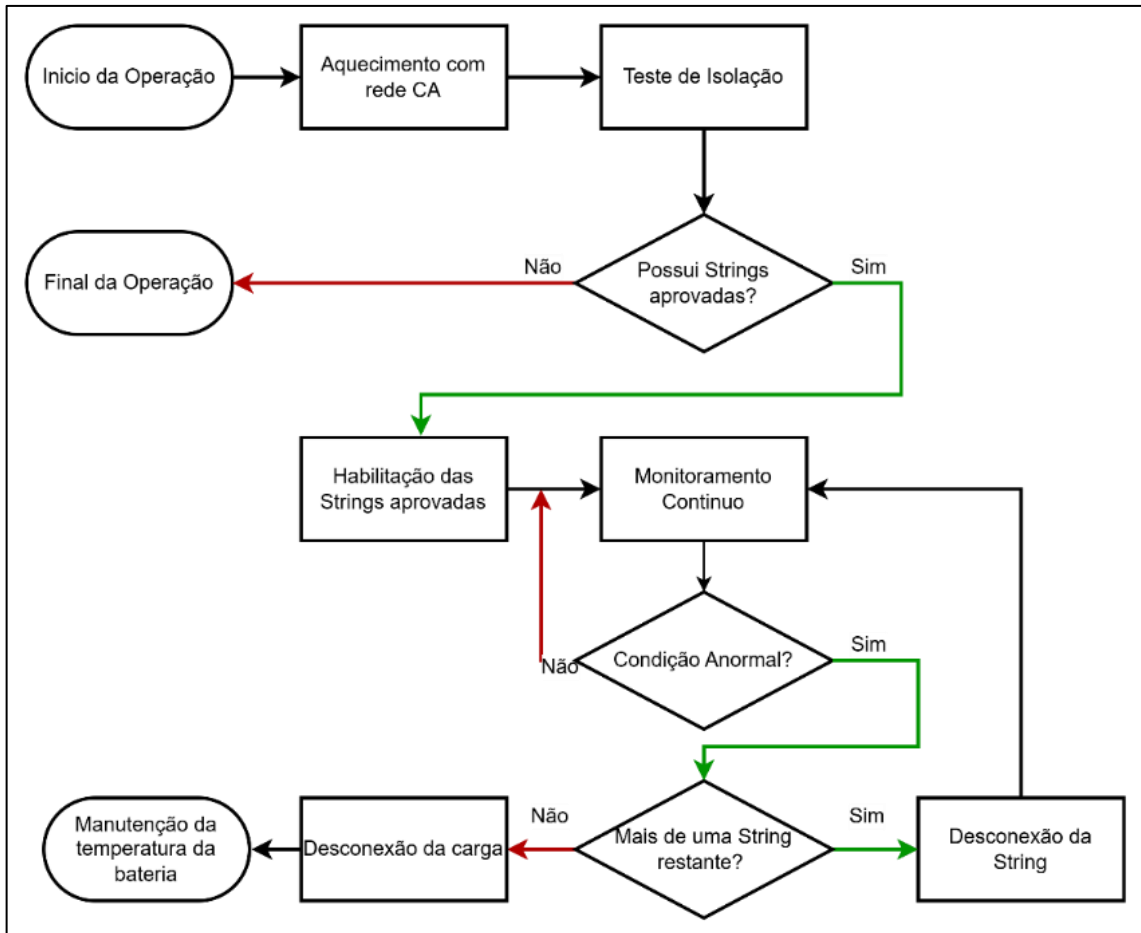


Figura 3.8: Fluxograma do sistema de proteção com múltiplas strings do BMS.

Na Figura 3.9 são ilustrados os níveis de aviso e alarme para corrente, tensão e potência²¹. Os limites de aviso e de alarme, de cada grandeza monitorada pelo BMS podem ser verificados ou alterados através dos registradores de configuração do BMS.

A violação de grandezas de tensão, corrente ou carga e a falha no teste de resistência de isolação geram desconexão apenas da *string* afetada. Enquanto a violação dos limites de temperatura ou a perda de comunicação com sensores gera parada completa da operação da bateria, desconectando todas as *strings*.

Em primeira ocasião, a proteção da bateria consiste em abrir os contadores principais do BMS, retornando ao estado *Ocioso*, mantendo o controle da temperatura da bateria. Porém, no caso de perda de comunicação com os sensores de temperatura ou caso a condição de falta não cesse, o BMS desliga todas as suas saídas e volta ao estado *Parado*.

²¹ No diagrama o limite da região não linear resultante da expressão $V * I > P_{limite}$ é aproximada por uma reta para fins ilustrativos.

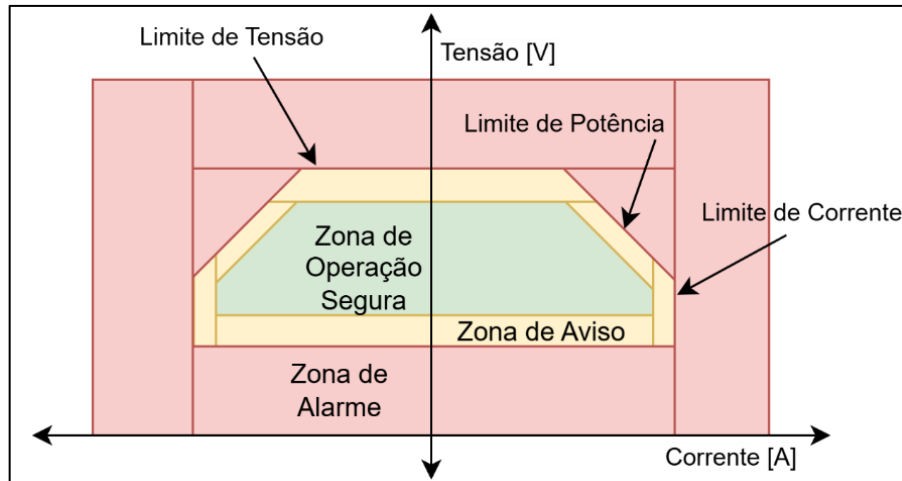


Figura 3.9: Zona segura de operação para tensão e corrente.

Estimativa de Estados da Bateria

A estimativa do estado de carga implementada é realizada por meio do método de contagem de Coulomb, sendo calculada individualmente a cada *string* sempre que estiverem conectadas.

A Equação 3.1 apresenta a formulação discretizada utilizada para a aplicação desse método, onde C_{nom} é a capacidade máxima da *string*. A Equação 3.2 apresenta a equação implementada para calcular o estado de carga da bateria, realizando a média ponderada pela capacidade de cada *string* conectada, para o cálculo do SOC total. Dessa forma, o algoritmo permite o uso de *strings* com diferentes capacidades, embora isso seja pouco comum na prática.

$$SOC_k^n = SOC_{k-1}^n + \frac{I_k^n * \Delta t}{C_{nom}^n} \quad 3.1$$

$$SOC_k = \frac{\sum_{n=1}^N SOC_k^n * C_{nom}^n}{\sum_{n=1}^N C_{nom}^n} \quad 3.2$$

No entanto, como esse método está sujeito a erros na medição de corrente, o SOC não é utilizado diretamente como critério para determinar o fim de carga ou descarga. Para evitar inconsistências, sempre que o critério de fim de carga for atingido, o SOC é reajustado para 100%. Da mesma forma, ao detectar o critério de fim de descarga, o SOC é ajustado para 0%, evitando valores negativos e compensando os erros acumulados durante a operação da bateria. Esse método é inspirado no BMS original e é descrita no manual de operação da bateria²².

²² Documento confidencial “ZEBRA® Battery Handbook for Vehicle Applications” revisão 1.8 de 2010 escrito pela fabricante da bateria FzSoNick.

Esses critérios foram definidos de forma a aproximar da melhor forma possível, as condições adotadas nos métodos laboratoriais de avaliação do SOH, nos quais a bateria é completamente descarregada antes de ser submetida a um ciclo de carga completo.

$$SOH = \frac{C_{final}}{C_{placa}} \quad 3.3$$

3.1.3. Monitoramento de Grandezas

O BMS possui algumas tarefas dedicadas a leitura dos sensores, elas são responsáveis por monitorar as variáveis críticas da bateria. Essas tarefas podem operar em três modos distintos: desligado, medição única ou medição contínua. Conforme comandos da tarefa de controle ou o usuário (no modo manual). O fluxograma apresentado na Figura 3.11 mostra o algoritmo que todas as tarefas de medição de sensores executam.

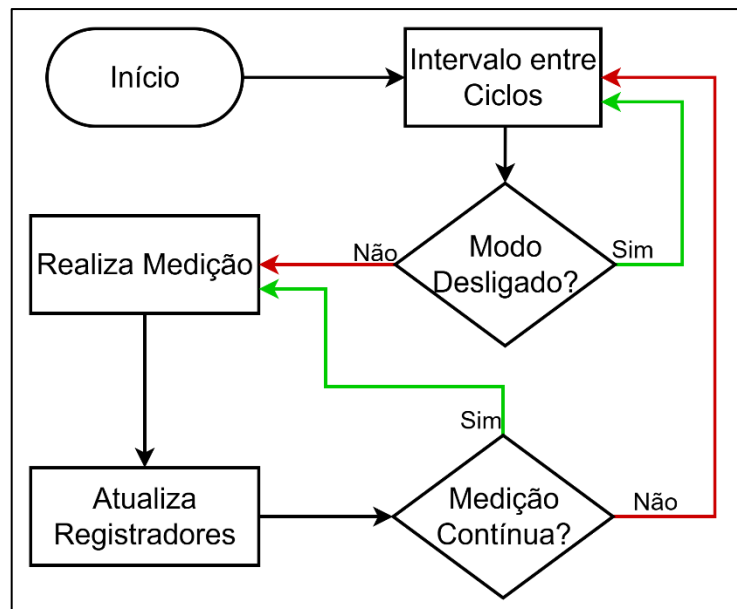


Figura 3.11: Fluxograma de operação das tarefas de medição de grandezas.

As tarefas de monitoramento são responsáveis por atualizar os registradores relativos as suas grandezas com valores em unidades convencionais, assim o restante das tarefas não precisa realizar conversões que dependam do tipo de sensor aplicado. Além disso, para cada grandeza monitorada é aplicado um filtro de média móvel.

Uma tarefa é responsável por verificar a presença de falhas internas entre os polos positivo ou negativo das *strings* e a carcaça aterrada. Essa falha pode ser detectada através do cálculo a resistência de isolamento a partir das correntes que circulam, quando um relé do circuito de medição é acionado.

A Figura 3.12 apresenta os circuitos simplificados do sistema de medição da resistência de isolamento da bateria, representando as resistências de isolamento e as correntes que circulam no sistema. Estes circuitos foram utilizados para determinar a fórmula para cálculo da resistência de isolamento implementada no BMS.

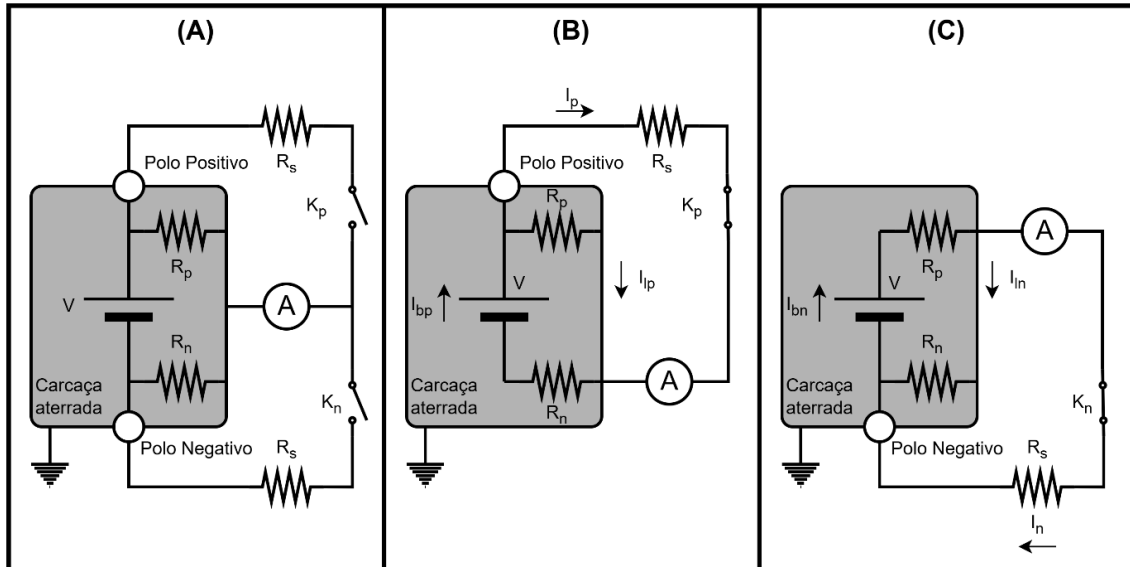


Figura 3.12: Circuitos simplificados da medição da resistência de isolamento.

- (A) Circuito com ambos os relés de medição abertos: Neste estado, nenhum caminho condutor é estabelecido entre os polos da bateria e a carcaça aterrada. Dessa forma, não há circulação de corrente para medição. É a condição do sistema antes dos testes.
- (B) Circuito com o relé K_p fechado: O fechamento de K_p estabelece um caminho condutor entre o polo positivo da bateria e o aterramento, permitindo a medição da corrente I_p que flui através do resistor de shunt R_s .
- (C) Circuito com o relé K_n fechado: Neste caso, o relé K_n estabelece um caminho entre o polo negativo da bateria e o aterramento, permitindo a medição da corrente I_n que flui pelo resistor de shunt R_s .

Aplicando as leis de Kirchoff para correntes e tensões nos circuitos da Figura 3.12(B) e Figura 3.12(C), temos um conjunto de equações 3.4. A Tabela 3.1 descreve as siglas utilizadas para representar os elementos dos circuitos da Figura 3.12 e elaboração das equações para determinar da resistência de isolamento da bateria.

$$\begin{cases} I_{lp} - I_{bp} + I_p = 0 \\ V - I_p * R_s - I_{bp} * R_n = 0 \\ I_{lp} * R_p - I_p * R_s = 0 \\ I_{bn} - I_{ln} - I_n = 0 \\ V - I_{bn} * R_p - I_n * R_s = 0 \\ I_n * R_s - I_{ln} * R_n = 0 \end{cases} \quad 3.4$$

No sistema de equações 3.4, as grandezas conhecidas são a tensão da bateria V , as correntes I_p e I_n , e a resistência R_s , restando seis incógnitas.

Tabela 3.1: Elementos para cálculo da resistência de isolamento.

Sigla	Descrição
R_s	Resistência de limitação da corrente de medição
V	Tensão da bateria
R_n	Resistência de isolamento polo negativo
R_p	Resistência de isolamento polo positivo
I_n	Corrente medida ao fechar o relé do polo negativo
I_p	Corrente medida ao fechar o relé do polo positivo
I_{ln}	Corrente por R_n ao fechar o polo negativo
I_{lp}	Corrente por R_p ao fechar o polo positivo
I_{bn}	Corrente total da bateria ao fechar o polo negativo
I_{bp}	Corrente total da bateria ao fechar o polo positivo

Utilizando o módulo de solução de sistemas não lineares do *Python (SymPy)*, baseado no método das bases de Gröbner para manipulação simbólica das equações²³, foi encontrado o resultado apresentado pelo sistema de equações 3.5, no qual R_p e R_n representam as resistências de isolamento nos polos positivo e negativo da *string*, respectivamente.

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{iso} = V - R_s * I_p - R_s * I_n \\ R_p = \frac{V_{iso}}{I_n} \\ R_n = \frac{V_{iso}}{I_p} \end{array} \right. \quad 3.5$$

A Figura 3.13 apresenta o fluxograma do processo de leitura das resistências de isolamento das *strings* da bateria, correspondente à etapa “Realiza Medição” da Figura 3.11.

A cada nova *string* adicionada, uma nova medição de isolamento é efetuada, permitindo avaliar a condição de cada *string*, conforme apresentado no fluxograma da Figura 3.14. O controle do fechamento dos relés e a ativação da leitura do isolamento são gerenciados pela tarefa de controle da bateria.

A tarefa de leitura de temperatura é responsável por fazer leituras de três sensores do tipo PT1000. O valor de leitura de cada sensor e o valor médio da temperatura é armazenado no mapa de registradores já convertido para graus Celsius. Em caso de falha em algum dos sensores, os demais são considerados para o cálculo da média.

²³ [SymPy](#)

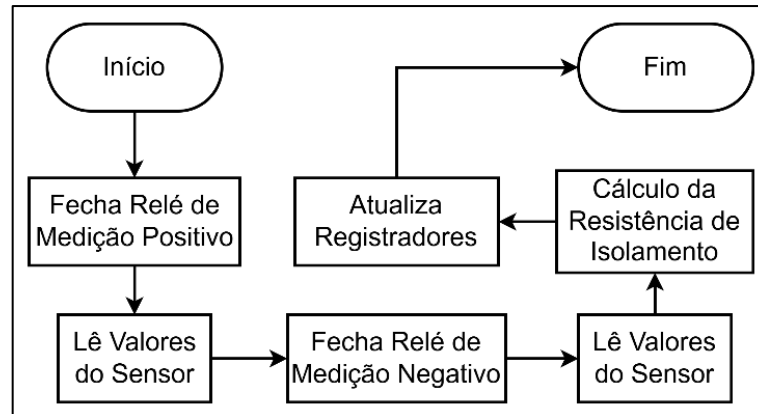


Figura 3.13: Fluxograma de medição da resistência de isolamento.

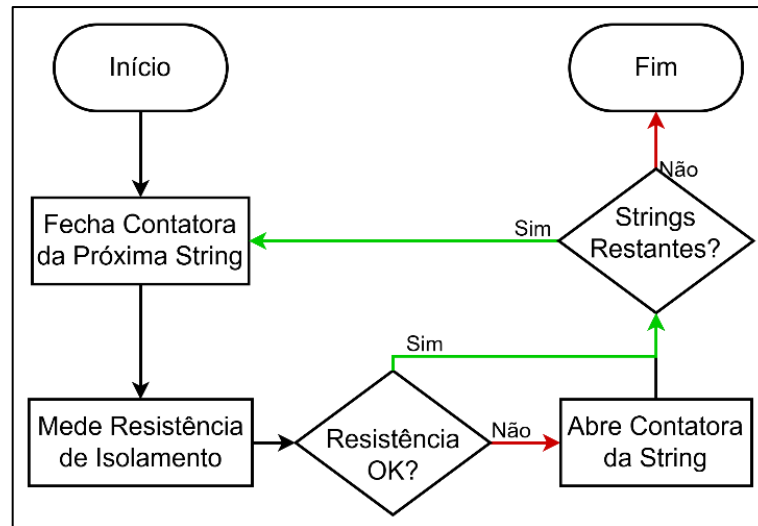


Figura 3.14: Fluxograma da sequência de medição da resistência de isolamento.

A tarefa responsável por ler a tensão e a corrente de cada uma das *strings* registra os valores de tensão em milivolt, de corrente em miliampere, e da potência em miliwatt.

Como uma tarefa deve ser criada para cada *string* da bateria, a estrutura de dados da tarefa possui campos para diferenciar o endereço I2C do sensor lido e os registradores que devem ser escritos, esses campos são definidos durante a fase de inicialização das tarefas.

Já a tarefa responsável pelo monitoramento do CPU não segue o modelo da Figura 3.11 pois permanece em execução constantemente. O algoritmo executado é apresentado no fluxograma da Figura 3.15.

No início de cada ciclo, é verificado o temporizador para cálculo do tempo de utilização da CPU por cada tarefa, permitindo analisar a execução de cada tarefa, servindo como ferramenta para o diagnóstico da performance do código.

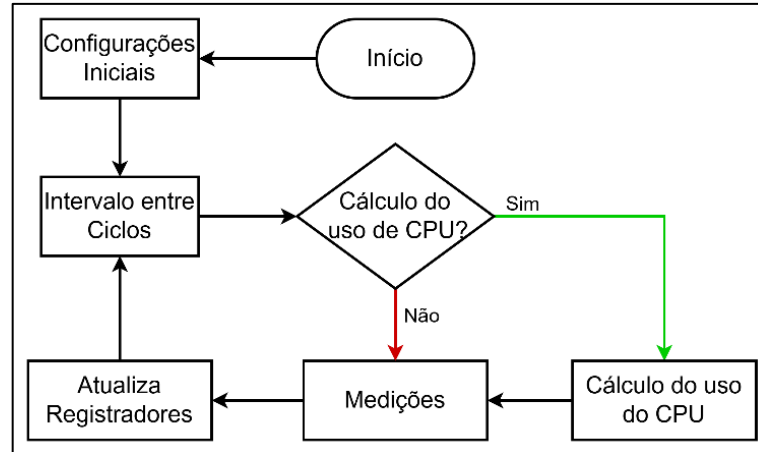


Figura 3.15: Fluxograma da tarefa de monitoramento do processador.

3.1.4. Controle de Temperatura da Bateria

Essa tarefa é responsável por controlar a potência aplicada nas resistências de aquecimento CA e CC, controlando a temperatura da bateria. Com ela é possível comandar o aquecimento e resfriamento da bateria em rampa, evitando variações muito rápidas na temperatura da bateria que podem prejudicar as células de sódio.

Três modos foram implementados: manual, parado e funcionando, conforme apresentado no diagrama do algoritmo da tarefa na Figura 3.16. Quando ela sai do modo funcionando ou manual, sempre passa por uma rotina de *reset*, onde as variáveis usadas para o controle de temperatura são reconfiguradas para os valores iniciais e segue para o modo parado. Isso garante que o controle de temperatura sempre inicie em um estado conhecido.

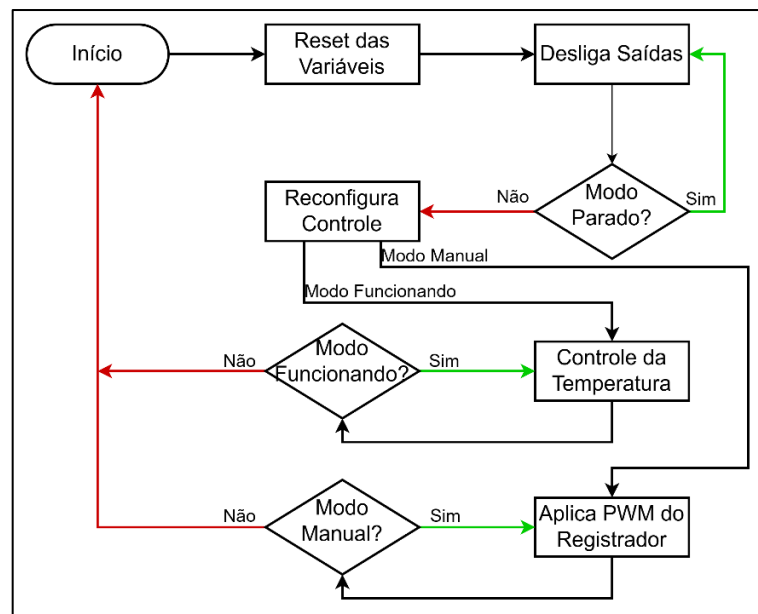


Figura 3.16: Algoritmo da tarefa de controle de temperatura.

No modo Automático é utilizado um controlador do tipo PI, responsável por ajustar a potência dissipada nas resistências de aquecimento. Os parâmetros proporcional e integral podem ser configurados através dos seus respectivos registradores. O objetivo é garantir que a temperatura da bateria siga uma trajetória de aquecimento suave e permita ajustes de desempenho realizados pelo usuário do BMS.

Para isso, utiliza-se uma rampa na referência de temperatura, que permite definir uma taxa de aquecimento para a bateria, a partir da temperatura inicial até a temperatura de operação. O controlador também possui saturação na saída, limitando a potência máxima aplicada às resistências de aquecimento em 80%. O diagrama de controle é ilustrado na Figura 3.17.

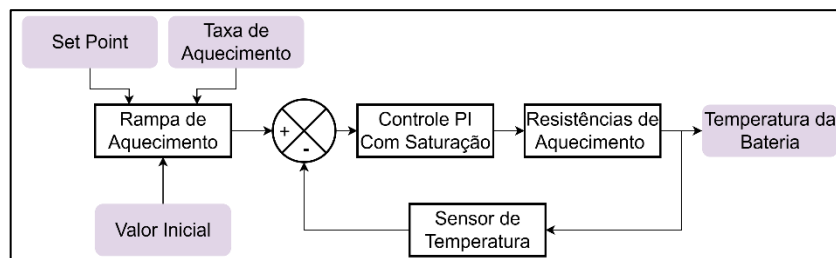


Figura 3.17: Diagrama de controle de temperatura.

No modo Manual a tarefa somente aplica o valor do registrador de *PWM de aquecimento* na saída do controlador de temperatura, este modo é utilizado para validação do sistema de aquecimento.

Inicialmente quando a bateria ainda está fria, é utilizado somente a energia da rede CA para o aquecimento. Quando a bateria atinge temperatura de operação, o aquecimento CC também é habilitado. Caso a energia da rede CA fique indisponível, mas a bateria já foi aquecida, a bateria é capaz de se manter aquecida de forma autônoma.

3.1.5. Protocolos de Comunicação

A integração do BMS com outros dispositivos e sistemas é essencial para o monitoramento e controle da bateria em tempo real. Para atender esse requisito o BMS implementa os protocolos de comunicação Modbus RTU²⁴ e CAN Open²⁵, permitindo tanto a leitura de variáveis operacionais, quanto o envio de comandos para controle.

Nesta seção, são apresentados os protocolos utilizados, a forma como acessam a estrutura de dados principal do BMS e as tarefas responsáveis pela comunicação.

²⁴ [Especificação Modbus](#)

²⁵ [Especificação CAN Open](#)

Modbus RTU

Este protocolo é implementado no BMS sobre as interfaces físicas USB e RS485. Em ambos os casos o BMS age como um dispositivo escravo e com o mesmo endereço de rede, assim a partir deste ponto, ambas as interfaces serão tratadas como se fossem somente uma.

A lista de registradores é um conjunto de variáveis que podem ser lidas por um dispositivo remoto, ou escritas por ele. O processo de leitura é essencial para que o dispositivo remoto, possa conhecer o estado de funcionamento do BMS, enquanto a possibilidade de escrita permite que o dispositivo remoto modifique as configurações do BMS.

A estrutura de dados do BMS é convertida na lista de registradores Modbus, de forma que o dispositivo remoto tem acesso as informações mais atuais do equipamento. Cada registrador da estrutura de dados do BMS possui 32 bits de comprimento e estão organizados de forma sequencial. Assim, 2 registradores Modbus são utilizados de forma que o endereço Modbus de um registrador do BMS pode ser calculado através da Equação 3.6.

$$Endereço_{Modbus} = 2 * Endereço_{BMS} \quad 3.6$$

Uma tarefa é responsável por receber as mensagens Modbus do dispositivo externo e atualizar ou transmitir os dados do BMS. A execução da tarefa consiste em aguardar o recebimento de uma mensagem, validação da mensagem recebida e processamento da mensagem formulando uma mensagem de resposta.

Além das funções padrão utilizadas para leitura e escrita de registradores. Foram implementadas funções especiais que permitem a obtenção de informações específicas do BMS, incluindo diagnóstico e monitoramento de eventos operacionais.

Leitura do Relatório de Erros: Permite a obtenção de uma lista detalhada de eventos inesperados ocorridos durante a execução do código do BMS, mas que não causam perigo para a operação da bateria, permitindo a análise de erros no código.

Leitura do Relatório de Tarefas: O relatório de tarefas fornece informações sobre processos internos do BMS, permitindo monitorar o uso de memória e o tempo de execução de cada tarefa. Essa funcionalidade auxilia na avaliação do desempenho do sistema e pode ser usada para otimizar a configuração das tarefas do BMS.

Registro de Eventos: O histórico de eventos operacionais do BMS pode ser consultado por meio desta uma função especial Modbus. Esses eventos registram atividades relevantes permitindo realizar análises de desempenho e rastreamento de possíveis anomalias.

Com a implementação dessas funções especiais o acesso a dados operativos do BMS é ampliado mantendo a compatibilidade com sistemas de comunicação industriais enquanto oferece funcionalidades avançadas para monitoramento e diagnóstico.

CAN Open

Este protocolo é implementado no meio físico do protocolo CAN, criando regras específicas para a utilização do campo de identificador e dados das mensagens. Nele, o mapeamento das informações é feito através de um Dicionário de Objetos, com endereçamento feito através de um índice de 16 bits e um subíndice de 8 bits.

Regiões de endereços são delimitadas para diferentes finalidades, sendo que a faixa reservada aos fabricantes (2000:00 à 5FFF:00) é utilizada para o acesso às variáveis do BMS, e todos os registradores do BMS correspondem ao objeto mais simples do protocolo, que possui 32 bits com um único subíndice.

Os dispositivos CAN Open podem funcionar em diferentes estados, ao ser energizado o estado de inicialização é ativado. No BMS, este estado CAN Open corresponderá ao Estado Inicializações.

Após a inicialização, o dispositivo envia um sinal de *Boot Up* para a rede, e então entra no estado pré-operacional, a partir da qual só muda de estado através de comandos enviados pelo mestre CAN Open.

Os estados da rede CAN Open não devem ser confundidos com os estados de operação do BMS. Apesar de os estados de inicialização coincidirem, a máquina de estados do protocolo é independente da máquina de estados do BMS.

Os tipos de mensagens enviadas ou recebidas por um dispositivo CAN Open, são determinadas pelo estado de rede do dispositivo. No BMS foram implementados somente algumas das funcionalidades do protocolo CAN Open. A Tabela 3.2 apresenta os tipos de mensagens enviadas em cada estado. Os tipos de mensagem implementadas são:

- PDO, mensagens enviadas automaticamente e periodicamente pelo BMS contendo informações de operação;
- SDO, mensagens de pergunta e resposta iniciada pelo dispositivo mestre;
- EMCY, mensagem de erro informando o tipo de erro ocorrido;
- NTM, mensagens para mudança de estado de dispositivo CAN Open.

Tabela 3.2: Tipos de pacotes aceitos em cada estado CAN Open.

	Pré-Operacional	Operacional	Parado
PDO		X	
SDO	X	X	
EMCY	X	X	
NTM	X	X	X

Uma tarefa é responsável por gerenciar o recebimento e envio de mensagens CAN Open. A execução da tarefa consiste em gerenciar a máquina de estados do protocolo, receber as mensagens, processar a solicitação e enviar as mensagens de resposta na rede.

3.1.6. Modo Manual

O modo manual do BMS flexível foi projetado para execução de testes e validação do *hardware*, permitindo que o operador tenha controle direto sobre diversas funções do sistema.

Nesse modo de operação, é possível modificar os modos de medição das grandezas, atuar diretamente sobre as saídas digitais de acionamento dos relés e ajustar o sinal PWM responsável pelo controle do aquecimento da bateria.

Este modo é especialmente útil durante as fases de desenvolvimento e manutenção, pois possibilita a verificação individual dos componentes sem a necessidade de operar o sistema no modo automático.

3.2. Expansão das Funcionalidades do BMS

As atualizações feitas no *hardware* do BMS Flexível demandaram a incorporação de novas funcionalidades no código do BMS, para isso novas tarefas foram criadas e integradas ao código existente.

Essa atualização contemplou a mudança na medição de corrente e tensão, a implementação do monitoramento individual das células apresentado na Seção 2.4.1 e a ampliação da conectividade do BMS para suporte a métodos de IoT. A Figura 3.18 apresenta um diagrama com as novas tarefas.

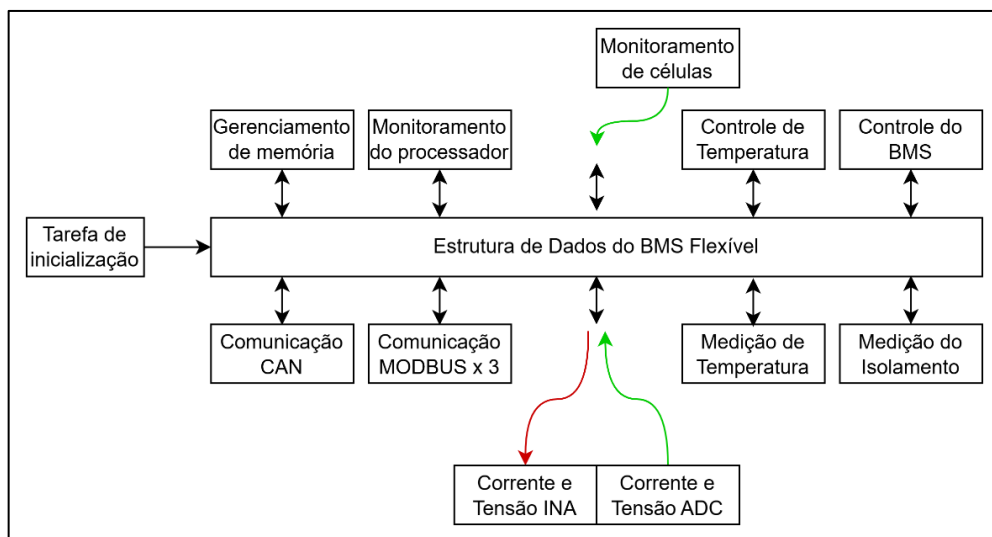


Figura 3.18: Tarefas implementadas na expansão do BMS.

3.2.1. Substituição do Sensor de Corrente e Tensão

O processo de substituição do sensor de corrente teve como principal objetivo reduzir os custos do sistema de medição, simplificar sua implementação e manter a compatibilidade com as demais funcionalidades do BMS. A Figura 3.18 ilustra como a tarefa é substituída sem alterar a forma como as demais tarefas interagem com as grandezas de tensão e corrente.

A nova abordagem passou a utilizar canais ADC do microcontrolador para realizar as medições de tensão e corrente das *strings* da bateria. Uma nova tarefa de leitura foi criada e substituiu a tarefa anterior, coletando mesmos os valores de tensão, corrente e potência e seguindo os modos de operação apresentados na Figura 3.11, para que não houvesse impacto nas outras tarefas do BMS.

3.2.2. Monitoramento de Células BMS-IoT

Uma nova tarefa foi criada para realizar as medições das tensões de cada célula da bateria e acionar o sistema de balanceamento sempre que necessário. Esse controle sobre as células visa maximizar a vida útil da bateria e obter um desempenho mais uniforme entre as strings da bateria.

A comunicação com os módulos de balanço ocorre via protocolo SPI, os módulos são conectados em cadeia, conforme apresenta a Figura 3.19. O primeiro módulo está diretamente conectado ao BMS-IoT, enquanto os demais são conectados ao módulo anterior, os comandos enviados ao primeiro módulo são replicados automaticamente para os demais.

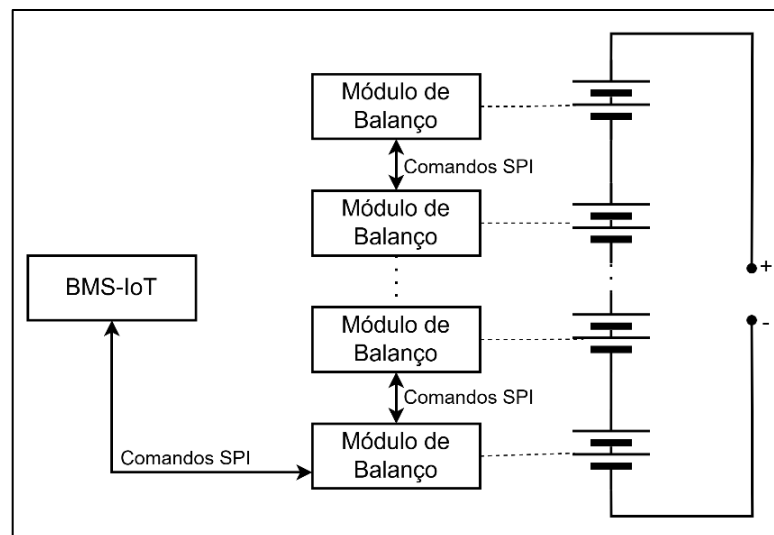


Figura 3.19: Diagrama de comunicação com os módulos de balanço.

A Figura 3.20 apresenta um diagrama do algoritmo executado pela tarefa. O monitoramento das células possui três modos de funcionamento distintos:

- Modo Desligado: Nenhuma leitura ou operação de balanceamento é realizada;
- Modo Leitura das tensões das células: As tensões das células são medidas e armazenadas nos respectivos registradores a cada de 30ms;
- Modo Balanço: As tensões das células são verificadas e caso alguma atenda o critério para balanço, é determinado que esta célula seja descarregada por 20 segundos.

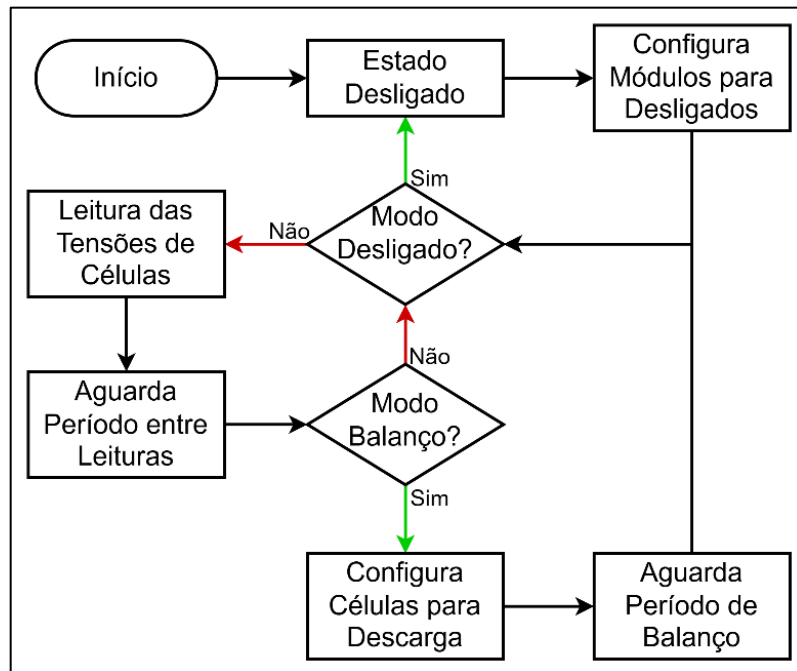


Figura 3.20: Algoritmo da tarefa de monitoramento das células.

A decisão de quais células serão selecionadas para o balanceamento segue uma abordagem fundamentada na comparação das tensões das células com o critério da métrica utilizada. Se a tensão da célula atende ao critério de seleção, ela é marcada para descarregamento.

As células que foram marcadas para balanceamento têm seu circuito de balanço ativado, permitindo que a energia excedente seja transferida para o seu módulo. Esse processo ocorre de forma contínua, com reavaliações periódicas das tensões.

3.2.3. Expansão da Conectividade BMS-IoT

Para ampliar as capacidades de monitoramento remoto do BMS, foi implementada uma nova tarefa de comunicação Modbus. Assim um módulo ESP pode realizar uma leitura dos valores dos registradores do BMS periodicamente.

Com isso é possível a integração com sistemas de remotos e a aplicação de algoritmos avançados com computação em nuvem, aumentando a acessibilidade dos dados operacionais. A Figura 3.21 apresenta um diagrama das redes de comunicação pelo BMS-IoT.

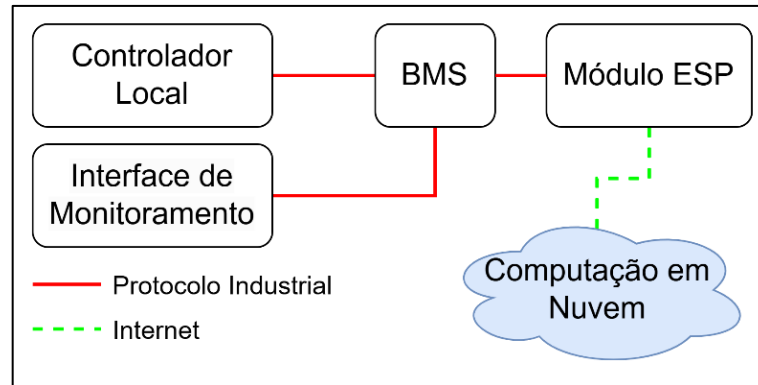


Figura 3.21: Diagrama das interfaces de comunicação do BMS-IoT

Cabe destacar que não é escopo deste trabalho o desenvolvimento da programação no módulo ESP, assim esta expansão de funcionalidade é abordada para destacar a flexibilidade do BMS a se adaptar a novas demandas necessárias sem afetar as funções já implementadas.

3.2.4. Configuração BMS-1S

O BMS Flexível suporta aplicações em que apenas uma *string* de bateria esteja em uso. Para isso, o registrador de *uso de strings* é utilizado para definir a quantidade de strings ativas no sistema. Cada bit em nível alto nesse registrador indica que a string correspondente será utilizada, permitindo que um dispositivo externo ou operador selecione quais strings estarão em operação.

O BMS-1S mantém todas as filosofias de operação do sistema multistring, com a diferença de que apenas uma das tarefas de medição de corrente e tensão é ativada. Dessa forma, o BMS pode ser utilizado em aplicações que não demandam mais de uma string.

3.3. Interface Gráfica de Operação

A interface gráfica foi desenvolvida para ser uma ferramenta de operação, teste e validação do BMS, permitindo monitoramento e configuração do sistema. Sua implementação foi feita em linguagem de programação *Python*²⁶ (versão 3.8.10) com o pacote *custom TKinter*²⁷ para criação dos elementos visuais.

²⁶ Python

²⁷ Custom TKinter

A aplicação é iniciada através de um arquivo executável, sendo compatível com ambiente *Windows* 8 ou superior, a comunicação com o BMS ocorre via USB utilizando o protocolo Modbus RTU.

A interface é composta por múltiplas telas, acessíveis por meio de uma barra de navegação lateral. As informações apresentadas são lidas da lista de registradores do BMS. Cada tela apresenta uma parcela das informações agrupadas por contexto, como por exemplo:

- Valores operacionais;
- Configurações da bateria;
- Diagnósticos;
- Monitoramento das células;
- Comandos no modo manual.

A aplicação é formada por dois quadros principais: a barra de navegação e o quadro de rolagem. O módulo que controla a barra de navegação é responsável pela leitura dos registradores do BMS, além de definir qual tela está ativa e disparar o comando de atualização.

Essa abordagem permite inclusão e remoção de telas, uma vez que todas as telas seguem o mesmo padrão. A Figura 3.22 ilustra a interação entre a barra de navegação e a tela ativa, destacando as responsabilidades de cada componente da interface.

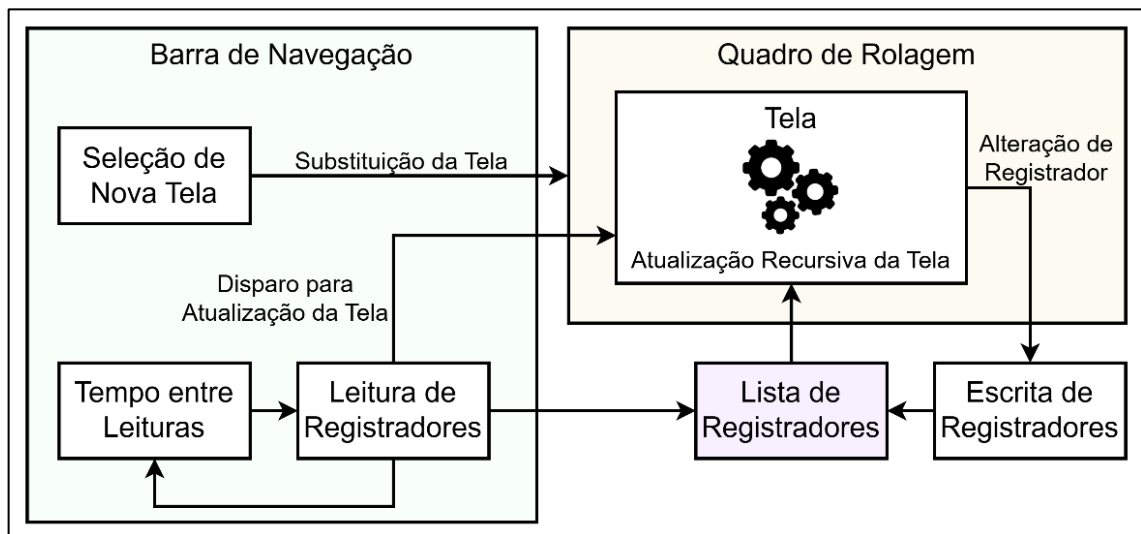


Figura 3.22: Algoritmo da Interface de Monitoramento.

3.4. Métodos para Validação das Funcionalidades do BMS

A validação do BMS será realizada por meio de testes que verificarão o funcionamento das principais funcionalidades do sistema em diversas condições operacionais, conforme descrito nas Subseções a seguir.

Os resultados serão apresentados no formato de tabelas, conforme modelo apresentado na Tabela 3.3, contendo a descrição dos procedimentos adotados, os resultados obtidos e observações pertinentes aos resultados. As tabelas completas estão compiladas no Apêndice A. A Seção 4.1 discute os principais resultados, incluindo gráficos, capturas de osciloscópio e imagens a fim de apresentar os resultados obtidos.

Tabela 3.3: Modelo da tabela de apresentação de resultados.

	Procedimento	Resultado	Observação
Teste 1	Descrição do procedimento do teste	Resultados obtidos com o teste	Observações sobre os resultados
Teste 2			

3.4.1. Comunicação e Interface

Os testes de comunicação avaliavam a capacidade de comunicação entre o BMS e dispositivos externos por meio dos protocolos Modbus RTU e CAN Open. São realizadas verificações das mensagens recebidas e enviadas, assegurando que o BMS siga o protocolo, conforme definido, diante de diferentes comandos.

Nos testes de comunicação Modbus, foi utilizado um *software* mestre Modbus e um terminal serial, para realizar testes de leitura dos registradores, de escrita dos registradores com acesso permitidos e envios de comandos como o salvamento de dados, os comandos de operação e a leitura dos registros de eventos.

Para os testes de comunicação CAN, utilizou-se um conversor CAN-USB e o *software* BusMaster²⁸. O objetivo foi validar o comportamento do BMS como dispositivo CAN-Open, testar o acesso aos registradores via SDO, o envio correto de mensagens PDO e EMCY.

Para validação da interface foi utilizada a comunicação Modbus por USB, para monitorar valores, alterar configurações e enviar comandos ao BMS, fazendo a comparação entre os valores internos do BMS aos apresentados pela interface.

3.4.2. Sistema de Leitura e Controle de Temperatura

A leitura do sensor de temperatura é validada fazendo a substituição do sensor por diferentes resistores correspondentes a temperaturas distintas, os valores lidos são comparados com valores de temperatura de tabelas de referências do sensor tipo PT1000²⁹. A Tabela 3.4 apresenta os valores de resistência e a temperatura correspondente.

²⁸ Busmaster

²⁹ Tabela de referência PT1000

O controlador PI utilizado para o controle térmico da bateria foi validado a partir de um circuito RC, que simula de forma simplificada o comportamento térmico da bateria, utilizando a tensão em um capacitor C_1 ($100\mu F$) como análogo da temperatura da bateria³⁰.

Nesse sistema simplificado, apresentado na Figura 3.23, a corrente pelo resistor série R_1 ($1k\Omega$) representa a transferência de calor pelas resistências de aquecimento da bateria e a corrente pelo resistor paralelo R_2 ($4,7k\Omega$) é responsável por modelar a dissipação térmica, refletindo a perda de calor da bateria.

Tabela 3.4: Valores referência para teste de leitura de temperatura do BMS.

Resistência [Ω]	Temperatura [$^{\circ}C$]
1200	52
1500	131
2000	267
2200	323

O objetivo do teste do controlador de temperatura é fazer com que a tensão no capacitor, siga referências de tensão em rampa, de forma similar ao que é aplicada a temperatura da bateria. O circuito utilizado permite verificar o funcionamento correto do controlador PI, antes de realizar o aquecimento da bateria.

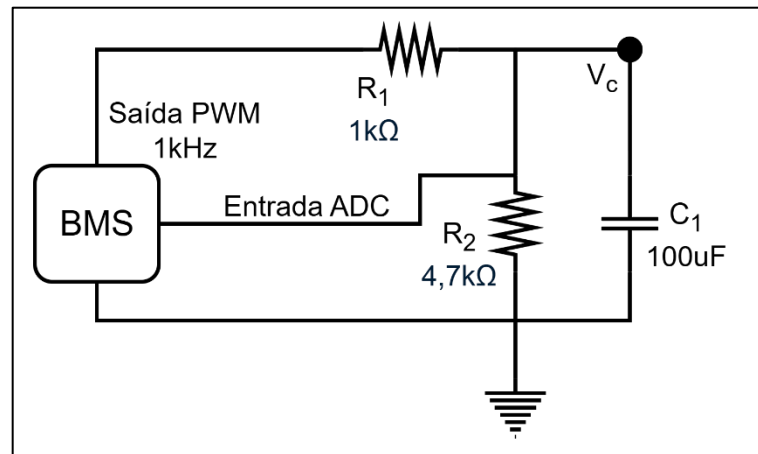


Figura 3.23: Circuito para validação do controlador PI.

Em seguida é realizado o teste do controlador PI para aquecimento da bateria, avaliando o comportamento do controlador e a potência de aquecimento aplicada. São coletados dados da temperatura da bateria, a temperatura de referência e a potência determinada pelo controlador. Essas informações permitem avaliar se o sistema se comporta de maneira adequada.

³⁰ Analogia elétrica da condução de calor

O gráfico apresentado na Figura 3.24 mostra a resposta esperada para o teste de aquecimento da bateria, onde o controlador PI mantém a temperatura da bateria próxima ao valor de referência.

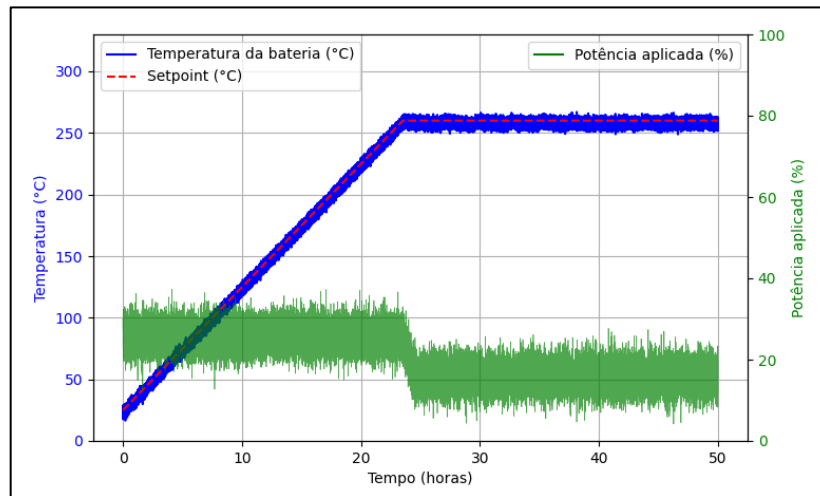


Figura 3.24: Simulação do aquecimento da bateria.

3.4.3. Medição de Grandezas da Bateria

Para validar a medição da resistência entre os polos da bateria e a carcaça são realizados testes, com uma fonte de tensão com saída configurada em 300V, em duas condições de isolamento: com os polos da bateria completamente isolados da carcaça e com conexão resistiva de $150\text{ k}\Omega$ ($500\ \Omega/\text{V}$ ³¹ para 300V). Na Figura 3.25 são apresentados os diagramas simplificados do teste de isolamento da bateria.

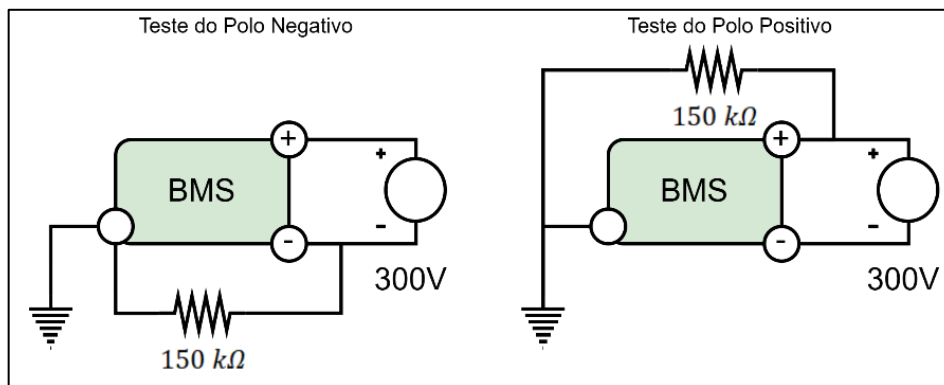


Figura 3.25: Diagrama de teste da medição de resistência de isolamento.

³¹ Normas automotivas indicam a resistência mínima de isolamento de $500\ \Omega/\text{V}$: [Automotive High-Voltage and Isolation Leakage Measurements Reference Design](#)

Nos testes de medição de tensão e corrente do BMS são verificados a exatidão das medições e são divididos em dois procedimentos distintos, de acordo com o tipo de sensor utilizado.

No teste com o sensor INA260 valores conhecidos de tensão e corrente são aplicados e a exatidão dos valores lidos são verificados. No teste com sensor via shunt de corrente e divisor resistivo, a medição é realizada pelo ADC do BMS.

Valores conhecidos de tensão e corrente são aplicados e as leituras do ADC são registradas. Em seguida, é realizado um ajuste de curva para determinar os ganhos necessários para os sensores. Esses ganhos são configurados nos *registradores de calibração* do BMS, o teste é repetido para validar a precisão das leituras.

3.4.4. Proteção e Controle da Bateria

A proteção da bateria é avaliada verificando a sua atuação para cada *string*, garantindo que falhas não comprometam a operação do sistema. Cada proteção é testada individualmente e serão apresentadas as capturas com osciloscópio dos ensaios.

O setup de testes apresentado na Figura 3.26 simula falhas por sobrecorrente, de forma que duas fontes de tensão foram utilizadas para representar as duas *strings* da bateria, ambas foram configuradas com uma tensão de 50V.

O BMS foi configurado para um limite de proteção por corrente de 3,5A para cada string, e uma carga eletrônica foi configurada para manter uma tensão de até 49V, dessa forma, quando conectada a carga drenará corrente, simulando uma descarga na bateria.

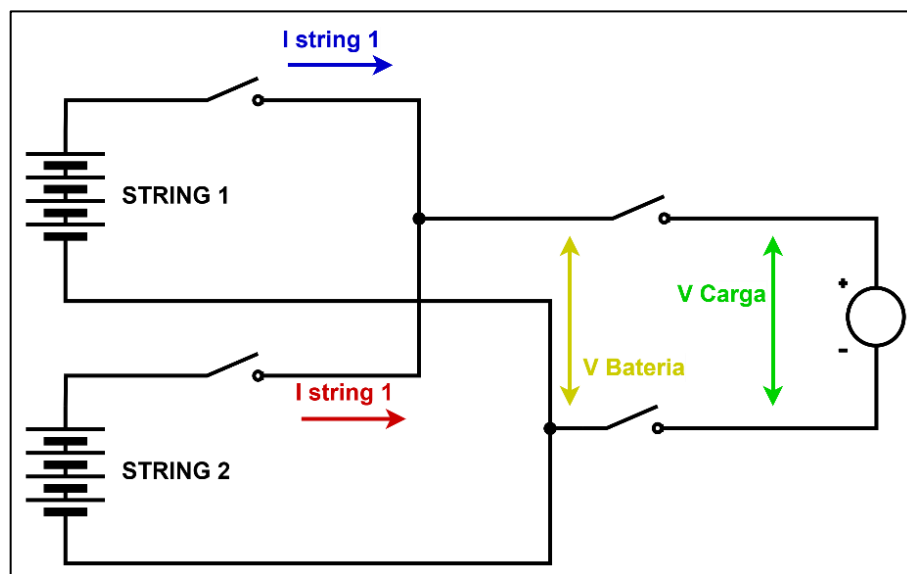


Figura 3.26: Diagrama de testes de proteção por sobrecorrente do BMS.

Os limites escolhidos para os testes não refletem a capacidade do BMS, sendo utilizados para simular a operação da bateria e validar o sistema de proteção do BMS. O protocolo de ensaio de sobrecorrente é forçar sobrecorrentes nas *strings*:

1. Aplicar sobrecorrente na string 1.
2. Aplicar sobrecorrente na string 2.
3. Recompôr o sistema de teste.
4. Aplicar sobrecorrente na string 2.
5. Aplicar sobrecorrente na string 1.

O protocolo foi realizado na presença e na ausência da alimentação CA, permitindo avaliar a operação do sistema também em cenário isolado da rede CA. As diferentes cores presentes na Figura 3.26 correspondem aos sinais registrados pelo osciloscópio durante os testes de proteção.

A validação do sistema de proteção da bateria também inclui testes de proteção por tensão e detecção do fim de carga e descarga, conforme descrito na Seção 3.1.2. Diversos cenários operativos são impostos alterando as fontes e a carga e o BMS deve interromper a carga ou descarga conforme os critérios configurados. A perda da rede CA durante a descarga da bateria também é simulada, avaliando a operação do BMS de forma autônoma.

Juntamente com os testes de proteção é avaliada o seguimento do fluxograma do algoritmo da tarefa de controle, conforme Figura 3.7, de acordo com os eventos simulados.

3.4.5. Módulos de Balanceamento de Células

Os módulos serão validados em fontes de bancada, observando o monitoramento das tensões de células e o funcionamento dos circuitos de balanceamento de forma controlada, conforme diagrama de teste apresentado na Figura 3.27.

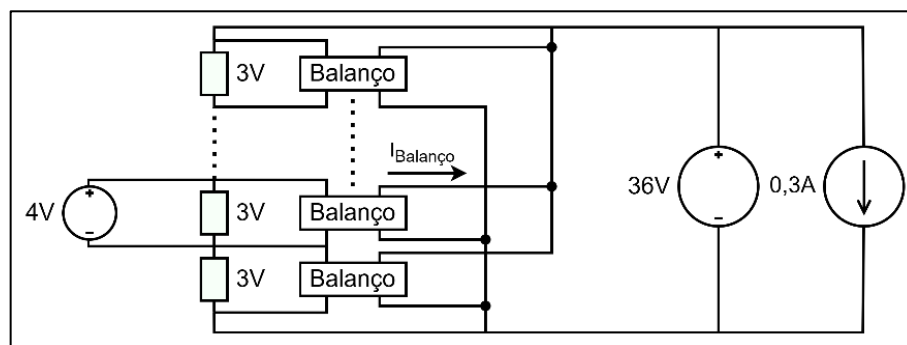


Figura 3.27: Diagrama de testes do balanço de células em bancada.

Cada circuito de balanceamento é testado individualmente, utilizando um divisor resistivo para simular as tensões das células. Os módulos possuem 12 circuitos de balanceamento, uma fonte será configurada para emular a string de células com uma tensão de 36V (3V por célula),

enquanto outra fonte representará uma célula desbalanceada, sendo ajustada para uma tensão superior às demais. Uma carga eletrônica é configurada para drenar 0,3A.

Durante os testes, a corrente da fonte que simula a célula mais carregada deve ser igual à corrente de balanceamento, aproximadamente 2,5A, enquanto a fonte que emula a string deve apresentar uma redução na corrente drenada correspondente à corrente de balanceamento, confirmando a transferência de energia entre o circuito da célula e da string.

Após validação dos módulos será realizado teste de balanceamento das células da bateria. A tarefa de monitoramento das células será habilitada para realizar balanço manualmente por meio da interface gráfica.

Durante o teste, os dados serão registrados pela interface, enquanto a proteção da bateria será realizada externamente pelo sistema de monitoramento da *National Instruments*³², que também faz a coleta das tensões das células.

Para determinar quais células devem ser balanceadas, foi implementado um algoritmo baseado no fluxograma apresentado pela Figura 2.5 e o desempenho de dois critérios foram comparados, apresentados na Equação 3.7:

- Modo Delta para Média: É calculada a média das tensões de todas as células e são selecionadas para balanceamento aquelas cujas tensões estejam 5mV acima da média.
- Modo Delta para Mínima: são selecionadas as células cuja tensão esteja 5mV acima da menor tensão registrada entre todas as células.

$$\begin{cases} V_{cel} - V_{médio} \geq 5 \text{ mV} \\ V_{cel} - V_{mín} \geq 5 \text{ mV} \end{cases} \quad 3.7$$

³² CDAQ National Instruments

Capítulo 4

Resultados

Este capítulo apresenta os resultados de validação do BMS, comprovando sua eficácia em diferentes cenários operacionais. Foram realizados testes para avaliar todas as funcionalidades implementadas, seguindo o planejamento detalhado na Seção 3.4. Além disso, são apresentadas aplicações práticas do BMS, demonstrando sua versatilidade e aplicabilidade em diferentes contextos.

4.1. Validação das Funcionalidades do BMS

Os testes realizados para a validação do BMS serão apresentados utilizando gráficos, capturas de tela do osciloscópio e imagens comprovando o funcionamento do BMS. As tabelas de resultados apresentam o procedimento realizado, o resultado obtido e observações relativas ao teste realizado, conforme apresentado no modelo da Tabela 3.3, e estão disponíveis no Apêndice A.

4.1.1. Testes de Comunicação e Interface

Os testes dos protocolos de comunicação têm como objetivo avaliar a correta execução dos protocolos de comunicação implementados no BMS, respondendo as mensagens de forma correta e realizando a troca de dados com outros dispositivos e sistemas.

A Tabela A.1, a Tabela A.2 e a Tabela A.3 apresentam os procedimentos e os resultados dos testes realizados com o protocolo Modbus, com a interface de monitoramento e com o protocolo CAN Open, respectivamente.

Os testes da comunicação Modbus foram realizados com *software* que simula um mestre Modbus para fazer a leitura e a escrita de registradores utilizando as diferentes funções Modbus,

as respostas do BMS foram de acordo com o definido no protocolo Modbus, comandos inválidos foram tratados da forma correta.

As funções especiais do BMS para leitura de diagnósticos internos e registros de eventos também foram verificadas com auxílio da interface de monitoramento, e tiveram o seu funcionamento verificado. Foram também enviados comandos de operação, realizadas alterações nas configurações do BMS.

As informações apresentadas pela interface, em suas diferentes telas, foram validadas durante a operação da bateria e testes das funcionalidades do BMS, incluindo a apresentação de tensões, correntes, estado de carga, alarmes de falhas, configurações e relatórios de operação.

Apesar da capacidade da interface em atuar como ferramenta para validação das outras funcionalidades, foi verificado que a responsividade das telas e a atualização das informações é lenta. A Figura 4.1 traz os valores apresentados na tela de registradores da interface, dando destaque ao quadro de valores da bateria e ao quadro de estados do BMS.

BMS Values		BMS States	
Voltage:	503.77 V	BMS mode:	IDLE
Current:	0.33 A	BMS state:	IDLE
Power:	166.83 W	Temperature State:	OP RANGE -
Temperature avg:	250.8 °C	String 1 Status:	CHARGING
Isolation Neg Pole 1:	44036 Ω/V	String 2 Status:	IDLE
Isolation Pos Pole 1:	22018 Ω/V	Error Protection Counter:	<input type="text" value="0"/>
Isolation Neg Pole 2:	0 Ω/V	Operation Stopped Counter:	<input type="text" value="0"/>
Isolation Pos Pole 2:	0 Ω/V	Battery Charge:	20.25 Ah
Temperature 1:	0.0 °C	Battery SOC:	<input type="text" value="53.2 %"/>
Temperature 2:	240.6 °C	Battery SOH:	<input type="text" value="100.0 %"/>
Temperature 3:	264.1 °C	String 1 Charge:	20.25 Ah
Voltage 1:	503.855 V	String 1 SOC:	<input type="text" value="53.2 %"/>
Current 1:	0.338 A	String 1 SOH:	<input type="text" value="100.0 %"/>
Power 1:	170.36 W	String 2 Charge:	19.00 Ah
Voltage 2:	0.000 V	String 2 SOC:	<input type="text" value="50.0 %"/>
Current 2:	0.000 A	String 2 SOH:	<input type="text" value="100.0 %"/>
Power 2:	0.00 W	07/01/2000 15:17:17	
Average Cell Voltage:	0.00 V	Run time:	0 days 00:42:30
Maximum Cell Voltage:	0.00 V		
Minimum Cell Voltage:	0.00 V		

Figura 4.1: Tela de monitoramento da interface do BMS.

De maneira similar ao Modbus, a validação do protocolo CAN Open foi feita usando *software* BusMaster. O programa foi utilizado para fazer leituras e escritas, a transição entre estados de rede, a validação das respostas do BMS para comandos inválidos, e do envio das mensagens temporizadas.

4.1.2. Testes do Sistema de Leitura e Controle de Temperatura

Os testes realizados para a validação do sistema de leitura e controle de temperatura do BMS tem como objetivo avaliar a precisão das medições de temperatura, a calibração dos

sensores e o desempenho do controlador PI no controle térmico da bateria. Os principais resultados são apresentados nesta seção e os procedimentos são apresentados na Tabela A.4.

A leitura de temperatura do BMS foi testada usando diferentes resistências que simulam os sensores PT1000, conforme apresenta a Figura 4.2, e comparando os valores obtidos pelo sistema de medição do BMS com os valores esperados. Assim, foi possível avaliar a precisão das medições e determinar a curva de calibração para a conversão da temperatura.

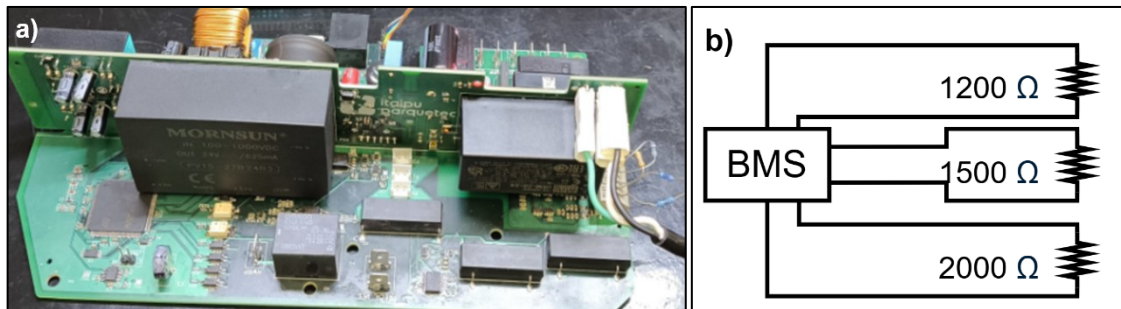


Figura 4.2: Teste da leitura de temperatura: a) Diferentes resistências conectadas ao BMS-1S. b) Diagrama elétrico do teste realizado.

Em seguida foi aplicado um ajuste linear aos dados, determinado os ganhos de conversão adequados, e os erros associados às medições foram analisados. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 4.1.

Foi observada uma variação considerável nas medições individuais de temperatura realizadas pelo BMS, causadas pela sensibilidade do circuito a ruídos. Apesar disso, após a aplicação do filtro de média móvel, os valores lidos pelo BMS estabilizam próximas ao valor correto. No entanto, melhorias no circuito podem ser implementadas para reduzir as oscilações verificadas nas leituras.

Tabela 4.1: Resultados dos testes de medição de temperatura.

Resistência Utilizada	Leitura do Sensor	Temperatura Esperada	Temperatura Ajuste	Erro
1198 Ω	1091	50,3°C	45,3°C	-5,0°C
1480 Ω	1733	120,7°C	126,3°C	5,6°C
1966 Ω	2693	238,7°C	247,3°C	8,6°C
2185 Ω	2962	290,7°C	281,2°C	-9,4°C

Para assegurar a correta aplicação das rampas de aquecimento e de resfriamento no controle de temperatura da bateria, foi realizado teste preliminar fora da bateria com o circuito de teste discutido na Seção 3.4.2.

O teste consistiu no controle da tensão de um capacitor, cuja tensão de referência varia linearmente com tempos de 15 segundos, entre valores mínimos e máximos de 0,2 V e 2,7 V, respectivamente.

A resposta da tensão controlada é apresentada na Figura 4.3, percebe-se que ela segue a referência de tensão de maneira estável, indicando que o controlador PI implementado para controlar a temperatura da bateria realiza a aplicação de rampa de forma adequada.

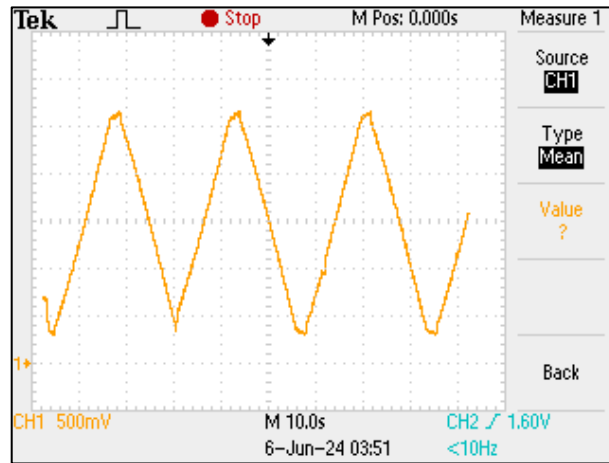


Figura 4.3: Resultado do controle da tensão no capacitor.

Finalmente, a Figura 4.4 apresenta a evolução da temperatura da bateria ao longo do tempo (Azul), em comparação com a referência de temperatura (Vermelho) e a potência aplicada ao sistema de aquecimento (Verde).

Observam-se oscilações significativas causadas por ruídos nos circuitos de leitura de temperatura, principalmente entre 9 e 12 horas do teste, as quais impactam diretamente a potência aplicada, gerando variações em alta frequência. Apesar das oscilações, observa-se que a temperatura segue a referência de forma satisfatória durante todo o período de aquecimento.

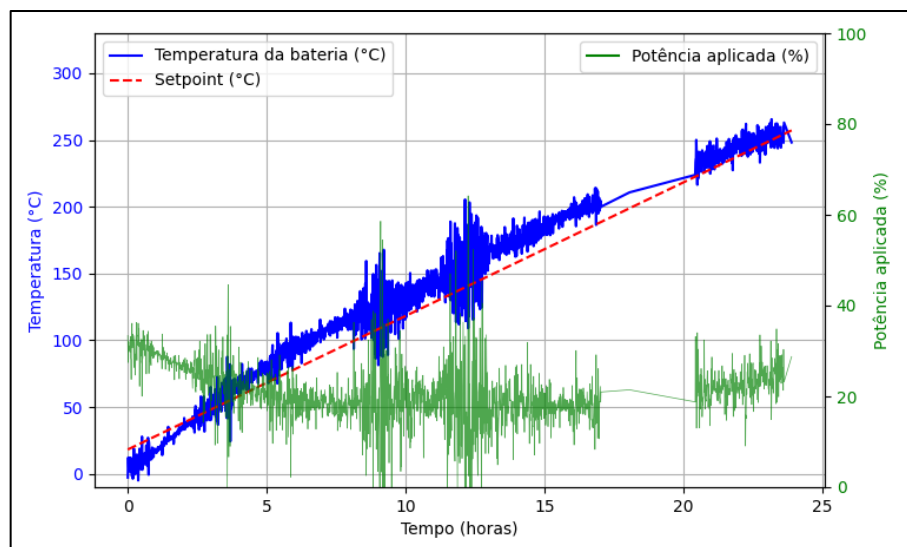


Figura 4.4: Resultado do controle de temperatura na bateria.

4.1.3. Testes de Medição de Grandezas da Bateria

Os resultados dos testes de medição da isolamento são resumidos na Tabela A.5. Na foto apresentada pela Figura 4.5, observa-se o teste de falha de isolamento realizado com uma resistência conhecida conectada entre um polo da bateria e o aterramento do sistema (resultando na medição de 517 Ohm/V), demonstrando a capacidade do BMS de detectar falhas de isolamento.

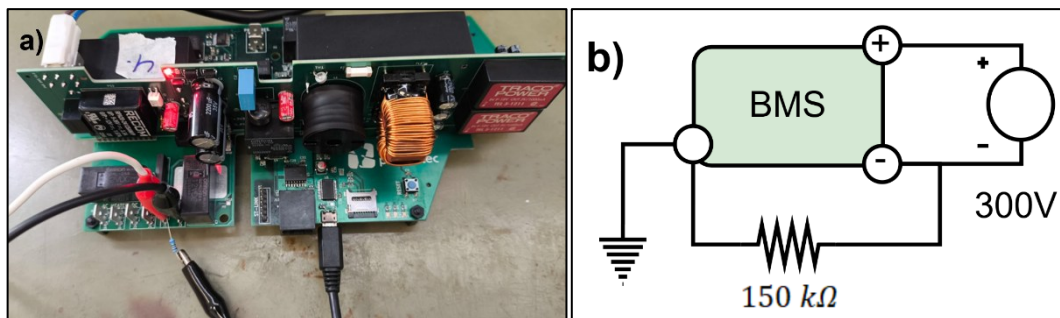


Figura 4.5: Teste de falha no isolamento: a) Aplicação do teste no BMS-1S. b) Diagrama elétrico do teste de isolamento.

Os sistemas de medição de tensão e corrente da bateria, foram testados conforme procedimentos definidos pela Seção 3.4.3, e um resumo dos resultados pode ser verificado na Tabela A.6.

A Figura 4.6 mostra a interface sendo utilizada durante os testes dos sensores de tensão e corrente do BMS-1S, nos quais os comandos para ativação manual da tarefa foram enviados pela interface e os valores lidos pelo sensor são apresentados na tela de monitoramento.

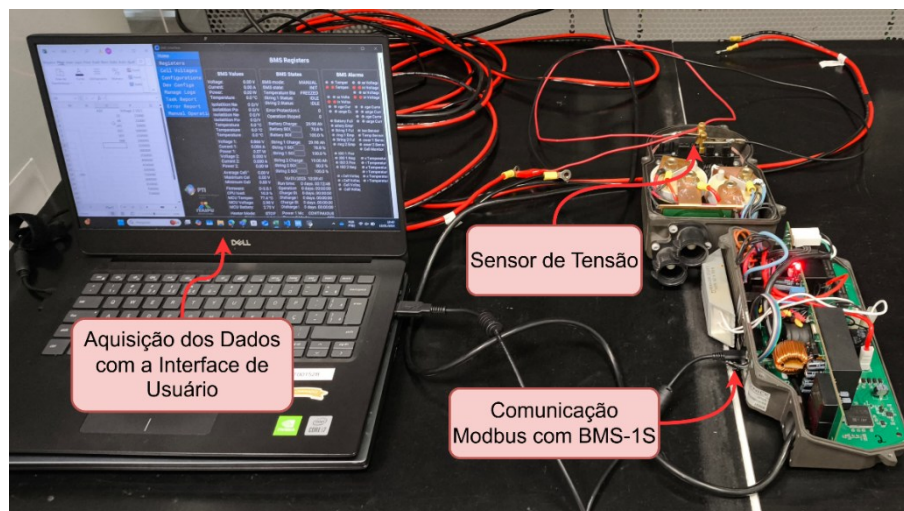


Figura 4.6: Teste dos sensores de tensão e corrente com uso da interface.

Tendo em vista que dois métodos para a medição destas grandezas foram utilizados nas versões do BMS, ambos são apresentados nesta seção e uma comparação entre as abordagens é realizada.

Utilizando o sensor INA260, observou-se que o erro percentual nas leituras de tensão e corrente permaneceu abaixo de $\pm 0,25\%$ com leituras estáveis em toda a faixa de leitura, indicando um bom desempenho do sensor. A Tabela 4.2 apresenta os resultados dos testes de precisão do sensor.

Tabela 4.2: Resultados dos testes de medição de tensão e corrente com sensor INA260.

Aplicado	Lido pelo BMS	Erro	Aplicado	Lido pelo BMS	Erro
50V	49,99V	-0,02%	-14 A	-14,01 A	0,06%
100V	99,98V	-0,02%	-12 A	-12,00 A	0,03%
150V	150,13V	0,09%	-10 A	-10,01 A	0,11%
200V	200,39V	0,19%	-8 A	-8,00 A	-0,02%
250V	249,84V	-0,06%	-6 A	-5,99 A	-0,15%
300V	299,94V	-0,02%	-4 A	-4,01 A	0,13%
350V	349,63V	-0,11%	-2 A	-2,00 A	0,09%
400V	399,87V	-0,03%	0 A	0,00 A	-
450V	449,15V	-0,19%	2 A	2,00 A	-0,09%
500V	499,29V	-0,14%	4 A	4,00 A	0,10%
550V	550,00V	0,00%	6 A	6,01 a	0,23%
600V	599,54V	-0,08%	8 A	8,00 A	0,02%
650V	648,94V	-0,16%	10 A	10,00 A	0,05%
700V	700,23V	0,03%	12 A	12,01 A	0,09%
750V	751,42V	0,19%	14 A	14,02 A	0,11%

Para os testes de medição de tensão utilizando divisor resistivo e o circuito de condicionamento com amplificadores operacionais, apresentado na Figura 4.6, os valores convertidos são apresentados respectivamente, na Tabela A.7 e na Tabela A.8.

Os erros para os valores de tensão monitorados foram inferiores a 0,25%. Para a medição de corrente utilizando um shunt resistivo, os maiores erros foram identificados em baixas correntes, para as quais o erro percentual chegou a $\sim 5\%$, o que pode estar relacionado à sensibilidade do circuito e à influência de ruídos.

Tanto para corrente quanto para a tensão, o ajuste de curva apresentado na Figura 4.7, revela que os circuitos com amplificadores operacionais do BMS apresentam bom nível de exatidão.

A medição com o INA260 oferece alta exatidão e precisão, com poucos componentes e implementação simples. No entanto, tem custo elevado, capacidade de medição de corrente limitada e possui dependência da disponibilidade do componente.

Já a medição com shunt e divisor resistivo é mais flexível e barata, permitindo ajuste para diferentes faixas de corrente. Porém, é mais sensível a ruídos, e necessita que seja executado uma calibração antes de iniciar a operação.

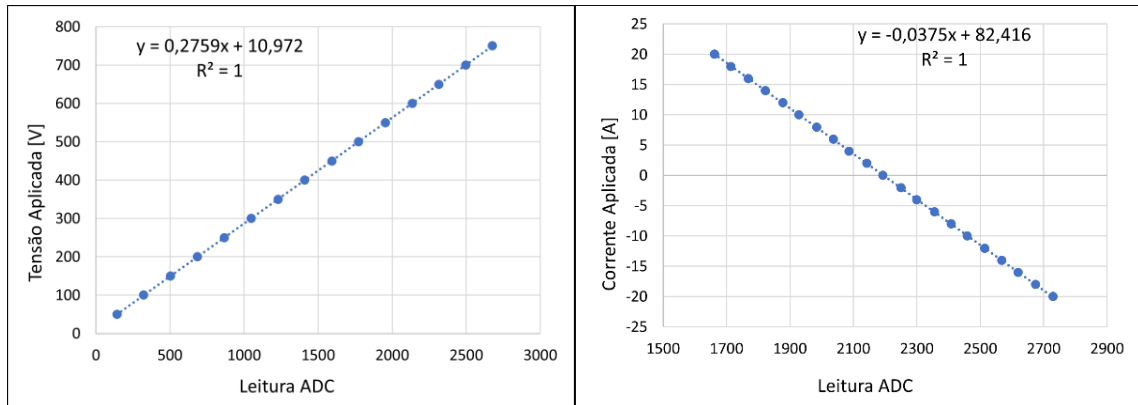


Figura 4.7: Ajuste de curva para calibração dos sensores de tensão e de corrente.

4.1.4. Teste de Proteção e Controle da Bateria

Os algoritmos de proteção da bateria foram avaliados em ambiente controlado com o uso de fontes de bancada, conforme descrito na Seção 3.4.4, e as respostas do BMS em diferentes condições de operação, foram comparadas com o comportamento esperado, permitindo comprovar o funcionamento do controle da bateria. Os sinais apresentados em cada captura de tela estão coloridos de acordo com a Figura 3.26:

- Em amarelo: A tensão de alimentação do BMS;
- Em azul: A corrente da *string* 1;
- Em vermelho: A corrente da *string* 2;
- Em verde: A tensão na carga.

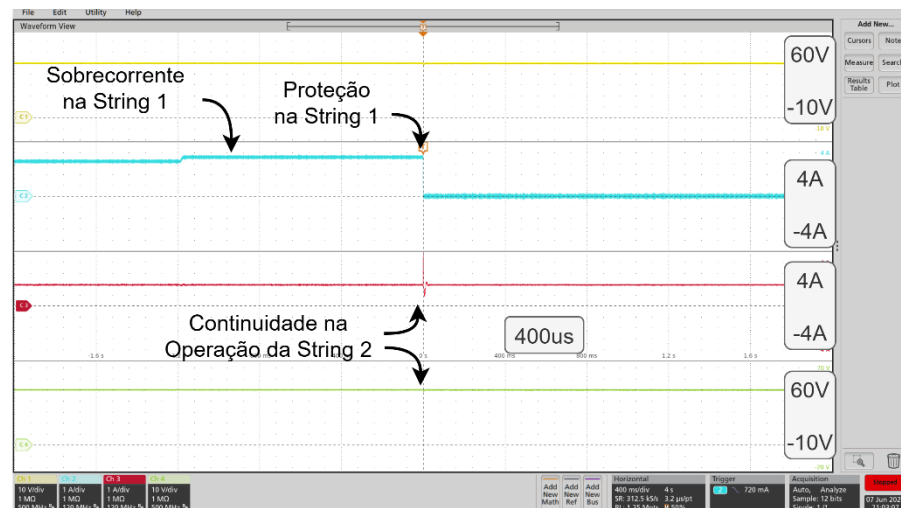


Figura 4.8: Teste de sobrecorrente realizado na string 1.

A Figura 4.8 apresenta a captura de tela do osciloscópio durante a execução do teste de sobrecorrente na *string* 1. Quando a corrente ultrapassou o limite configurado, o BMS abriu a conexão da *string*, interrompendo completamente seu funcionamento, enquanto a *string* 2

continuou sua operação normalmente, selecionando apenas a *string* em falta para o acionamento da proteção.

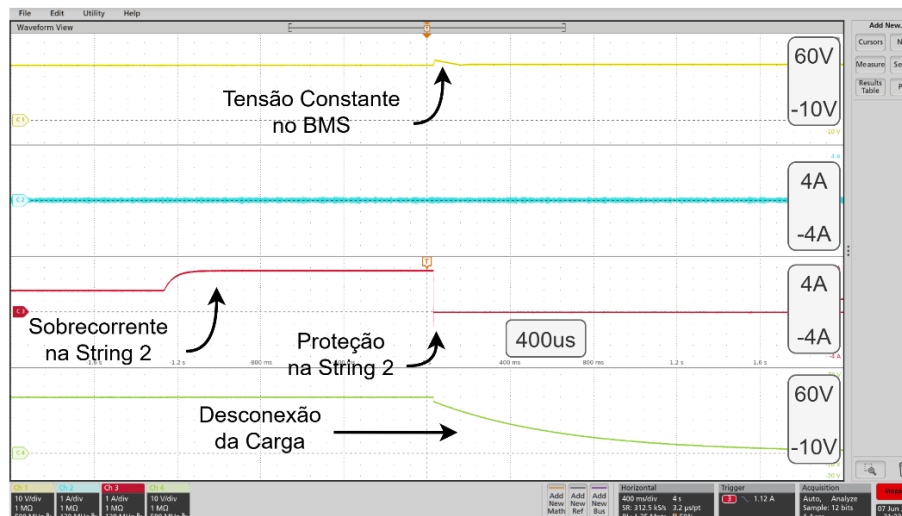


Figura 4.9: Teste de sobrecorrente realizado na string 2.

Após a proteção da *string* 1, foi induzida a sobrecorrente na *string* 2. Já que esta era a única *string* ativa do sistema, as chaves principais foram abertas, desconectando a carga e mantendo a tensão de alimentação do BMS, conforme pode ser observado na Figura 4.9.

Essa característica permite que o BMS e o sistema de aquecimento da bateria possam se manter operativos, permitindo uma recomposição pós-evento, através de comandos recebidos de dispositivos externos, ou de um usuário que esteja monitorando o sistema.

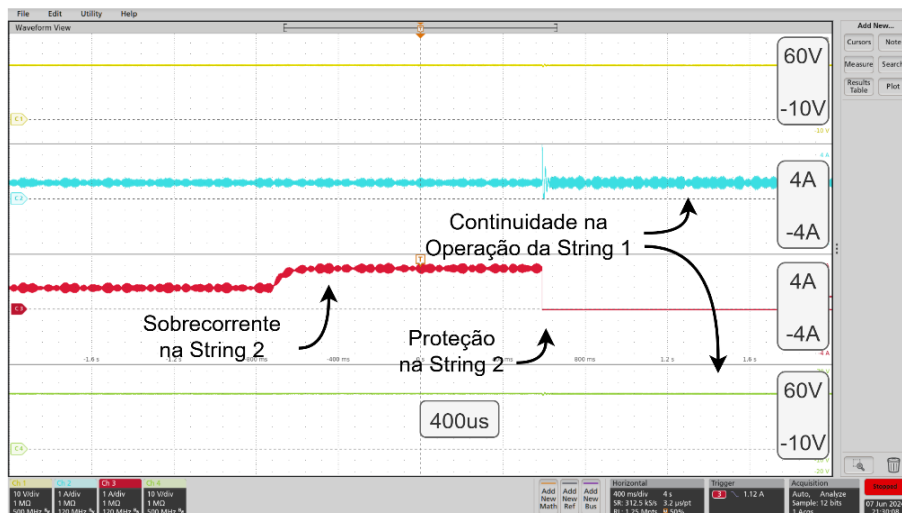


Figura 4.10: Teste de sobrecorrente realizado na string 1 sem alimentação pela rede CA.

Na sequência, os testes foram repetidos sem a presença da rede CA, cujos resultados podem ser observados na Figura 4.10, para o teste de sobrecorrente na string 2, e na Figura 4.11, para o teste de sobrecorrente na string 1. É interessante destacar que, nesse cenário, a

corrente da string 1 não se torna nula, como nos testes anteriores, devido ao consumo do BMS e do sistema de aquecimento da bateria.

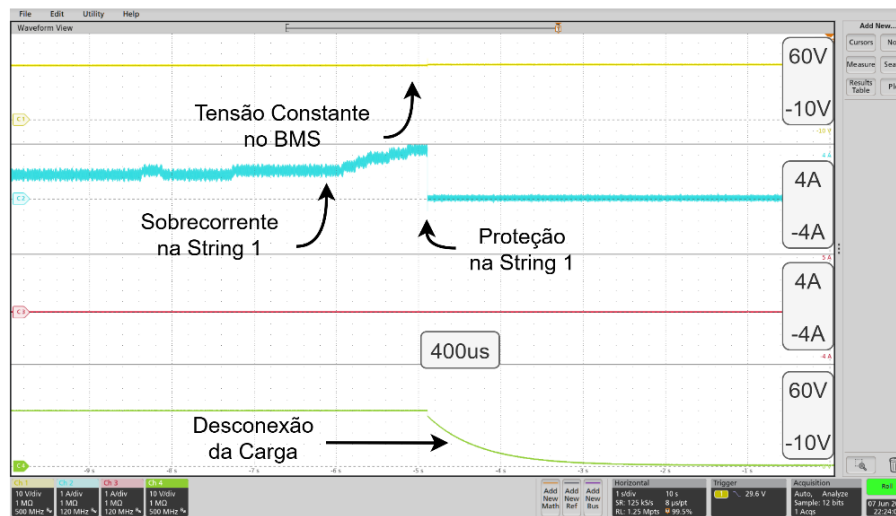


Figura 4.11: Teste de sobrecorrente realizado na string 2 sem alimentação pela rede CA.

A fim de verificar como o BMS reage a queda da rede CA durante uma descarga da bateria, foi realizado o teste apresentado na Figura 4.12. O resultado obtido confirma que, na ocorrência deste evento, o BMS passa a ser alimentado pela bateria.

Este resultado demonstrar a capacidade do circuito de alimentação redundante em garantir a continuidade da operação e o fornecimento de energia à carga durante um evento de perda da fonte principal de energia.

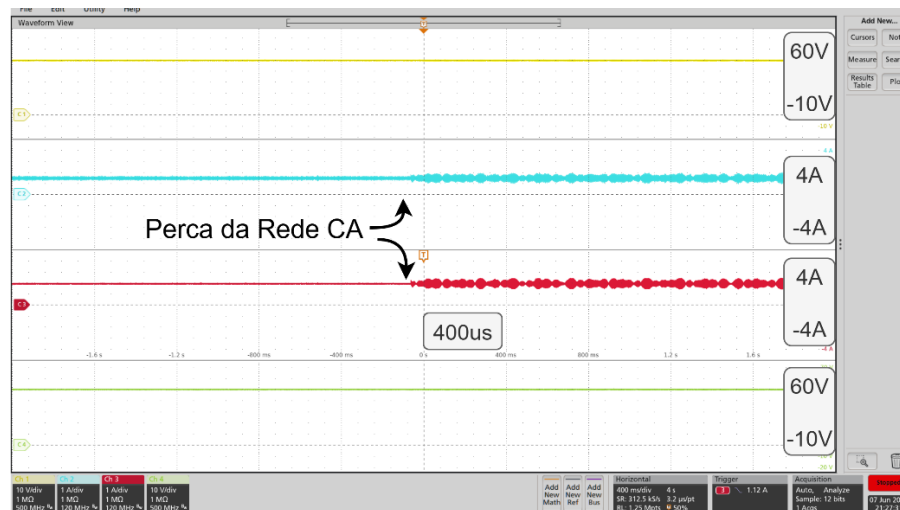


Figura 4.12: Teste de queda da rede CA durante a descarga da bateria.

Os resultados obtidos em bancada comprovam a capacidade do BMS de lidar com falhas individuais nas *strings*, manter a operação em cenários diversos, incluindo a perda da rede CA. Também foram verificados outros cenários de falta e foi validado a execução do fluxograma de controle do BMS. Todos os testes realizados são descritos e relatados na Tabela A.9.

4.1.5. Testes dos Módulos de Balanceamento de Células

Os módulos de balanceamento de células desenvolvidos passaram por diversos testes, tanto em bancada quanto com baterias reais. A Tabela A.10 apresenta os procedimentos realizados e os resultados obtidos.

Durante o teste de leitura das tensões das células, os valores medidos foram verificados utilizando a interface do usuário. Já ao realizar os testes de balanço de células em bancada com valores típicos de tensão das baterias de sódio (2,8V na célula a ser balanceada e 2,68V nas demais), foi identificado um erro UVLO (*Under Voltage Lock Out*) no circuito de balanceamento.

A falha é causada pela queda da tensão de alimentação do circuito LT8584 no momento da ativação do balanço, como apresentado na Figura 4.13. Para confirmar que o problema era realmente causado pela tensão, foram realizados testes com tensões mais elevadas, representando baterias de lítio (4V na célula a ser balanceada e 3V nas demais).

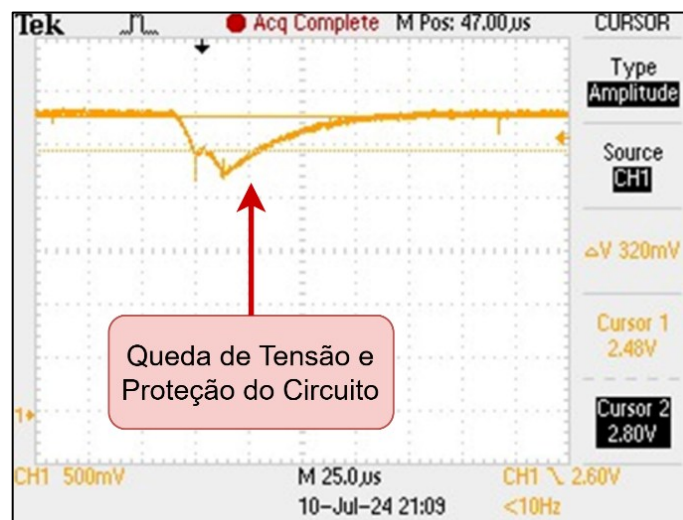


Figura 4.13: Queda na tensão de alimentação do CI LT8584.

Nestas condições, o circuito de balanceamento operou corretamente, apresentando correntes de balanço para a célula entre 2,3A e 2,8A. Além disso, foram realizados testes com um número reduzido de células conectadas aos módulos, verificando o caso em que os módulos sejam compostos por menos de 12 células. Observou-se que o sistema operou normalmente, desde que atendidas as seguintes condições:

- A tensão de alimentação do módulo deve ser superior a 11 V;
- As entradas de células não utilizadas devem ser conectadas à última célula do módulo;
- Nenhuma célula conectada deve estar em estado de falta.

Os testes também foram realizados em uma string de células de sódio, a string é composta por 20 células retiradas de uma bateria Z37-620-ML3X-38³³. Porém, durante o processo de remontagem e reaquecimento da string, 3 de suas células apresentaram falhas.

Assim, o teste foi realizado com as 17 células funcionais restantes (8 células foram conectadas ao módulo 1 e 9 células conectadas ao módulo 2). A Figura 4.14 apresenta a montagem na bateria de sódio. Foram realizados testes de monitoramento de tensão e de balanceamento das tensões de célula, tanto com a bateria em repouso quanto em carregamento.

Nos dois casos, as tensões de célula foram lidas e as células desbalanceadas foram identificadas corretamente. Porém, ao acionar o balanço a proteção por UVLO ocorreu devido à queda de tensão de alimentação do CI, conforme verificado em bancada.

Apesar dos resultados obtidos indicarem que o *hardware* desenvolvido não é viável devido às limitações de tensão da bateria de sódio, eles podem ser utilizados para outras tecnologias que possuem tensão de célula mais elevado, como as baterias de íons de lítio.

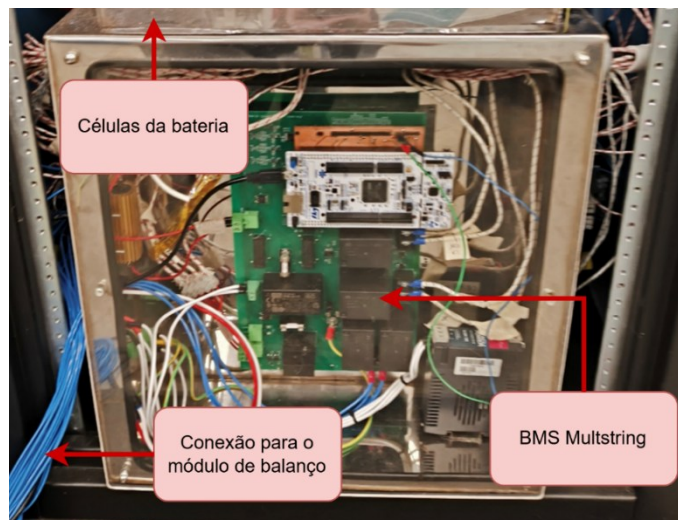


Figura 4.14: Bateria de sódio utilizada para teste dos módulos de balanço.

O sistema de balanceamento foi avaliado em um módulo composto por 12 células de lítio. A Figura 4.15 apresenta a bateria utilizada durante os testes. Estes testes permitiram avaliar os módulos de balanço em uma bateria real, e os dois critérios para seleção das células a serem balanceadas, conforme a Equação 3.7.

³³ Bateria de Sódio

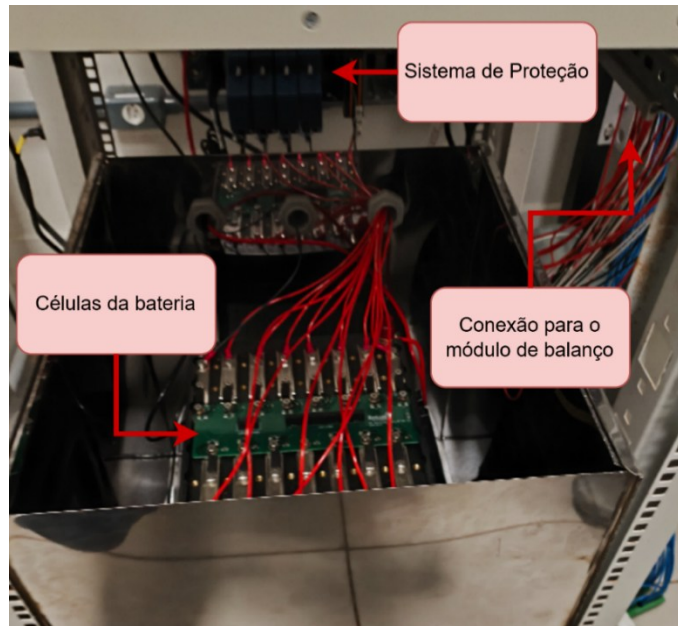


Figura 4.15: Bateria de lítio utilizada para teste dos módulos de balanço.

Os dados de tensões de células durante o balanceamento utilizando o modo *delta para média*, foram salvos utilizando a interface de monitoramento e estão apresentados na Figura 4.16. Através do perfil de tensão das células durante o balanceamento, pode-se concluir que as células com maior tensão foram corretamente identificadas e a energia delas foi transferida para todo o módulo.

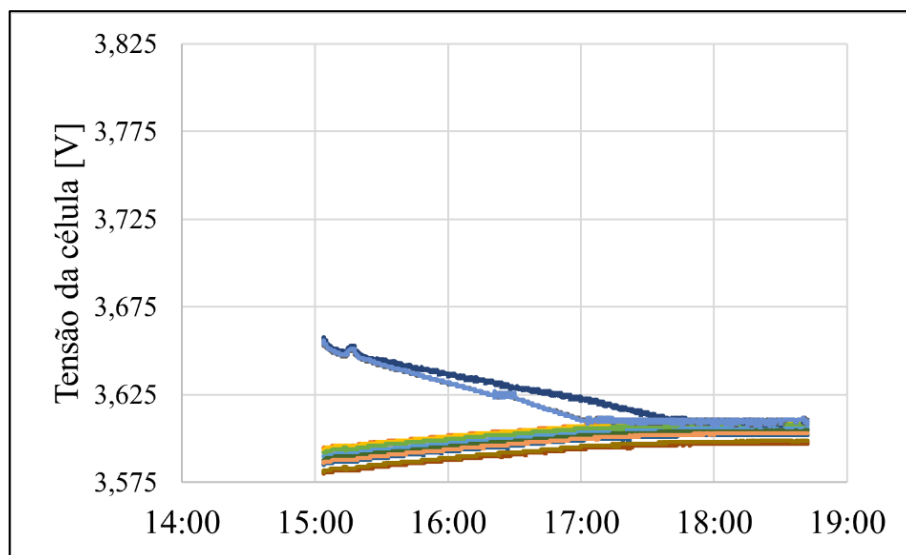


Figura 4.16: Tensões de célula durante o balanceamento no modo delta para média.

Os dados de tensões de células durante o balanceamento utilizando o modo *delta para mínima*, são apresentados pela Figura 4.17. As células com tensão 5mV superior à mínima foram corretamente identificadas e selecionadas para o balanço.

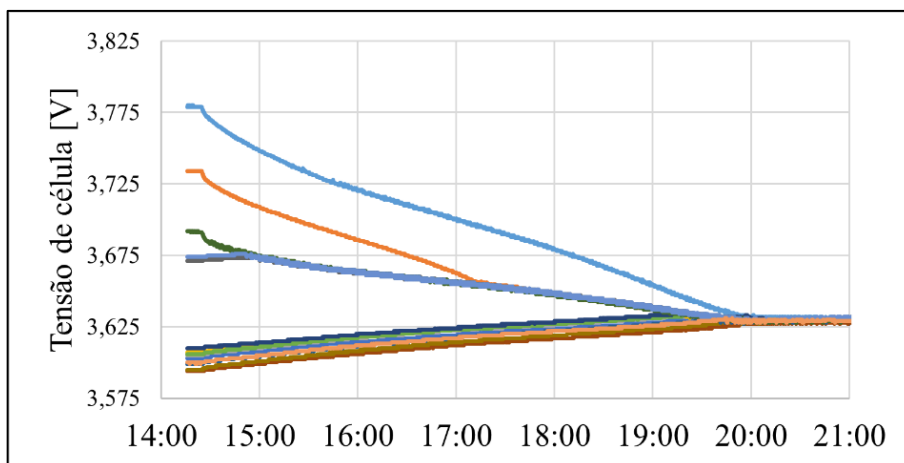


Figura 4.17: Tensões de célula durante o balanceamento no modo delta para mínima.

Com base nos resultados apresentados na Figura 4.16 e na Figura 4.17, conclui-se que o teste com modo delta para mínima iniciou com um desvio de tensão mais acentuado ($\sim 200\text{mV}$), e conseguiu balancear a tensão de todas as células com desvio inferior a 5mV .

Já o teste com delta para a média partiu de uma diferença menor ($\sim 80\text{mV}$), e obteve um resultado satisfatório, embora com um desvio final maior, em torno de 10mV . Ambos os modos são eficazes, porém o modo *delta para a mínima* apresenta menor desvio das tensões ao final do balanço.

Para contornar a limitação identificada durante o acionamento do balanço em baterias do tipo ZEBRA, algumas possibilidades foram exploradas. A primeira consiste em revisar o projeto dos módulos de balanceamento, utilizando dois pares de cabos por célula, separando o circuito percorrido pela corrente de balanço da célula do circuito de monitoramento de tensão. Assim a corrente de balanço não causará queda da tensão monitorada pelo CI LT8584.

A segunda alternativa é o uso de uma topologia de R-BMS (abordados na Seção 2.2.1), no qual o sistema identifica e isola automaticamente as células com desempenho inadequado, reconfigurando as conexões das células, utilizando somente as células saudáveis. Essa estratégia aumenta a segurança, já que células com comportamento anômalo podem ser rapidamente retiradas do circuito, porém a complexidade do controle e o custo do sistema aumenta significativamente.

A terceira opção analisada é a substituição da topologia de balanceamento utilizada pela alternativa descrita na Seção 2.4.2. Quando comparada à topologia testada, esta apresenta como vantagens a capacidade de 16 células por módulo, carga e descarga das células, tensão mínima de célula de $1,17\text{V}$. Porém é necessária a utilização de uma bateria auxiliar, além de existir limitações da quantidade de células balanceadas simultaneamente.

4.2. Aplicação do BMS em Projetos de Armazenamento de Energia

Esta seção apresenta como o BMS foi aplicado à diversos projetos, demonstrando a capacidade de adaptação conferida pelo uso da arquitetura modular do *software*. São apresentados alguns projetos desenvolvidos pela área de Gestão Energética do Itaipu Parquetec, onde o BMS foi utilizado com baterias de segunda vida, ressaltando as limitações observadas e os aprimoramentos realizados.

O primeiro projeto tem como objetivo o desenvolvimento de BMS para a integração de sistemas de baterias de segunda vida de diferentes tecnologias, a validação desses BMSs foi realizada em bancada de testes equipada com componentes da plataforma Victron Energy³⁴, o diagrama apresentado na Figura 4.18 representa o sistema que a bancada de teste emula.

A bateria originalmente era formada por duas strings de 300V conectadas em paralelo internamente, com apenas dois terminais externos disponíveis. Esta configuração impede a individualização das strings para controle, diagnóstico e proteção.

Buscou-se externalizar a conexão das duas strings, modificando a arquitetura do *pack* para que cada string pudesse ser monitorada e operada de forma independente. Para permitir maior segurança e compatibilidade com a da plataforma Victron, foram utilizadas células da bateria original montadas em duas strings de 48V.

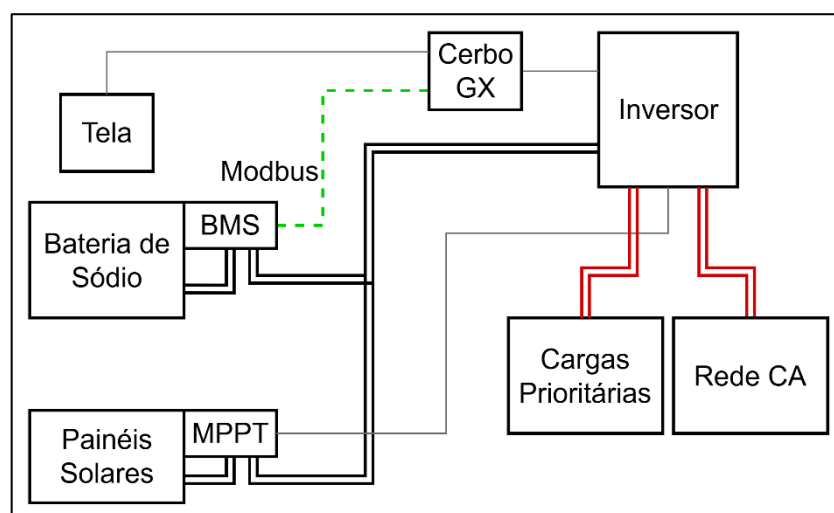


Figura 4.18: Esquemático simplificado para o projeto BMS.

A bancada, apresentada na Figura 4.19, permitiu testar a bateria em diferentes cenários de operação, como modo backup e autoconsumo, em condições de falha de rede ou limitação

³⁴ [Victron Energy](#)

da geração fotovoltaica. O sistema é controlado por um dispositivo Cerbo GX³⁵, que se comunica com o BMS pelo protocolo Modbus para obter os parâmetros da bateria.

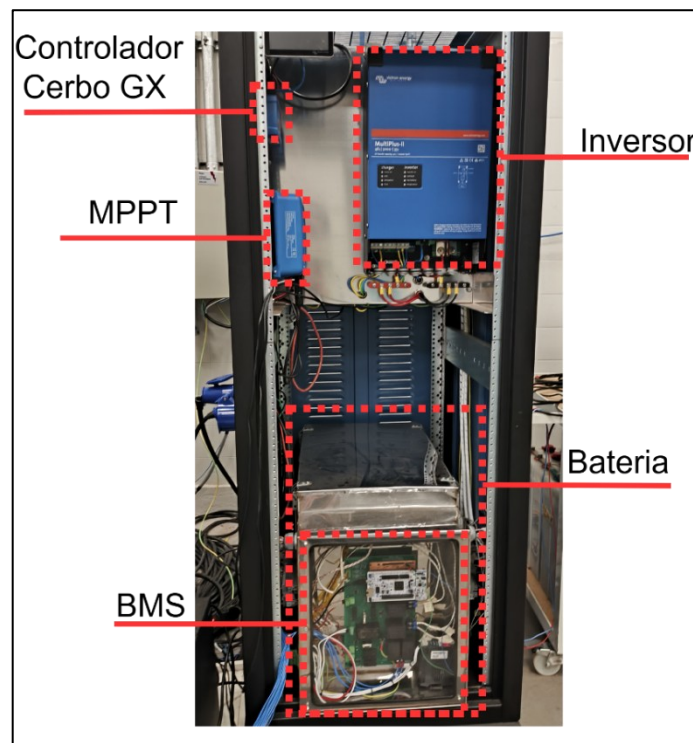


Figura 4.19: Bancada de testes montada para o projeto BMS.

Durante a utilização das baterias neste projeto, as células apresentaram falhas prematuras inviabilizando a operação das duas strings em paralelo. Este ponto motivou o desenvolvimento de um módulo complementar de monitoramento de células, com capacidade para realizar estratégias de balanceamento ativo.

Embora o balanceamento não tenha sido aplicável às células de sódio, conforme resultados discutidos na Seção 4.1.5, foi possível validar a operação do BMS em cenários limitados, com uma string de acordo com a tensão das células remanescentes.

O segundo projeto onde o BMS foi utilizado é o SSEM (Sistema de Segurança Energética Modular) que foi concebido com o objetivo de oferecer uma solução para fornecimento de energia para localidades isoladas ou emergências que seja modular e transportável.

O Sistema é formado por duas baterias de segunda vida de sódio com tensão nominal de 600 V e um inversor bidirecional Victron³⁴. O inversor realiza a gestão da conexão das baterias e de duas strings fotovoltaicas com a rede CA. O sistema possui ainda, uma entrada para a conexão de um gerador a diesel garantindo a operação em modo ilhado quando necessário, um esquema simplificado do projeto é apresentado pela Figura 4.20.

³⁵ Controlador Cerbo GX

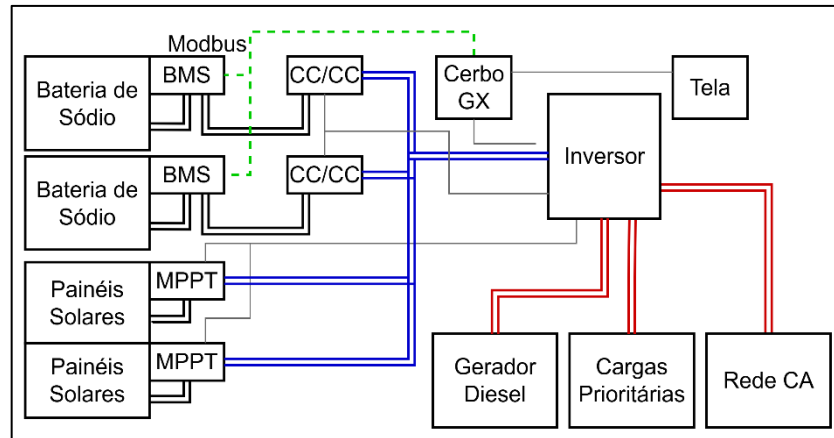


Figura 4.20: Esquemático simplificado para o projeto SSEM.

Inicialmente, o projeto previa a utilização do BMS original das baterias, no entanto, a baixa flexibilidade operacional do BMS automotivo e a dificuldade de montagem do BMS flexível direto sobre a bateria, levou ao desenvolvimento do BMS-1S.

Outra característica importante do projeto é a integração de dois BMS na mesma rede Modbus, controlados pelo mesmo dispositivo. Nessa configuração, os comandos para um BMS não devem interferir no outro. Neste projeto foi possível verificar a operação de múltiplas baterias equipadas com o BMS desenvolvido.

O projeto CIGE (Conversor CC-CC Multiportas e Sistema IoT para Gestão Inteligente de Energia), tem como objetivo o desenvolvimento de uma microrrede CC isolada voltada à produção de H2V (hidrogênio verde), por meio da integração de múltiplas fontes de energia renovável e armazenamento de energia, conforme o diagrama simplificado da Figura 4.21.

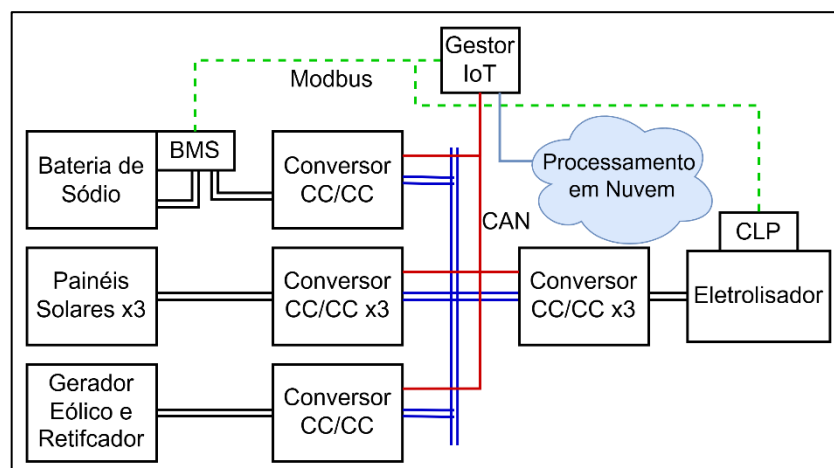


Figura 4.21: Esquemático simplificado para o projeto CIGE.

O sistema é gerenciado por uma rede de controle hierárquico, composta por uma rede CAN, que interliga todos os conversores de potência, e uma rede Modbus, responsável pela comunicação com o BMS e com o CLP que controla o eletrolisador.

As informações são centralizadas no Gestor IoT e esses dados são então enviados para processamento em nuvem, para determinação da geração H2V e outras estratégias operacionais. Dada a configuração deste projeto, o BMS é integrado em uma rede Modbus com um CLP demonstrando a sua compatibilidade com dispositivos comerciais.

No projeto SAE-H (Sistema de Armazenamento de Energia Híbrido) o objetivo é o desenvolvimento de um sistema de armazenamento avançado que combina diferentes tecnologias de armazenamento (lítio, sódio e supercapacitores), explorando as características complementares de cada equipamento, buscando alcançar alta capacidade energética e de potência, conforme apresentado no diagrama da Figura 4.22.

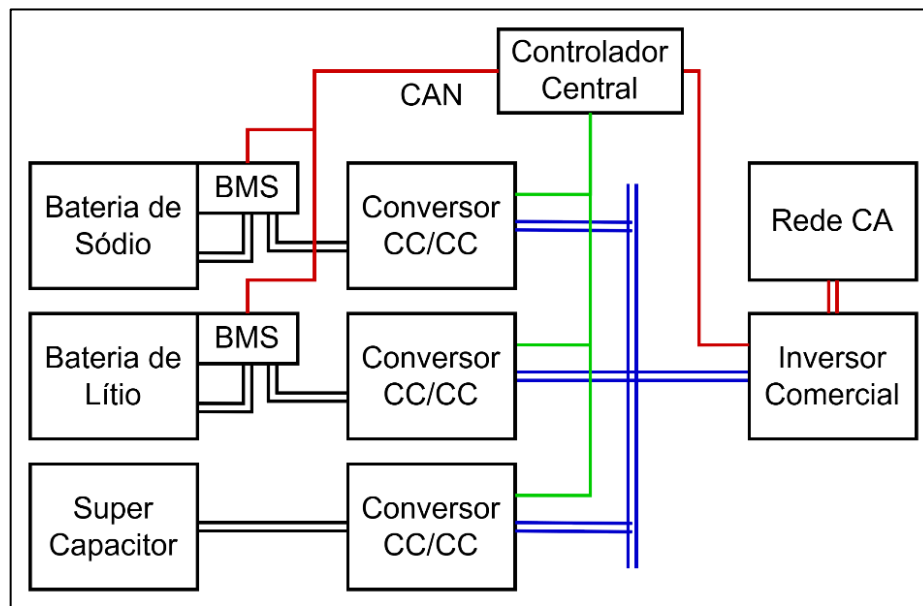


Figura 4.22: Esquemático simplificado para o projeto SAE-H.

A operação é gerenciada por um controlador central, responsável pelo controle dos conversores CC/CC, pela comunicação com o inversor e a aquisição do SOC e SOH das baterias, através dos BMS por meio do protocolo de comunicação CAN. Assim como nos projetos anteriores foi utilizado BMS-1S.

A Figura 4.23 apresenta a montagem das baterias e super capacitor juntamente com seus BMSs e conversores em um quadro, integrando uma solução híbrida de armazenamento de energia.

Além disso, neste projeto também foi desenvolvido um BMS para a bateria de lítio, tomando como base todo o conhecimento e experiência adquiridos no desenvolvimento do BMS de sódio. Este BMS para bateria de lítio de segunda vida utiliza a mesma arquitetura de software do BMS de sódio.

Portanto o *software* modular desenvolvido neste trabalho, é flexível o suficiente para permitir o seu uso em outras tecnologias de baterias, atingindo e indo além do objetivo inicialmente definido.

Como parte das entregas do projeto SAE-H, foi elaborado um manual de usuário para o BMS da bateria de lítio, apresentado no Apêndice C, o qual descreve o layout físico do BMS, a estrutura da bateria e os comandos para operação, monitoramento e diagnóstico do sistema.

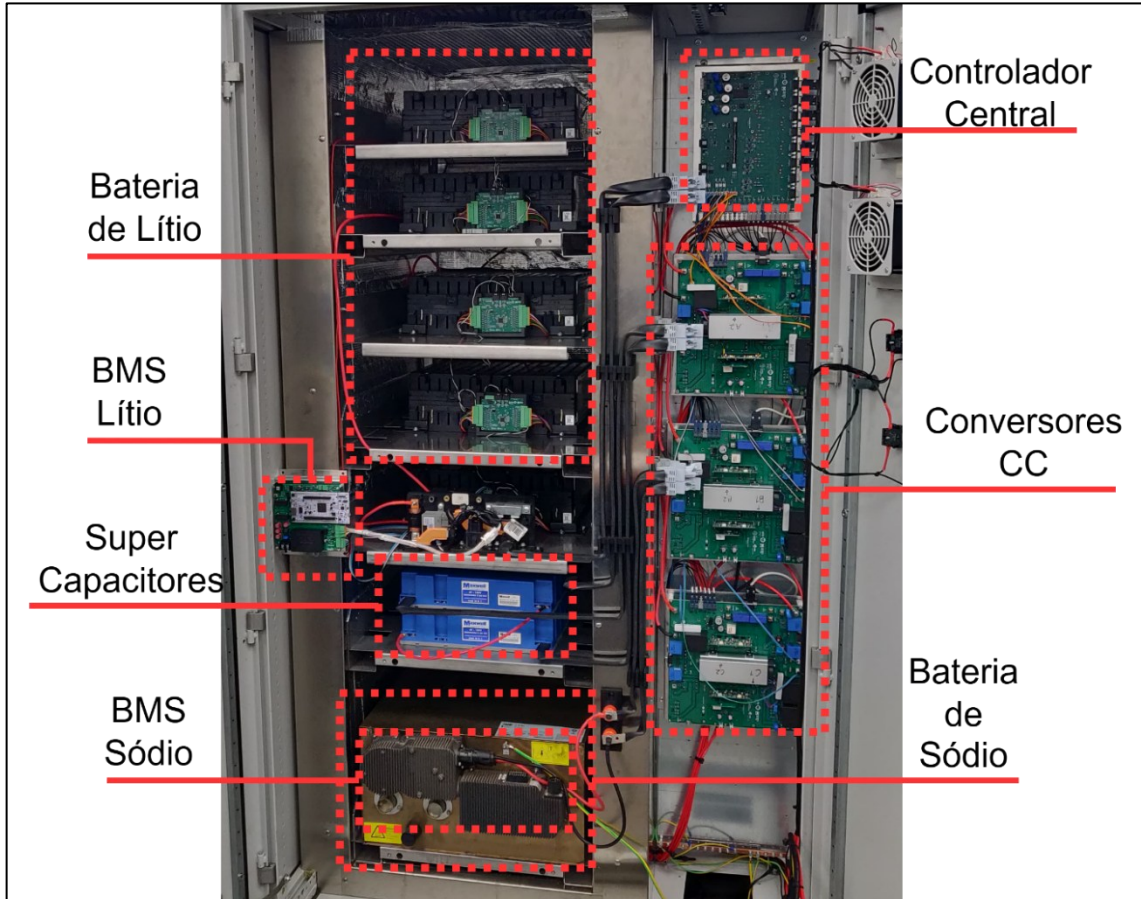


Figura 4.23: Montagem do quadro do projeto SAE-H.

Capítulo 5

Conclusões

Este trabalho apresentou o desenvolvimento de um modelo de software de BMS para utilização com baterias do tipo ZEBRA em aplicações de segunda vida, com foco em um modelo de *software* flexível e aplicável a diferentes configurações de bateria e múltiplas aplicações, sem a necessidade de alterações no código-fonte.

A abordagem adotada foi uma arquitetura modular e expansível, na qual uma estrutura de dados centralizada é a interface para receber e enviar informações entre os módulos do *software*. Os objetivos específicos propostos foram alcançados:

1. As funcionalidades essenciais para BMSs em segunda vida foram levantadas a partir do estudo do estado da arte e de soluções comerciais;
2. O modelo de *software* foi projetado com uso de sistema operacional em tempo real RTOS, empregando tarefas independentes, banco de dados compartilhado e controle de eventos, conferindo alta modularidade e organização ao código;
3. Foi desenvolvido um programa de computador que atua como uma interface gráfica de monitoramento e operação do BMS, permitindo leitura, configuração e visualização de grandezas em tempo real, com suporte a comandos de controle e teste;
4. Foram implementados dois protocolos de comunicação industriais: Modbus RTU e CAN-Open). Eles conferem ao BMS flexibilidade e capacidade de conexão com diferentes equipamentos, conforme evidenciado na Seção 4.2;
5. A validação foi conduzida por meio de ensaios laboratoriais em ambiente controlados e aplicações práticas, testando todas as funcionalidades previstas para o BMS e validando seu funcionamento de forma completa.

Em paralelo, o *hardware* do BMS passou por uma atualização significativa, com a substituição dos sensores de tensão e corrente, a incorporação de módulos para balanceamento ativo de células e a adição de capacidade IoT. Como resultado do aprimoramento do *hardware*, foram desenvolvidas duas versões distintas do sistema:

- **BMS-IoT:** Projetado para o monitoramento de múltiplas strings com capacidade de balanceamento ativo e conexão IoT.

- **BMS-1S:** Versão compacta dedicada ao monitoramento de uma única string, integrada diretamente a carcaça original da bateria, facilitando sua aplicação quando a bateria não precisa ser desmontada.

Apesar dos avanços alcançados, o trabalho também revelou limitações e oportunidades de aprimoramento que poderão ser exploradas em trabalhos futuros. Dentre elas destaca-se a dificuldade de se trabalhar com as baterias do tipo ZEBRA depois de realizar o processo de avaliação das células para montagem de nova bateria. Assim a versão do BMS-1S se demonstrou bastante superior a versão multistring pelas características da bateria ZEBRA.

Em trabalhos futuros, os seguintes tópicos e abordagens são propostos:

- Realizar testes de longa duração, com múltiplos ciclos de carga e descarga, permitindo uma avaliação de longo prazo do BMS;
- Utilizar a funcionalidade IoT para a coleta e armazenamento de dados operativos;
- Desenvolver métodos para predição de estados de SOC e SOH baseadas em modelos aprendizado de máquina ou em modelos elétricos equivalentes;
- Otimizar os módulos de balanço, diminuindo o seu tamanho e solucionando o problema da queda de tensão nas células;
- Melhorar a responsividade da interface de usuário e incorporar visualizações com gráficos de tendencia temporais;
- Desenvolver um modelo de negócio para a aplicação de baterias de segunda vida em pequena escala. Módulos retirados de baterias veiculares podem ser utilizados na montagem de baterias dimensionadas para aplicações residenciais;
- Desenvolver padrões de comunicação e procedimentos para a operação entre baterias e sistema de gestão energética, facilitando a integração de sistemas de armazenamento em segunda vida.

O modelo de *software* modular concebido neste trabalho demonstrou alta capacidade de adaptação a diferentes contextos tecnológicos e operacionais, abrangendo baterias de sódio e lítio, com ou sem acesso individual às células, operando em sistemas com uma e duas strings. A flexibilidade do modelo de software para BMS, permite a aplicação do mesmo hardware de BMS em diferentes baterias dimensionadas de acordo com a demanda a ser atendida.

Essa flexibilidade é fruto da modularidade e da centralização dos dados de forma estruturada. Assim, diante das limitações das baterias ZEBRA, o modelo desenvolvido pode ser adaptado para outras baterias. As baterias de íons-sódio são uma alternativa promissora, uma vez que não dependem da produção de metais como cobalto e lítio e possuem características eletroquímicas semelhantes às baterias de íons de lítio. O que permite que os dispositivos e técnicas possam ser mais facilmente adaptadas.

Referências

- Ahmadi, L., Fowler, M., Young, S. B., Fraser, R. A., Gaffney, B., & Walker, S. B. (2014). Energy efficiency of Li-ion battery packs re-used in stationary power applications. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, pp. 9-17.
- Akdere, M., Giegerich, M., Wenger, M., Schwarz, R., Koffel, S., Fühner, T., . . . März, M. (2016). Hardware and Software Framework for an Open Battery Management System in Safety-Critical Applications. *IECON 2016-42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 5507-5512.
- Armand, M., Ortiz-Vitoriano, N., Olarte, J., Salazar, A., & Ferret, R. (2023). Salt Batteries: Opportunities and applications of storage systems based on sodium nickel chloride batteries. *EPRS: European Parliamentary Research Service*.
- Barsukov, Y. (2009). Battery Cell Balancing: What to Balance and How. *Texas Instruments*. Retrieved Novembro 22, 2023, from <https://www.ti.com/download/trng/docs/seminar/Topic%20%20-%20Battery%20Cell%20Balancing%20-%20What%20to%20Balance%20and%20How.pdf>
- Benato, R., Cosciani, N., Crugnola, G., Sessa, S. D., Lodi, G., Parmeggiani, C., & Todeschini, M. (2015). Sodium nickel chloride battery technology for large-scale stationary storage in the high voltage network. *Journal of Power Sources*, pp. 127-136.
- Börner, M. F., Frieges, M. H., Späth, B., Spütz, K., Heimes, H. H., Sauer, D. U., & Li, W. (2022). Challenges of second-life concepts for retired electric vehicle batteries. *Cell Reports Physical Scienc.*
- Cadar, D., Petreus, D., Patarau, T., & Palaghita, N. (2010). Active balancing method for battery cell equalization. *Acta Technica Napocensis*, p. 1.
- Casals, L. C., García, B. A., & Cremades, L. V. (2017). Electric vehicle battery reuse: Preparing for a second life. *Journal of Industrial Engineering and Management*, pp. 266-285.
- Castillo-Martínez, D. H., Rodríguez-Rodríguez, A. J., Soto, A., Berrueta, A., Vargas-Requena, D. T., Matias, I. R., . . . Rodríguez-Rodríguez, W. E. (2022). Design and on-field validation of an embedded system for monitoring second-life electric vehicle lithium-ion batteries. *Sensors*.

- Delmas, C. (2018). Sodium and sodium-ion batteries: 50 years of research. *Advanced Energy Materials*.
- Dini, P., Colicelli, A., & Saponara, S. (2024). Review on modeling and soc/soh estimation of batteries for automotive applications. *Batteries*, 10.
- Dixon, J., Nakashima, I., Arcos, E. F., & Ortúzar, M. (2009). Electric vehicle using a combination of ultracapacitors and ZEBRA battery. *IEEE transactions on industrial electronics*, pp. 943-949.
- Dustmann, C.-H. (2004). Advances-in-ZEBRA-Batteries. *Journal of power sources*, pp. 85-92.
- Feng, X., Ouyang, M., Liu, X., Lu, L., Xia, Y., & He, X. (2018). Thermal runaway mechanism of lithium ion battery for electric vehicles: A review. *Energy storage materials*, pp. 246-267.
- Gabbar, H. A., Othman, A. M., & Abdussami, M. R. (2021). Review of battery management systems (BMS) development and industrial standards. *Technologies*.
- Giegerich, M., Akdere, M., Freund, C., Fühner, T., Grosch, J. L., Koffel, S., . . . Lorentz, V. R. (2016). Open, flexible and extensible battery management system for lithium-ion batteries in mobile and stationary applications. *2016 IEEE 25th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)* (pp. 991-996). IEEE.
- Haram, M. H., Lee, J. W., Ramasamy, G., Ngu, E. E., Thiagarajah, S. P., & Lee, Y. H. (2021, Mar 31). Feasibility of utilising second life EV batteries: Applications, lifespan, economics, environmental impact, assessment, and challenges. *Alexandria Engineering Journal*, pp. 4517-4536.
- Hemavathi, S. (2020). Overview of cell balancing methods for Li-ion battery technology. *Energy storage*, 3.
- Hossain, E., Murtaugh, D., Mody, J., Faruque, H. M., Sunny, M. S., & Mohammad, N. (2019). A comprehensive review on second-life batteries: Current state, manufacturing considerations, applications, impacts, barriers & potential solutions, business strategies, and policies. *Ieee Access*, pp. 73215-73252.
- Itaipu Binacional. (2012, Junho 12). *Rio+20: Projeto VE, da Itaipu, apresenta utilitário elétrico*. Retrieved Agosto 12, 2025, from <https://www.itaipu.gov.br/noticias/tecnologia/rio20-projeto-ve-da-itaipu-apresenta-utilitario-eletrico>
- Itaipu Parquetec. (2025, Agosto 12). *Portal de Soluções Itaipu Parquetec*. Retrieved from <https://www.itaipuparquetec.org.br/solucoes>
- Lee, Y., Seonwoo, J., Lee, H., & Bae, S. (2016). Comparison on cell balancing methods for energy storage applications. (I. S. Environment, Ed.) *Indian Journal of Science and Technology*, 9.

- Lelie, M., Braun, T., Knips, M., Nordmann, H., Ringbeck, F., Zappen, H., & Sauer, D. U. (2018). Battery management system hardware concepts: An overview. *Applied Sciences*.
- Lipu, M. H., Ansari, S., Miah, M. S., Meraj, S. T., Hasan, K., Shihavuddin, A., . . . Hussain, A. (2022). Deep learning enabled state of charge, state of health and remaining useful life estimation for smart battery management system: Methods, implementations, issues and prospects. *Journal of Energy Storage*.
- Martinez-Laserna, E., Sarasketa-Zabala, E., Sarria, I. V., Stroe, D.-I., Swierczynski, M., Warnecke, A., . . . Rodriguez, P. (2018). Technical viability of battery second life: A study from the ageing perspective. *IEEE Transactions on Industry Applications*, pp. 2703-2713.
- Omariba, Z. B., Zhang, L., & Sun, D. (2019). Review of battery cell balancing methodologies for optimizing battery pack performance in electric vehicles. (IEEE, Ed.) *IEEE Access*, 7, pp. 129335--129352.
- Raeber, M., Heinzlmann, A., & Abdeslam, D. O. (2020). Analysis of an active charge balancing method based on a single nonisolated DC/DC converter. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 68, pp. 2257--2265.
- Safari, M. (2025). A Perspective on the Battery Value Chain and the Future of Battery Electric Vehicles. (Wiley, Ed.) *Battery Energy*. doi:<https://doi.org/10.1002/bte2.20240016>
- Shahjalal, M., Roy, P. K., Shams, T., Fly, A., Chowdhury, J. I., Ahmed, M. R., & Liu, K. (2022). A review on second-life of Li-ion batteries: Prospects, challenges, and issues. *Energy*.
- Shamim, N. a., Reed, D. M., Sprenkle, V. L., & Li, G. (2021). Evaluating zebra battery module under the peak-shaving duty cycles. *Materials*.
- Strickland, D. a., Stone, D. A., Foster, M. P., & Price, B. (2014). Estimation of transportation battery second life for use in electricity grid systems. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, pp. 795-803.
- Sudworth, J. (1994). Zebra batteries. *Journal of Power Sources*.
- Sudworth, J. (2001). The sodium/nickel chloride (ZEBRA) battery. *Journal of power sources*, pp. 149-163.
- Sylvestrin, G. R. (2020). *Desenvolvimento de um sistema embarcado adaptável para o gerenciamento de bateria utilizando tecnologias abertas*. Dissertação de Mestrado. Foz do Iguaçu, Paraná, Brasil: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Computação - Universidade Estadual do Oeste do Paraná.
- Tan, X., Vezzini, A., Fan, Y., Khare, N., Xu, Y., & Wei, L. (2022). *Battery Management System and Its Applications*. Singapura: John Wiley & Sons.

- Tong, S. J., Same, A., Kootstra, M. A., & Park, J. W. (2013). Off-grid photovoltaic vehicle charge using second life lithium batteries: An experimental and numerical investigation. *Applied energy*, pp. 740-750.
- Tran, M.-K., Panchal, S., Khang, T. D., Panchal, K., Fraser, R., & Fowler, M. (2022). Concept review of a cloud-based smart battery management system for lithium-ion batteries: Feasibility, logistics, and functionality. *Batteries*, 8.
- Veneri, O., Capasso, C., & Patalano, S. (2017). Experimental study on the performance of a ZEBRA battery based propulsion system for urban commercial vehicles. *Applied Energy*, pp. 2005-2018.
- Viswanathan, V., Palaniswamy, L. N., & Leelavinodhan, P. B. (2019). Optimization techniques of battery packs using re-configurability: A review. *Journal of Energy Storage*, pp. 404-415.
- Wang, W., Wang, J., Tian, J., Lu, J., & Xiong, R. (2021). Application of digital twin in smart battery management systems. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 34.
- Xiangwei, G., Jiahao, G., Zhen, L., Kang, L., & Xiaozhuo, X. (2020). Active balancing method for series battery pack based on flyback converter. *IET Circuits, Devices & Systems*, 14, pp. 1129--1134.
- Yang, S., Liu, X., Li, S., & Zhang, C. (2022). *Advanced Battery Management System for Electric Vehicles*. Singapura: Springer Nature.
- Yu, K., Shang, Y., Wang, X., Wang, N., Duan, B., & Zhang, C. (2019). A multi-cell-to-multi-cell equalizer for series-connected batteries based on Flyback conversion. *3rd Conference on Vehicle Control and Intelligence (CVCI)*, pp. 1--5.
- Yue, M., Lambert, H., Pahon, E., Roche, R., Jemei, S., & Hissel, D. (2021). Hydrogen energy systems: A critical review of technologies, applications, trends and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 146.
- Zhou, W., Zheng, Y., Pan, Z., & Lu, Q. (2021). Review on the battery model and SOC estimation method. *Processes*, 9.

Apêndice A

Tabelas de Procedimentos e Resultados

Tabela A.1: Procedimentos e Resultados dos Testes de Comunicação Modbus RTU.

	Procedimento	Resultado	Observação
Leitura Modbus usando a função 03	Utilizando software mestre Modbus para leitura de 20 registradores do BMS, dos endereços 0000H a 0013H. Comparando as leituras aos valores do BMS	Os valores do BMS, e os adquiridos através da rede foram iguais	
Leitura Modbus usando a função 04			
Escrita Modbus usando a função 06 em um registrador do tipo R	Utilizando software serial para escrever o valor 0010H no registrador de endereço 0000H (Serial Number) Quadro: 01 06 0000 0010 8806	O BMS respondeu 01 86 04 43A3, o que indica que houve um erro (86H) com exceção 04H. O valor do registrador não foi modificado	Registradores do tipo R (read) não devem ser escritos

	Procedimento	Resultado	Observação
Escrita Modbus usando a função 16 em 1 registradores tipo R	Utilizando software serial para escrever o valor 0005H no registrador de endereço 0000H (Serial number). Quadro: 01 10 0000 0001 02 0005 6653	O BMS respondeu 01 90 04 4DC3, o que indica que houve um erro (90H) com exceção 04H. O valor do registrador não foi modificado.	
Escrita Modbus usando a função 06 em um registrador do tipo R/W	Utilizando software serial para escrever o valor 0002H no registrador de endereço 0005H (Endereço Modbus) Quadro: 01 06 0005 0002 180A	O BMS respondeu 01 06 0005 0002 180A (Sucesso na comunicação) e modificou o seu endereço de rede	Ao modificar o endereço, o BMS deixa de responder as mensagens com endereço de rede antigo
Escrita Modbus usando a função 16 em 1 registradores tipo RW	Utilizando software serial para escrever o valor 0002H no registrador de endereço 0005H (Endereço Modbus) Quadro: 01 10 0005 0001 02 0002 27C4	O BMS respondeu 01 10 0005 0001 11C8 (Sucesso na comunicação) e modificou o seu endereço de rede	
Escrita Modbus usando a função 16 em 4 registradores tipo RW	Utilizando software serial para escrever os valores 0000H, 03E8H, 0000 01F4H, nos registradores de endereço 005AH-005DH. Quadro: 01 10 005A 0004 08 0000 03E8 0000 01F4 0E91	O BMS respondeu 01 10 005A 0004 E1D9 (sucesso na comunicação). Os valores na memória do BMS foram modificados	Os registradores determinam os mínimos de warning e alarme para o valor da resistência de isolamento do BMS
Escrita Modbus usando a função 16 em 4 registradores tipo RW e ao menos um do tipo R	Utilizando software serial para escrever os valores 0000H, 01F4H, 0000 03E8H, nos registradores de endereço 0002H-0006H. Quadro: 01 10 0002 0004 08 0000 0005 0000 0010 8271	O BMS respondeu 01 90 04 4DC3, o que indica que houve um erro (90H) com exceção 04H. Os valores dos registradores não foram modificados	Se ao menos 1 registrador não for do tipo correto, a mensagem é desconsiderada
Escrita de um valor inválido num registrador	Utilizando <i>software</i> serial para escrever os valores 0000H, 01F4H, 0000 03E8H, nos registradores de endereço 005AH-005DH. Quadro: 01 10 005A 0004 08 0000 01F4 0000 03E8 DE18	O BMS respondeu 01 90 03 0C01, o que indica que houve um erro (90H) com exceção 03H. Os valores dos registradores não foram modificados	Valores de configuração inválidos detectados através da validação do BMS

	Procedimento	Resultado	Observação
Comando salvar na memória flash	O endereço de rede do BMS foi modificado e foi enviado o comando salvar Quadros utilizados: 01 06 0005 0002 180A 02 10 0128 0002 04 0000 0001 3305	Após a reinicialização do BMS o endereço de rede configurado se manteve	
Teste de voltar os parâmetros aos valores de fábrica com endereço broadcast	Com o endereço de rede do BMS em 2, foi enviado o comando para voltar aos valores de fábrica, que deve alterar o endereço para o valor 01. Quadro default: 00 06 0129 0003 182E	Após o envio do quadro default, o BMS voltou a responder os quadros com endereço padrão 01	O broadcast é aceito para todas as funções, e não apresenta resposta
Recepção de frame com endereçamento incorreto	Utilizando software mestre Modbus para leitura de 20 registradores do BMS, dos endereços 0000H a 0013H, porém com endereço de rede incorreto	O BMS não apresentou resposta	
Reset do BMS pela rede Modbus	Utilizando software terminal para enviar o quadro de reset ao BMS. Quadro de reset: 01 10 01C0 0002 04 0000 0000 F26F	O BMS reinicializou	
Mudança da configuração de comunicação	Utilizando <i>software</i> terminal para enviar o quadro de mudança de configuração de comunicação ao BMS. Quadro: 01 10 000E 0002 04 0000 0060 720B 00 – 1 bit de stop 00 – Sem paridade 0060 – 9600 bps	O BMS respondeu o Quadro: 01 10 000E 0002 200B e o a nova configuração foi aplicada	A mudança da configuração da comunicação acontece após o envio da resposta
Teste de leitura de Log inexistente	Realizar a leitura do Log salvo no índice 16. É importante que não haja log salvo neste índice. Quadro de leitura: 01 41 0010 5000	O BMS respondeu o quadro 01 C1 0B 3057, o que indica que o índice enviado foi invalido	A posição de memória correspondente ao índice

	Procedimento	Resultado	Observação
Teste de leitura de log com índice inválido	Realizar a tentativa de leitura de um log com índice 1024, que é maior que a quantidade de logs possíveis no BMS. Quadro de leitura: 01 41 0400 530C		escolhido não contém um log válido
Teste de leitura de log de memória index 0	Realizar a leitura do Log salvo no índice 0. Quadro de leitura: 01 41 0000 51CC	O BMS respondeu um quadro contendo as informações salvas no índice correspondente da memória de logs	
Teste de leitura de log de memória index 1	Realizar a leitura do Log salvo no índice 1. Quadro de leitura: 01 41 0001 900C		

Tabela A.2: Procedimentos e Resultados dos Testes da Interface.

	Procedimento	Resultado	Observação
Visualização de corrente das strings	Aplicação de corrente no sensor de cada string e acompanhamento da medida	Correntes de string exibidas de forma coerente	Valores lidos foram consistentes com medições externas realizadas
Visualização da tensão das strings	Aplicação de tensão no sensor de cada string e acompanhamento da medida	Tensões de string exibidas de forma coerente	
Monitoramento de temperatura	Simulação de diferentes temperaturas de sensores conectados ao BMS	Valores de temperatura foram corretamente exibidos	
Leitura de tensões das células	Utilizar a interface para visualizar as tensões das células	Tensões exibidas corretamente na tela	
Exibição de status de proteção	Alteração manual do registrdor de erros para verificar exibição de status	Interface apresentou os alarmes e falhas conforme esperado	
Atualização de endereço Modbus pela interface	Modificação do endereço de rede do BMS diretamente pela interface	Endereço foi alterado corretamente nas comunicações subsequentes	Após alteração, o BMS só respondeu ao novo endereço

	Procedimento	Resultado	Observação
Configuração de parâmetros de alarme	Alteração de limites de alarme para tensão de célula usando a interface	Limites foram modificados com sucesso no BMS	
Leitura de histórico de eventos	Cosultar o histórico de registro de eventos	Eventos registrados foram recebidos e exibidos na interface	
Teste de comando manual de operação	Envio de comando manual de ativação/desativação das saídas via interface	BMS executou o comando conforme solicitado	
Salvar dados de operação	Habilitar o registro de dados em arquivo csv	Arquivo exportado com sucesso no formato csv	Dados ser abertos e analisados posteriormente

BMS Interface

- Home
- Registers**
- Cell Voltages
- Configurations
- Dev Configs
- Manage Logs
- Task Report
- Error Report
- Manual Operation

BMS Registers

BMS Values

Voltage: 503.77 V
 Current: 0.33 A
 Power: 166.83 W
 Temperature avg: 250.8 °C

Isolation Neg Pole 1: 44036 Ω/V
 Isolation Pos Pole 1: 22018 Ω/V
 Isolation Neg Pole 2: 0 Ω/V
 Isolation Pos Pole 2: 0 Ω/V
 Temperature 1: 0.0 °C
 Temperature 2: 240.6 °C
 Temperature 3: 264.1 °C

Voltage 1: 503.855 V
 Current 1: 0.338 A
 Power 1: 170.36 W
 Voltage 2: 0.000 V
 Current 2: 0.000 A
 Power 2: 0.00 W

Average Cell Voltage: 0.00 V
 Maximum Cell Voltage: 0.00 V
 Minimum Cell Voltage: 0.00 V

Firmware: D-3.5.1
 CPU load: 17.8 %
 MCU Temperature: 21.4 °C
 MCU Voltage: 3.40 V
 MCU Battery: 3.14 V

Heater Mode: RUN
 Heater PWM: 1.8 %
 Heater SetPoint: 260.0 °C
 Heater Target: 260.0 °C

BMS States

BMS mode: IDLE
 BMS state: IDLE
 Temperature State: OP RANGE -
 String 1 Status: CHARGING
 String 2 Status: IDLE

Error Protection Counter:
 Operation Stopped Counter:

Battery Charge: 20.25 Ah
 Battery SOC:
 Battery SOH:

String 1 Charge: 20.25 Ah
 String 1 SOC:
 String 1 SOH:

String 2 Charge: 19.00 Ah
 String 2 SOC:
 String 2 SOH:

07/01/2000 15:17:17

Run time: 0 days, 00:42:30
 Operation time: 0 days, 00:00:59
 Charge String 1 time: 0 days, 00:42:15
 Discharge String 1 time: 0 days, 00:00:00
 Charge String 2 time: 0 days, 00:00:00
 Discharge String 2 time: 0 days, 00:00:00

Power 1 Mode: CONTINUOUS
 Power 2 Mode: OFF
 Isolation Mode: OFF
 Cell Monitor Mode: OFF
 Temperature Measure Mode: CONTINUOUS

BMS Alarms

- Max Temperature
- Min Temperature
- Max Voltage
- Min Voltage
- Charge Current
- Discharge Current
- Battery Full
- Battery Empty
- String 1 Full
- String 1 Empty
- String 2 Full
- String 2 Empty
- ISO 1 Pos
- ISO 1 Neg
- ISO 2 Pos
- ISO 2 Neg
- Max Cell Voltage 1
- Max Cell Voltage 2
- Min Cell Voltage 1
- Min Cell Voltage 2
- Max Voltage 1
- Min Voltage 1
- Max Voltage 2
- Min Voltage 2
- Charge Current 1
- Discharge Current 1
- Charge Current 2
- Discharge Current 2
- Iso Sensor
- Temp Sensor
- Power 1 Sensor
- Power 2 Sensor
- Cell Monitor
- Max Temperature 1
- Min Temperature 1
- Max Temperature 2
- Min Temperature 2
- Max Temperature 3
- Min Temperature 3


 **PTI**
Parque Tecnológico Itaipu

Figura A.1: Tela de monitoramento da interface do BMS.

Tabela A.3: Procedimentos e Resultados dos Testes de Comunicação CAN Open.

	Procedimento	Resultado	Observação
Recepção do boot Up	Foi utilizado um conversor CAN-USB para enviar e receber dados CAN no <i>software</i> BusMaster	Quando o BMS foi inicializado, quadro de Boot-up foi recebido: ID: 701H – DLC: 01 – Dado: 00	O Boot up é um frame que indica que o BMS está online na rede
Estado Pré-operacional	Foi encaminhado um quadro NMT (gerenciamento de rede) para passar o dispositivo para pré operacional. Quadro: ID: 000H – DLC: 02 Dados: 80 01	Ao mudar para o modo pré operacional os PDOs são interrompidos	
Estado parado	Foi encaminhado um quadro NMT para passar o dispositivo para o modo parado. Quadro: ID: 000H – DLC: 02 Dados: 02 01	No estado parado nem mesmo os SDOs são respondidos.	
Reset de rede CAN	Foi encaminhado um quadro NMT para resetar a rede CAN. Quadro: ID: 000H – DLC: 02 Dados: 81 01	O BMS enviou o quadro com ID:701H, Dado: 00 (Quadro de Boot Up)	O reset de rede CAN não reseta a BMS, apenas a comunicação
Reset do BMS pela rede CAN	Foi encaminhado um quadro SDO download para o BMS, escrevendo 0 no registrador 20A0 00 H. Quadro: ID: 601H – DLC: 08 Dados: 23 E0 20 00 00 00 00 00	O BMS respondeu o quadro de SDO download, reiniciou e enviou o quadro de Boot up. Resposta: ID: 581 Dados: 60 E0 20 00 00 00 00 00 Boot Up: ID:00, Dados: 00	

	Procedimento	Resultado	Observação
Acesso por SDO a um endereço inexistente do dicionário de objetos	Foi encaminhado um quadro SDO upload (leitura) para o BMS. Leitura do índice 0, subíndice 0. Quadro: ID: 601H – DLC: 08 Dados: 40 00 00 00 00 00 00 00	O BMS retornou o quadro: ID: 581H – DLC:08 Dados: 80 00 00 00 00 00 02 06 80H = erro 0602 0000 H = Objeto não existe	O dicionário de objetos inicia no índice 2000H
SDO de upload (leitura)	Foi encaminhado um quadro SDO upload (leitura) para o BMS. Quadro: ID: 601H – DLC: 08 Dados: 40 00 20 00 00 00 00 00	O BMS retornou o quadro: ID: 581H – DLC:08 Dados: 43 00 20 00 01 00 00 00 43H = Acesso correto 2000 00 H = índice e subíndice 0000 0001 = Número de série	O dicionário de objetos inicia no índice 2000H

	Procedimento	Resultado	Observação
Acesso por SDO a um endereço inexistente do dicionário de objetos	Foi encaminhado um quadro SDO upload (leitura) para o BMS. Leitura do índice 0, subíndice 0. Quadro: ID: 601H – DLC: 08 Dados: 40 00 00 00 00 00 00 00	O BMS retornou o quadro: ID: 581H – DLC:08 Dados: 80 00 00 00 00 00 02 06 80H = erro 0602 0000 H = Objeto não existe	O dicionário de objetos inicia no índice 2000H
SDO de download (escrita) em um registrador do tipo R	Foi encaminhado um quadro SDO download (escrita) para o BMS. Quadro: ID: 601H – DLC: 08 Dados: 23 00 20 00 05 00 00 00 Tentativa de escrever o valor 05 no número de série	O BMS retornou o quadro: ID: 581H – DLC:08 Dados: 80 00 20 00 00 00 01 06 80H = Erro 2000 00 H = índice e subíndice 0601 0000 = Acesso não suportado	Registradores do tipo R (read) não devem ser escritos
SDO de download (escrita) em um registrador do tipo RW	Foi encaminhado um quadro SDO download (escrita) para o BMS. Quadro: ID: 601H – DLC: 08 Dados: 23 02 20 00 05 00 00 00 Escrita do valor 00000005 no ID do dispositivo	O BMS retornou o quadro: ID: 581H – DLC:08 Dados: 60 02 20 00 00 00 00 00 60H = Acesso correto 2002 00 H = índice e subíndice 0000 0000 = complemento	Ao modificar o endereço de rede, o dispositivo reenvia o quadro de boot up com o novo ID
NMT mudando para o modo Operacional	Foi encaminhado um quadro NMT (gerenciamento de rede) para passar o dispositivo para modo operacional. Quadro: ID: 000H – DLC: 02 Dados: 01 01	Não há resposta pela rede CAN, porém verificou-se a mudança de estado através da recepção de PDOs	

	Procedimento	Resultado	Observação
Modo operacional e recepção dos PDOs	Após envio de NMT para modo Operacional se verifica o envio dos quadros PDOs periodicamente	O BMS envia 4 quadro de PDOs a cada 500ms.	
Mudança da velocidade de comunicação	Foi encaminhado um quadro SDO download para o BMS, escrevendo 1 no registrador 2006 00 H (500kbps) Quadro: ID: 601H – DLC: 08 Dados: 23 06 20 00 01 F4 00 00	O BMS respondeu o quadro SDO, e posteriormente a comunicação foi alterada para velocidade 500Kbps. Resposta: ID: 581. Dados: 60 06 20 00 00 00 00 00	A resposta ocorre na velocidade de comunicação antiga
Geração de frame EMCY	Através do DEBUG as flags de temperatura máxima foi ativada para forçar o envio da mensagem de erro	Foi recebido o quadro ID: 081H, Dados: 00 01 89 00 03 05 00 00	A mensagem recebida indica erro de temperatura
Acesso a um registrador obrigatório CanOpen	Foi encaminhado um quadro SDO upload (leitura) para o BMS no endereço 1001:00 (registrador de erro). Quadro: ID: 601H Dados: 40 01 10 00 00 00 00 00	O BMS respondeu o seguinte quadro: ID: 581H Dados: 43 01 10 00 89 00 00 00	O teste foi feito após o teste anterior, de forma que o conteúdo do registrador de erro estava forçado para apresentar as flags de warning e alarme da temperatura máxima

Tabela A.4: Procedimentos e Resultados dos Testes de Controle de Temperatura.

	Procedimento	Resultado	Observação
Verificação da Leitura dos Sensores de Temperatura	Simulação de sensores PT1000 conectando diferentes resistências ao circuito de medição do BMS e comparação com valores esperados	Foram coletados os valores lidos pelos sensores para avaliação e determinação dos ganhos	A precisão das leituras é aceitável, mas foram observadas variações acima do esperado
Calibração dos Sensores de Temperatura	Ajuste de curva baseado nos valores de resistência aplicados e nas leituras do ADC do BMS	Ajuste da curva resultou em um coeficiente de determinação $R^2 = 0,9939$	
Teste do Controlador PI	Aplicação de rampas de tensão em um circuito RC para validar a comportamento do controlador antes da implementação no sistema de aquecimento da bateria	A tensão seguiu a referência em rampa de forma estável	O teste demonstrou que o controlador PI pode ser utilizado para o controle de temperatura da bateria
Teste de Aquecimento da Bateria	Aplicação de rampa aquecimento com velocidade de $10^{\circ}\text{C}/\text{h}$ na bateria, monitorando a resposta térmica do sistema e a atuação do controlador	O controle térmico seguiu a referência definida, com a temperatura estabilizando dentro do intervalo esperado	Variações foram observadas durante o período de aquecimento, mas a temperatura se manteve próxima ao esperado seguiu o esperado

Tabela A.5: Procedimentos e Resultados dos Testes de Resistência de Isolamento.

	Procedimento	Resultado	Observações
Teste de comunicação com o sensor I2C	Realizar o teste de comunicação com o sensor iniciando a tarefa manualmente	Não ocorreu erro de comunicação com o sensor	Normas automotivas indicam resistência mínima de isolamento para baterias de 1500 Ohm/V. Com os polos isolados ambos passam no teste de isolamento. Quanto maior a tensão da bateria, maior deve ser a resistência medida para bateria passar no teste.
Medir isolamento com o sistema completamente isolado	Realizar a medição do isolamento da bateria onde as entradas dos polos da bateria estão isoladas da conexão carcaça	O BMS calculou as seguintes resistências de isolamento: Bat+ para Carcaça: 32632 Ohm/V Bat- para Carcaça: 36472 Ohm/V	
Medir isolamento com o sistema em falha no polo positivo	Realizar a medição do isolamento da bateria com tensão aplicada de 300V e conexão da carcaça da bateria por uma resistência 150KOhm (500 Ohm/V, para bateria de 300V)	O BMS calculou as seguintes resistências de isolamento: Bat+ para Carcaça: 517 Ohm/V Bat- para Carcaça: 6680 Ohm/V	
Medir isolamento com o sistema em falha no polo negativo		O BMS calculou as seguintes resistências de isolamento: Bat+ para Carcaça: 6670 Ohm/V Bat- para Carcaça: 610 Ohm/V	

Tabela A.6: Procedimentos e Resultados de Medição de Tensão e Corrente.

	Procedimento	Resultado	Observações
Teste de comunicação com o sensor INA260	Realizar o teste de comunicação com o sensor iniciando a tarefa manualmente	Não ocorreu erro de comunicação com o sensor	
Teste de medição de tensão e corrente com INA260	Comparar valores de tensão e corrente lidos com sensor INA260 com valores aplicados	Erro percentual menor que $\pm 0,25\%$ para a tensão e corrente	O BMS demonstrou leituras estáveis e precisas para corrente e tensão da bateria

	Procedimento	Resultado	Observações
Calibração dos sensores de tensão e corrente	Ajuste de curva baseado nos valores das leituras do ADC do BMS	Ajuste da curva determinou os ganhos a serem usados para conversão das grandezas	
Teste de medição de tensão com divisor resistivo	Comparar valores convertidos com os valores aplicados	Erro percentual menor que $\pm 0,25\%$ para a tensão	Apesar de boa precisão nas medidas, foram observadas oscilações nas leituras Os maiores erros na leitura de corrente ocorrem para valores baixos
Teste de medição de corrente com shunt	Comparar valores convertidos com os valores aplicados	Erro percentual menor que $\pm 5\%$ para a corrente	

Tabela A.7: Testes de medição de tensão com amplificadores operacionais.

Tensão Aplicada [V]	Lido pelo BMS [ADC]	Tensão Convertida [V]	Erro [%]
50	141	49,87	-0,25%
100	322	99,81	-0,19%
150	503	149,75	-0,17%
200	684	199,69	-0,16%
250	866	249,90	-0,04%
300	1049	300,39	0,13%
350	1230	350,33	0,09%
400	1410	399,99	0,00%

Tensão Aplicada [V]	Lido pelo BMS [ADC]	Tensão Convertida [V]	Erro [%]
450	1593	450,48	0,11%
500	1773	500,14	0,03%
550	1953	549,80	-0,04%
600	2135	600,02	0,00%
650	2316	649,96	-0,01%
700	2496	699,62	-0,05%
750	2677	749,56	-0,06%

Tabela A.8: Testes de medição de corrente com amplificadores operacionais.

Corrente Aplicada [A]	Lido pelo BMS [ADC]	Corrente Convertida [A]	Erro [%]
-20	2730	-19,959	-0,20%
-18	2675	-17,8965	-0,57%
-16	2620	-15,834	-1,04%
-14	2568	-13,884	-0,83%
-12	2514	-11,859	-1,18%
-10	2459	-9,7965	-2,04%
-8	2409	-7,9215	-0,98%
-6	2356	-5,934	-1,10%
-4	2300	-3,834	-4,15%
-2	2250	-1,959	-2,05%

Corrente Aplicada [A]	Lido pelo BMS [ADC]	Corrente Convertida [A]	Erro [%]
0	2193	0,1785	-
2	2142	2,091	4,55%
4	2086	4,191	4,78%
6	2037	6,0285	0,47%
8	1984	8,016	0,20%
10	1928	10,116	1,16%
12	1878	11,991	-0,08%
14	1823	14,0535	0,38%
16	1769	16,0785	0,49%
18	1714	18,141	0,78%
20	1662	20,091	0,46%

Tabela A.9: Procedimentos e Resultados dos Testes de Proteção e Controle da Bateria.

	Procedimento	Resultado	Observação
Teste de sobrecorrente na string 1	Aplicação de corrente acima do limite na string 1	O BMS abriu o contactor da string 1 e manteve a string 2 em operação	A alimentação do BMS foi mantida durante todos os testes.
Teste de sobrecorrente na string 2 após proteção da string 1	Aplicação de corrente acima do limite na string 2, após a proteção da string 1 ter sido ativada	O BMS abriu as chaves principais e desconectou a carga	

	Procedimento	Resultado	Observação
Teste de sobrecorrente na string 2 sem alimentação pela rede CA	Aplicação de corrente acima do limite na string 2 sem a presença da rede CA	O BMS abriu o contactor da string 2 e manteve a string 1 em operação	
Teste de sobrecorrente na string 1 sem alimentação pela rede CA após proteção da string 2	Aplicação de corrente acima do limite na string 1 sem a presença da rede CA, após a proteção da string 2 ter sido ativada	O BMS abriu as chaves principais e desconectou a carga	
Teste de queda da rede CA durante a descarga da bateria	Simulação da perda da rede CA durante a operação do BMS	O sistema foi mantido pela bateria e o fornecimento de energia à carga continuou normalmente	
Teste de proteção por sobretensão	Aplicação de tensão acima do limite permitido	O BMS acionou a proteção e desconectou a bateria	
Teste de detecção de fim de carga	Aplicação da condição de final de carga em uma string	O BMS abriu o contactor da string e manteve a outra string em operação	
Teste de detecção de fim de descarga	Aplicação da condição de final de carga em uma string	O BMS abriu o contactor da string e manteve a outra string em operação	
Sequência normal com comando de operação	Verificação da inicialização e controle do sistema	O BMS seguiu o fluxo de controle conforme apresentado pela Figura 3.7, identificando e realizando proteções em casos de falhas conforme esperado	
Sequência normal com comando de ocioso	Verificação do fluxo de controle após receber comando para estado ocioso	O BMS seguiu o fluxo de controle conforme apresentado pela Figura 3.7,	

	Procedimento	Resultado	Observação
Perda de sensores durante aquecimento	Verificação do fluxo de controle em caso de falha em sensores temperatura	identificando e realizando proteções em casos de falhas conforme esperado	
Retomada de operação após perda de sensores	Avaliação da capacidade de recuperação do sistema		
Sequência de operação em caso de falha de isolamento	Verificação do fluxo de controle em caso de falha de isolamento		
Sequência de operação em caso de sobrecorrente	Verificação do fluxo de controle em caso de violação nos limites de operação da bateria		
Retomada de operação após sobrecorrente	Teste de reinicialização após a eliminação da falha		
Entrada e saída do modo de operação manual	Validação da transição entre modos de operação		

Tabela A.10: Procedimentos e Resultados de Balanceamento das Tensões de Célula.

	Procedimento	Resultado	Observação
Teste de comunicação SPI com os módulos de balanceamento	Realizar o teste de comunicação com os módulos iniciando a tarefa manualmente	Foram obtidas informações de todos os módulos conectados	
fonteInicialização e leitura de tensões das células	Aplicação de tensão igual a 3V por célula e verificar as tensões monitoradas para cada célula	Tensões de célula lidas corretamente	Verificação feita através da interface de monitoramento

	Procedimento	Resultado	Observação
Teste em bancada com tensões da bateria de sódio	Aplicação de tensão de 2,8V na célula balanceada e 2,68V nas demais	CI LT8584 entra em estado de erro UVLO	Causa: queda na tensão de alimentação do CI no início do balanço (Ver Figura 4.13)
Teste com tensões da bateria de lítio	Aplicação de tensão de 4V na célula balanceada e 3V nas demais	Acionamento do circuito de balanceamento com correntes entre 2,3A e 2,8A	Envio de comandos e funcionamento dos módulos validados
Teste com menos células conectadas ao módulo	Conexão de número reduzido de células nos módulos	Sistema operou normalmente	
Teste de balanço na bateria de sódio	Teste com 17 células de sódio conectadas em 2 módulos	Erro UVLO também ocorreu com a bateria real	Causas e possíveis soluções são discutidas durante a seção
Teste com células de lítio - modo delta para média	Teste com 12 células de lítio conectadas em 1 módulo	Células balanceadas com desvio de tensão final de 10mV	Ver Figura 4.16
Teste com células de lítio - modo delta para mínima	Teste com 12 células de lítio conectadas em 1 módulo	Células balanceadas com desvio de tensão final de 5mV	Ver Figura 4.17

Apêndice B

Descrição do Hardware do BMS Flexível

Este Apêndice é dedicado à descrição do hardware desenvolvido no Itaipu Parquetec para a aplicação em baterias de segunda vida com múltiplas strings. O BMS pode ser dividido em duas partes: o BMS-C (Controlador BMS) e o BMS-I (Interface BMS) apresentados na Figura B.1.

O BMS-C consiste na placa de desenvolvimento ST Núcleo F429ZI³⁶, e contém o microcontrolador que é responsável por executar o *software* do BMS. Já o BMS-I é uma placa projetada para realizar a interface entre a bateria e um inversor ou carga.

No BMS-I estão os sensores para leitura das grandezas da bateria, chaves de proteção, além dos circuitos para condicionamento dos sinais trocados entre BMS-I e BMS-C.

O BMS-I possibilita o monitoramento e proteção de duas *strings* conectadas em paralelo. Relés são utilizados para conectar cada *string* aos polos da bateria e para estabelecer a conexão da bateria com o carregador, conforme indicado na Figura B.2.

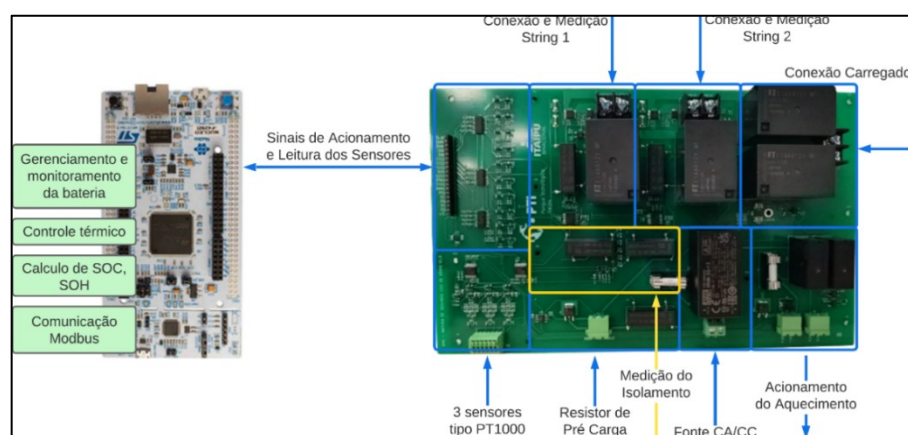


Figura B.1: Estrutura de Hardware do BMS.

³⁶ [ST Núcleo F429ZI](#)

Apesar do Hardware comportar apenas duas strings de baterias, o BMS pode ser expandido para qualquer quantidade de strings, conforme é indicado na Figura B.2, o conjunto de bateria, chave e sensores de tensão e corrente que podem ser replicados diversas vezes.

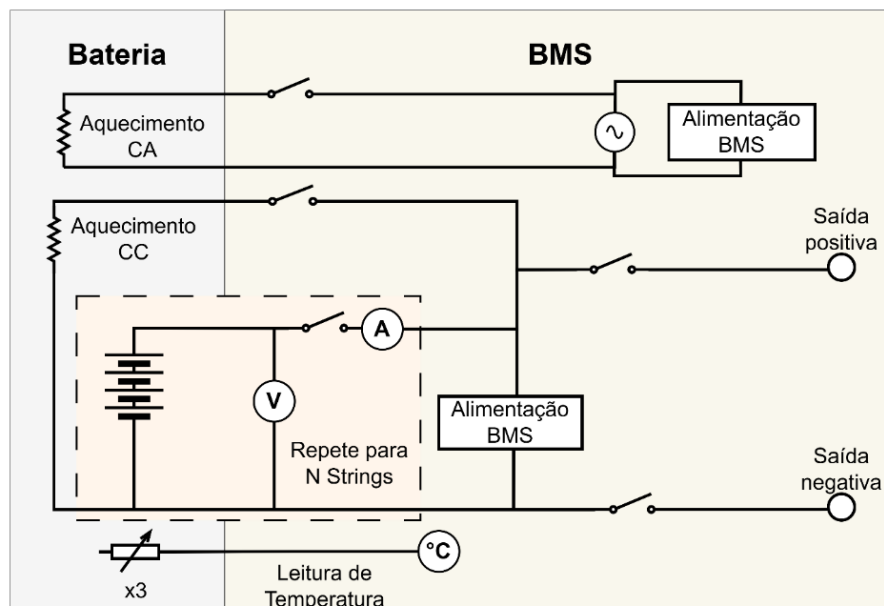


Figura B.2: Diagrama simplificado dos circuitos do BMS e da bateria de segunda vida.

B.1. Controlador do BMS

O BMS-C é implementado na placa de desenvolvimento Núcleo-F429ZI³⁶ e atua como o cérebro do sistema, sendo responsável pelo processamento e controle do BMS. Ele gerencia as redes de comunicação I2C para leitura dos sensores do BMS-I, monitora os limites de operação, controla os relés de conexão e a temperatura da bateria, estimar os estados de carga e saúde além de atuar como um dispositivo escravo Modbus, para a integração com outros sistemas.

A placa de desenvolvimento foi selecionada por seu alto poder computacional, garantindo o processamento dos dados e a adaptabilidade necessária para futuras otimizações e aumento de funções. A Tabela B.1 apresenta o mapeamento dos principais sinais do BMS-C enviados para o BMS-I, associando os pinos do microcontrolador às suas respectivas funções. Essa tabela serve como referência para os rótulos usados para os sinais abordados posteriormente durante a descrição do hardware do BMS.

Tabela B.1: Descrição dos sinais principais do BMS.

Rótulo	ST Núcleo	Função do Pino
3.3V	-	Alimentação principal +3.3V
I2C1_SDA	PB7	Linha de dados do barramento I2C1 (Serial Data)

Rótulo	ST Núcleo	Função do Pino
I2C1_SCL	PB6	Linha de <i>clock</i> do barramento I2C1 (Serial <i>Clock</i>)
I2C3_SDA	PC9	Linha de dados do barramento I2C3 (Serial Data)
I2C3_SCL	PA8	Linha de <i>clock</i> do barramento I2C3 (Serial <i>Clock</i>)
PS_INT	PC10	Sinal de intertravamento
D_MHEAT	PB5	Sinal PWM para controle do sistema de aquecimento
D_PRECH	PB4	Sinal para habilitação do sistema de pré-carga
D_HEATR	PB8	Sinal para habilitação do sistema de aquecimento
D_ISON	PD5	Sinal para medição de isolamento no polo negativo
D_ISOP	PD6	Sinal para medição de isolamento no polo positivo
D_STR1PP	PE8	Controle do acoplamento do polo positivo da string 1
D_STR2PP	PE7	Controle do acoplamento do polo positivo da string 2
D_BPP	PE5	Controle do acoplamento do polo positivo da bateria
D_BNP	PB9	Controle do acoplamento do polo negativo da bateria
D_VMS2	PA15	Sinal para habilitação da medição da string 2
D_VMS1	PE9	Sinal para habilitação da medição da string 1
GND	-	Alimentação principal 0V

B.2. Interface do BMS

Na placa de interface estão os circuitos e sensores utilizados para o monitoramento, a proteção e controle da bateria, os circuitos para acionamento dos relés de conexão das strings de células, e os circuitos de condicionamento de sinais digitais e isoladores de comunicação I2C.

B.2.1. Alimentação

A alimentação é feita por uma entrada em tensão alternada 127/220V que é ligada a fonte de alimentação principal do BMS-I e ao aquecimento da bateria. O CI IRM-20-24³⁷ é usado, permitindo entrada de 100V até 240V AC e de saída 24V DC e 20W de potência, capacitores são utilizados para filtragem de ruídos de alta frequência e estabilização do sinal, a tensão de

³⁷ [IRM-20-24](#)

24V energiza os demais circuitos do BMS a partir de conversores que regulam a tensão de saída adequada para cada circuito. O BMS-C é alimentado com uma tensão de 3,3 V, adicionalmente, no pino de entrada para bateria é conectado a um supercapacitor, com capacidade de até 1F, para manter os valores de RTC durante pequenas interrupções de energia.

B.2.2. Watchdog

Um watchdog UCC2946³⁸ monitora o sinal PS_INT garantindo que ele seja alternado a cada período de monitoramento, este tempo pode ser configurado com alguns resistores e capacitores posicionados próximo ao CI. Caso o sinal não seja alternado dentro do intervalo estipulado, a saída é acionada, acionando o mecanismo de intertravamento, que desconecta a fonte de alimentação principal do hardware da placa BMS-I.

Nesse cenário, todos os relés são abertos, desconectando a bateria do sistema onde ela está aplicada. Quando o sinal de entrada retoma a alternância dentro do período correto, a saída retorna a 3,3 V, permitindo que a fonte principal realimente a placa BMS-I e que os relés sejam reativados. Assim, caso o BMS-C desligue por algum motivo, os relés de conexão serão automaticamente abertos, garantindo a proteção da bateria.

B.2.3. Pré-Carga

O circuito de pré-carga tem a função de inserir um resistor em série com o circuito principal da bateria, limitando picos de corrente durante a conexão com o barramento capacitivo de inversores e carregadores. Essa abordagem reduz o estresse elétrico sobre os componentes e minimiza a degradação da bateria, contribuindo para a longevidade e a segurança do sistema.

A Figura B.3 apresenta o circuito aplicado, um relé KT12-1A-40L³⁹ é responsável por ativar e desativar o resistor de pré-carga, esse relé possui uma corrente de retenção máxima de 2,5 A, o que define o limite da corrente de pré-carga. Para assegurar que a corrente não ultrapasse esse valor, o resistor de pré-carga deve ser dimensionado conforme a Equação B.1, onde I_{max} é a máxima corrente de pré-carga permitida e V_{bat} representa a tensão máxima de operação da bateria.

$$R_{prch} = \frac{V_{bat}}{I_{max}} \quad \text{B.1}$$

³⁸ [UCC2946](#)

³⁹ [KT12-1A-40L](#)

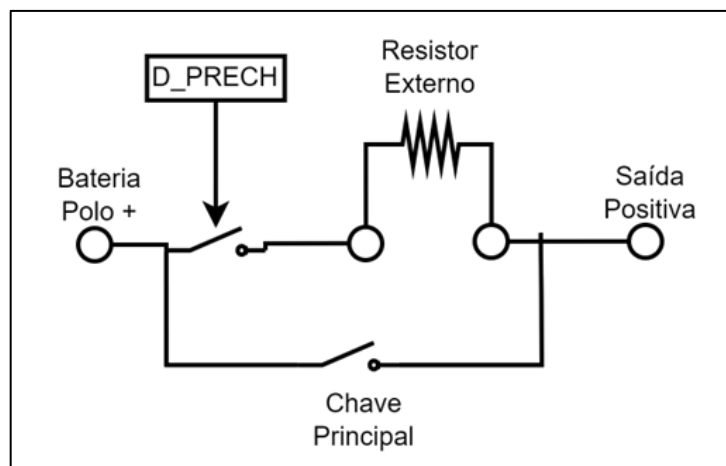


Figura B.3: Circuito de pré-carga da bateria.

B.2.4. Contatores Principais

Os contatores principais são responsáveis pela conexão e desconexão das strings da bateria com os inversores e carregadores. Sua função primária é permitir o seccionamento seguro da bateria, garantindo a proteção do sistema em situações de falha operacional, como curto-circuito ou condições adversas de funcionamento.

No BMS-I são utilizados contatores do modelo FTRE1AA012Y⁴⁰ da Fujitsu, que possuem capacidade de operação em 450 VDC a 20 A. A bobina desses contatores opera em 12 VDC com um consumo de 75 mA. Para o acionamento, é empregado um MOSFET de canal N do tipo NTR5103N⁴¹, responsável por controlar a energização da bobina.

Os sinais D_STR1PP, D_STR2PP, D_BPP e D_BNP, enviados pelo BMS-C, comandam o acionamento dos contatores por meio de optoacopladores TLP291⁴², que garantem o isolamento elétrico entre os sinais digitais de controle e os circuitos de potência.

B.2.5. Medição de Isolação

Este circuito permite a detecção de falhas de isolamento que podem comprometer a segurança do sistema. Esse monitoramento é fundamental para prevenir riscos de fuga de corrente e garantir a conformidade com normas de segurança elétrica³¹ em aplicações de baterias de alta tensão. Ela é feita através do circuito apresentado de forma simplificada na

⁴⁰ [FTRE1AA012Y](#)

⁴¹ [NTR5103N](#)

⁴² [TLP291](#)

Figura B.4, onde um polo da bateria é conectado à carcaça do sistema através de resistências calculadas para limitar a corrente máxima drenada, e a corrente que flui por esse caminho é medida. O mesmo procedimento é feito ao outro polo da bateria em sequência.

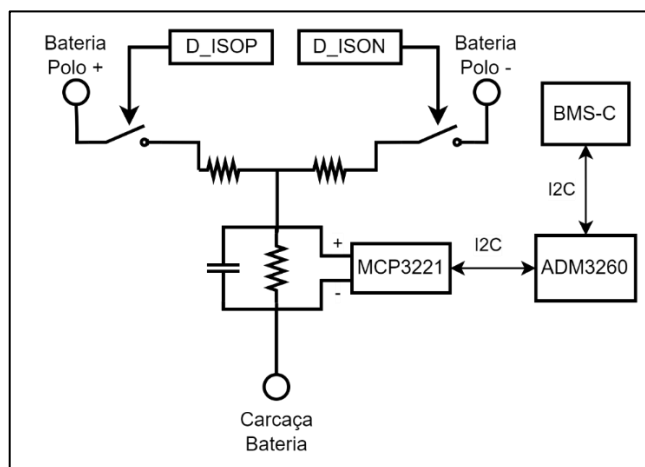


Figura B.4: Circuito de medição da isolação da bateria.

O sensor MCP3221⁴³ é utilizado para realizar a medida da corrente através de um resistor shunt. A comunicação entre o sensor e o microcontrolador é feita por comunicação I2C isolada utilizando o CI ADM3260⁴⁴ da Analog Devices. Além da isolação do sinal, esse CI é responsável por gerar a alimentação dos circuitos usados para medição da isolação.

Se não é detectada nenhuma corrente, significa que a bateria está perfeitamente isolada da carcaça. Já se a isolação não está em bom estado, alguma corrente elétrica circula pela conexão realizada. A corrente que circula depende da resistência de isolamento existente entre os polos da bateria e a carcaça. No BMS flexível essa resistência é calculada a partir das correntes registradas durante a conexão alternada dos dois polos à carcaça.

B.2.6. Medição de Corrente e Tensão

A medição de corrente e tensão para cada string é realizada pelo do circuito integrado INA260⁴⁵, um sensor de alta precisão que permite a leitura direta desses parâmetros com poucos componentes externos para condicionamento do sinal. A Figura B.5 apresenta o circuito simplificado de medição para uma das strings, sendo o mesmo replicado para a segunda string.

⁴³ [MCP3221](#)

⁴⁴ [ADM3260](#)

⁴⁵ [INA260](#)

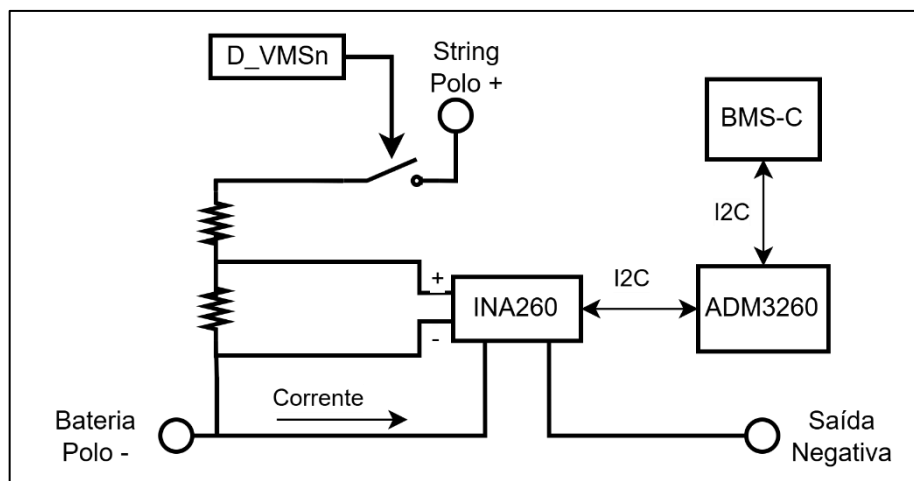


Figura B.5: Circuito de medição da tensão e corrente com INA260.

O sensor utilizado permite medição direta de corrente bidirecional de +/-15A, já o canal de medição de tensão tem uma faixa de 0 a 36V que pode ser estendida com um divisor de tensão externo, a potência é calculada pelo sensor a partir dos resultados da medição de corrente e tensão. A comunicação dos dados obtidos pelo INA260 é realizada via interface I2C, utilizando o circuito integrado ADM3260 da Analog Devices.

B.2.7. Medição de Temperatura

O BMS-I incorpora um circuito dedicado à medição de temperatura, capaz de realizar a leitura de até três sensores do tipo PT1000. Esses sensores de resistência variável permitem monitorar a temperatura da bateria em uma ampla faixa de operação, desde temperaturas baixas até as condições elevadas típicas das baterias de sódio, a faixa de medição projetada é de -40°C a 450°C, garantindo um acompanhamento contínuo do perfil térmico das células.

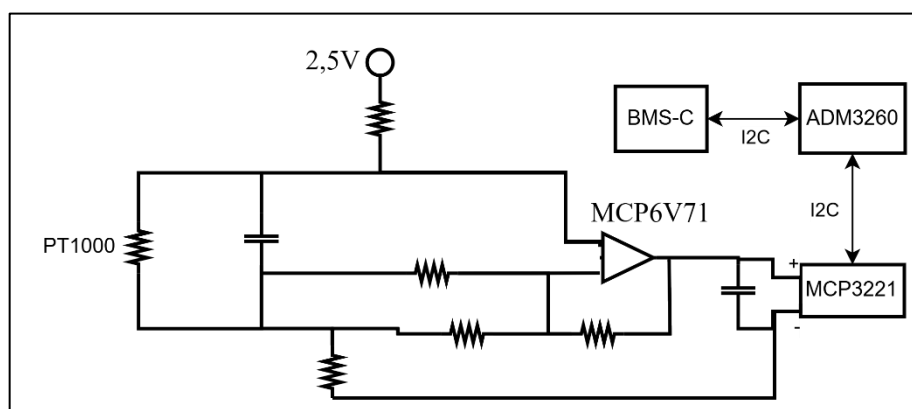


Figura B.6: Circuito para medição de temperatura com sensor PT1000.

Para assegurar um monitoramento da distribuição térmica na bateria, a medição ocorre em três pontos distintos da bateria. O circuito simplificado do sensor de temperatura é

apresentado na Figura B.6 e utiliza um condicionamento de sinal baseado em divisores de tensão e amplificadores operacionais de baixa deriva MCP6V71⁴⁶, proporcionando maior estabilidade na leitura dos sensores. Além disso, para minimizar interferências e garantir a confiabilidade da medição, as entradas do circuito são filtradas com capacitores de 1 μ F. A saída do amplificador operacional é convertida para o domínio digital por meio de um conversor A/D de 12 bits MCP3221, a leitura dos valores processados é realizada pelo BMS-C via comunicação I2C, permitindo integração com o restante do sistema de monitoramento do BMS.

B.2.8. Controle de Temperatura

O sistema de aquecimento da bateria pode ser alimentado diretamente pela rede elétrica em corrente alternada, ou alternativamente pela bateria, desde que ela esteja dentro das condições operacionais adequadas.

O aquecimento em corrente contínua, alimentado pela própria bateria é ilustrado na Figura B.7, a modulação da potência dissipada na resistência de aquecimento é realizada por meio de controle via PWM (sinal D_MHEAT) de um MOSFET. A resistência de aquecimento é diretamente acoplada aos polos principais da bateria, e um diodo de roda livre é incorporado ao circuito para evitar surtos de tensão, uma vez que o fio resistivo dentro do cartucho de aquecimento pode apresentar comportamento indutivo. Para proteção do sistema, um fusível de ação rápida é inserido no circuito de aquecimento. O desacoplamento da resistência pode ser efetuado por meio de um relé acionado pelo sinal D_HEATCC.

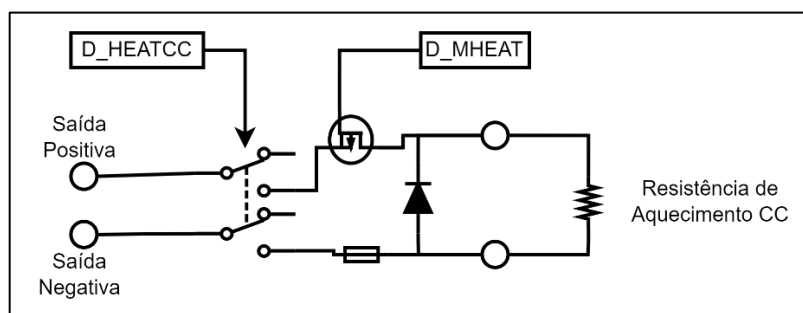


Figura B.7: Circuito de aquecimento CC.

De maneira similar ao sistema de aquecimento CC, o BMS-I também conta com um circuito de aquecimento em CA, cujo circuito simplificado é apresentado na Figura B.8. Neste caso, a modulação da potência dissipada na resistência de aquecimento é realizada pelo circuito integrado CPC1966⁴⁷, que permite realizar a modulação diretamente na tensão CA, assim o controle da energia fornecida ao elemento de aquecimento se torna mais simples.

⁴⁶ [MCP6V71](#)

⁴⁷ [CPC1966](#)

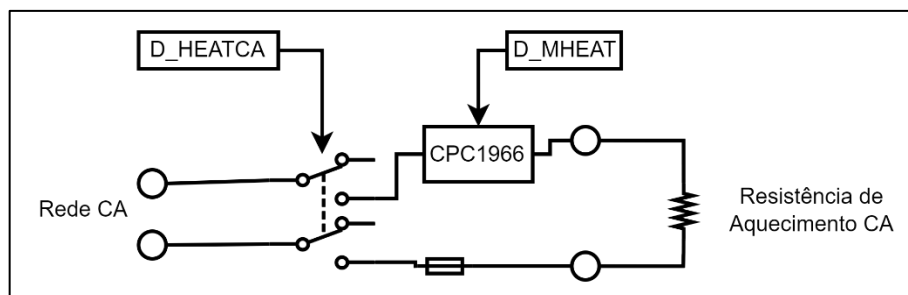


Figura B.8: Circuito de aquecimento CA.

B.3. Expansão das Funcionalidades do BMS

Após a realização dos testes iniciais utilizando uma bateria de segunda vida, foram identificadas diversas dificuldades na integração entre o BMS e a bateria. Essas dificuldades estavam associadas a falhas em células durante os primeiros ciclos de operação, bem como à incapacidade do BMS de operar a partir da tensão da bateria, impossibilitando aplicação em cenários isolados da rede CA.

Com o objetivo de aumentar a aplicabilidade do BMS flexível foram implementadas melhorias no projeto, abrangendo tanto a introdução de novas funcionalidades quanto a otimização do hardware. Dentre as principais melhorias realizadas, destacam-se:

Alimentação: Adição de circuito para alimentação do BMS pela própria bateria. Agora duas fontes podem ser utilizadas tanto para o aquecimento da bateria quanto para a energização do BMS, sendo a seleção realizada por um circuito de redundância que prioriza a alimentação proveniente da rede elétrica em corrente alternada, conforme apresentado na Figura B.9. Esse mecanismo garante maior confiabilidade no sistema, garantindo que a energia da bateria só será utilizada para manter o BMS ativo quando não houver presença da rede CA.

A fonte de alimentação principal do BMS-I permanece baseada no circuito integrado IRM-20-24, conforme descrito na Seção B.2.1. Adicionalmente, a fonte de alimentação derivada da bateria é projetada para operar de acordo com a tensão nominal do sistema de armazenamento, garantindo compatibilidade e fornecendo uma saída estabilizada de 24V

Acionamento de Contadoras Externas: A alimentação das bobinas das contadoras principais foi externalizada, permitindo o uso de diferentes tipos de contadoras conforme a necessidade da aplicação. Com isso, a instalação das contadoras torna-se mais flexível, uma vez que elas não precisam estar fixadas na placa do BMS, facilitando a manutenção e reduzindo o tamanho da placa de interface.

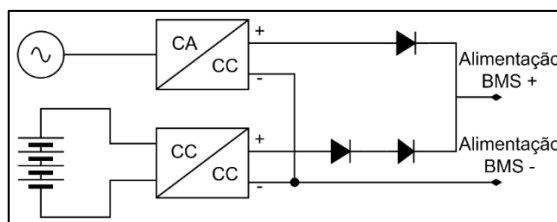


Figura B.9: Circuito de redundância do BMS.

Medição de Corrente e Tensão por String Utilizando Amplificadores Operacionais:

A nova abordagem de medição por amplificadores operacionais, conforme apresentado no circuito simplificado da Figura B.10, proporciona maior flexibilidade no design do hardware, permitindo ajustes na amplificação de acordo com as características da bateria, não tendo limitações na leitura de corrente ou de tensão. Além disso, essa solução reduz o custo do sistema de medição, simplifica sua implementação ao eliminar a necessidade de comunicação via I2C e remove a dependência do CI INA260, garantindo maior disponibilidade e independência de componentes específicos.

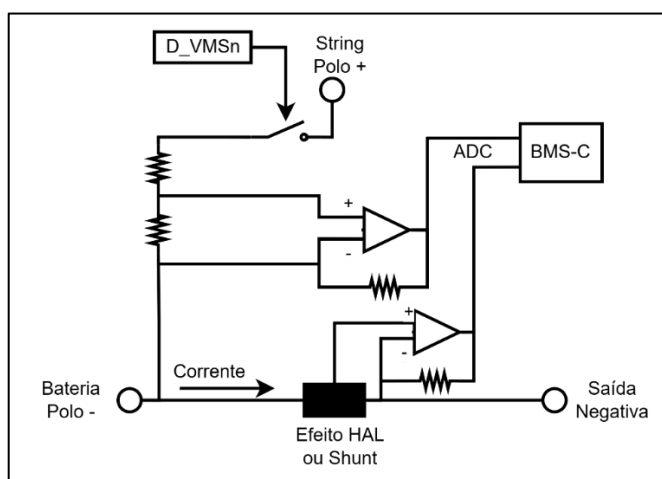


Figura B.10: Circuito de medição da tensão e corrente com AmpOp.

Com o objetivo de mitigar problemas relacionados a falhas em células da bateria, foi incorporada à leitura e o balanceamento das tensões das células, além disso o sistema passou a contar com recursos de Internet das Coisas, possibilitando comunicação remota e monitoramento em tempo real do estado da bateria. Essa melhoria viabiliza estratégias avançadas de gestão energética e manutenção preditiva, aumentando a confiabilidade e eficiência do sistema.

Ainda foi identificada uma limitação significativa no BMS original, decorrente das restrições operacionais impostas pelo seu projeto, que comprometeram sua adequação a determinadas aplicações estacionárias. Como resposta a essa limitação e como alternativa ao BMS multistring, foi desenvolvido o BMS-1S. Esse novo modelo mantém a estrutura física do BMS original, permitindo sua substituição direta e facilitando a instalação sem a necessidade de adaptações mecânicas.

B.3.1. BMS-IoT

O BMS-IoT amplia as capacidades do BMS, integrando módulos de balanceamento ativo e conectividade IoT para otimizar a gestão das baterias. Com uma arquitetura modular, o sistema permite a medição das tensões de célula, balanceamento ativo e a conexão para monitoramento remoto. Essa abordagem permite maior adaptabilidade, possibilitando sua aplicação em diferentes configurações e até diferentes tecnologias de baterias.

O hardware desenvolvido para o balanceamento ativo das células da bateria utiliza o chip LT8584 da Linear Technology, esse sistema foi descrito na Seção 2.4.1. Os módulos do protótipo construído são apresentados na Figura B.11.

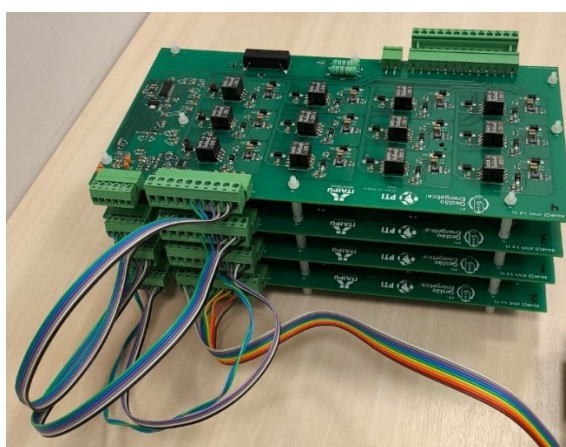


Figura B.11: Módulos de balanço de célula do BMS-IoT.

O projetado dos módulos segue as recomendações dos fabricantes dos componentes. Para garantir flexibilidade na implementação, foram adicionados resistores de 0 Ohm em pontos estratégicos, permitindo adaptações conforme o número de células conectadas em cada módulo. Além disso, como as baterias de sódio necessitam de aquecimento antes da operação, foi incluído um reed relay controlado pelo BMS, garantindo que a bateria não seja utilizada enquanto estiver fria.

A fim de viabilizar o monitoramento remoto do estado da bateria e possibilitar a aplicação de algoritmos avançados de otimização, foi integrada ao BMS-I uma interface de conectividade remota, incorporando um módulo ESP-32⁴⁸ é responsável por realizar a leitura das informações do BMS via protocolo Modbus e transmitir os dados para a rede de internet, o módulo se comunica com o BMS-C utilizando a camada física UART.

Na Figura B.12 é apresentado o protótipo do BMS-IoT com destaque ao módulo ESP integrado ao BMS-I. Esse recurso permite que o sistema envie dados para plataformas na nuvem

⁴⁸ [ESP32](#)

e receba comandos de controle, abrindo possibilidades para a utilização de técnicas como aprendizado de máquina e análise preditiva.

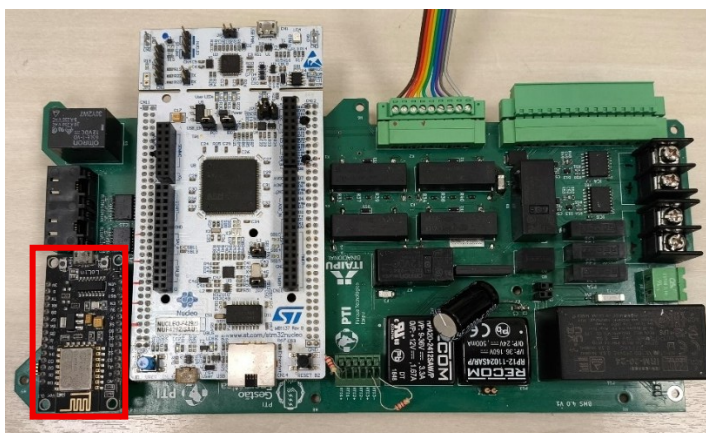


Figura B.12: BMS-IoT.

B.3.2. BMS-1S

O BMS-1S foi desenvolvido como uma versão otimizada para aplicações em que apenas uma única string de células necessita ser monitorada. Seu principal diferencial é a adaptação para instalação direta na estrutura física do BMS original da bateria, conforme ilustrado na Figura B.13, reduzindo significativamente a complexidade do processo de integração e facilitando sua adoção. Essa abordagem é particularmente vantajosa para aplicações em que não se deseja desmontar a bateria, mas ainda se requer maior flexibilidade operacional em comparação ao BMS original. Em termos funcionais, a operação do BMS-1S é idêntica à do BMS multistring, diferindo apenas pelo monitoramento exclusivo de uma única string de células.

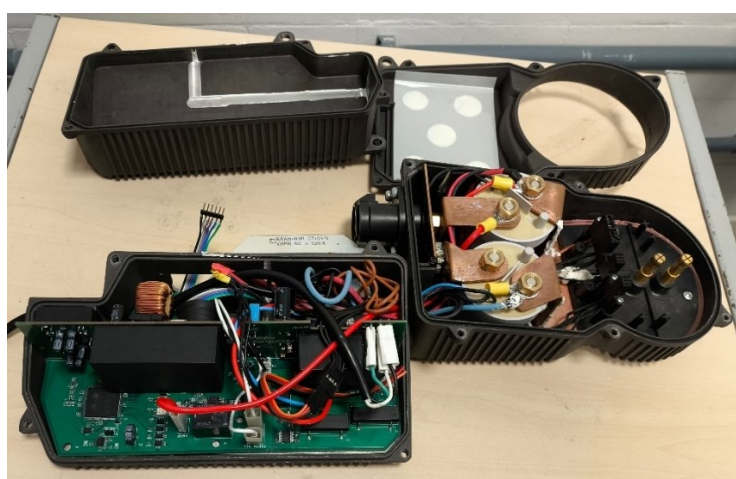


Figura B.13: BMS-1S montado na estrutura física do BMS original.

Apêndice C

Manual de Usuário do BMS de Lítio

Este documento fornece as primeiras informações necessárias para entendimento do Battery Management System (BMS) e para que ele seja colocado em operação. É um documento de inicialização para entendimento do equipamento. A Figura C.1 mostra um diagrama representativo do BMS, interligado à bateria e suas ligações básicas.

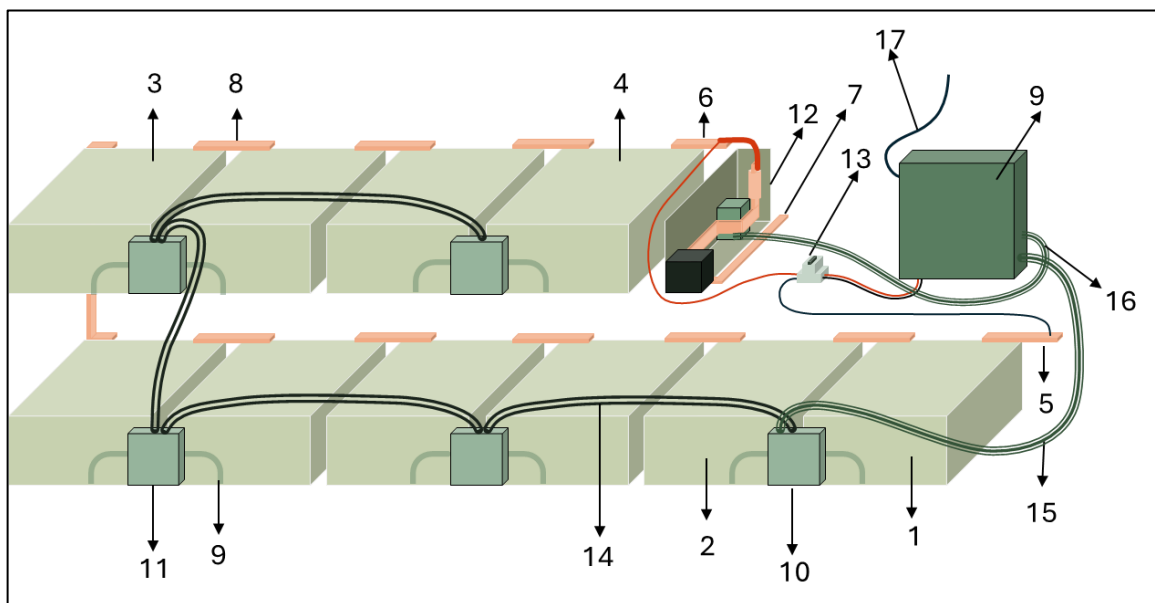


Figura C.1: Representação do sistema de bateria de segunda vida e seu BMS.

1. Módulo 1 da bateria;
2. Módulo 2 da bateria;
3. Módulo 7 da bateria;
4. Módulo 10 da bateria;
5. Polo negativo para conexão externa da bateria;
6. Polo positivo da bateria (para conexões internas);

7. Polo positivo para conexão externa da bateria;
8. Ligação dos módulos da bateria em série;
9. BMS primário;
10. BMS secundário 1 – responsável pelos módulos 1 e 2;
11. BMS secundário 3 – responsável pelos módulos 5 e 6;
12. BJB – Caixa de junção da bateria (Battery junction Box);
13. Chave de ligação do BMS primário;
14. Rede de comunicação entre os BMS secundários;
15. Rede de comunicação entre o BMS primário e os secundários;
16. Sinais dos sensores de corrente e relés de conexão da bateria;
17. Cabo de comunicação com o BMS – CAN e/ou Modbus.

C.1. A Bateria

O BMS é um dispositivo de proteção e gerenciamento de uma bateria. A bateria de que trata este documento é composta por 10 módulos iguais ao mostrado na Figura C.2.

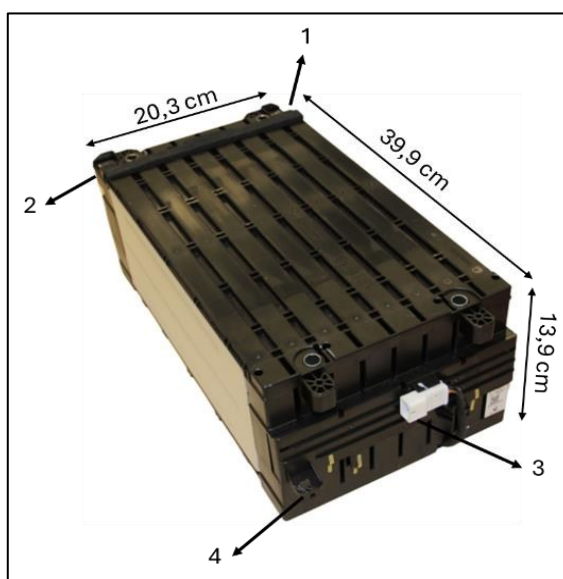


Figura C.2: Módulo da bateria.

1. Polo negativo do módulo.
2. Polo positivo do módulo.
3. Conector de leitura dos dados internos do módulo.
4. Suporte usado para fixação de um BMS secundário.

Cada módulo é composto por 16 células de lítio. Cada dupla de células é ligada em paralelo, e os 8 conjuntos resultantes são interligados em série. A temperatura do módulo e as tensões individuais dos pares de células podem ser monitoradas individualmente através do conector 3 indicado na Figura C.2. Um módulo da bateria possui as seguintes características:

- Tecnologia construtiva: NMC-C (lítio, níquel, Manganês, cobalto).
- Tensão mínima, nominal e máxima: 24 / 29 / 33 VCC.
- Quantidade de conjuntos monitorados: 8.
- Tensão mínima, nominal e máxima das células: 3 / 3,625 / 4,125 VCC.
- Corrente mínima e máxima de carga e descarga: 30 A.
- Peso: 18Kg.
- Sensor de temperatura: NTC 10k Ω .
- Temperatura de trabalho: 10 a 45 °C.

A bateria completa é composta por 10 desses módulos interligados em série, de forma que as principais características da bateria são:

- Tensão mínima, nominal e máxima: 240 / 290 / 330 VCC.
- Corrente mínima e máxima de carga e descarga: 30 A.
- Temperatura de trabalho: 10 a 45 °C.

O polo positivo da bateria é conectado à BJB (Battery Junction Box), local utilizado para medição das condições de uso e de controle. Este dispositivo é responsável por:

- Realizar a proteção da bateria por fusível;
- Realizar leitura da corrente;
- Habilitar ou desabilitar a utilização da bateria através de um sistema de relé de precarga e relé principal, que permite diminuição de transitórios.

A Figura C.3 mostra uma foto da BJB e seus principais componentes.

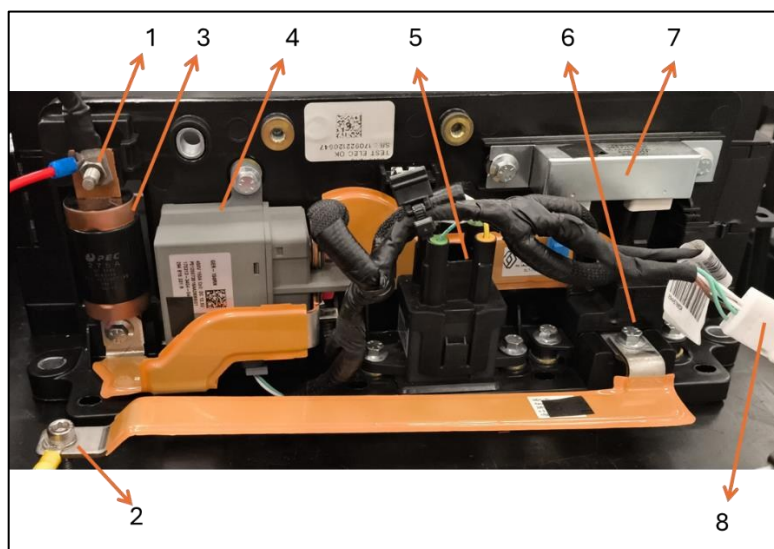


Figura C.3: Battery Junction Box.

1. Ponto de conexão com o positivo da bateria
2. Ponto de conexão para sistemas externos
3. Fusível de proteção

4. Relé principal
5. Relé de precarga
6. Sensor de corrente
7. Resistor de precarga
8. Conector para o BMS primário

C.2. BMS Secundários

O BMS é composto por 1 dispositivo chamado BMS primário e 5 outras partes, chamadas de BMSs secundários. Um BMS secundário pode:

- gerenciar 2 módulos de bateria;
- ler 16 tensões de células – 8 de cada módulo;
- ler a temperatura de cada módulo ligado a ele;
- fazer balanceamento passivo das 16 células de forma independente;
- formar rede de comunicação com dispositivos iguais em formato daisy chain;
- ser alimentado pela própria tensão dos módulos interligados a ele;
- ler a temperatura da área onde estão colocados os resistores de balanço de cada módulo;
- comunicar com o BMS primário através de um protocolo que permite acesso a todos os secundários a partir de um único ponto de conexão.

A Figura C.4 mostra as partes relevantes de um BMS secundário e suas conexões.

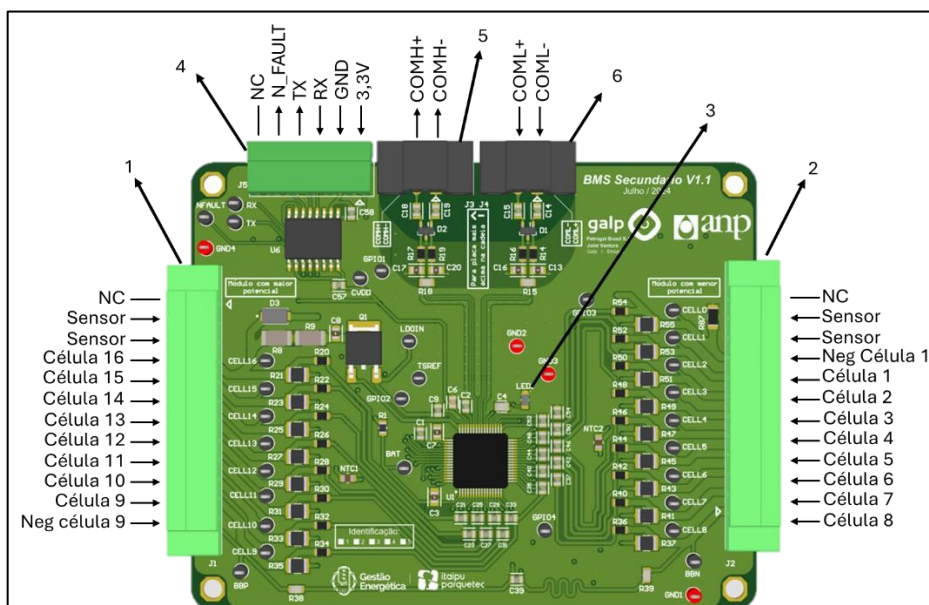


Figura C.4: Placa do BMS secundário e seus sinais.

1. Conector para o módulo da bateria com maior potencial elétrico;
2. Conector para o módulo da bateria com menor potencial elétrico;

3. LED de indicação de funcionamento;
4. Conexão com BMS primário;
5. Conexão com BMS secundário superior;
6. Conexão com BMS secundário inferior;

Apenas o BMS secundário conectado no módulo de bateria com menor potencial é ligado ao BMS primário (indicação 15 – Figura C.1). Os demais BMSs secundários são interligados entre si, de forma que os fios COMH da inferior liga-se ao COML da superior, e assim em diante, como mostra a indicação 14 da Figura C.1.

C.3. BMS Primário

O BMS primário é responsável por ler os dados de todos os BMSs secundários, processar e realizar o controle da bateria, além de servir como interface de acesso ao sistema. O BMS primário:

- é alimentado diretamente pela bateria: 240 a 330 VCC;
- possui leds e chave de conexão/desconexão para interface com usuário;
- possui comunicação RS485/Modbus, USB/Modbus e CAN/CanOpen;
- controla a BJB, podendo conectar ou desconectar a bateria;
- monitora todas as células da bateria, gerando avisos e alarmes.

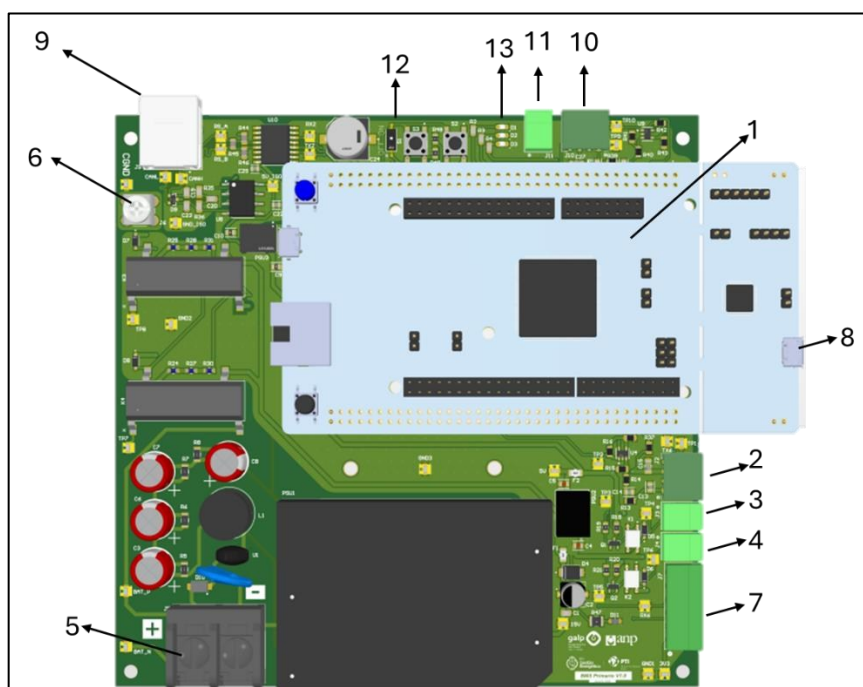


Figura C.5: Placa de um BMS primário e seus pontos de destaque.

1. Placa do controlador (STM32F429)
2. Conector J2: Sensor de corrente
3. Conector J3: relé principal
4. Conector J4: relé de precarga
5. Conector J5: alimentação geral (240 a 330 VCC)
6. Conector J6: Conector para GND da carcaça
7. Conector J7: acesso aos BMSs secundários
8. Conector USB micro: Modbus RTU
9. Conector J9: Conector de comunicação Modbus (RS485) e Can
10. Conector J10: Conector ADC reserva – PA4
11. Conector J11: Conector GPIO reserva – PF8
12. Chave de conexão/desconexão
13. Leds de indicação de Status de operação

Uma chave de ligação deve ser colocada entre o BMS primário e a bateria (indicação 13 da Figura C.1), para que seja possível o desligamento do equipamento em caso de manutenção. A tensão de trabalho pode chegar a 330 VCC. A **Figura C.6** mostra uma representação do BMS primário e suas conexões.

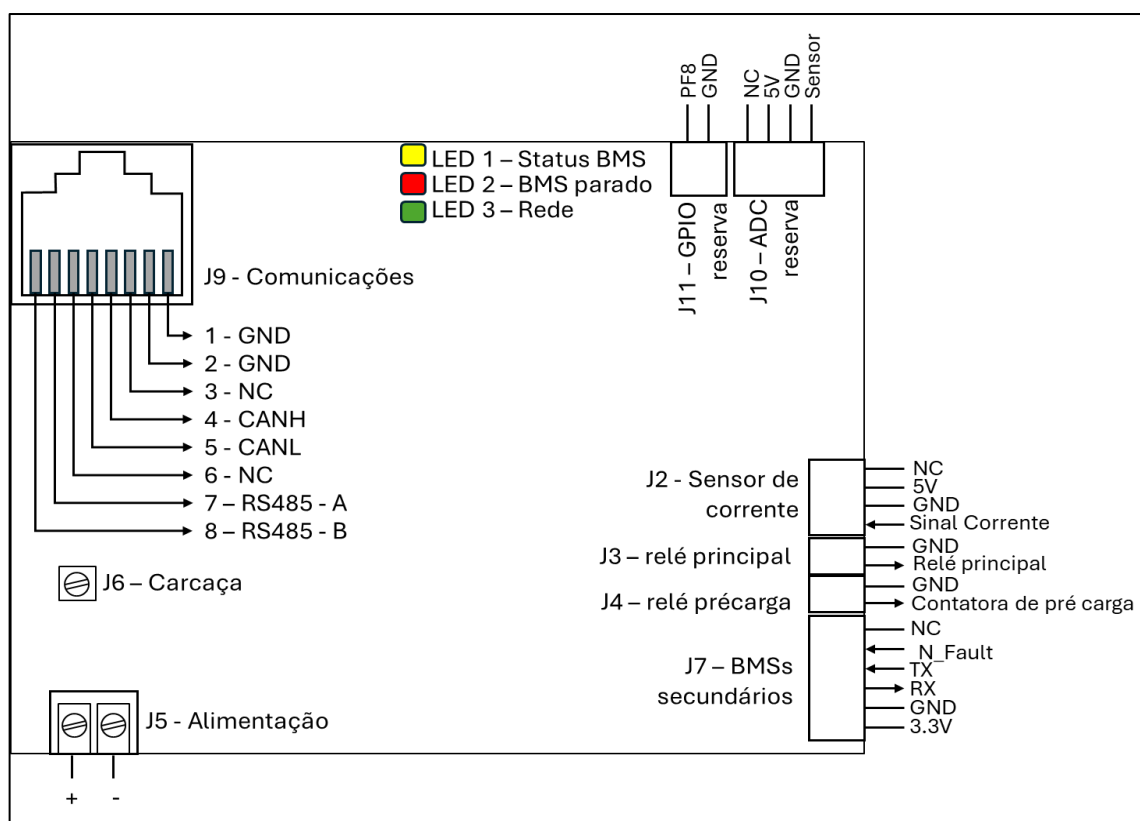


Figura C.6: Representação do BMS primário com suas conexões.

C.3.1. Leds de Indicação de Status

Existem 3 Leds para indicação dos status. Na inicialização todos eles são acionados e posteriormente entram no regime descrito a seguir:

- LED1: Relacionado com o funcionamento do BMS
 - Piscando: 3 segundos off, 0,1 segundo on – bateria em repouso
 - Piscando: 1 segundo off, 1 segundo on – Bateria em uso
 - Aceso: bateria sendo recarregada
- LED2: Indica que o BMS está parado
 - Piscando: 3 segundos off, 0,1 segundo on – houve erro no BMS.
 - Aceso: o BMS foi colocado no estado parado pela rede de comunicação.
- LED3: Indica o funcionamento das redes de comunicação. Pisca por 0,1 segundo sempre que um pacote de comunicação é processado em alguma das interfaces de comunicação.

C.4. Ligando pela Primeira Vez

Após a ligação de todos os fios, como indicado nos capítulos C.1 a C.3, o BMS está pronto para ser ligado. Isso pode ser feito através do acionamento da chave de ligação do BMS primário (indicação 13 da Figura C.1).

Observar o comportamento dos LEDs de status para verificar quando a inicialização está finalizada. O que se espera é que o LED1 (status do BMS) esteja piscando (3s off e 0,1 s on). Por default o BMS inicia no modo Idle, ou seja, bateria desconectada, porém com todas as grandezas sendo monitoradas.

Antes de avançar para a conexão do BMS, é importante verificar se a chave de conexão está na posição “ligada”, pois caso contrário, a conexão será impedida.

O BMS pode receber comandos e fornecer informações sobre a bateria por três redes de comunicação (RS485/Modbus, USB/Modbus e CAN/CanOpen), o uso destas redes é abordado a seguir.

C.4.1. Operação Pela Rede Modbus

A rede Modbus, seja pela USB ou pela linha RS485, permite monitorar e alterar praticamente todos os parâmetros do BMS. A configuração padrão da rede Modbus é a seguinte:

- Velocidade: 19200 bps
- Paridade: Par

- Quantidade de bits de dados: 8
- Quantidade de stop bits: 1
- Controle de fluxo: não
- Endereço Modbus: 1

Para conectar a bateria aos sistemas externos o BMS deve ser passado ao modo de operação (Ready). Para isso, deve-se escrever o valor 0000 0005 H nos registradores 01C0H e 01C1H, de acordo com o mostrado na Figura C.7.

	End	Função	Reg inicial	Quant reg	Bytes	Valores reg 01C0 e 01C1		CRC
Comando	01	10	01C0	0002	04	0000	0005	326C
	End	Função	Reg inicial	Quant reg	CRC			
Resposta BMS	01	10	01C0	0002	4008			

Figura C.7: Quadro Modbus para passar o BMS para o estado de operação (Ready)

O comando especificado na Figura C.7 irá fazer com que o relé de pré-carga seja acionado por um tempo, e em seguida o relé principal. A bateria então está pronta para ser utilizada, seja em carga, descarga, podendo também permanecer em repouso. Os principais registradores de monitoramento de operação da bateria são mostrados na Tabela C.1.

Tabela C.1: Registradores utilizados para monitorar as condições da bateria.

Endereço [hexadecimal]	Modo	Descrição
00B2 e 00B3	R	SOC percentual (multiplicador 10)
00B4 e 00B5	R	SOH percentual (multiplicador 10)
012A e 012B	R/W	Dia, mês e ano atuais
012C e 012D	R/W	Hora, minuto e segundo
012E e 012F	R	Tensão da bateria (multiplicador 1000)
0130 e 0131	R	Corrente da bateria (multiplicador 1000)
0132 e 0133	R	Potência da bateria (multiplicador 1000)
0134 e 0135	R	Temperatura média da bateria (multiplicador 10)
0136 e 0137	R	Registrador de erro (ver lista de registradores)
01C0 e 01C1	R/W	Comando para o controle do BMS (ver lista de registradores)
01C2 e 01C3	R	Modo de operação do controle do BMS (ver lista de registradores)
0012 e 0013	R	Quantidade de logs salvos atualmente na memória
	Função 65	Leitura de logs da memória

C.4.2. Operação Pela Rede Can/Canopen

A interface de comunicação CAN é compatível com a especificação CAN 2.0B, utilizando identificador de mensagem com 11 bits. Nas camadas superiores da comunicação é implementado características do protocolo CanOpen. A configuração padrão da rede Can/CanOpen é a seguinte:

- Velocidade: 1 Mbps
- Endereço de rede: 1

O endereço de rede na interface CAN é o mesmo do endereço de rede da interface Modbus, e pode ser configurado num range entre 1 e 127. A comunicação CAN/CanOpen utiliza formato little endian no campo de dados. Os exemplos fornecidos nesta subseção consideram que o BMS está na sua configuração default, descrita anteriormente.

Modos de Funcionamento da Rede

A rede CAN/CanOpen possui 3 modos de funcionamento que podem ser modificados entre si pela própria rede de comunicação. Esses modos têm relação apenas com esta interface de comunicação, e não possuem relação com o funcionamento do BMS em si:

1. Modo Pré-operacional: Os registradores podem ser lidos e escritos normalmente, de forma similar com o protocolo Modbus.
2. Modo Operacional: além da funcionalidade descrita no modo anterior, neste caso alguns dados são enviados para a rede periodicamente de forma autônoma;
3. Parado: A rede está parada, não permite escritas ou leituras.

Inicialização e Manipulação da Rede CAN/CanOpen

O BMS informa sua inicialização pela rede CAN enviando o seguinte quadro de dados:

Quadro de inicialização	
Identificador CAN	Dado
701	00

Após o quadro de inicialização os registradores podem ser lidos ou escritos e o modo de funcionamento da rede pode ser modificado, como descrito anteriormente. Os quadros mostrados a seguir modificam o modo de funcionamento da rede:

Muda o modo de operação da rede para o modo operacional		
Identificador CAN	Dado	
000	01	01
Muda o modo de operação da rede para o modo pré-operacional		
Identificador CAN	Dado	
000	80	01

Muda o modo de operação da rede para o modo parado		
Identificador CAN	Dado	
000	02	01

Operação do BMS com Modo de Funcionamento de Rede Pré-Operacional

Durante a inicialização do BMS a comunicação CAN/CanOpen entra, por padrão, no modo de funcionamento pré-operacional. Este modo permite apenas leituras e escritas no dicionário de dados do BMS (similar ao funcionamento do Modbus acessando sua lista de registradores).

As tabelas a seguir fornecem exemplo de como escrever e ler nos registradores do BMS a partir da rede CAN/CanOpen.

Escrita do valor 0000 0005H no objeto de índice 20E0H e subíndice 00, do dispositivo com endereço 01 – passa o BMS para o modo de operação pronto, conecta a bateria para utilização.			
Identificador CAN	Dados		
	Controle	Índice e subíndice	Dados escritos
600 + endereço	Byte 00	Bytes 01 - 03	Bytes 04 - 07
601H	23H	E0 20 00	05 00 00 00

Resposta do BMS para o exemplo de escrita fornecido anteriormente. A primeira resposta indica sucesso na escrita e a segunda indica que houve erro.			
Identificador CAN	Dados		
	Controle	Índice e subíndice	Reservado ou erro
580 + endereço	Byte 00	Bytes 01 - 03	Bytes 04 - 07
581H	60H	E0 20 00	00 00 00 00
581H	80H	E0 20 00	Xx xx xx xx Código de erro

Leitura do objeto de índice 2059 subíndice 00, do dispositivo 01 – Leitura do SOC			
Identificador CAN	Dados		
	Controle	Índice e subíndice	Dados aleatórios
600 + endereço	Byte 00	Bytes 01 - 03	Bytes 04 - 07
601H	40H	59 20 00	00 00 00 00

Resposta do exemplo de leitura do SOC, fornecido anteriormente, indicando 50,0 % de carga.			
Identificador CAN	Dados		
	Controle	Índice e subíndice	Reservado ou erro
580 + endereço	Byte 00	Bytes 01 - 03	Bytes 04 - 07
581H	43H	59 20 00	F4 01 00 00

Operação do BMS com Modo de Funcionamento de Rede Operacional

Neste caso, o dispositivo que controla o BMS deve ser capaz de controlar o modo de funcionamento da rede Can/CanOpen. Apesar de ser aparentemente mais elaborado, este modo de funcionamento da rede permite uma interação simplificada entre os dispositivos, visto que, uma vez o modo de funcionamento seja modificado para o modo Operacional, O BMS começa a enviar diversos dados de forma autônoma a cada 500 ms. Além disso, tudo o que pode ser feito no modo de funcionamento descrito anteriormente pode ser feito neste modo.

A Figura C.8 mostra o modelo de comunicação com o BMS quando o modo de funcionamento da rede de comunicação é o modo Operacional. Os 4 quadros autônomos enviados pelo BMS a cada 500ms no modo operacional são apresentados na Tabela C.2.

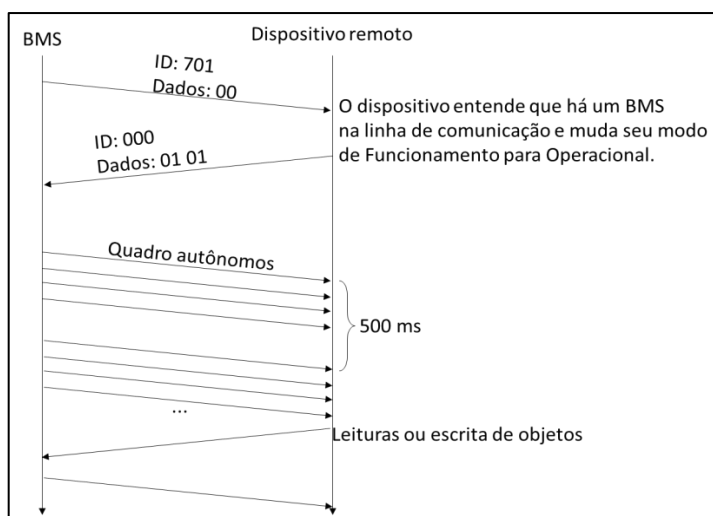


Figura C.8: Conexão entre o BMS e o dispositivo remoto no modo Operacional.

Tabela C.2: Quadros autônomos enviados pelo BMS no modo Operacional.

Identificador Can	Dado		Unidades
181H	Tensão da bateria	Corrente da bateria	Tensão da bateria [V] multiplicador 1000
	xx xx xx xx	yy yy yy yy	Corrente da bateria [A] multiplicador 1000
281H	SOC	SOH	SOC [%] multiplicador 10
	xx xx xx xx	yy yy yy yy	SOH [%] multiplicador 10
381H	Temperatura média da bateria	Temperatura máxima da bateria	Temperatura média [°C] multiplicador 1000
	xx xx xx xx	yy yy yy yy	Temperatura máxima [°C] multiplicador 1000
481H	Modo de operação e estado do BMS	Flags de alarmes e erros	
	xx xx xx xx	zz zz zz zz	

Para operar o BMS neste modo, quando o BMS enviar o quadro de inicialização, deve-se mudar o comando do controle do BMS e então enviar o quadro de mudança de funcionamento de rede para o modo Operacional.

Mensagens de Erro pela Rede Can/CanOpen

Ao contrário da rede Modbus, onde os erros devem ser lidos por um dispositivo que faz varredura dos dados pela rede de comunicação, na rede Can/CanOpen um quadro de EMCY é gerado de forma autônoma e enviada pela rede sempre que um limite de operação é violado. O quadro de emergência gerado possui o seguinte formato:

Identificador CAN		Dados			
	Byte 0-1	Byte 2	Byte 3-6	Byte 7	Byte 8
0x081		0x0001	Registrador de erro	Flags de erro	00

Mais de uma flag pode estar ativada ao mesmo tempo. Um aviso é emitido quando um limite é atingido, e um alarme indica que o limite foi violado e a bateria desconectada. O conteúdo do registrador de erro possui o seguinte formato:

Erros							
Erro fabricante	0	0	0	Temperatura	Tensão	Corrente	Erro genérico
Bit 7	Bit 6	Bit 5	Bit 4	Bit 3	Bit 2	Bit 1	Bit 0

C.5. Dúvidas Frequentes

C.5.1. Como Fazer Carga e Descarga da Bateria?

Para que a bateria possa ser utilizada, seja para carga ou descarga, o BMS deve estar no modo de operação Pronto (Ready). Para que o BMS possa ser colocado neste estado, a chave de conexão deve estar na posição Ligada e deve ser escrito o valor 00000005 H nos registradores 01C0H e 01C1H pela rede Modbus, ou o mesmo valor no objeto 20E0:00H pela rede Can/CanOpen.

O modo de operação default do BMS é desconectado, porém isso também pode ser modificado nos registradores 00A0H e 00A1H, ou objeto 2050:00H.

A carga e descarga não deve ultrapassar os limites máximos da bateria, e pode ser feito por carregador de qualquer tipo. O BMS não possui conexão ou interface de comunicação para controle direto da carga ou descarga da bateria, assim o conversor conectado a bateria deve ser capaz de utilizar a bateria de forma autônoma. Ele somente monitora os parâmetros da bateria e realiza a proteção caso algum limite seja violado.

C.5.2. Como Alterar e Salvar Configurações?

Diversas configurações do BMS são salvas na memória não volátil do equipamento (ver “Anexo B – estrutura de dados do BMS” para mais detalhes). Todas elas possuem valor default que permitem o correto funcionamento do equipamento, porém o usuário pode modificar esses parâmetros. Se um parâmetro desse tipo for alterado, por exemplo o modo de operação default do BMS, então o usuário deve salvar esse valor para que ele não seja perdido em caso de desligamento do BMS primário.

Para salvar a configuração atual na memória não volátil do BMS deve-se escrever o valor 1 nos registradores de endereço 0128H e 0129H pela rede Modbus, ou o mesmo valor no objeto 2094:00H pela rede Can/CanOpen.

C.5.3. Como Voltar as Configurações ao Valor Default?

Se houver algum problema no funcionamento do BMS as configurações podem ser retornadas aos valores padrões escrevendo o valor 3 nos registradores de endereço 0128H e 0129H pela rede Modbus, ou o mesmo valor no objeto 2094:00H pela rede Can/CanOpen.

A configuração também é retornada ao valor default quando os dois botões presentes na placa do BMS primário são pressionados de forma simultânea por 3 segundos.

C.5.4. O que Fazer Quando Ocorrer um Erro?

Quando uma condição limite é detectada, o BMS desconecta a bateria, atualiza as flags de erro, gera um log, envia um quadro de emergência pela rede CAN e sinaliza a condição através dos leds de interface com o usuário. Após o erro, o dispositivo pode se conectar novamente através de um pulso no botão de conexão (desligar e ligar novamente), pelas redes de comunicação ou por tempo.

Sem nenhuma intervenção pela rede ou pelo botão de conexão, o BMS tenta retomar a operação (para o modo idle) novamente após 60 segundos, por até 3 vezes (valores default). Após essas tentativas, porém, se o erro persistir, o BMS permanecerá em modo de erro.

O usuário pode verificar através da rede de comunicação o que está acontecendo, seja pelas flags de erro ou pela leitura dos logs. Após verificação do sistema e correção da causa do problema o usuário pode mandar um comando para retomada da operação escrevendo o valor 00000001 H nos registradores 01C0H e 01C1H pela rede Modbus, ou o mesmo valor no objeto 20E0:00H pela rede Can/CanOpen.

Apêndice D

Lista de Registradores

#	Índice:Sub-Índice CAN-Open [Hexadecimal]	Endereço Modbus [Hexadecimal]	R/W	Significado	Unidade/Definição
1	2000:00	0000 e 0001	R	Número de série do BMS	
2	2001:00	0002 e 0003	R	Versão do código do BMS	
3	2002:00	0004 e 0005	R/W	Endereço de rede	De 1 a 127
4	2003:00	0006 e 0007	R	Reservado	
5	2004:00	0008 e 0009	R	Reservado	
6	2005:00	000A e 000B	R	Reservado	
7	2006:00	000C e 000D	R/W	Velocidade da comunicação CAN	
8	2007:00	000E e 000F	R/W	Configurações da comunicação Modbus	

#	Índice:Sub-Índice CAN-Open [Hexadecimal]	Endereço Modbus [Hexadecimal]	R/W	Significado	Unidade/Definição
9	2008:00	0010 e 0011	R	Número máximo de logs da memória	
10	2009:00	0012 e 0013	R	Quantidade de logs salvos na memória	
11	200A:00	0014 e 0015	R/W	Tipo de bateria	
12	200B:00	0016 e 0017	R/W	Quantidade de células em série	
13	200C:00	0018 e 0019	R/W	Quantidade de strings em paralelo	
14	200D:00	001A e 001B	R/W	Quantidade total de células da bateria	
15	200E:00	001C e 001D	R/W	Variação de tensão permitida pelo balanço	V (multiplicador 1000)
16	200F:00	001E e 001F	R/W	Configuração da tensão da célula da bateria	V (multiplicador 1000)
17	2010:00	0020 e 0021	R/W	Configuração da tensão de operação da bateria	V (multiplicador 1000)
18	2011:00	0022 e 0023	R/W	Tipo de sensor de temperatura	
19	2012:00	0024 e 0025	R/W	Limite de aviso da tensão máxima de célula	V (multiplicador 1000)
20	2013:00	0026 e 0027	R/W	Limite de aviso da tensão máxima da bateria	V (multiplicador 1000)
21	2014:00	0028 e 0029	R/W	Limite de alarme da tensão máxima de célula	V (multiplicador 1000)
22	2015:00	002A e 002B	R/W	Limite de alarme da tensão máxima da bateria	V (multiplicador 1000)
23	2016:00	002C e 002D	R/W	Limite de aviso da tensão mínima de célula	V (multiplicador 1000)
24	2017:00	002E e 002F	R/W	Limite de aviso da tensão mínima da bateria	V (multiplicador 1000)
25	2018:00	0030 e 0031	R/W	Limite de alarme da tensão mínima de célula	V (multiplicador 1000)

#	Índice:Sub-Índice CAN-Open [Hexadecimal]	Endereço Modbus [Hexadecimal]	R/W	Significado	Unidade/Definição
26	2019:00	0032 e 0033	R/W	Limite de alarme da tensão mínima da bateria	V (multiplicador 1000)
27	201A:00	0034 e 0035	R/W	Limite de aviso da corrente máxima da string	A (multiplicador 1000)
28	201B:00	0036 e 0037	R/W	Limite de aviso da corrente máxima da bateria	A (multiplicador 1000)
29	201C:00	0038 e 0039	R/W	Limite de alarme da corrente máxima da string	A (multiplicador 1000)
30	201D:00	003A e 003B	R/W	Limite de alarme da corrente máxima da bateria	A (multiplicador 1000)
31	201E:00	003C e 003D	R/W	Limite de aviso da corrente mínima da string	A (multiplicador 1000)
32	201F:00	003E e 003F	R/W	Limite de aviso da corrente mínima da bateria	A (multiplicador 1000)
33	2020:00	0040 e 0041	R/W	Limite de alarme da corrente mínima da string	A (multiplicador 1000)
34	2021:00	0042 e 0043	R/W	Limite de alarme da corrente mínima da bateria	A (multiplicador 1000)
35	2022:00	0044 e 0045	R/W	Limite da corrente para detecção de final de carga	A (multiplicador 1000)
36	2023:00	0046 e 0047	R/W	Tensão de célula mínima para final de carga	V (multiplicador 1000)
37	2024:00	0048 e 0049	R/W	Tensão de string mínima para final de carga	V (multiplicador 1000)
38	2025:00	004A e 004B	R/W	Tensão de célula de final de descarga pesada	V (multiplicador 1000)
39	2026:00	004C e 004D	R/W	Tensão de string de final de descarga pesada	V (multiplicador 1000)
40	2027:00	004E e 004F	R/W	Tensão de célula de final de descarga leve	V (multiplicador 1000)
41	2028:00	0050 e 0051	R/W	Tensão de string de final de descarga leve	V (multiplicador 1000)
42	2029:00	0052 e 0053	R/W	Limite de aviso da temperatura máxima	°C (multiplicador 10)

#	Índice:Sub-Índice CAN-Open [Hexadecimal]	Endereço Modbus [Hexadecimal]	R/W	Significado	Unidade/Definição
43	202A:00	0054 e 0055	R/W	Limite de alarme da temperatura máxima	°C (multiplicador 10)
44	202B:00	0056 e 0057	R/W	Limite de aviso da temperatura mínima	°C (multiplicador 10)
45	202C:00	0058 e 0059	R/W	Limite de alarme da temperatura mínima	°C (multiplicador 10)
46	202D:00	005A e 005B	R/W	Limite de aviso da resistência de isolamento	Ω/V
47	202E:00	005C e 005D	R/W	Limite de alarme da resistência de isolamento	Ω/V
48	202F:00	005E e 005F	R/W	Reservado	
49	2030:00	0060 e 0061	R/W	Reservado	
50	2031:00	0062 e 0063	R/W	Temperatura de resfriamento	°C (multiplicador 10)
51	2032:00	0064 e 0065	R/W	Temperatura de operação	°C (multiplicador 10)
52	2033:00	0066 e 0067	R/W	Rampa de aquecimento	°C/h (multiplicador 10)
53	2034:00	0068 e 0069	R/W	Divisor dos parâmetros de controle de temperatura	
54	2035:00	006A e 006B	R/W	Ganho proporcional controle de temperatura	
55	2036:00	006C e 006D	R/W	Ganho integral controle de temperatura	
56	2037:00	006E e 006F	R/W	reservado	
57	2038:00	0070 e 0071	R/W	Tempo de espera para retornar à operação após falha	s (multiplicador 1000)
58	2039:00	0072 e 0073	R/W	Tentativas de reinício após falhas	
59	203A:00	0074 e 0075	R/W	Tentativas de reinício após violação de limites	

#	Índice:Sub-Índice CAN-Open [Hexadecimal]	Endereço Modbus [Hexadecimal]	R/W	Significado	Unidade/Definição
60	203B:00	0076 e 0077	R/W	Tempo entre ciclos da tarefa de controle	s (multiplicador 1000)
61	203C:00	0078 e 0079	R/W	Endereço I2C do sensor de isolamento	
62	203D:00	007A e 007B	R/W	Endereço I2C do sensor de temperatura 1	
63	203E:00	007C e 007D	R/W	Endereço I2C do sensor de temperatura 2	
64	203F:00	007E e 007F	R/W	Endereço I2C do sensor de temperatura 3	
65	2040:00	0080 e 0081	R/W	Parâmetro A de calibração do sensor de tensão 1	V/ADC (multiplicador 1000)
66	2041:00	0082 e 0083	R/W	Parâmetro B de calibração do sensor de tensão 1	V (multiplicador 1000)
67	2042:00	0084 e 0085	R/W	Parâmetro A de calibração do sensor de corrente 1	A/ADC (multiplicador 1000)
68	2043:00	0086 e 0087	R/W	Parâmetro B de calibração do sensor de corrente 1	A (multiplicador 1000)
69	2044:00	0088 e 0089	R/W	Parâmetro A de calibração do sensor de tensão 2	V/ADC (multiplicador 1000)
70	2045:00	008A e 008B	R/W	Parâmetro B de calibração do sensor de tensão 2	V (multiplicador 1000)
71	2046:00	008C e 008D	R/W	Parâmetro A de calibração do sensor de corrente 2	A/ADC (multiplicador 1000)
72	2047:00	008E e 008F	R/W	Parâmetro B de calibração do sensor de corrente 2	A (multiplicador 1000)
73	2048:00	0090 e 0091	R/W	Tempo para detecção de final de carga/descarga	s (multiplicador 1000)
74	2049:00	0092 e 0093	R/W	Tempo com resistor de pré-carga ligado	s (multiplicador 1000)
75	204A:00	0094 e 0095	R/W	Reservado	
76	204B:00	0096 e 0097	R/W	Reservado	

#	Índice:Sub-Índice CAN-Open [Hexadecimal]	Endereço Modbus [Hexadecimal]	R/W	Significado	Unidade/Definição
77	204C:00	0098 e 0099	R/W	Timeout do watchdog	s (multiplicador 1000)
78	204D:00	009A e 009B	R/W	Espera após acionamento dos contatores principais	s (multiplicador 1000)
79	204E:00	009C e 009D	R/W	Tempo entre salvamento dos dados de operação	s (multiplicador 1000)
80	204F:00	009E e 009F	R/W	Reservado	
81	2050:00	00A0 e 00A1	R/W	Comando padrão utilizado pelo BMS ao reiniciar	
82	2051:00	00A2 e 00A3	R/W	Usar strings	
83	2052:00	00A4 e 00A5	R/W	Reservado	
84	2053:00	00A6 e 00A7	R/W	SOC inicial mínimo para atualizar SOH	
85	2054:00	00A8 e 00A9	R/W	Tensão de carga mínima para atualizar SOH	
86	2055:00	00AA e 00AB	R/W	Tempo mínimo com tensão de carga para SOH	
87	2056:00	00AC e 00AD	R/W	Carga máxima da string	Ah (multiplicador 3600000)
88	2057:00	00AE e 00AF	R/W	Carga máxima da bateria	Ah (multiplicador 3600000)
89	2058:00	00B0 e 00B1	R	Estimativa da carga da bateria	Ah (multiplicador 3600000)
90	2059:00	00B2 e 00B3	R	Estado de carga da bateria (SOC)	% (multiplicador 10)
91	205A:00	00B4 e 00B5	R	Estado de saúde da bateria (SOH)	% (multiplicador 10)
92	205B:00	00B6 e 00B7	R	Estimativa da carga da string 1	Ah (multiplicador 3600000)
93	205C:00	00B8 e 00B9	R	Estado de carga da string 1 (SOC)	% (multiplicador 10)

#	Índice:Sub-Índice CAN-Open [Hexadecimal]	Endereço Modbus [Hexadecimal]	R/W	Significado	Unidade/Definição
94	205D:00	00BA e 00BB	R	Estado de saúde da string 1 (SOH)	% (multiplicador 10)
95	205E:00	00BC e 00BD	R	Estimativa da carga da string 2	Ah (multiplicador 3600000)
96	205F:00	00BE e 00BF	R	Estado de carga da string 2 (SOC)	% (multiplicador 10)
97	2060:00	00C0 e 00C1	R	Estado de saúde da string 2 (SOH)	% (multiplicador 10)
98	2061:00	00C2 e 00C3	R/W	Ciclos completos da bateria	
99	2062:00	00C4 e 00C5	R/W	Ciclos de carga da bateria	
100	2063:00	00C6 e 00C7	R/W	Ciclos de descarga da bateria	
101	2064:00	00C8 e 00C9	R/W	Carga parcial da bateria (contagem de ciclos)	Ah (multiplicador 3600000)
102	2065:00	00CA e 00CB	R/W	Descarga parcial da bateria (contagem de ciclos)	Ah (multiplicador 3600000)
103	2066:00	00CC e 00CD	R/W	Ciclos completos da string 1	
104	2067:00	00CE e 00CF	R/W	Ciclos de carga da string 1	
105	2068:00	00D0 e 00D1	R/W	Ciclos de descarga da string 1	
106	2069:00	00D2 e 00D3	R/W	Carga parcial da string 1 (contagem de ciclos)	Ah (multiplicador 3600000)
107	206A:00	00D4 e 00D5	R/W	Descarga parcial da string 1 (contagem de ciclos)	Ah (multiplicador 3600000)
108	206B:00	00D6 e 00D7	R/W	Ciclos completos da string 2	
109	206C:00	00D8 e 00D9	R/W	Ciclos de carga da string 2	
110	206D:00	00DA e 00DB	R/W	Ciclos de descarga da string 2	

#	Índice:Sub-Índice CAN-Open [Hexadecimal]	Endereço Modbus [Hexadecimal]	R/W	Significado	Unidade/Definição
111	206E:00	00DC e 00DD	R/W	Carga parcial da string 2 (contagem de ciclos)	Ah (multiplicador 3600000)
112	206F:00	00DE e 00DF	R/W	Descarga parcial da string 2 (contagem de ciclos)	Ah (multiplicador 3600000)
113	2070:00	00E0 e 00E1	R/W	Cargas completas string 1	
114	2071:00	00E2 e 00E3	R/W	Cargas completas string 2	
115	2072:00	00E4 e 00E5	R/W	Descargas completas string 2	
116	2073:00	00E6 e 00E7	R/W	Descargas completas string 3	
117	2074:00	00E8 e 00E9	R	Reservado	
118	2075:00	00EA e 00EB	R	Reservado	
119	2076:00	00EC e 00ED	R	Reservado	
120	2077:00	00EE e 00EF	R	Reservado	
121	2078:00	00F0 e 00F1	R	Reservado	
122	2079:00	00F2 e 00F3	R	Reservado	
123	207A:00	00F4 e 00F5	R	Reservado	
124	207B:00	00F6 e 00F7	R	Reservado	
125	207C:00	00F8 e 00F9	R	Reservado	
126	207D:00	00FA e 00FB	R	Reservado	
127	207E:00	00FC e 00FD	R	Reservado	

#	Índice:Sub-Índice CAN-Open [Hexadecimal]	Endereço Modbus [Hexadecimal]	R/W	Significado	Unidade/Definição
128	207F:00	00FE e 00FF	R	Reservado	
129	2080:00	0100 e 0101	R	Reservado	
130	2081:00	0102 e 0103	R	Reservado	
131	2082:00	0104 e 0105	R	Reservado	
132	2083:00	0106 e 0107	R	Reservado	
133	2084:00	0108 e 0109	R	Reservado	
134	2085:00	010A e 010B	R	Reservado	
135	2086:00	010C e 010D	R	Reservado	
136	2087:00	010E e 010F	R	Reservado	
137	2088:00	0110 e 0111	R	Reservado	
138	2089:00	0112 e 0113	R	Reservado	
139	208A:00	0114 e 0115	R	Reservado	
140	208B:00	0116 e 0117	R	Reservado	
141	208C:00	0118 e 0119	R	Reservado	
142	208D:00	011A e 011B	R	Reservado	
143	208E:00	011C e 011D	R	Reservado	
144	208F:00	011E e 011F	R	Reservado	

#	Índice:Sub-Índice CAN-Open [Hexadecimal]	Endereço Modbus [Hexadecimal]	R/W	Significado	Unidade/Definição
145	2090:00	0120 e 0121	R	Reservado	
146	2091:00	0122 e 0123	R	Reservado	
147	2092:00	0124 e 0125	R	Reservado	
148	2093:00	0126 e 0127	R	Reservado	
149	2094:00	0128 e 0129	R/W	Status de salvamento dos dados em memória	
150	2095:00	012A e 012B	R/W	Dia, mês e ano	
151	2096:00	012C e 012D	R/W	Hora, minuto e segundo	
152	2097:00	012E e 012F	R	Tensão da bateria	V (multiplicador 1000)
153	2098:00	0130 e 0131	R	Corrente da bateria	A (multiplicador 1000)
154	2099:00	0132 e 0133	R	Potência na bateria	W (multiplicador 1000)
155	209A:00	0134 e 0135	R	Temperatura Média	°C (multiplicador 10)
156	209B:00	0136 e 0137	R	Registrador 1 de erros do BMS	
157	209C:00	0138 e 0139	R	Registrador 2 de erros do BMS	
158	209D:00	013A e 013B	R	Strings com isolamento bom	
159	209E:00	013C e 013D	R	strings com proteção acionada	
160	209F:00	013E e 013F	R	Reservado	
161	20A0:00	0140 e 0141	R	Tensão da string 1	V (multiplicador 1000)

#	Índice:Sub-Índice CAN-Open [Hexadecimal]	Endereço Modbus [Hexadecimal]	R/W	Significado	Unidade/Definição
162	20A1:00	0142 e 0143	R	Corrente da string 1	A (multiplicador 1000)
163	20A2:00	0144 e 0145	R	Potência na string 1	W (multiplicador 1000)
164	20A3:00	0146 e 0147	R	Tensão da string 2	V (multiplicador 1000)
165	20A4:00	0148 e 0149	R	Corrente da string 2	A (multiplicador 1000)
166	20A5:00	014A e 014B	R	Potência na string 2	W (multiplicador 1000)
167	20A6:00	014C e 014D	R	Temperatura sensor 1	°C (multiplicador 10)
168	20A7:00	014E e 014F	R	Temperatura sensor 2	°C (multiplicador 10)
169	20A8:00	0150 e 0151	R	Temperatura sensor 3	°C (multiplicador 10)
170	20A9:00	0152 e 0153	R	Resistencia de isolamento do polo positivo string 1	Ω/V
171	20AA:00	0154 e 0155	R	Resistencia de isolamento do polo negativo string 1	Ω/V
172	20AB:00	0156 e 0157	R	Resistencia de isolamento do polo positivo string 2	Ω/V
173	20AC:00	0158 e 0159	R	Resistencia de isolamento do polo negativo string 2	Ω/V
174	20AD:00	015A e 015B	R	Média das tensões de célula	V (multiplicador 1000)
175	20AE:00	015C e 015D	R	Máxima Tensão de célula	V (multiplicador 1000)
176	20AF:00	015E e 015F	R	Mínima Tensão de célula	V (multiplicador 1000)
177	20B0:00	0160 e 0161	R	Temperatura do CPU	°C (multiplicador 10)
178	20B1:00	0162 e 0163	R	Tensão de alimentação do CPU	V (multiplicador 1000)

#	Índice:Sub-Índice CAN-Open [Hexadecimal]	Endereço Modbus [Hexadecimal]	R/W	Significado	Unidade/Definição
179	20B2:00	0164 e 0165	R	Tensão da bateria do CPU	V (multiplicador 1000)
180	20B3:00	0166 e 0167	R	Taxa de ocupação do CPU	% (multiplicador 10)
181	20B4:00	0168 e 0169	R	Reservado	
182	20B5:00	016A e 016B	R	Estado das saídas do BMS	
183	20B6:00	016C e 016D	R	Estado das entradas do BMS	
184	20B7:00	016E e 016F	R	Tempo de operação do BMS	s (multiplicador 1000)
185	20B8:00	0170 e 0171	R	Tempo de bateria conectada	s (multiplicador 1000)
186	20B9:00	0172 e 0173	R	Tempo de duração da última carga string 1	s (multiplicador 1000)
187	20BA:00	0174 e 0175	R	Tempo de duração da última carga string 2	s (multiplicador 1000)
188	20BB:00	0176 e 0177	R	Tempo de duração da última descarga string 1	s (multiplicador 1000)
189	20BC:00	0178 e 0179	R	Tempo de duração da última descarga string 2	s (multiplicador 1000)
190	20BD:00	017A e 017B	R	Reservado	
191	20BE:00	017C e 017D	R	Reservado	
192	20BF:00	017E e 017F	R	Reservado	
193	20C0:00	0180 e 0181	R	Reservado	
194	20C1:00	0182 e 0183	R	Reservado	
195	20C2:00	0184 e 0185	R	Reservado	

#	Índice:Sub-Índice CAN-Open [Hexadecimal]	Endereço Modbus [Hexadecimal]	R/W	Significado	Unidade/Definição
196	20C3:00	0186 e 0187	R	Reservado	
197	20C4:00	0188 e 0189	R	Reservado	
198	20C5:00	018A e 018B	R	Reservado	
199	20C6:00	018C e 018D	R	Reservado	
200	20C7:00	018E e 018F	R	Reservado	
201	20C8:00	0190 e 0191	R	Reservado	
202	20C9:00	0192 e 0193	R	Reservado	
203	20CA:00	0194 e 0195	R	Reservado	
204	20CB:00	0196 e 0197	R	Reservado	
205	20CC:00	0198 e 0199	R	Reservado	
206	20CD:00	019A e 019B	R	Reservado	
207	20CE:00	019C e 019D	R	Reservado	
208	20CF:00	019E e 019F	R	Reservado	
209	20D0:00	01A0 e 01A1	R	Reservado	
210	20D1:00	01A2 e 01A3	R	Reservado	
211	20D2:00	01A4 e 01A5	R	Reservado	
212	20D3:00	01A6 e 01A7	R	Reservado	

#	Índice:Sub-Índice CAN-Open [Hexadecimal]	Endereço Modbus [Hexadecimal]	R/W	Significado	Unidade/Definição
213	20D4:00	01A8 e 01A9	R	Reservado	
214	20D5:00	01AA e 01AB	R	Reservado	
215	20D6:00	01AC e 01AD	R	Reservado	
216	20D7:00	01AE e 01AF	R	Reservado	
217	20D8:00	01B0 e 01B1	R	Reservado	
218	20D9:00	01B2 e 01B3	R	Reservado	
219	20DA:00	01B4 e 01B5	R	Reservado	
220	20DB:00	01B6 e 01B7	R	Reservado	
221	20DC:00	01B8 e 01B9	R	Reservado	
222	20DD:00	01BA e 01BB	R	Potência de aquecimento	% (multiplicador 10)
223	20DE:00	01BC e 01BD	R	Referência atual do controle de temperatura	°C (multiplicador 10)
224	20DF:00	01BE e 01BF	R	Referência final do controle de temperatura	°C (multiplicador 10)
225	20E0:00	01C0 e 01C1	R/W	Comando para o controle do BMS	
226	20E1:00	01C2 e 01C3	R	Modo de operação do controle do BMS	
227	20E2:00	01C4 e 01C5	R	Status de operação do controle do BMS	
228	20E3:00	01C6 e 01C7	R	Status de temperatura da bateria	
229	20E4:00	01C8 e 01C9	R	Status de uso da string 1	

#	Índice:Sub-Índice CAN-Open [Hexadecimal]	Endereço Modbus [Hexadecimal]	R/W	Significado	Unidade/Definição
230	20E5:00	01CA e 01CB	R	Status de uso da string 2	
231	20E6:00	01CC e 01CD	R	Estado da rede CAN-Open	
232	20E7:00	01CE e 01CF	R	Modo da tarefa de leitura da isolação	
233	20E8:00	01D0 e 01D1	R	Modo da tarefa de leitura da temperatura	
234	20E9:00	01D2 e 01D3	R	Modo da tarefa de leitura de potência string 1	
235	20EA:00	01D4 e 01D5	R	Modo da tarefa de leitura de potência string 2	
236	20EB:00	01D6 e 01D7	R	Modo da tarefa de balanço de células	
237	20EC:00	01D8 e 01D9	R	Modo da tarefa de controle de temperatura	
238	20ED:00	01DA e 01DB	R	Modo de operação da tarefa de teste do PID	
239	20EE:00	01DC e 01DD	R	Contagem de erros registrados	
240	20EF:00	01DE e 01DF	R	Contagem de tarefas	
241	20F0:00	01E0 e 01E1	R/W	Contagem de falhas de operação	
242	20F1:00	01E2 e 01E3	R	Reservado	
243	20F2:00	01E4 e 01E5	R	Reservado	
244	20F3:00	01E6 e 01E7	R	Reservado	
245	20F4:00	01E8 e 01E9	R	Reservado	
246	20F5:00	01EA e 01EB	R	Reservado	

#	Índice:Sub-Índice CAN-Open [Hexadecimal]	Endereço Modbus [Hexadecimal]	R/W	Significado	Unidade/Definição
247	20F6:00	01EC e 01ED	R	Reservado	
248	20F7:00	01EE e 01EF	R	Reservado	
249	20F8:00	01F0 e 01F1	R	Reservado	
250	20F9:00	01F2 e 01F3	R	Reservado	
251	20FA:00	01F4 e 01F5	R	Reservado	
252	20FB:00	01F6 e 01F7	R	Reservado	
253	20FC:00	01F8 e 01F9	R	Reservado	
254	20FD:00	01FA e 01FB	R	Reservado	
255	20FE:00	01FC e 01FD	R	Reservado	
256	20FF:00	01FE e 01FF	R	Reservado	
257	2100:00	0200 e 0201	R	Reservado	
258	2101:00	0202 e 0203	R	Reservado	
259	2102:00	0204 e 0205	R	Reservado	
260	2103:00	0206 e 0207	R	Reservado	
261	2104:00	0208 e 0209	R	Reservado	
262	2105:00	020A e 020B	R	Reservado	
263	2106:00	020C e 020D	R	Reservado	

#	Índice:Sub-Índice CAN-Open [Hexadecimal]	Endereço Modbus [Hexadecimal]	R/W	Significado	Unidade/Definição
264	2107:00	020E e 020F	R	Reservado	
265	2108:00	0210 e 0211	R	Reservado	
266	2109:00	0212 e 0213	R	Reservado	
267	210A:00	0214 e 0215	R	Reservado	
268	210B:00	0216 e 0217	R	Reservado	
269	210C:00	0218 e 0219	R	Reservado	
270	210D:00	021A e 021B	R	Reservado	
271	210E:00	021C e 021D	R	Reservado	
272	210F:00	021E e 021F	R	Reservado	
273	2110:00	0220 e 0221	R	Reservado	
274	2111:00	0222 e 0223	R	Reservado	
275	2112:00	0224 e 0225	R	Reservado	
276	2113:00	0226 e 0227	R	Reservado	
277	2114:00	0228 e 0229	R	Reservado	
278	2115:00	022A e 022B	R	Reservado	
279	2116:00	022C e 022D	R	Reservado	
280	2117:00	022E e 022F	R	Reservado	

#	Índice:Sub-Índice CAN-Open [Hexadecimal]	Endereço Modbus [Hexadecimal]	R/W	Significado	Unidade/Definição
281	2118:00	0230 e 0231	R	Reservado	
282	2119:00	0232 e 0233	R	Reservado	
283	211A:00	0234 e 0235	R	Reservado	
284	211B:00	0236 e 0237	R	Reservado	
285	211C:00	0238 e 0239	R	Reservado	
286	211D:00	023A e 023B	R	Reservado	
287	211E:00	023C e 023D	R	Reservado	
288	211F:00	023E e 023F	R	Reservado	
289	2120:00	0240 e 0241	R	Reservado	
290	2121:00	0242 e 0243	R	Reservado	
291	2122:00	0244 e 0245	R	Reservado	
292	2123:00	0246 e 0247	R	Reservado	
293	2124:00	0248 e 0249	R	Reservado	
294	2125:00	024A e 024B	R	Reservado	
295	2126:00	024C e 024D	R	Reservado	
296	2127:00	024E e 024F	R	Reservado	
297	2128:00	0250 e 0251	R	Reservado	

#	Índice:Sub-Índice CAN-Open [Hexadecimal]	Endereço Modbus [Hexadecimal]	R/W	Significado	Unidade/Definição
298	2129:00	0252 e 0253	R	Reservado	
299	212A:00	0254 e 0255	R	Reservado	
300	212B:00	0256 e 0257	R	Reservado	
301	212C:00	0258 e 0259	R	Reservado	
302	212D:00	025A e 025B	R	Reservado	
303	212E:00	025C e 025D	R	Reservado	
304	212F:00	025E e 025F	R	Reservado	
305	2130:00	0260 e 0261	R	Reservado	
306	2131:00	0262 e 0263	R	Reservado	
307	2132:00	0264 e 0265	R	Reservado	
308	2133:00	0266 e 0267	R	Reservado	
309	2134:00	0268 e 0269	R	Reservado	
310	2135:00	026A e 026B	R	Reservado	
311	2136:00	026C e 026D	R	Reservado	
312	2137:00	026E e 026F	R	Reservado	
313	2138:00	0270 e 0271	R	Reservado	
314	2139:00	0272 e 0273	R	Reservado	

#	Índice:Sub-Índice CAN-Open [Hexadecimal]	Endereço Modbus [Hexadecimal]	R/W	Significado	Unidade/Definição
315	213A:00	0274 e 0275	R	Reservado	
316	213B:00	0276 e 0277	R	Reservado	
317	213C:00	0278 e 0279	R	Reservado	
318	213D:00	027A e 027B	R	Reservado	
319	213E:00	027C e 027D	R	Reservado	
320	213F:00	027E e 027F	R	Reservado	
321	2140:00	0280 e 0281	R	Reservado	
322	2141:00	0282 e 0283	R	Reservado	
323	2142:00	0284 e 0285	R	Reservado	
324	2143:00	0286 e 0287	R	Reservado	
325	2144:00	0288 e 0289	R	Reservado	
326	2145:00	028A e 028B	R	Reservado	
327	2146:00	028C e 028D	R	Reservado	
328	2147:00	028E e 028F	R	Reservado	
329	2148:00	0290 e 0291	R	Reservado	
330	2149:00	0292 e 0293	R	Reservado	
331	214A:00	0294 e 0295	R	Reservado	

#	Índice:Sub-Índice CAN-Open [Hexadecimal]	Endereço Modbus [Hexadecimal]	R/W	Significado	Unidade/Definição
332	214B:00	0296 e 0297	R	Reservado	
333	214C:00	0298 e 0299	R	Reservado	
334	214D:00	029A e 029B	R	Reservado	
335	214E:00	029C e 029D	R	Reservado	
336	214F:00	029E e 029F	R	Reservado	
337	2150:00	02A0 e 02A1	R	Reservado	
338	2151:00	02A2 e 02A3	R	Reservado	
339	2152:00	02A4 e 02A5	R	Tensão célula 1	V (multiplicador 1000)
340	2153:00	02A6 e 02A7	R	Tensão célula 2	V (multiplicador 1000)
341	2154:00	02A8 e 02A9	R	Tensão célula 3	V (multiplicador 1000)
342	2155:00	02AA e 02AB	R	Tensão célula 4	V (multiplicador 1000)
343	2156:00	02AC e 02AD	R	Tensão célula 5	V (multiplicador 1000)
344	2157:00	02AE e 02AF	R	Tensão célula 6	V (multiplicador 1000)
345	2158:00	02B0 e 02B1	R	Tensão célula 7	V (multiplicador 1000)
346	2159:00	02B2 e 02B3	R	Tensão célula 8	V (multiplicador 1000)
347	215A:00	02B4 e 02B5	R	Tensão célula 9	V (multiplicador 1000)
348	215B:00	02B6 e 02B7	R	Tensão célula 10	V (multiplicador 1000)

#	Índice:Sub-Índice CAN-Open [Hexadecimal]	Endereço Modbus [Hexadecimal]	R/W	Significado	Unidade/Definição
349	215C:00	02B8 e 02B9	R	Tensão célula 11	V (multiplicador 1000)
350	215D:00	02BA e 02BB	R	Tensão célula 12	V (multiplicador 1000)
351	215E:00	02BC e 02BD	R	Tensão célula 13	V (multiplicador 1000)
352	215F:00	02BE e 02BF	R	Tensão célula 14	V (multiplicador 1000)
353	2160:00	02C0 e 02C1	R	Tensão célula 15	V (multiplicador 1000)
354	2161:00	02C2 e 02C3	R	Tensão célula 16	V (multiplicador 1000)
355	2162:00	02C4 e 02C5	R	Tensão célula 17	V (multiplicador 1000)
356	2163:00	02C6 e 02C7	R	Tensão célula 18	V (multiplicador 1000)
357	2164:00	02C8 e 02C9	R	Tensão célula 19	V (multiplicador 1000)
358	2165:00	02CA e 02CB	R	Tensão célula 20	V (multiplicador 1000)
359	2166:00	02CC e 02CD	R	Tensão célula 21	V (multiplicador 1000)
360	2167:00	02CE e 02CF	R	Tensão célula 22	V (multiplicador 1000)
361	2168:00	02D0 e 02D1	R	Tensão célula 23	V (multiplicador 1000)
362	2169:00	02D2 e 02D3	R	Tensão célula 24	V (multiplicador 1000)
363	216A:00	02D4 e 02D5	R	Tensão célula 25	V (multiplicador 1000)
364	216B:00	02D6 e 02D7	R	Tensão célula 26	V (multiplicador 1000)
365	216C:00	02D8 e 02D9	R	Tensão célula 27	V (multiplicador 1000)

#	Índice:Sub-Índice CAN-Open [Hexadecimal]	Endereço Modbus [Hexadecimal]	R/W	Significado	Unidade/Definição
366	216D:00	02DA e 02DB	R	Tensão célula 28	V (multiplicador 1000)
367	216E:00	02DC e 02DD	R	Tensão célula 29	V (multiplicador 1000)
368	216F:00	02DE e 02DF	R	Tensão célula 30	V (multiplicador 1000)
369	2170:00	02E0 e 02E1	R	Tensão célula 31	V (multiplicador 1000)
370	2171:00	02E2 e 02E3	R	Tensão célula 32	V (multiplicador 1000)
371	2172:00	02E4 e 02E5	R	Tensão célula 33	V (multiplicador 1000)
372	2173:00	02E6 e 02E7	R	Tensão célula 34	V (multiplicador 1000)
373	2174:00	02E8 e 02E9	R	Tensão célula 35	V (multiplicador 1000)
374	2175:00	02EA e 02EB	R	Tensão célula 36	V (multiplicador 1000)
375	2176:00	02EC e 02ED	R	Tensão célula 37	V (multiplicador 1000)
376	2177:00	02EE e 02EF	R	Tensão célula 38	V (multiplicador 1000)
377	2178:00	02F0 e 02F1	R	Tensão célula 39	V (multiplicador 1000)
378	2179:00	02F2 e 02F3	R	Tensão célula 40	V (multiplicador 1000)
379	217A:00	02F4 e 02F5	R	Tensão célula 41	V (multiplicador 1000)
380	217B:00	02F6 e 02F7	R	Tensão célula 42	V (multiplicador 1000)
381	217C:00	02F8 e 02F9	R	Tensão célula 43	V (multiplicador 1000)
382	217D:00	02FA e 02FB	R	Tensão célula 44	V (multiplicador 1000)

#	Índice:Sub-Índice CAN-Open [Hexadecimal]	Endereço Modbus [Hexadecimal]	R/W	Significado	Unidade/Definição
383	217E:00	02FC e 02FD	R	Tensão célula 45	V (multiplicador 1000)
384	217F:00	02FE e 02FF	R	Tensão célula 46	V (multiplicador 1000)
385	2180:00	0300 e 0301	R	Tensão célula 47	V (multiplicador 1000)
386	2181:00	0302 e 0303	R	Tensão célula 48	V (multiplicador 1000)
387	2182:00	0304 e 0305	R	Tensão célula 49	V (multiplicador 1000)
388	2183:00	0306 e 0307	R	Tensão célula 50	V (multiplicador 1000)
389	2184:00	0308 e 0309	R	Tensão célula 51	V (multiplicador 1000)
390	2185:00	030A e 030B	R	Tensão célula 52	V (multiplicador 1000)
391	2186:00	030C e 030D	R	Tensão célula 53	V (multiplicador 1000)
392	2187:00	030E e 030F	R	Tensão célula 54	V (multiplicador 1000)
393	2188:00	0310 e 0311	R	Tensão célula 55	V (multiplicador 1000)
394	2189:00	0312 e 0313	R	Tensão célula 56	V (multiplicador 1000)
395	218A:00	0314 e 0315	R	Tensão célula 57	V (multiplicador 1000)
396	218B:00	0316 e 0317	R	Tensão célula 58	V (multiplicador 1000)
397	218C:00	0318 e 0319	R	Tensão célula 59	V (multiplicador 1000)
398	218D:00	031A e 031B	R	Tensão célula 60	V (multiplicador 1000)
399	218E:00	031C e 031D	R	Tensão célula 61	V (multiplicador 1000)

#	Índice:Sub-Índice CAN-Open [Hexadecimal]	Endereço Modbus [Hexadecimal]	R/W	Significado	Unidade/Definição
400	218F:00	031E e 031F	R	Tensão célula 62	V (multiplicador 1000)
401	2190:00	0320 e 0321	R	Tensão célula 63	V (multiplicador 1000)
402	2191:00	0322 e 0323	R	Tensão célula 64	V (multiplicador 1000)
403	2192:00	0324 e 0325	R	Tensão célula 65	V (multiplicador 1000)
404	2193:00	0326 e 0327	R	Tensão célula 66	V (multiplicador 1000)
405	2194:00	0328 e 0329	R	Tensão célula 67	V (multiplicador 1000)
406	2195:00	032A e 032B	R	Tensão célula 68	V (multiplicador 1000)
407	2196:00	032C e 032D	R	Tensão célula 69	V (multiplicador 1000)
408	2197:00	032E e 032F	R	Tensão célula 70	V (multiplicador 1000)
409	2198:00	0330 e 0331	R	Tensão célula 71	V (multiplicador 1000)
410	2199:00	0332 e 0333	R	Tensão célula 72	V (multiplicador 1000)
411	219A:00	0334 e 0335	R	Tensão célula 73	V (multiplicador 1000)
412	219B:00	0336 e 0337	R	Tensão célula 74	V (multiplicador 1000)
413	219C:00	0338 e 0339	R	Tensão célula 75	V (multiplicador 1000)
414	219D:00	033A e 033B	R	Tensão célula 76	V (multiplicador 1000)
415	219E:00	033C e 033D	R	Tensão célula 77	V (multiplicador 1000)
416	219F:00	033E e 033F	R	Tensão célula 78	V (multiplicador 1000)

#	Índice:Sub-Índice CAN-Open [Hexadecimal]	Endereço Modbus [Hexadecimal]	R/W	Significado	Unidade/Definição
417	21A0:00	0340 e 0341	R	Tensão célula 79	V (multiplicador 1000)
418	21A1:00	0342 e 0343	R	Tensão célula 80	V (multiplicador 1000)
419	21A2:00	0344 e 0345	R	Registrador para testes	