

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA

RAFAEL DE SOUSA SANTOS

**PROPOSTA DE DESENVOLVIMENTO DE UM IED PARA MEDIÇÕES
DE DESCARGAS PARCIAIS A BAIXO CUSTO**

Uberlândia

2024

RAFAEL DE SOUSA SANTOS

**PROPOSTA DE DESENVOLVIMENTO DE UM IED PARA MEDIÇÕES
DE DESCARGAS PARCIAIS A BAIXO CUSTO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Eletrônica e de telecomunicações.

Orientador: Prof. Dr. Alan Petrônio Pinheiro

Uberlândia

2024

RAFAEL DE SOUSA SANTOS

**PROPOSTA DE DESENVOLVIMENTO DE UM IED PARA MEDIÇÕES
DE DESCARGAS PARCIAIS A BAIXO CUSTO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Eletrônica e de Telecomunicações.

Uberlândia, 07 de maio de 2024

Banca Examinadora:

Orientador – Prof. Dr. Alan Petrônio Pinheiro (UFU)

Examinador – Prof. Dr. Daniel Pereira de Carvalho (UFU)

Examinador – Prof. Dr. Lorenzo Santos Vasconcelos (UFU)

Dedico este trabalho aos meus pais pelo apoio e
confiança dado a todo momento dessa etapa da
vida.

AGRADECIMENTOS

Dedico este trabalho primeiramente à minha mãe, Vilma, que foi a minha maior apoiadora em toda essa jornada e sempre me incentivou a nunca desistir, mesmo quando o cenário não estava favorável. Também dedico ao meu pai, Cristovam, que, junto com minha mãe, me proporcionou a possibilidade de me dedicar integralmente à minha formação, e ao meu irmão, Lucas, que sempre me ajudou quando estava ao seu alcance. Dedico também à minha namorada, Mestra Andreia, que chegou em minha vida no momento mais decisivo e cuja presença foi muito significativa para o resultado aqui obtido, por todo apoio, orientação, suporte e incentivo para que essa última etapa da minha jornada na graduação fosse concluída com sucesso.

Agradeço ao meu orientador, Professor Doutor Alan, por me dar o grande desafio de desenvolver este equipamento sozinho. Agradeço ao Laboratório de Redes Inteligentes por disponibilizar a infraestrutura para o desenvolvimento deste trabalho. Por fim, agradeço à Petrobras e à UFU por financiarem este projeto de P&D-ANEEL nº PD-00553-0071/2021, que permitiu a realização do sonho de vários engenheiros, que em sua maioria sonham, desde a infância, em construir algo que seja relevante e contribua positivamente para a sociedade. O projeto também contou com o suporte da SEL Inc.

“Quando tudo parecer estar contra você,
lembre-se que o avião decola contra o vento, não
com a ajuda dele.”
(HENRY FORD)

RESUMO

Neste trabalho, foi proposta uma prova de conceito de um sistema de aquisição de dados para descargas parciais. Trata-se de um sistema composto por elementos de hardware e software que constituem um IED, incluindo um módulo de aquisição, uma unidade de processamento de dados e uma interface homem-máquina. Essas características, aliadas a diversos recursos de conectividade e mobilidade, visam criar um dispositivo para uso em campo.

O sistema foi submetido a testes com o objetivo de avaliar sua capacidade de aquisição de dados e determinar a viabilidade mínima do sistema, bem como suas limitações, principalmente. Os resultados preliminares indicaram um sistema capaz de registrar alguns pulsos, porém com uma série de limitações quanto ao registro. Quanto à usabilidade do projeto do IED, o sistema foi considerado relevante e promissor, uma vez que reúne em um único conjunto físico elementos de processamento sofisticados, interfaces de comunicação avançadas e todos os acessórios básicos que conferem ao sistema autonomia para uso em atividades de campo. Todos esses elementos contribuem para criar uma estrutura tecnológica de suporte para trabalhos em campo relacionados a medições elétricas.

Palavras-chave: IED, Aquisição de sinais elétricos, Computador de Placa Única, Descargas Parciais, Desenvolvimento de Software.

ABSTRACT

In this work, a proof of concept of a data acquisition system for partial discharges was proposed. It is a system composed of hardware and software elements that make up an IED, including an acquisition module, a data processing unit and a human-machine interface. These characteristics, combined with several connectivity and mobility features, aim to create a device for use in the field.

The system was submitted to tests with the objective of evaluating its data acquisition capacity and determining the minimum feasibility of the system, as well as its limitations, mainly. The preliminary results indicated a system capable of recording some pulses, but with a number of limitations regarding recording. As for the usability of the IED project, the system was considered relevant and promising, since it brings together in a single physical set sophisticated processing elements, advanced communication interfaces and all the basic accessories that give the system autonomy for use in field activities. All these elements contribute to creating a technological support structure for field work related to electrical measurements.

Keywords: IED, Electrical Signal Acquisition, Single Board Computer, Partial Discharges, Software Development.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 -	Descarga de corona	15
Figura 2 -	Carbonização interna no cabo e caminho de penetração na junção do cabo	15
Figura 3 -	Tipos de danos ao isolante provocado por diferentes tipos de defeitos	16
Figura 4 -	Cavidade localizada no interior do material isolante	17
Figura 5 -	Aspecto da arborescência elétricas	17
Figura 6 -	Sensor HFCT	19
Figura 7 -	Sensor FMC	19
Figura 8 -	Sonda de corrente AC	20
Figura 9 -	Exemplo de amostragem de um sinal	21
Figura 10 -	Exemplo do efeito <i>aliasing</i>	22
Figura 11 -	Elementos do osciloscópio	24
Figura 12 -	Elementos do projeto	26
Figura 13 -	Visão geral do equipamento	27
Figura 14 -	Diagrama elétrico do agregador	28
Figura 15 -	Fonte AC/DC utilizada no projeto	29
Figura 16 -	Tomadas de tensão para alimentação 24V _{DC}	31
Figura 17 -	Célula lítio íon 18650	32
Figura 18 -	Distribuição das células	35
Figura 19 -	Banco de baterias montado	35
Figura 20 -	Modulo BMS	36
Figura 21 -	Banco de baterias conectado ao BMS	37
Figura 22 -	Alteração do BMS para suportar 4 células em série	37
Figura 23 -	Modulo conversor DC – DC step down carregador	38
Figura 24 -	Modulo DC – DC ajuste de tensão	38
Figura 25 -	Modulo DC – DC ajuste de corrente	39
Figura 26 -	Circuito <i>ORing</i>	39
Figura 27 -	Modulo conversor DC – DC step down 300W.....	40
Figura 28 -	Modulo conversor DC – DC step down 300W ajuste de tensão	40

Figura 29 -	Modulo conversor DC – DC step down 300W ajuste de corrente	41
Figura 30 -	Ventoinha 60 mm	41
Figura 31 -	Tela sensível ao toque de 10.1 polegadas	42
Figura 32 -	Placa SBC Up Xtreme	43
Figura 33 -	Modulo Connect Plus	44
Figura 34 -	Adaptado <i>docking</i> 2	45
Figura 35 -	Osciloscópio digital	46
Figura 36 -	Peças metálicas que compõem o agregador	47
Figura 37 -	Suporte de apoio central	48
Figura 38 -	Estrutura em “U”	48
Figura 39 -	Canaletas de fixação das laterais	48
Figura 40 -	Tampa de acesso ao interior	49
Figura 41 -	Suporte de parede e pé de apoio	49
Figura 42 -	Estrutura metálica de sustentação	50
Figura 43 -	Fluxo de trabalho da aplicação	51
Figura 44 -	Fluxo de trabalho da biblioteca HTHardDll.dll	52
Figura 45 -	Tela principal da aplicação	53
Figura 46 -	Calibrador de pulso	55
Figura 47 -	RIGOL DS6062	56
Figura 48 -	Arranjo experimental	56
Figura 49 -	Configuração do calibrador de pulso (a) 400pC e (b) 800pC	57
Figura 50 -	Nível de tensão do banco de baterias antes do carregamento	59
Figura 51 -	Conversor DC-DC indicando o consumo de corrente	59
Figura 52 -	Verificação da tensão e corrente durando	60
Figura 53 -	Imagem infravermelho (a) conversor DC-DC, (b) BMS e (c) banco de baterias	60
Figura 54 -	Sistema de balanceamento de células em funcionamento	61
Figura 55 -	Corrente na saída no conversor DC-DC	61
Figura 56 -	Luz de indicação de término de carregamento do conversor DC-DC	62
Figura 57 -	Tensão elétrica do banco de baterias ao final do carregamento .	62
Figura 58 -	Arranjo de teste de duração do banco de baterias	63

Figura 59 -	Arranjo de teste de estresse	64
Figura 60 -	Janela de monitoramento do teste de estresse	65
Figura 61 -	Foto infravermelho (a) fonte de alimentação, (b) SBC e (c) osciloscópio	66
Gráfico 1 -	FFT do sinal há 400pC	57
Gráfico 2 -	FFT do sinal há 800pC	58
Gráfico 3 -	Telemétrica da SBC	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Relação de consumo elétricos de todo equipamento	29
Tabela 2 -	Especificações da fonte	30
Tabela 3 -	Especificações célula lítio íon 18650.....	32
Tabela 4 -	Especificações do banco de baterias	34
Tabela 5 -	Especificações Single Board Computer	43
Tabela 6 -	Especificações modulo Connect Plus	44
Tabela 7 -	Taxa de amostragem há 1Gsa/s	46
Tabela 8 -	Plano de teste de validação do sistema	56

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ARM	Advanced RISC Machine
BMS	Battery Management Systems
BW	BandWidth
CAD	Computer Aided Design
CISC	Complex Instruction Set Computer
DLL	Dynamic Link Library
DP	Descarga Parcial
EMI	Electromagnetic Interference
ETs	Electrical Treeing
FMC	Flexible Magnetic Coupler
GPIB	General Purpose Interface Bus
HFCT	High Frequency Current Transformer
IED	Intelligent Electronic Device
OEM	Original Equipment Manufacturer
PLA	Polímero do tipo Ácido Polilático
RAM	Random Access Memory
RISC	Reduced Instruction Set Computer
SBC	Single Board Computer
SO	Sistema Operacional
XLPE	Cross Linked Polyethylene Cable

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Objetivo.....	13
1.2	Limitações e convenções	14
1.3	Estrutura do trabalho.....	15
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	16
2.1	Descarga parcial em condutores elétricos.....	16
2.2	Sensores para medição de descargas parciais.....	20
2.3	Aquisição de dados digitais e O osciloscópio digital	22
2.4	Trabalhos correlatos.....	25
3	METODOLOGIA.....	27
3.1	Requisitos do sistema.....	27
3.2	Visão geral e arquitetura.....	27
3.3	Materiais e métodos.....	29
3.3.1	Projeto do sistema elétrico interno do IED	29
3.3.2	Sistema de arrefecimento	44
3.3.3	Tela sensível ao toque.....	45
3.3.4	Single Board Computer	45
3.3.5	Osciloscópio digital	48
3.3.6	Projeto estrutural	49
3.4	Algoritmo	53
3.5	Validação do sistema	56
4	RESULTADOS	57
4.1	Aquisição de dados	57
4.2	Carregamento do banco de baterias	60
4.3	Descarregamento do banco de baterias	65
4.4	Estresse e estabilidade	66
5	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	69
	REFERÊNCIAS	70

1 INTRODUÇÃO

Para garantir a contínua operação da malha elétrica, é fundamental dispor de um sistema capaz de capturar e analisar sinais em ativos, uma vez que falhas inesperadas podem comprometer as operações e resultar em grandes prejuízos. Uma ferramenta de grande interesse nesse sentido é a medição do fenômeno de descarga parcial ao longo do período de operação. Em termos simplificados, a Descarga Parcial (DP) refere-se à ionização de um gás ou fluido na presença de uma grande concentração de carga, provocando um arco elétrico.

Com o avanço das tecnologias de eletrônica e computação, os sistemas de detecção de DP tornaram-se cada vez mais sofisticados, especialmente em relação à sua sensibilidade, embora também tenham se tornado mais dispendiosos devido ao uso de componentes de alto custo e processos de fabricação mais refinados. Esses avanços contribuíram para melhorias na avaliação de equipamentos em campo, que geralmente enfrentam condições ambientais adversas.

Assim como ocorre em diversas áreas científicas, a redução de custos e a acessibilidade na aquisição de computadores, aliadas aos benefícios proporcionados pelos avanços no processamento de informações, têm oferecido diversas alternativas para o desenvolvimento de sistemas de aquisição. Este trabalho visa reunir várias tecnologias acessíveis em um único equipamento de baixo custo de produção, capaz de capturar e armazenar sinais, buscando melhorias, facilidade e mobilidade para as medições realizadas. Especificamente no setor elétrico, esses equipamentos, dotados de eletrônica embarcada, capacidade de processamento e análise, são denominados IEDs (*inteligente electronic device*).

1.1 Objetivo

A proposta principal deste trabalho é desenvolver e implementar uma prova de conceito de um equipamento que possa realizar registros elétricos básicos, utilizando um osciloscópio, juntamente com recursos computacionais integrados em uma mesma infraestrutura física e lógica, que possa servir como o embrião de um sistema para medição de descarga parcial em campo. Para isso, o sistema foi desenvolvido com base na filosofia de projeto Original Equipment Manufacturer (OEM) e consiste, essencialmente, em um osciloscópio digital

controlado por um computador de placa única, permitindo a aquisição de dados elétricos para posterior análise. Diante deste objetivo principal, decorrem outros, a saber:

- Montar um sistema de aquisição de dados elétricos e avaliar sua pertinência para medição de descargas parciais;
- Montar um ecossistema eletrônico essencial para dar independência de uso ao equipamento para trabalho em campo;
- Projetar um encapsulamento mecânico que viabilize a integridade física e funcional de todos os itens em um único *case*;
- Dispor de um conjunto elétrico com redundância de alimentação;
- Favorecendo a mobilidade do protótipo aqui proposto, facilitando o uso do operador em campo;
- Baixo custo em relação a equipamentos já existentes no mercado.

1.2 Limitações e convenções

Este trabalho estabelece as seguintes convenções:

- 1) Todo o desenvolvimento aqui proposto se trata de prova de conceito e projeto conceitual, sendo o relato de seus usuários os principais elementos de *feedback* e sendo eles os principais e suficientes para estabelecer o alcance ou não de alguns objetivos;
- 2) Embora um dos objetivos seja a medição de descarga parcial, este trabalho ficará restrito ao uso de um modelo construtivo tipo OEM (*Original Equipment Manufacturer*) de osciloscópio, que será integrado à plataforma tecnológica aqui proposta e usado para avaliar se existe potencial de uso deste tipo de arquitetura para análise de descarga parcial. Logo, o foco está mais associado a identificar o potencial do que na qualificação do resultado propriamente dito.

Quanto às limitações, podem-se também citar:

- 1) Mesmo que o equipamento proposto seja para uso em campo, os testes feitos restringiram-se a testes de laboratório, em ambiente controlado e usando um "gerador de DPs". Logo, este trabalho apenas lança as bases iniciais para alcance do objetivo, cabendo a outros trabalhos futuros, chegar cada vez mais próximo do objetivo de medição em campo de maneira autônoma;
- 2) Não foram realizados testes de repetibilidade e por longos prazos, especialmente os testes de estresse. Logo, não foi possível fazer avaliações estatísticas de desempenho e identificação de tempo médio entre falhas.

1.3 Estrutura do trabalho

O presente trabalho está dividido em 5 capítulos. O Capítulo 2, é apresentada uma fundamentação teórica sobre o fenômeno de descarga parcial, juntamente com o sistema de aquisição de dados. Já o Capítulo 3, é exposto todo o processo necessário para a construção do equipamento aqui proposto e o desenvolvimento dos elementos de *software* do mesmo. O Capítulo 4 apresenta e discute os resultados obtidos de diversos testes realizados. Por fim, o Capítulo 5 descreve as conclusões obtidas no desenvolvimento do Agregador, juntamente com os resultados esperados e propostas de melhorias futuras.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Descarga parcial em condutores elétricos

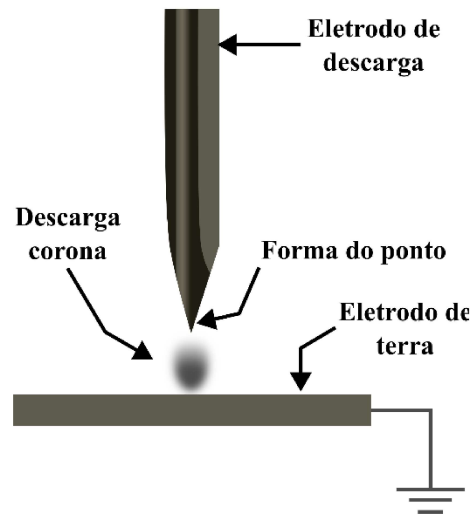
Em uma região preenchida com um elemento dielétrico, como o ar, na presença de um elevado campo elétrico, tem-se a ocasionar o surgimento de uma descarga elétrica [1]. A Descarga Parcial (DP) se assemelha a esse fenômeno, porém é denominada parcial pois não resulta na ionização total do material, não levando à ruptura do isolante. Sua forma apresenta-se como pulso com duração geralmente inferior a $1\ \mu\text{s}$ [1 – 3].

Os materiais dielétricos, também conhecidos como isolantes, diferem dos materiais condutores, por não possuírem cargas livres. Por consequência, esses materiais dispõem baixa condutividade elétrica. No entanto, todo o conjunto de carga encontra-se presa a sua estrutura molecular através das forças de Coulomb [4][5]. Quando um dielétrico é submetido a um campo elétrico acentuado, inicia-se o processo de retirada dos elétrons, convertendo-o em um material condutor, este fenômeno é conhecido como ruptura dielétrica.

A ruptura dielétrica pode ocorrer em inúmeros tipos de matérias, incluindo sólidos, líquidos e gases, e é influenciada por condições ambientais como umidade e temperatura, bem como pelo tempo de exposição do material ao campo elétrico. Há uma certa tolerância que associa à intensidade do campo elétrico e ao valor máximo suportado pelos dielétricos, o qual é chamado rigidez dielétrica [5]. Quando um material isolante é exposto a um elevado campo elétrico, favorece-se o surgimento de descargas internas em micro cavidades presentes no material. Com o passar do tempo, essas descargas podem evoluir até atingirem dimensões equivalentes à espessura do isolante paredes do isolamento resultando em uma falha do cabo [1].

As DPs possuem a forma de um impulso com duração inferior a $1\ \mu\text{s}$, sendo classificadas como: interna, de superfície ou corona. [1]. As DPs de corona resultam na geração de luz provocada pela ionização do ar entre o condutor de alta tensão e o plano de terra, conforme mostrado na Figura 1. Do ponto de vista de descarga elétrica, esse fenômeno é consequência da ionização de um fluido, como o ar presente em torno de um condutor carregado eletricamente.

Figura 1 – Descarga de corona



Fonte: Adaptado de Rosle, 2021 [6].

Diversos estudos revelam que as descargas de corona são provocadas indiretamente pelo cabo ou suas extremidades, mas também podem ocorrer em conexões com disjuntores ou entre a conexão do cabo e o terminal. As descargas de superfície acontecem na estrutura de isolamento de um arranjo de alta tensão. Ela se localiza na superfície do material dielétrico sólido, como mostrado na Figura 2, sendo provocadas por processos de deterioração, como a corrosão.

Figura 2 – Carbonização interna no cabo e caminho de penetração na junção do cabo

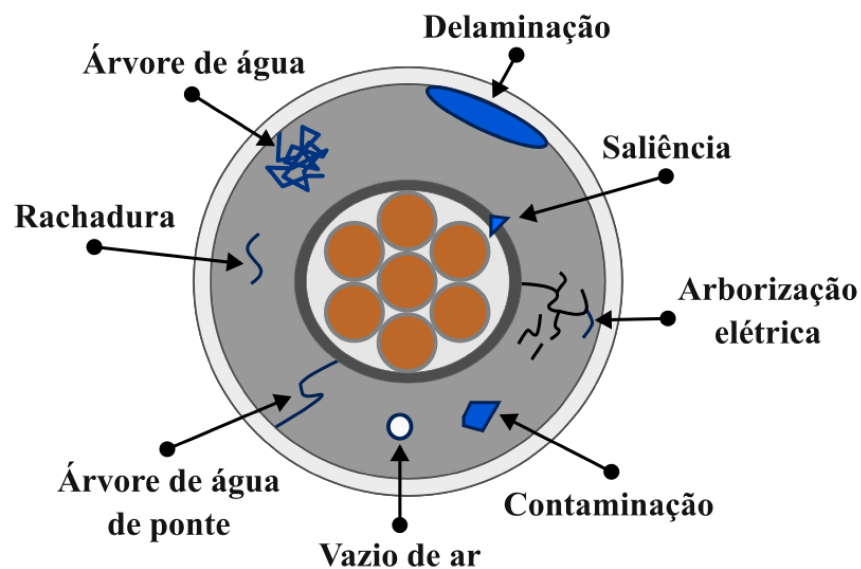


Fonte: Shahsavarian, 2021 [7].

A ocorrência dessa descarga acelera o processo de desgaste da superfície do isolamento. Em cabos com isolamento que utilizam polietileno reticulado, *cross linked polyethylene cable* (XLPE), por exemplo, a descarga superficial resulta do aumento da componente tangencial do campo elétrico, que excede o campo presente na superfície do material. As descargas de superfície ocorrem devido a condições como o tipo de tensão a que o condutor está exposto, os elementos envolvidos na construção do isolamento e fatores ambientais como pressão e umidade.

A descarga interna ocorre no interior do material isolante, sendo, portanto, difícil de diagnosticar visualmente e identificar o ponto exato de ocorrência em comparação com outros tipos de descargas. Defeitos no isolamento podem apresentar diferentes formas e resultar em uma descarga interna, como mostrado na Figura 3, onde cada tipo de defeito possui seu próprio modelo de DP que o caracteriza.

Figura 3 – Tipos de danos ao isolante provocados por diferentes tipos de defeitos

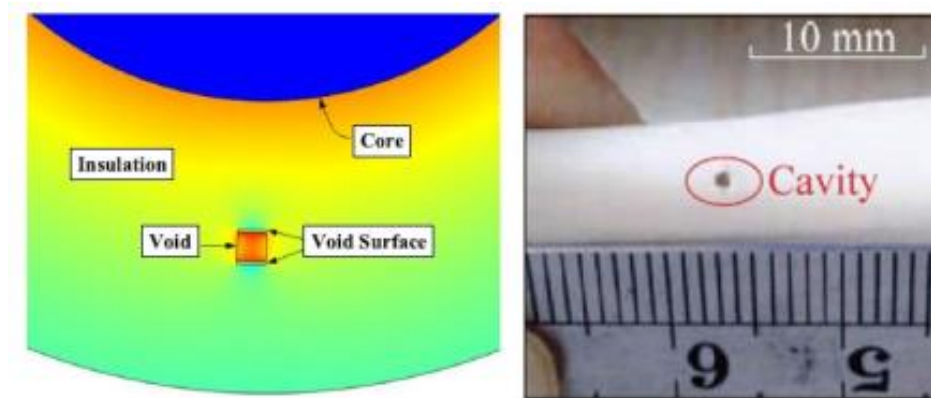


Fonte: Adaptado de Rosle, 2021 [6].

As cavidades são um defeito interno comum, conforme mostrado na Figura 4, e se originam entre o condutor e o material isolante ou no interior do material dielétrico. A presença de um grande campo elétrico no interior dessas lacunas, preenchidas com elementos gasoso (como o ar), provoca o início das descargas internas, devido às permissividades diferentes entre a composição dos gases e a do material isolante. A quantidade de energia liberada na descarga

depende de fatores como a dimensão, o formato, a posição da lacuna, a composição do gás e das extremidades da lacuna, bem como da tensão elétrica presente no interior isolamento.

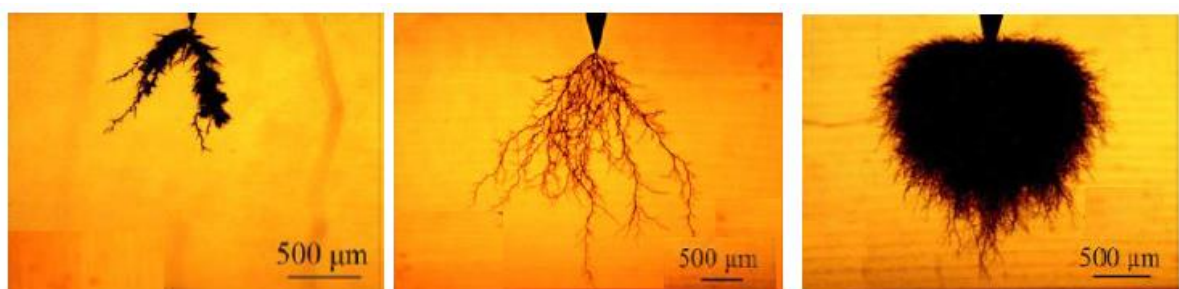
Figura 4 – Cavidade localizada no interior do material isolante



Fonte: Shabsavarian, 2021 [7].

Arborescência de água e elétrica são formas de árvores elétricas condutoras (ETs) que se formam devido à alta intensidade do campo elétrico ao redor de cavidades vazias. Essas arborescências constituem os principais caminhos que levam à falha no material isolante do cabo, conforme mostrado na Figura 5. A presença de DP no interior dos “galhos” das árvores em evolução promove o crescimento das trilhas por todo o isolamento. A intensidade do campo elétrico e a permissividade do material aplicado determina a forma das arborescências.

Figura 5 – Aspecto de arborescências elétricas



Fonte: Shabsavarian, 2021 [7].

Os condutores elétricos podem apresentar imperfeições, como pontas afiadas ou irregularidades na bainha de aterramento, conhecidas como saliências, que podem interromper a uniformidade do campo elétrico e provocar DPs em locais de campo elétrico intenso. As

saliências são imperfeições frequentemente criadas em juntas ou terminações. Em um ambiente contendo apenas ar, essas saliências têm menor efeito nocivo, produzindo descargas de corona. No entanto quando localizadas na blindagem do condutor ou do isolante, elas podem degradar a resistência do isolamento e ocasionar a formação de árvores elétricas.

2.2 Sensores para medição de descargas parciais

O estudo de DPs exige a utilização de sensores específicos, uma vez que este fenômeno apresenta características distintas de outros tipos de sinais, como elevada frequência, curto tempo de duração e alta densidade de carga instantânea.

O *High Frequency Current Transformer* (HFCT), representado na Figura 6, é uma bobina de indução com núcleo ferromagnético projetada para a medição de sinais transitórios, como aqueles gerados por uma DP [8]. Esse dispositivo pode ser fixado ao redor do núcleo do cabo, mas é comumente instalado na bainha de aterramento, permitindo uma melhor relação sinal-ruído [9] [10]. O sensor opera a partir da corrente dos pulsos de DP que fluem pelo cabo elétrico através do enrolamento primário, que serve como entrada. A saída do sensor apresenta uma corrente proporcional à corrente de entrada, obtida a partir de um resistor de carga que converte a tensão induzida no secundário em corrente. Esta corrente é então medida pelo instrumento de análise [8] [11].

Figura 6 – Sensor HFCT



Fonte: O autor.

Outro sensor comumente utilizado é o *Flexible Magnetic Coupler* (FMC), mostrado na Figura 7. Este sensor de detecção de DP funciona com base em um acoplamento magnético direto com os condutores elétricos ou a blindagem. Na ocorrência de uma DP, um pulso eletromagnético é captado pelo FMC. Diferente do HFCT, o FMC não possui um núcleo ferromagnético, o que evita a saturação em elevadas correntes de carga durante a operação normal, mantendo a sensibilidade [12][13][14].

Figura 7 – Sensor FMC



Fonte: O autor.

Durante o processo de aquisição de uma DP no condutor elétrico a ser analisado, pode-se medir simultaneamente um sinal de 60Hz, proveniente da rede elétrica, para melhor precisão no rastreamento da fase em que ocorre o fenômeno. Para isso, foi utilizado o sensor Rogowski [15]. Este sensor capta o sinal através da variação de corrente (di/dt), sendo composto por uma bobina toroidal com núcleo de ar e um integrador, conforme mostrado na Figura 8. O sensor Rogowski é capaz de aferir impulsos de alta velocidade em corrente alternada, seu princípio físico segue as leis de Ampere e Faraday [15].

Figura 8 – Sonda de corrente AC



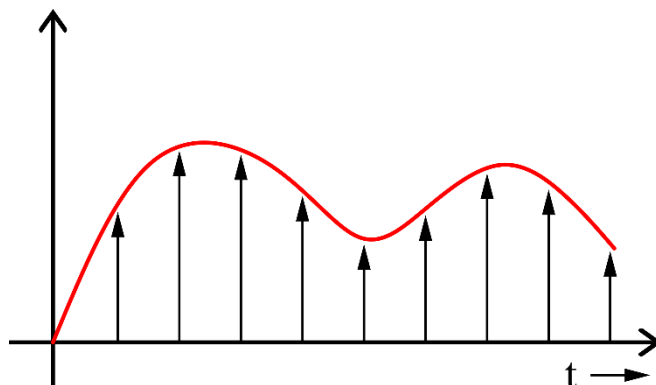
Fonte: O autor.

Os métodos de medição de descarga parcial podem ser realizados de duas formas: o sistema *online* e *offline*. O sistema *online* ocorre em uma malha elétrica ativa, responsável pela distribuição de energia para plantas industriais ou para o abastecimento de cidades. Nesse tipo de medição, pode haver diversas fontes de ruídos, e geralmente o objetivo é analisar se o condutor apresenta algum tipo de dano no isolamento. O sistema *offline*, por outro lado, é realizado em um ambiente laboratorial com exposição controlada a ruído, facilitando a aquisição próxima do ideal de uma DP. Este método tem como objetivo a caracterização do fenômeno físico, permitindo o desenvolvimento de ferramentas precisas de análise.

2.3 Aquisição de dados digitais e osciloscópio digital

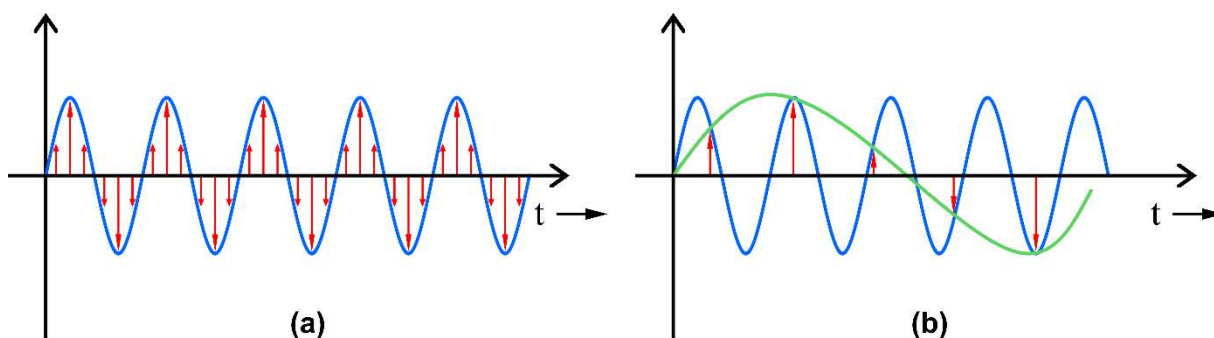
Analisar um sinal é um processo essencial para determinar o comportamento de um sistema, permitindo o estudo de seu comportamento e a identificação de possíveis falhas. Para que a análise dos sinais utilizando ferramentas computacionais seja viável, é necessário amostrá-los previamente. Este processo visa converter o sinal inicialmente analógico em um sinal digital [16 – 17]. Para que essa operação seja bem-sucedida, é necessário seguir o critério de Nyquist. Segundo este critério, se um sinal contínuo no tempo possui uma frequência máxima de B Hz, para que ele seja reconstruído corretamente é necessário amostrá-lo a uma taxa maior que $2B$ Hz. Assim, a reconstrução a partir de suas amostras será possível se $f_s > 2B$, onde f_s é a frequência de amostragem. Um exemplo pode ser visto na Figura 9.

Figura 9 – Exemplo de amostragem de um sinal



Fonte: Adaptado de Oppenheim, 2010 [17].

Um efeito indesejado, denominado *aliasing*, pode ocorrer se a frequência de amostragem for menor que duas vezes a frequência do sinal ($f_s < 2B$). A subamostragem provoca distorções que impedem a reconstrução correta do sinal, como ilustrado na Figura 10.

Figura 10 – Exemplo do efeito *aliasing*

Fonte: Adaptado de Oppenheim, 2010 [17].

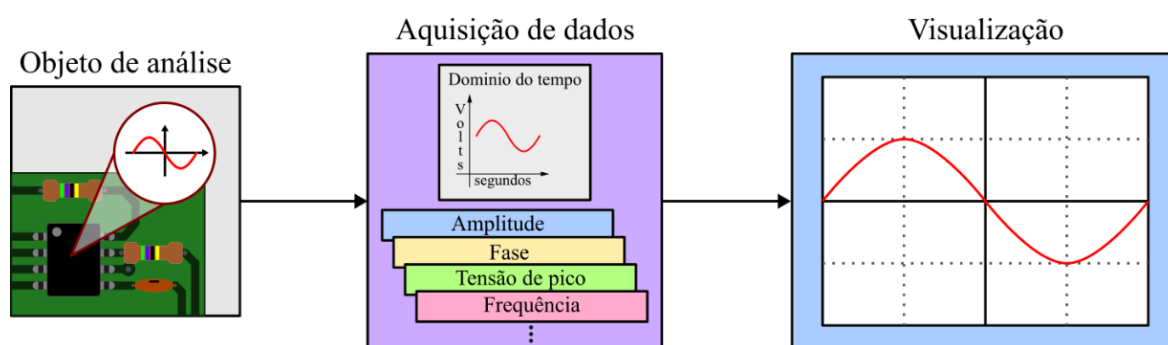
Dentro do universo dos equipamentos de medição elétrica, voltímetro e amperímetro são os mais conhecidos. Eles podem ser encontrados como dispositivos isolados ou integrados em um único dispositivo conhecido como multímetro, que é capaz de realizar leituras instantânea do objeto de análise. Por outro lado, existe o osciloscópio, que realiza a mesma tarefa de um voltímetro, mas permite a análise temporal através do armazenamento de uma determinada janela de tempo ajustável do sinal medido em um buffer de dados. Esses dados

podem ser exibidos na tela do próprio aparelho ou exportados para análise em outro dispositivo [18].

A capacidade do osciloscópio de realizar análises no domínio do tempo permite o estudo de características do sinal, como a amplitude, que representa o nível de tensão elétrica do sinal possibilitando a verificar tensão de pico, tensão entre picos, tensão eficaz e componentes contínuas e alternadas, conforme mostrado na Figura 11. A análise no domínio do tempo permite estudar o período do sinal ou a fase entre dois sinais diferentes. Além disso, é possível realizar análise no domínio da frequência, visualizando as componentes espectrais, que auxilia na identificação de ruídos presentes no sinal [16].

Algumas características do dispositivo devem ser consideradas antes de escolher um modelo para uma aplicação específica, como largura de banda (*BandWidth*, BW). A BW especifica a máxima frequência do sinal que pode ser analisado e é comum encontrar equipamentos que operem na faixa de 20 a 30 MHz, podendo chegar a GHz em osciloscópios em alguns modelos. A BW representa a frequência onde o sinal de entrada sofre uma perda de 70.7% da amplitude, correspondendo a -3dB. A frequência de amostragem refere-se ao número de amostras gravadas por segundo, representando a precisão do osciloscópio; quanto maior esse valor, melhor o nível de detalhes capturado de um sinal, especialmente aqueles com rápidas variações. Durante a operação, a frequência de amostragem está vinculada à divisão de tempo que o dispositivo registra, mantendo o número de pontos aferidos do sinal constante.

Figura 11 – Elementos do osciloscópio



Fonte: O autor.

Segundo o teorema de Nyquist, para que seja possível reconstruir um sinal corretamente, a frequência de amostragem deve ser pelo menos duas vezes a maior componente espectral do sinal. No entanto, isso é válido apenas para sinais repetitivos. Em aplicações reais, onde o sinal

analisado pode apresentar ruído e pequenas variações, aplicar apenas a condição do teorema de Nyquist não é suficiente. Desta maneira é fundamental que a frequência de amostragem seja ao menos cinco vezes maior que a maior frequência presente no sinal a ser analisado [18].

A profundidade de memória é um fator importante na escolha do dispositivo para uma aplicação, pois determina a quantidade de informação do sinal que pode ser retida a cada registro. Cada canal possui uma quantidade fixa de memória disponível, e alguns modelos permitem combinar toda a memória em um canal para aquisições com grande quantidade de pontos.

2.4 Trabalhos correlatos

Com a evolução da indústria de informática e eletrônica, surgiram ferramentas de medição mais avançadas e poderosas que podem ser utilizadas para monitorar e diagnosticar equipamentos. A disponibilidade de computadores potentes a baixo custo e a infinidade de dispositivos eletrônicos permite a aquisição, condicionamento e processamento de sinais muito fracos, utilizando análise estatística e outras técnicas matemáticas. Como resultado, dispositivos especiais podem ser desenvolvidos para ajudar os engenheiros a decidir antecipadamente o melhor momento para reparar ou substituir os equipamentos mais importantes e caros, contribuindo para aumentar a segurança geral do sistema elétrico.

Este panorama aborda avanços significativos na aquisição e análise de dados de DPs. Em 1998, Z. Berler destacou o desenvolvimento de analisadores de descargas parciais com utilizando osciloscópio com faixa de frequência de 20MHz [19]. Uma inovação importante foi a capacidade de adquirir dados de DP e construir digitalmente utilizando um osciloscópio digital comum com a interface *General Purpose Interface Bus* (GPIB) [20]. No entanto, a disponibilidade de osciloscópios com largura de banda que atinja a escala de GHz tem sido uma consideração fundamental, tornando adequada a detecção de pulsos de DP em frequências com largura de banda de até 1 GHz [21]. Observou-se um desenvolvimento notável no uso de osciloscópios com quantidades modestas de memória, embora esse tenha sido um fator limitante [22]. Devido a limitada largura de banda dos osciloscópios na época, muitas vezes era difícil medir a verdadeira magnitude dos pulsos, que apareciam apenas brevemente na tela do osciloscópio [23].

Em 2008, foi investigado a viabilidade do uso de um osciloscópio digital equipado com um sistema de memória de armazenamento massivo para detectar e analisar informações de DP [24]. Essa abordagem foi ampliada com o uso de digitalizadores de alta velocidade, como o NI 5112, que oferece taxa de amostragem, memória e largura de banda adequadas para as exigências do sistema [25]. Estudos recentes têm investigado o início de DPs sob aplicação de tensão de pulso, empregando osciloscópios padrões e análises de dados em Matlab [26]. Por fim, é importante ressaltar que a aquisição da tensão de saída do sensor flexível foi realizada por meio de um osciloscópio de armazenamento digital modelo SIGLENT SDS1204CFL. Esses avanços evidenciam a convergência de tecnologias que possibilitam uma compreensão e detecção aprimoradas de descargas parciais [27].

3 METODOLOGIA

3.1 Requisitos do sistema

Aplicações de campo exigem sistemas compactos que apresentem todos os recursos necessários para a execução de diversas atividades, considerando a realidade do ambiente onde é feita a medição. Para este projeto, foram estabelecidos os seguintes requisitos:

- a) O sistema deve ser dotado de *hardware* capaz de executar um sistema operacional, armazenar e processar os dados adquiridos;
- b) Possuir conectividade para adição de outros equipamentos e periféricos ao sistema, especialmente relés de medição e outros equipamentos de descarga parcial;
- c) Possuir interface homem-máquina (tela com interface gráfica);
- d) Apresentar uma estrutura robusta para suportar as intempéries do ambiente;
- e) Possuir saídas de alimentação em corrente contínua para alimentação de dispositivos externos;
- f) Ser flexível no manuseio, sendo capaz de ser operado sobre uma bancada ou fixado na parede;
- g) Possuir sistema secundário de alimentação capaz de manter o sistema em operação, evitando a perda de dados.

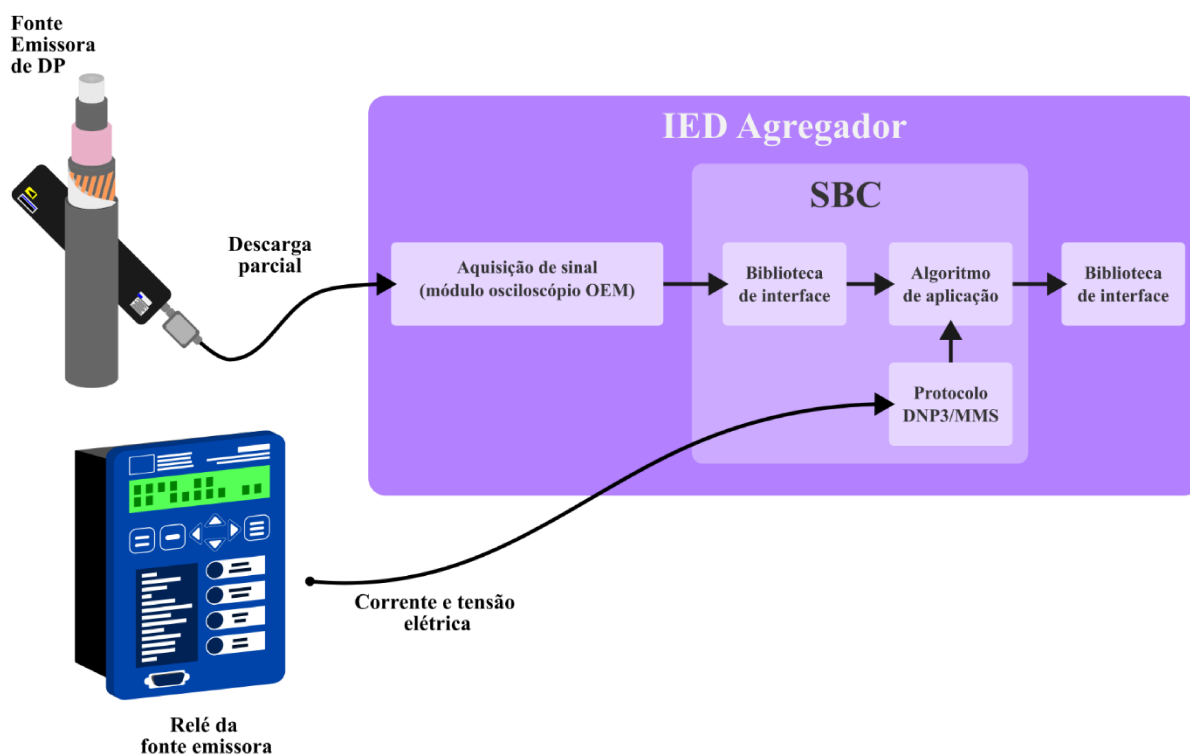
Esses requisitos básicos foram levantados com base na experiência de uso relatada por especialistas, que possuem experiência em medições de descargas parciais em campo. Eles foram os elementos norteadores da metodologia proposta.

3.2 Visão geral e arquitetura

O presente trabalho visa à produção de um equipamento – doravante designado apenas como “**Agregador**” – capaz de aferir sinais de DP presentes em cabos de média tensão isolados, conforme ilustrado na Figura 12. O sistema é composto inicialmente por uma fonte emissora de DP que produz um sinal de referência similar a um pulso de DP, um osciloscópio digital para a aquisição dos sinais, uma *Single Board Computer* (SBC) para o processamento, as

Dynamic Link Library (DLL) de controle do osciloscópio digital, algoritmo de processamento das informações aferidas e uma tela sensível ao toque para interação com o *Intelligent Electronic Device* (IED).

Figura 12 – Elementos do projeto



Fonte: O autor.

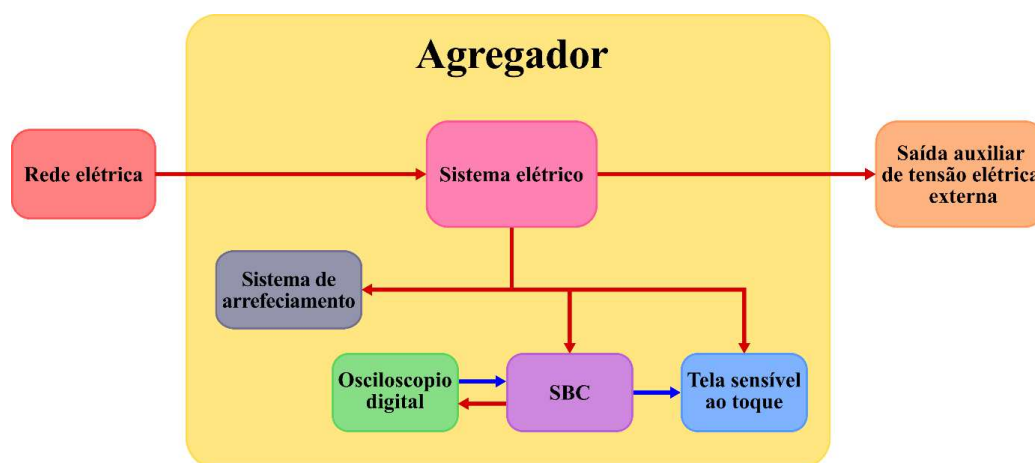
Observa-se que o IED, também chamado de Agregador, está projetado para receber dados elétricos de um relé que monitora o ativo. A proposta é que o dispositivo seja capaz de receber tanto os dados de medição de descarga parcial quanto os dados elétricos do cabo medidos por um relé. Dessa forma, o Agregador combina essas duas diferentes fontes de dados, essenciais para avaliar as condições de operação do ativo.

No entanto, embora essa seja a ideia geral da solução, este trabalho se dedicou apenas aos registros de dados de descargas parciais. A integração com fontes de dados de relé será objeto de trabalhos futuros. Ainda assim, é importante destacar que a infraestrutura tecnológica (fonte de alimentação, portas Ethernet adicionais, processador e recursos da SBC) para a futura inserção dos protocolos de relé já foi considerada no projeto.

3.3 Materiais e métodos

O Agregador é um dispositivo de medição *all-in-one* projetado para atividades em campo. Sua estrutura é integrada em uma caixa de metal que abriga o sistema elétrico, alimentado por uma fonte principal de tensão elétrica, um conjunto de conectores para alimentar equipamentos externos e uma fonte auxiliar de tensão elétrica para suprir o equipamento na ausência de rede elétrica. O dispositivo também inclui um sistema de arrefecimento, uma SBC (que é o núcleo de todo o processamento), um dispositivo de aquisição de dados e uma tela sensível ao toque. Os elementos do IED podem ser visualizados na Figura 13, onde as setas vermelhas representam a transferência de energia elétrica e as setas azuis representam a transferência de dados.

Figura 13 – Visão geral do equipamento



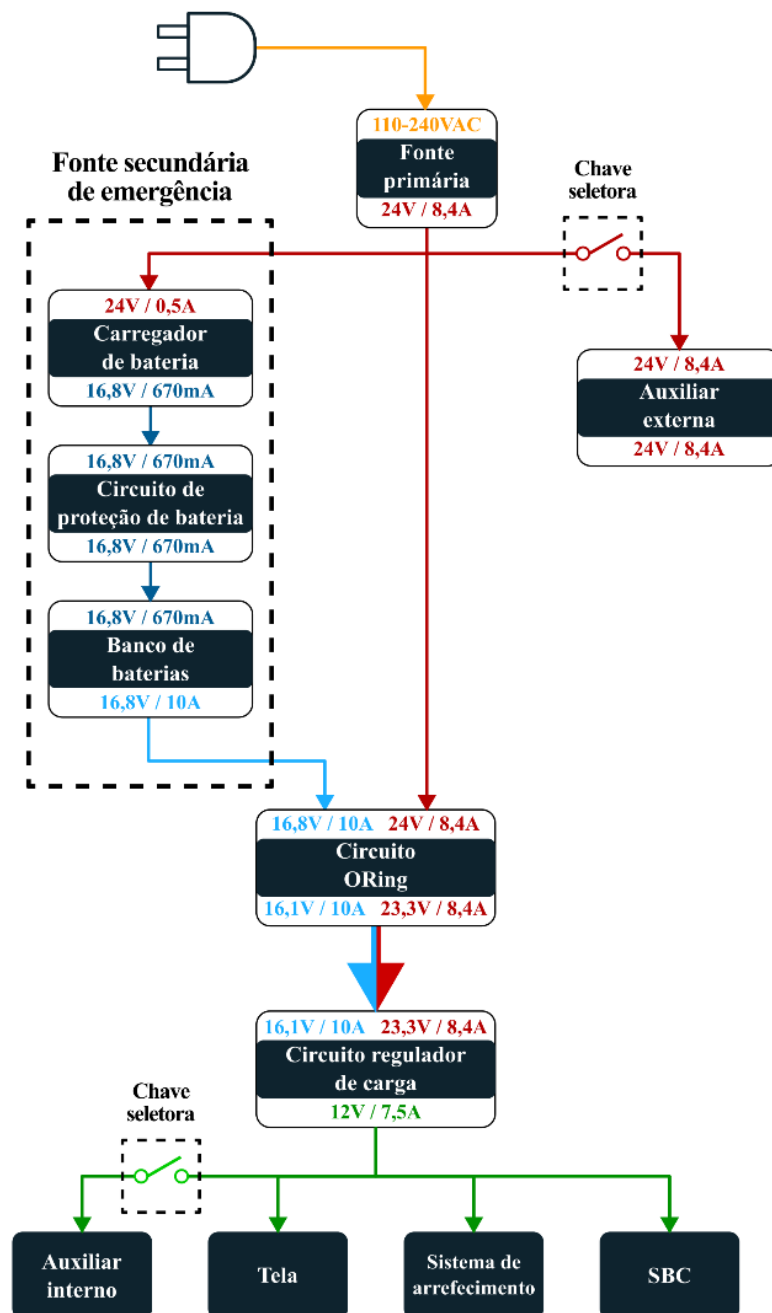
Fonte: O autor.

3.3.1 Projeto do sistema elétrico interno do IED

O Agregador foi concebido para operar com a rede de distribuição de energia como sua fonte principal de alimentação. No entanto, o dispositivo é equipado com um sistema de reserva de energia para garantir a integridade dos dados coletados em situações de queda de energia ou falha da fonte principal. Além disso, o dispositivo possui conexões elétricas para alimentar equipamentos externos em 24V_{DC}. Devido à utilização de duas fontes de energia operando simultaneamente, emprega-se um circuito seletor para determinar a fonte de energia a ser

utilizada. Em seguida, um módulo regulador de tensão é empregado para assegurar que o nível de tensão e corrente permaneçam dentro dos limites operacionais dos demais componentes eletrônicos internos, estabelecidos em 12V_{DC}. O diagrama elétrico correspondente pode ser visualizado na Figura 14.

Figura 14 – Diagrama elétrico do agregador



Fonte: O autor.

A fonte primária de alimentação para o projeto deve atender a critérios específicos. Estes incluem ter dimensões físicas compactas para otimizar o espaço interno do equipamento, não apresentar chave seletora de tensão elétrica de entrada e fornecer uma tensão de saída de 24V, pois será necessária uma tensão mínima de 17V para o sistema de carregamento das baterias. Além de garantir potência elétrica ativa suficiente para suprir todos os módulos internos, cujo consumo elétrico estimado é de 99W, e externos, que podem chegar a até 100W, conforme mostrado na Tabela 1.

Tabela 1 – Relação de consumo elétricos de todo equipamento

Módulo	Tensão	Corrente elétrica	Potência
SBC	12V	2,5A	26W
Tela	12V	1,5A	36W
Osciloscópio	5V	1A	5W
Sistema de baterias	24V	0,5A	12W
Auxiliar interna	12V	1,67A	20W
Auxiliar externa	24V	4,2A	101W

Fonte: O autor.

Para cumprir os requisitos mencionados anteriormente, optou-se pelo modelo comercial EPP-200-24, conforme ilustrado na Figura 15. Esta fonte é certificada para uso em equipamentos médicos e possui um filtro contra *eletromagnetic interference* (EMI). Tal característica é de suma importância, considerando que o IED utilizará equipamentos de aquisição sensíveis a qualquer forma de interferência.

Figura 15– Fonte AC/DC utilizada no projeto



Fonte: O autor.

A fonte incorporada ao dispositivo é do tipo chaveada, apresentando uma capacidade máxima de potência de saída de 201.6W na presença de ventilação forçada. Destaca-se também por possuir um ciclo de vida superior a 65 mil horas. Suas características incluem tolerância a variações de temperatura e umidade, alinhadas com as condições ambientais às quais o equipamento estará sujeito. As especificações detalhadas estão disponíveis na Tabela 2.

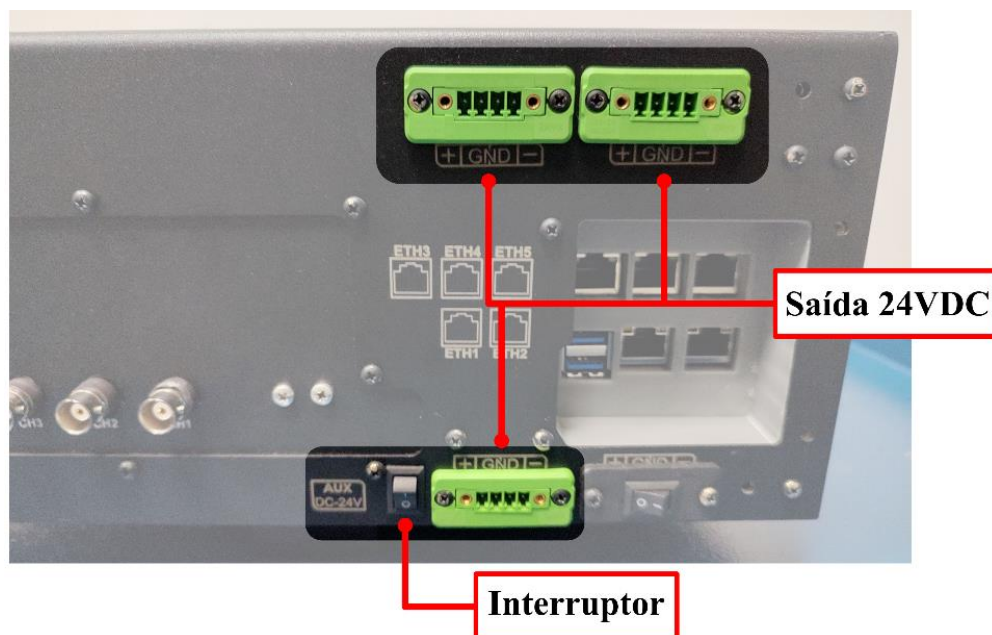
Tabela 2 – Especificações da fonte

Modelo		RPS-200-24
Fabricante		MEAN WELL
Entrada	Tensão de entra	80 ~ 264V _{AC}
	Frequência de operação	47 ~ 63Hz
	Fator de potência	FP > 0,94/230V _{AC}
	Eficiência	94%
	Corrente de inrush	60A/230V _{AC}
Saída	Tensão de saída	24V
	Corrente de saída	8.4A
	Potência de saída	201.6W
	<i>Ripple</i> e ruído	120mVp-p
Proteção	<i>Overload</i>	110 ~ 140%
	<i>Over voltage</i>	26.4 ~ 31.2V
Ambiental	Temperatura de trabalho	-30 ~ 70°C
	Umidade de trabalho	20 ~ 90% umidade relativa

Fonte: MAEN WELL, 2024 [28].

O IED foi concebido não apenas como um dispositivo de medição, mas como uma plataforma que viabiliza a integração de outros equipamentos externos, tanto para transferência de dados quanto para aproveitamento de sua capacidade como fonte de energia. Nesse contexto, o sistema elétrico principal, operando com uma tensão de saída de 24V_{DC}, está conectado a três pontos de alimentação externa, conforme ilustrado na Figura 16. Além disso, o sistema inclui um interruptor que permite desligar a energia dos conectores, eliminando a necessidade de desconectar o dispositivo para desenergizá-lo.

Figura 16 – Tomadas de tensão para alimentação 24V_{DC}



Fonte: O autor.

A fonte secundária de emergência foi incorporada ao projeto devido a uma possível situação encontrada em campo, na qual, caso o dispositivo esteja monitorando e armazenando dados e ocorra um pico de energia na rede elétrica ou sua interrupção, a fonte secundária assume a responsabilidade de manter o dispositivo operacional, garantindo a integridade dos dados em processamento. Os componentes que integram o sistema de emergência incluem um módulo carregador, um battery management system (BMS) e um banco de baterias.

Antes de dimensionar os dispositivos que compõem o sistema de bateria, como o carregador e o sistema de proteção, é necessário inicialmente dimensionar o banco de baterias de acordo com as exigências da aplicação. O banco de baterias será formado por células do tipo 18650, amplamente disponíveis no mercado em diversas configurações de tensão, corrente e capacidade. O modelo escolhido, conforme ilustrado na Figura 17, opera com uma tensão nominal de 3,6V, corrente máxima de 5A e capacidade de 3350mAh. Outras especificações estão detalhadas na Tabela 3.

Figura 17 – Célula lítio íon 18650



Fonte: O autor.

Tabela 3 – Especificações célula lítio íon 18650

Modelo	ICR18650-3400	
Fabricante	RONTEK	
Tensão elétrica nominal	3,6V	
Máxima corrente de descarga	5000mA	
Capacidade típica	3350mAh	
Carregamento padrão	Corrente constante há 670mA Tensão elétrica 4,2V	
Descarregamento padrão	Corrente de 670mA com tensão até 2,5V	
Temperatura de operação	Carga	0°C até 45°C
	Descarga	-20°C até 50°C
Diâmetro	18,7 mm	
Altura	65,5 mm	

Fonte: STA, 2024 [29].

Com base em todas as especificações da célula, é possível calcular todas as características do banco de baterias, conforme apresentado na Tabela 4. Inicialmente, é necessário calcular a tensão de operação usando a Equação 1, considerando que a tensão exigida por todos os dispositivos internos é de 12V.

$$T_{bb} = T_c \cdot N_c \quad (1)$$

onde,

- T_{bb} : Tensão do banco de baterias,
- T_c : Tensão por célula,
- N_{cs} : Número de células em série.

Logo pode-se calcular:

$$T_{bb} = 3,6V \cdot 4$$

$$T_{bb} = 14,4V$$

Portanto, o banco de baterias deve conter no mínimo 4 células em série para garantir que a tensão não seja inferior a 12V. Outro aspecto importante é a corrente máxima que o banco de baterias pode fornecer para todos os componentes internos. A partir da Tabela 1, observa-se que a corrente total necessária é de aproximadamente 7,17A. Assim, não seria o suficiente utilizar apenas 4 células em série, pois a corrente máxima seria de 5000mA. Para calcular a corrente fornecida por 2 células em paralelo, utiliza-se a Equação 2.

$$C_{bb} = C_c \cdot N_{cp} \quad (2)$$

onde,

- C_{bb} : Corrente do banco de baterias,
- C_c : Corrente por célula,
- N_{cp} : Número de células em paralelo.

Assim obtêm-se:

$$C_{bb} = 5000mA \cdot 2$$

$$C_{bb} = 10000mA$$

Logo, o banco de baterias será configurado como 4s2p, o que significa 4 células em série e 2 em paralelo, totalizando 8 células. Com isso, é possível calcular outras características, como a capacidade total, conforme demonstrado pela Equação 3.

$$Cap_{bb} = Cap_c \cdot N_{cp} \quad (3)$$

onde,

- Cap_{bb} : Capacidade do banco de baterias,
- Cap_c : Capacidade por célula.

Desta forma:

$$Cap_{bb} = 3350mAh \cdot 2$$

$$Cap_{bb} = 6700mAh$$

Sabendo que a potência necessária para alimentar todos os módulos internos, que é de 99W, e utilizando os dados calculados do banco de bateria, é possível estimar a potência total que será possível extrair de todas as células conforme a Equação 4

$$P_{bb} = T_{cs} \cdot C_{cp} \quad (4)$$

onde,

- P_{bb} : Potência do banco de baterias,
- T_{cs} : Tensão das células em série,
- C_{cp} : Corrente das células em paralelo.

Logo têm-se:

$$P_{bb} = (3,6V \cdot 4) \cdot (5000mA \cdot 2)$$

$$P_{bb} = 14,4V \cdot 10A$$

$$P_{bb} = 144W$$

Também é possível calcular a duração de energia do banco de bateria quando submetido à carga estimada utilizando a Equação 5.

$$D_{bb} = \frac{Cap_{bb}}{C_{es}} \quad (5)$$

onde,

- D_{bb} : Duração do banco de baterias,
- C_{es} : Corrente exigida pelo sistema.

Desta maneira:

$$D_{bb} = \frac{6700mAh}{7,17A}$$

$$D_{bb} = 0,9344 \text{ horas}$$

Convertendo o resultado para minutos usando a Equação 6.

$$T_{min} = 60 \cdot T_{hor} \quad (6)$$

onde,

- T_{min} : Tempo total em minutos,
- T_{hor} : Tempo total em horas.

Deste modo:

$$T_{min} = 60 \cdot 0,9344 \text{ horas}$$
$$T_{min} = 56,064 \text{ minutos}$$

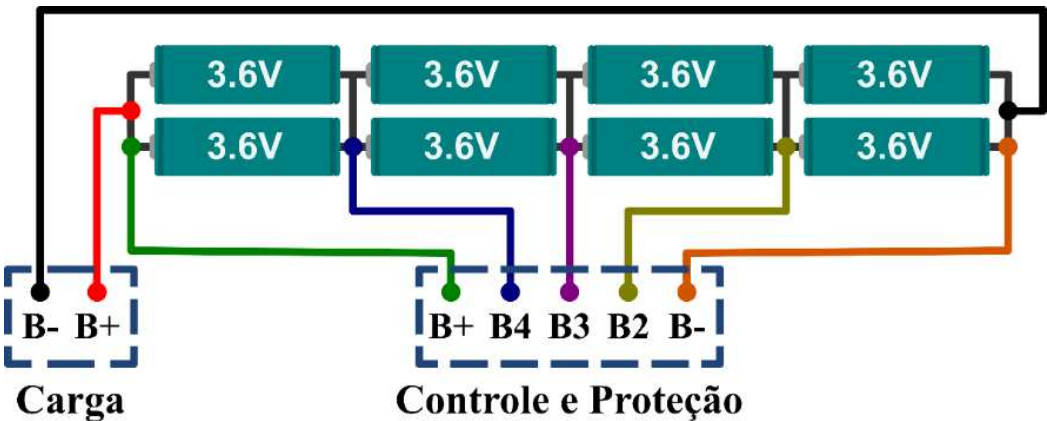
Tabela 4 – Especificações do banco de baterias

Tensão nominal	14,4V
Máxima corrente de descarga	10000mA
Capacidade	6700mAh
Potência	144W
Tempo de duração de energia	56 minutos

Fonte: O autor.

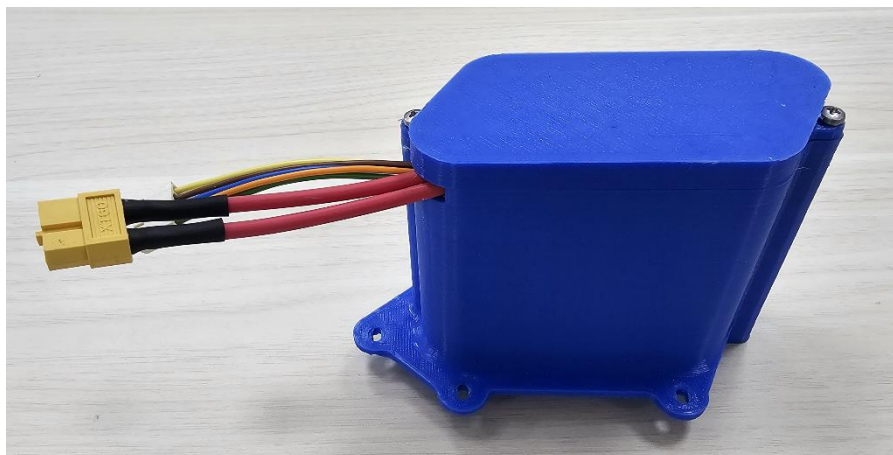
A partir da configuração de construção do banco de baterias estabelecida em 4s2p, conforme ilustrado na Figura 18, as células foram soldadas usando solda-ponto e fita de níquel como material condutor. Utilizando uma estação de solda e estanho, foram conectados os condutores positivo e negativo principais de alimentação e os acessos para o gerenciamento do banco de baterias. Para acomodar as células no interior do IED, foi projetada uma caixa compacta, conforme mostrado na Figura 19, priorizando a otimização do espaço a ser ocupado.

Figura 18 – Distribuição das células



Fonte: O autor.

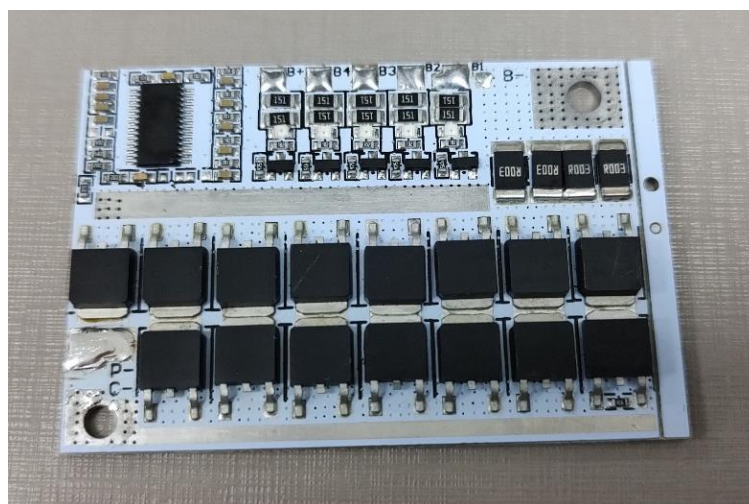
Figura 19 – Banco de baterias montado



Fonte: O autor.

O BMS é outro subsistema presente no projeto do sistema elétrico do IED. Trata-se de um sistema de gerenciamento eletrônico para banco de baterias, que possibilita a gestão de cada célula que o integra. O modelo adotado para este projeto, conforme representado na Figura 20, suporta até 5 células em série do tipo íon lítio, operando a 3,6V, e possui corrente de carga de até 60A.

Figura 20 – Modulo BMS



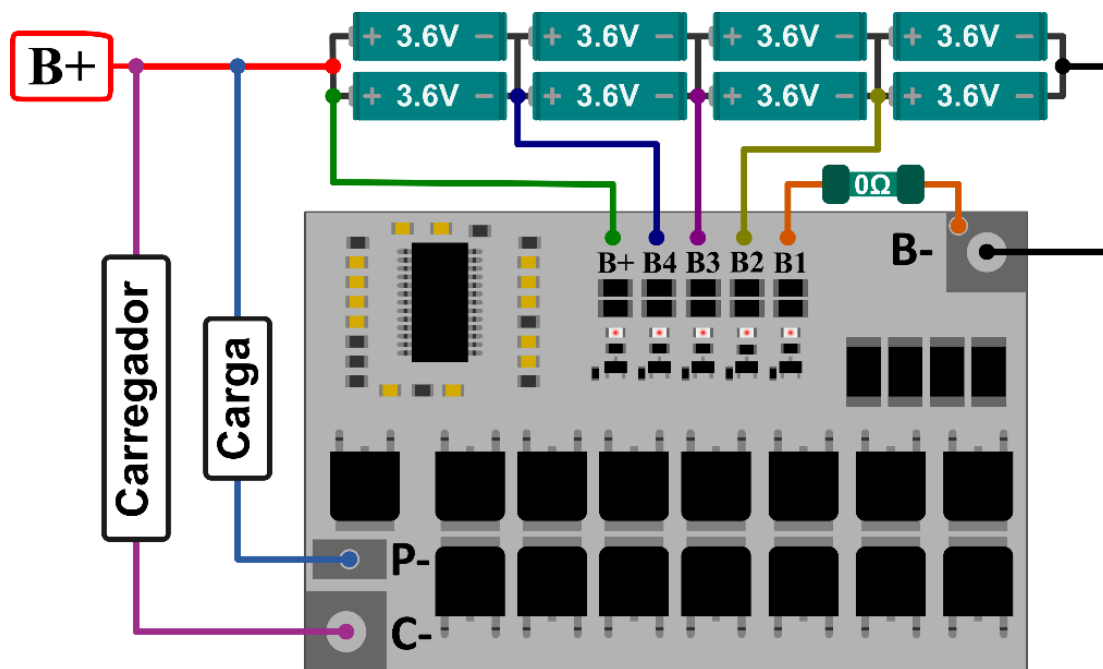
Fonte: O autor.

O módulo BMS adotado possui um sistema de balanceamento, cuja função é desviar a corrente de cada célula que atingiu o nível de tensão elétrica de 4,21V a 4,29V, representando total carregamento, para um banco de resistores. Este banco de resistores dissipa o excesso de

energia dessas células até que todas as outras estejam totalmente carregadas. Além disso, o módulo BMS inclui um circuito responsável pelo controle de descarga, que corta a tensão de saída do banco de baterias se as células sofrerem uma descarga abaixo do limite mínimo de tensão elétrica de 2,72V a 2,88V, ou se alguma delas estiver defeituosa, apresentando um nível de tensão elétrica muito abaixo desses limites. Além do controle de descarga, o dispositivo também controla a carga, desativando o carregador quando a tensão máxima do banco de baterias é atingida, calculada anteriormente em 16,8V, ou na presença de uma célula defeituosa com tensão acima da tensão de carga completa. O BMS também é capaz de interromper o fornecimento de energia caso a corrente exceda 60A.

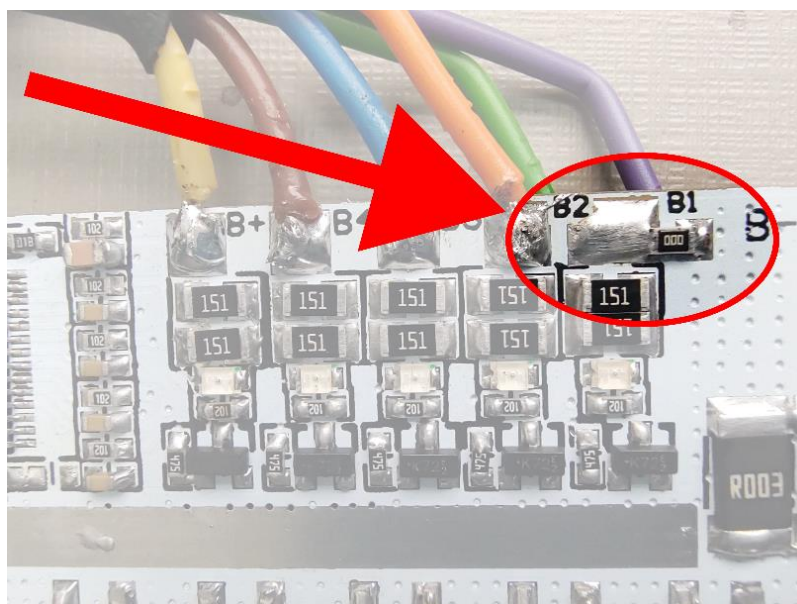
Para monitorar o banco de baterias, é necessário medir a tensão individual de cada célula, através dos terminais B-, B1, B2, B3, B4 e B+, conforme mostrado na Figura 21, correspondente ao circuito de balanceamento de cada célula. O módulo também possui conexões individuais de negativo para carga (terminal P-) e para o carregador (terminal C-). Para o banco de bateria 4s2p, é necessária uma pequena modificação no BMS, adicionando um resistor de 0 Ohms entre o B- e B1, conforme ilustrado na Figura 22, o que viabiliza a utilização de apenas 4 células em série.

Figura 21 – Banco de baterias conectado ao BMS



Fonte: O autor.

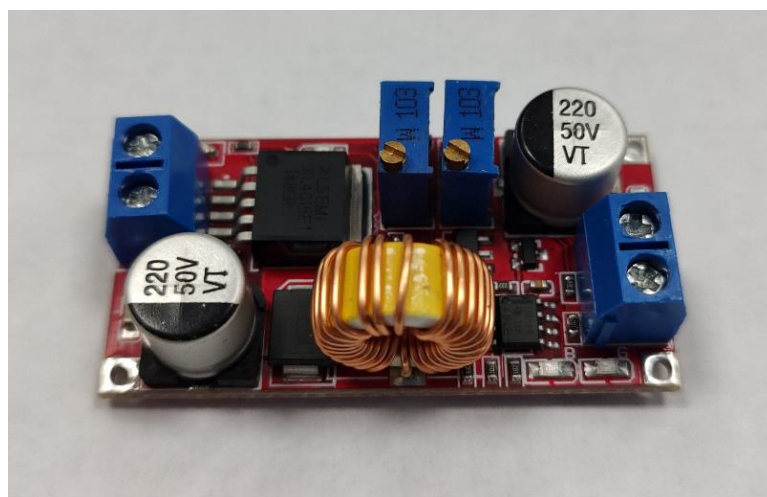
Figura 22 – Alteração do BMS para suportar 4 células em série



Fonte: O autor.

O controle de tensão elétrica para o carregamento do banco de baterias é conduzido por um conversor DC-DC *step down*. O modelo utilizado pode ser observado na Figura 23. Ele é compatível com uma faixa de tensão de entrada de 5 a 32V e oferece uma faixa de tensão de saída de 1,25 a 30V. O dispositivo conta com proteção contra curto-circuito e permite ajustes na tensão e corrente de saída. Tais ajustes são essenciais, pois as células de lítio íon exigem um controle preciso da tensão e corrente para evitar danos.

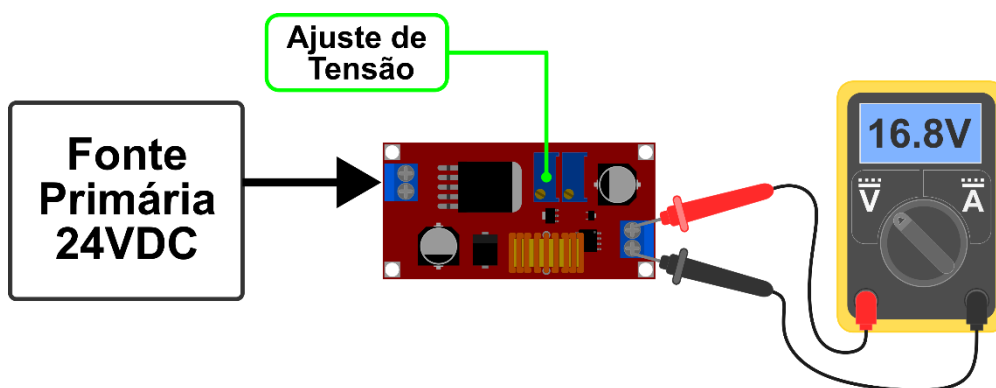
Figura 23 – Modulo conversor DC – DC step down carregador



Fonte: O autor.

Conforme as informações fornecidas nas especificações das baterias, o valor a ser ajustado para a tensão máxima na saída do conversor DC-DC é quatro vezes o valor do nível de tensão elétrica de carregamento por célula, ou seja, 4,2V. Portanto, o nível de tensão na saída do conversor DC-DC é de 16,8V. Para realizar esse ajuste, é necessário deixar a saída a vazio e, com o auxílio de um voltímetro, ajustar o potenciômetro multivoltas até alcançar esse valor, conforme ilustrado na Figura 24.

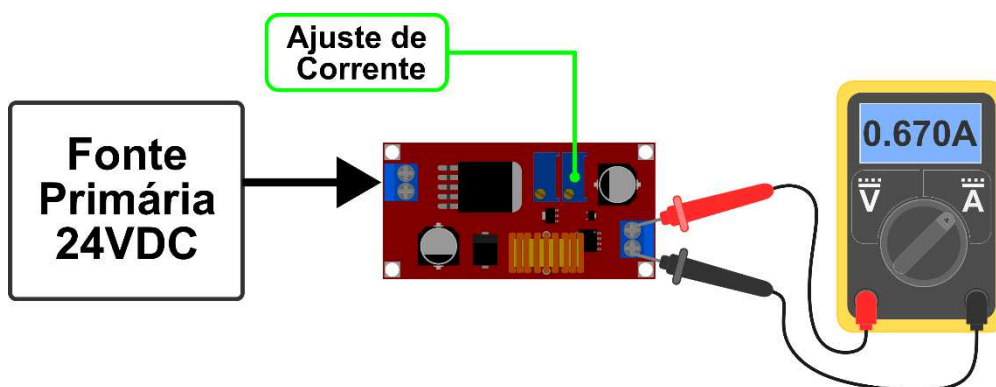
Figura 24 – Modulo DC – DC ajuste de tensão



Fonte: O autor.

Para ajustar a corrente elétrica, é necessário seguir as recomendações do fabricante, que indicam que, para o carregamento, a corrente de saída deve ser constantemente de 670mA. Ao contrário do ajuste de tensão, em que a saída estava a vazio, para alcançar o nível de corrente desejado, é preciso colocar a saída em curto-circuito, conforme ilustrado na Figura 25. Utilizando um amperímetro, é possível ajustar o valor necessário por meio do potenciômetro multivoltas.

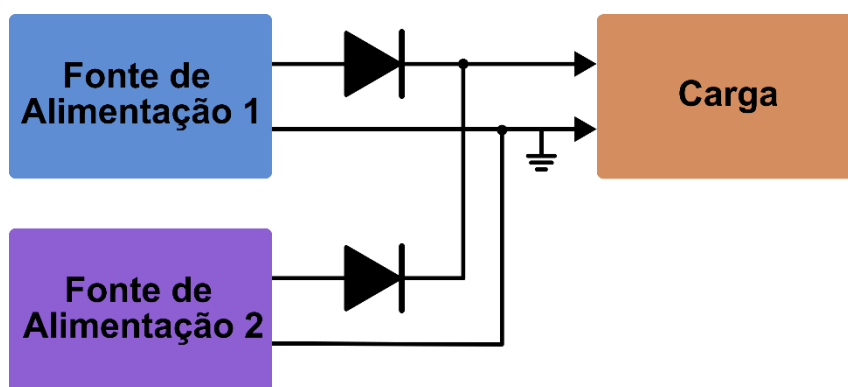
Figura 25 – Modulo DC – DC ajuste de corrente



Fonte: O autor.

Como o IED conta com duas fontes de alimentação para redundância, é necessário um mecanismo que comute da fonte principal para a fonte de emergência. Para isso, foi empregado o circuito ORing, representado na Figura 26. Este circuito consiste em dois diodos conectados ao positivo de ambas as fontes. Pelo princípio de funcionamento do diodo, a fonte de maior tensão elétrica, que neste caso é a fonte primária com 24V, terá predominância para alimentar todo o equipamento. Na ausência da fonte primária, a fonte secundária, com 16,8V, assume a função de fonte principal. Foram utilizados diodos 10a10, que suportam uma corrente de 10A quando diretamente polarizados. Todos os módulos internos necessitam de, no mínimo, 7,17A.

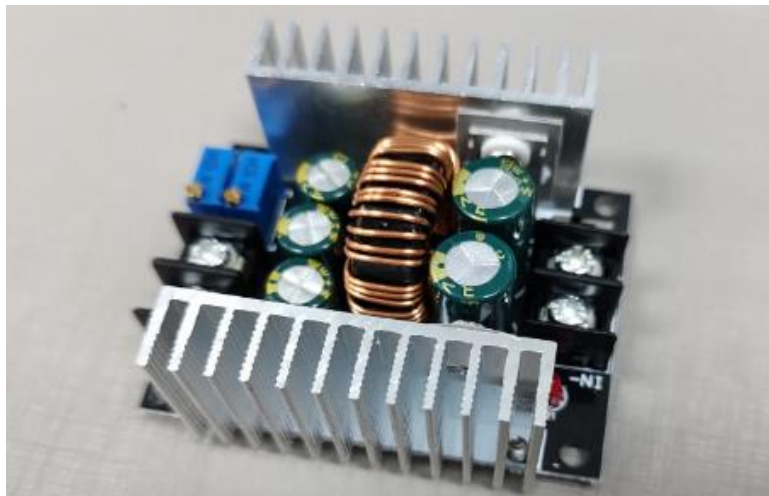
Figura 26 – Circuito *ORing*



Fonte: O autor.

O nível de tensão de 12V foi convencionado para a alimentação de todos os dispositivos internos. No entanto, todas as fontes disponíveis possuem tensão de operação superior. Para reduzir o nível de tensão e garantir que a corrente permaneça dentro dos limites estipulados, foi empregado um conversor DC-DC step-down, ilustrado na Figura 27. Este conversor suporta uma potência de saída de até 300W, uma tensão de entrada de 6 a 40V, uma tensão de saída de 1,2 a 36V, uma corrente máxima de saída de 20A e possui uma eficiência energética de 95%.

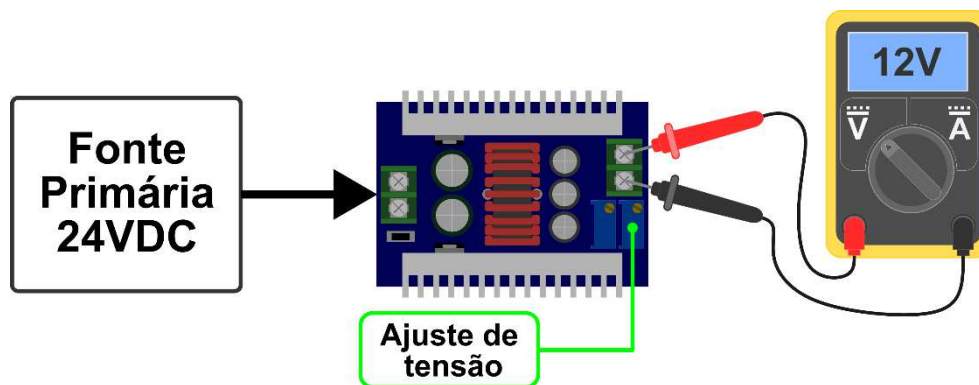
Figura 27 – Modulo conversor DC–DC *step down* 300W



Fonte: O autor.

A tensão de saída foi ajustada para 12V_{DC} utilizando o potenciômetro de ajuste de tensão, com um multímetro configurado na escala de tensão contínua conectado à saída do conversor a vazio, conforme ilustrado na Figura 28.

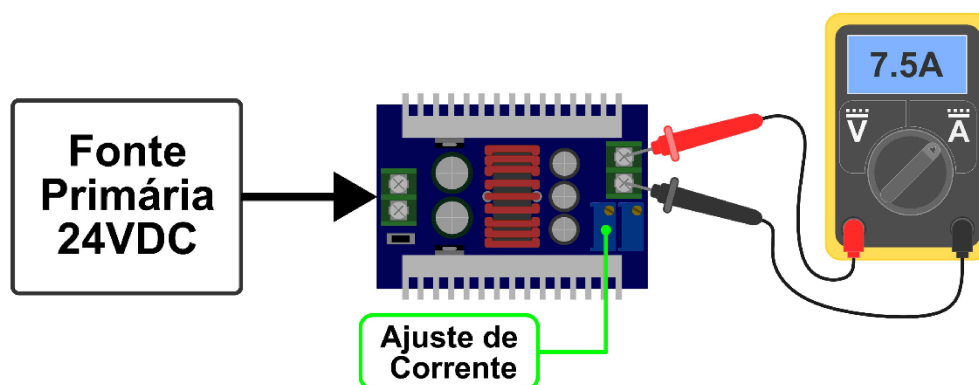
Figura 28 – Modulo conversor DC–DC *step down* 300W ajuste de tensão



Fonte: O autor.

A corrente máxima de saída foi ajustada para 7,5A utilizando o potenciômetro de ajuste de corrente, com um multímetro configurado na escala de corrente contínua conectado à saída do conversor em curto-circuito, conforme mostrado na Figura 29.

Figura 29 – Modulo conversor DC-DC *step down* 300W ajuste de corrente

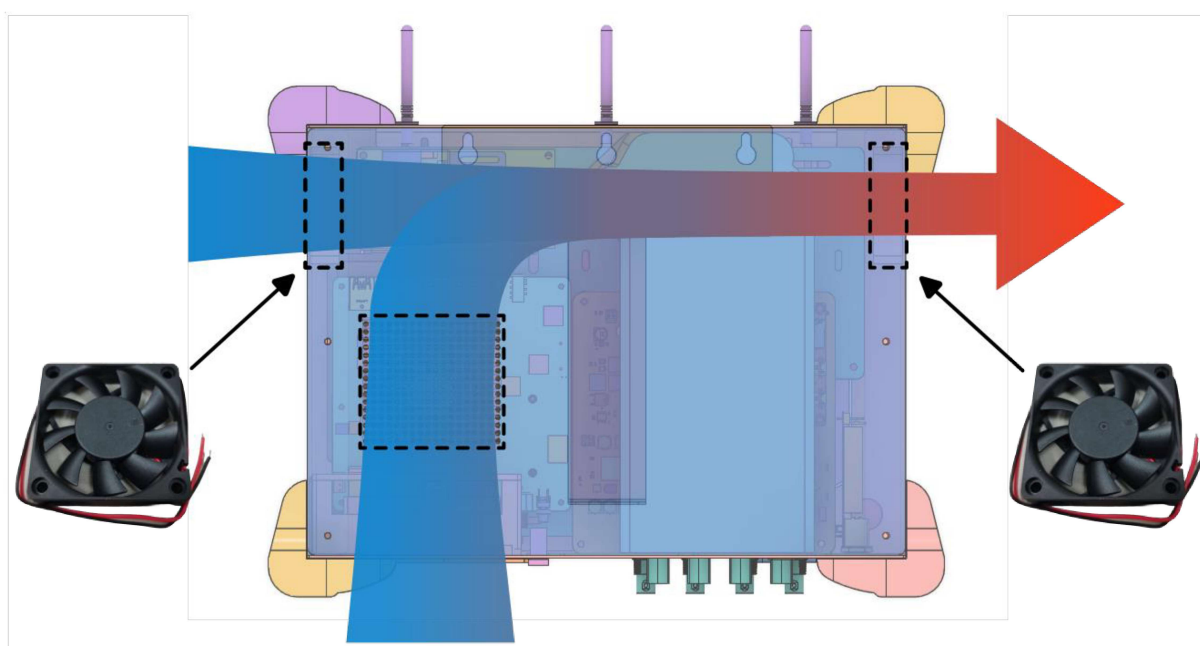


Fonte: O autor.

3.3.2 Sistema de arrefecimento

O sistema de arrefecimento do IED é composto por duas ventoinhas posicionadas nas laterais do equipamento. Uma ventoinha é responsável por puxar o ar externo para o interior, enquanto a outra empurra o ar interno para o exterior. O modelo instalado em ambos os casos é mostrado na Figura 30. Este modelo possui tamanho de 65mm, opera a 4500 RPM, apresenta um fluxo de ar de 18,8 CFM, tensão de alimentação de 12VDC e requer uma corrente de 0,11A.

Figura 30 – Ventoinha 60 mm



Fonte: O autor

3.3.3 Tela sensível ao toque

A interação entre o operador e o IED ocorrerá por meio de uma tela sensível ao toque, conforme ilustrado na Figura 31. A tela possui 10,1 polegadas, resolução de 1280x800 pixels, conexão via entrada HDMI e conexão touchscreen através de porta USB. A operação é garantida em uma faixa de temperatura de 0 a 40°C e umidade relativa de até 90%.

Figura 31 – Tela sensível ao toque de 10.1 polegadas



Fonte: O autor.

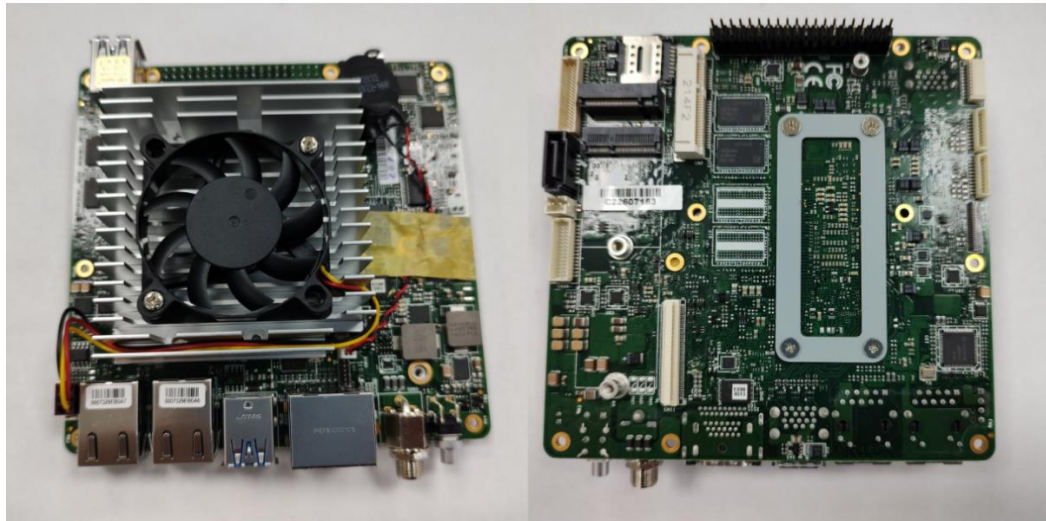
3.3.4 Single Board Computer

Uma SBC é um computador compacto desenvolvido comercialmente, contendo em uma única placa diversos componentes essenciais para seu funcionamento básico, como memória *Random Access Memory* (RAM), memória de armazenamento e processador. Alguns modelos também incluem módulos de conectividade sem fio ou conexões necessárias para futuras instalações. As SBCs podem ser embarcadas com diversas tecnologias de processamento, como *Advanced RISC Machine* (ARM), *Reduced Instruction Set Computer V* (RISC V) e x86, sendo necessário um estudo preliminar para determinar qual se adequa melhor à aplicação.

A escolha da SBC deste projeto teve como base a capacidade de executar um sistema operacional (SO) que suporta aplicações desenvolvidas na linguagem de programação C# e a compatibilidade com drives de terceiro que em sua maioria são mais acessíveis se utilizando o SO da Microsoft. A partir de pesquisas foram encontrados alguns modelos que atenderam a esses requisitos, porém o escolhido foi o modelo *UP Xtreme*, pois além de contar com conexões

PCIe que possibilitam a adição de acessórios de conectividade, ela também suporta o sistema operacional Windows 10. Outro fator muito importante que influenciou na sua escolha é a característica de suportar temperatura e umidade a níveis de ambiente industrial. Na Figura 32, é mostrado a SBC e todas as especificações estão listadas na Tabela 5.

Figura 32 – Placa SBC *Up Xtreme*



Fonte: O autor.

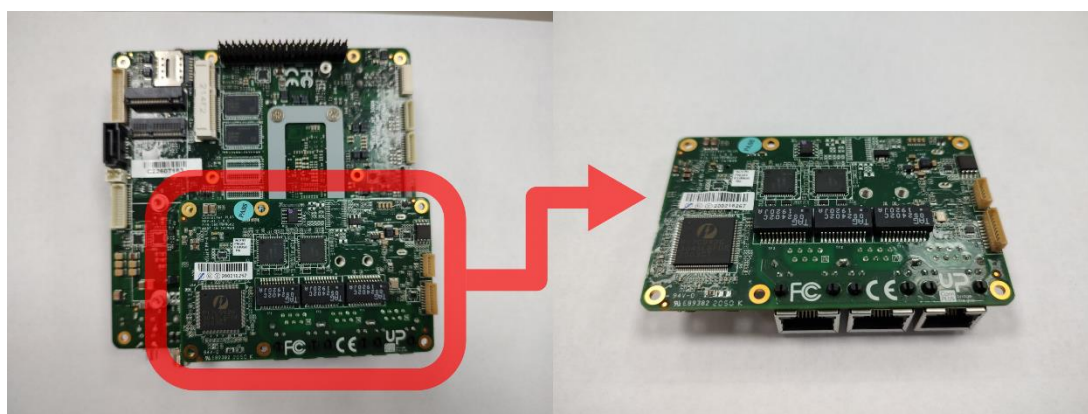
Tabela 5 – Especificações Single Board Computer

Board version	Xtreme Series
SoC	Intel® Celeron® 4305UE
Memória do sistema	4 GB (DDR4 2400MT/s)
Armazenamento	64GB
Sistemas compatíveis	Windows 10, Linux
Tensão elétrica de operação	12V ~ 60V DC
Consumo de potência	26W
Temperatura de operação	0°C ~ 60°C
Umidade de operação	0% ~ 90% (sem condensação)
Ethernet	2x GbLAN (Intel i210AT)
WiFi	Intel® AC9260
LTE/4G	Quectel 4G LTE CAT 4

Fonte: Up Board, 2024 [30].

Para a detecção de DPs, são utilizados equipamentos desenvolvidos exclusivamente para essa tarefa. Visando tornar o dispositivo desenvolvido neste trabalho compatível com esses equipamentos, foi adicionada a placa que aumenta o número de porta RJ45, *Connect Plus*, representada na Figura 33. A sua instalação proporciona três portas RJ45 extras para a SBC, suas especificações estão listadas na Tabela 6.

Figura 33 – Módulo Connect Plus



Fonte: O autor.

Tabela 6 – Especificações modulo Connect Plus

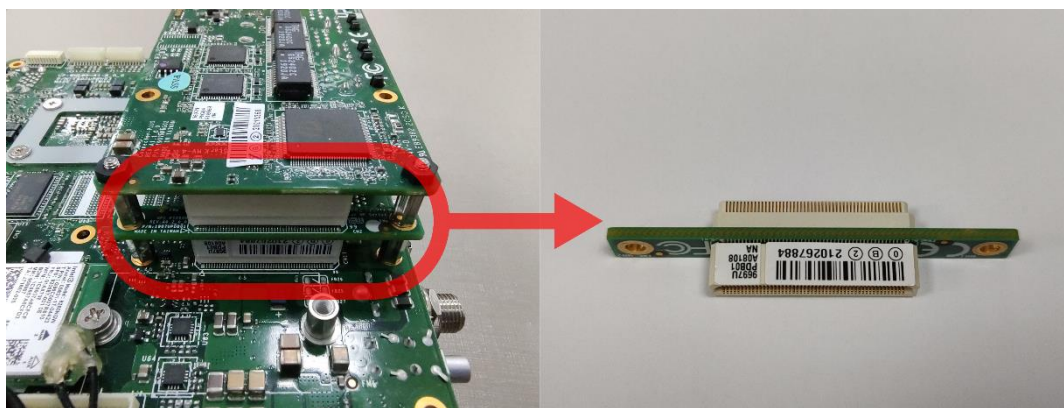
Board version	Connect Plus
Ethernet	Intel I211-AT
Fonte de alimentação necessária	12V & 5A
Potência elétrica consumida	13.5W
Temperatura de operação	0°C ~ 60°C
Umidade de operação	10 ~ 80% de umidade relativa
Slot de expansão	DOCKING 2

Fonte: Up Board, 2024 [30].

O *Connect Plus* é um acessório compatível com poucos modelos de SBC dessa fabricante, possuindo semelhança nas características de tolerância a temperatura e umidade da *UP Xtreme*. A conexão com a placa principal é feita através de um adaptador, conforme mostrado na Figura 35. Este adaptador consiste em um conector de 100 pinos que permite a conexão elétrica de 12V, necessária para o funcionamento do módulo, além de possuir barramentos do tipo I2C, UART, SPI, USB e PCI Express. As portas RJ45 utilizam dois dos

quatro barramentos disponíveis do tipo PCI Express, sendo que uma se conecta diretamente à SBC e duas utilizam um switch de pacotes baseado no chip PI7C9X2G304SL.

Figura 35– Adaptado docking 2



Fonte: O autor.

3.3.5 Osciloscópio digital

Para a aquisição de DPs, foi escolhido o modelo de osciloscópio digital Hantek 6074BC, conforme mostrado na Figura 36. Este dispositivo possui 4 canais, largura de banda de 70MHz, taxa de amostragem de até 1Gsa/s, profundidade de memória de 64 kilobytes por canal, interface de comunicação de dados e alimentação elétrica via USB, impedância de entrada de 1 Mega Ohm e resolução vertical de 8 bits.

Figura 35 – Osciloscópio digital



Fonte: O autor.

Este osciloscópio apresenta uma limitação na taxa de amostragem que deve ser considerada, pois ele não é capaz de atingir 1Gsa/s em qualquer condição de uso, apenas quando um dos quatro canais está habilitado. A Tabela 7 traz informações detalhadas sobre a base de tempo, número de canais ativos e a real taxa de amostragem aferida.

Tabela 7 – Taxa de amostragem há 1Gsa/s

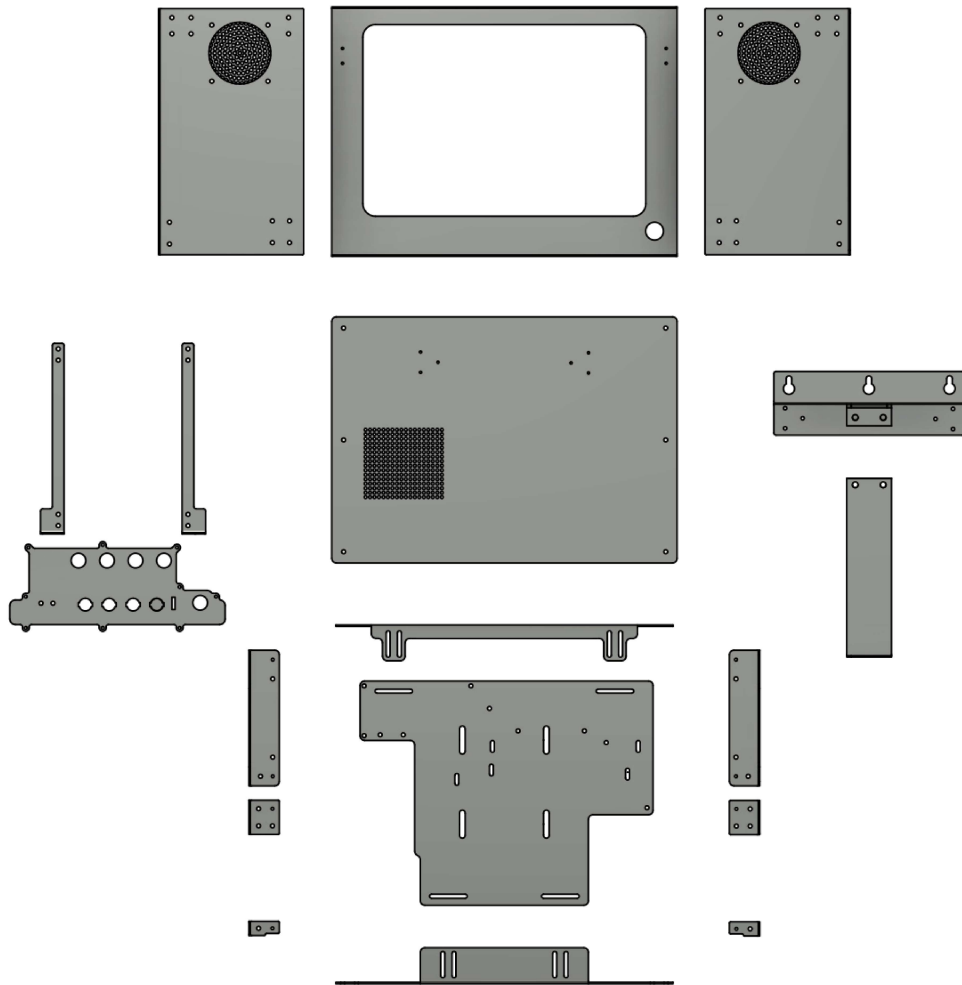
Base de tempo (s)	Nº canais ativos	Taxa de amostragem (Sa/s)
2n à 500n	1	1G
	2	0,5G
	4	250M

Fonte: Adaptado de Hantek, 2024 [31].

3.3.6 Projeto estrutural

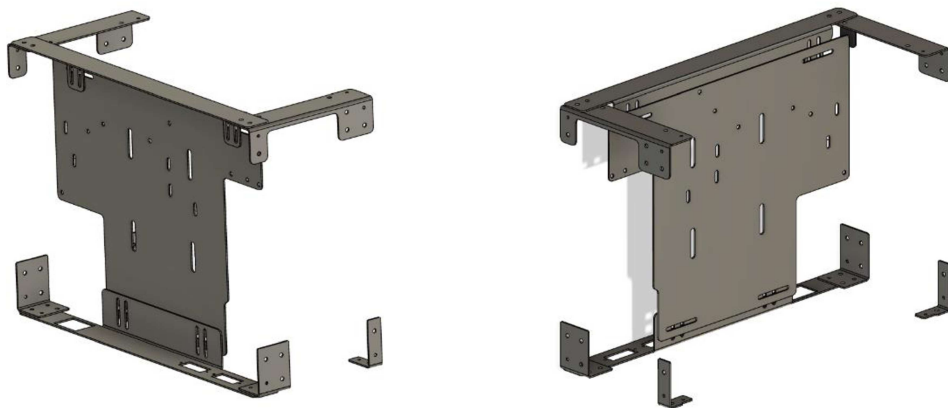
Durante o desenvolvimento do IED, foram utilizadas ferramentas de modelagem 3D. O equipamento é composto por várias peças, como representado na Figura 36. A lógica de projeto parte de uma estrutura interna central que serve de suporte para a maioria dos dispositivos internos e proporciona reforço estrutural para o restante da caixa, conforme mostrado na Figura 37. A peça que envolve a parte superior, frente e inferior tem formato de “U”, garantindo melhor rigidez à estrutura, como ilustrado na Figura 38. As laterais são separadas e fixadas ao corpo principal por um conjunto de canaletas, conforme visualizado na Figura 39. O fundo é composto por uma tampa que dá acesso ao interior do dispositivo, sendo necessário soltar seis parafusos, como mostrado na Figura 40. O dispositivo também conta com um suporte de fixação para parede e um pé de apoio que mantém o IED em um ângulo de 45° com relação a superfície de apoio, conforme ilustrado na Figura 41.

Figura 36 – Peças metálicas que compõem o agregador



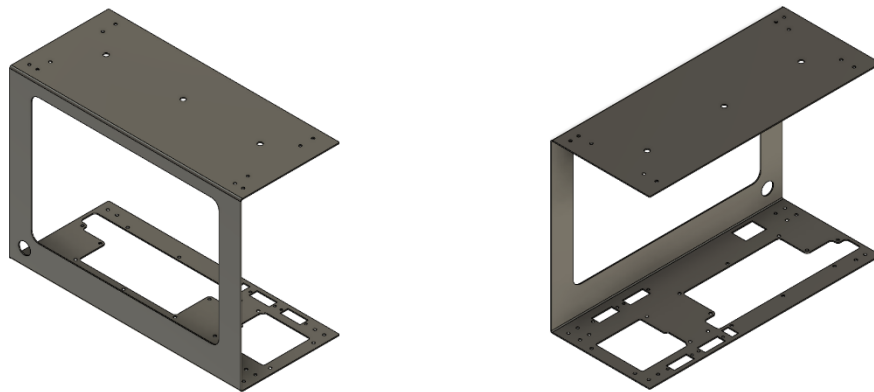
Fonte: O autor.

Figura 37 – Suporte de apoio central



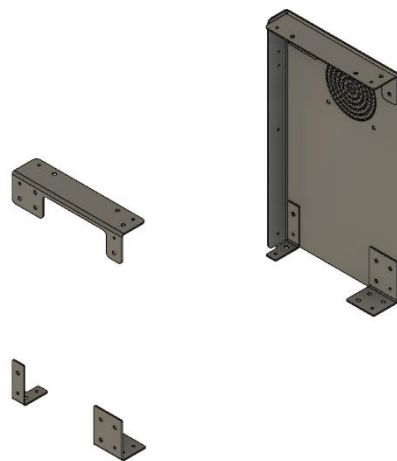
Fonte: O autor.

Figura 38 – Estrutura em “U”



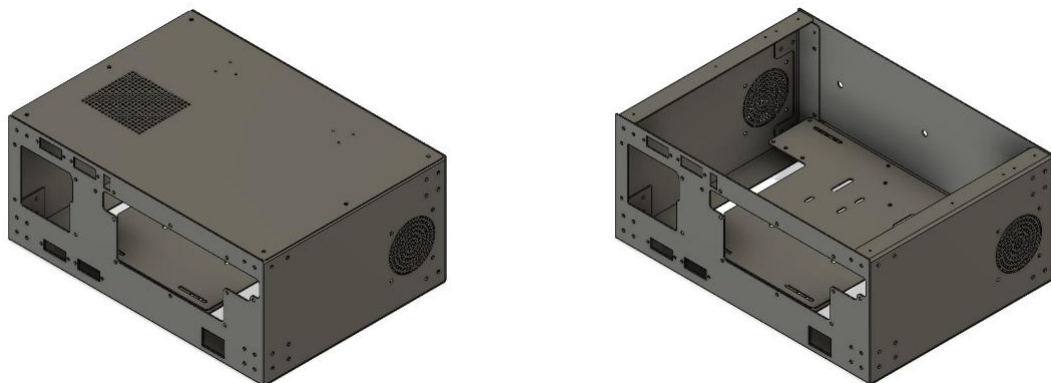
Fonte: O autor.

Figura 39 – Canaletas de fixação das laterais



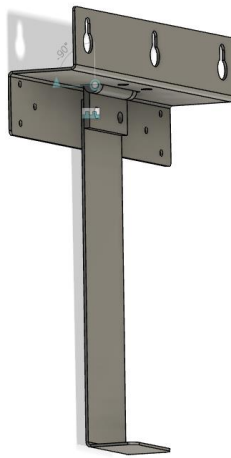
Fonte: O autor.

Figura 40 – Tampa de acesso ao interior



Fonte: O autor.

Figura 41 – Suporte de parede e pé de apoio



Fonte: O autor.

A versão atual foi produzida em aço carbono em chapa de 1,5 mm de espessura, cortada a laser e dobrada utilizando prensa hidráulica. Para a união das peças, foram utilizados parafusos M3 de diferentes comprimentos e porcas auto-travante em alguns pontos, enquanto em outros foi criada rosca na própria chapa de metal. Apenas a estrutura metálica do dispositivo tem um peso aproximado de 3,425 kg, como ilustrado na Figura 42.

Figura 42 – Estrutura metálica de sustentação



Fonte: O autor.

A estrutura também inclui suportes para fixação de componentes internos, como o suporte para a SBC, o suporte para os conversores DC-DC, o suporte para o BMS e a *case* do

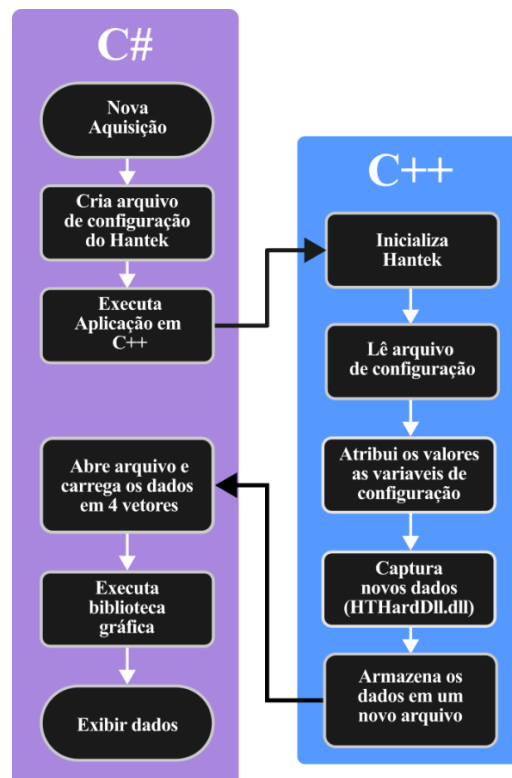
banco de baterias. Essas peças são fabricadas em polímero do tipo ácido polilático (PLA) utilizando uma impressora 3D.

3.4 Algoritmo

O programa a ser executado no IED deve ser capaz de utilizar uma DLL que tem o papel a comunicação entre o hardware do osciloscópio e as funções do algoritmo. Para isso, serão utilizadas DLLs, que são bibliotecas que permitem o acesso a seus dados por múltiplos programas simultaneamente. Para essa aplicação, elas são de grande importância, pois são responsáveis por comandar o osciloscópio digital.

A principal linguagem de programação utilizada para o desenvolvimento foi o C#. Ela será responsável por gerar a interface de controle e visualização dos sinais. A segunda linguagem que será utilizada é o C++, com o propósito de executar a biblioteca que possibilita a configuração e aquisição de dados do osciloscópio. O fluxo completo da aplicação pode ser visualizado na Figura 43.

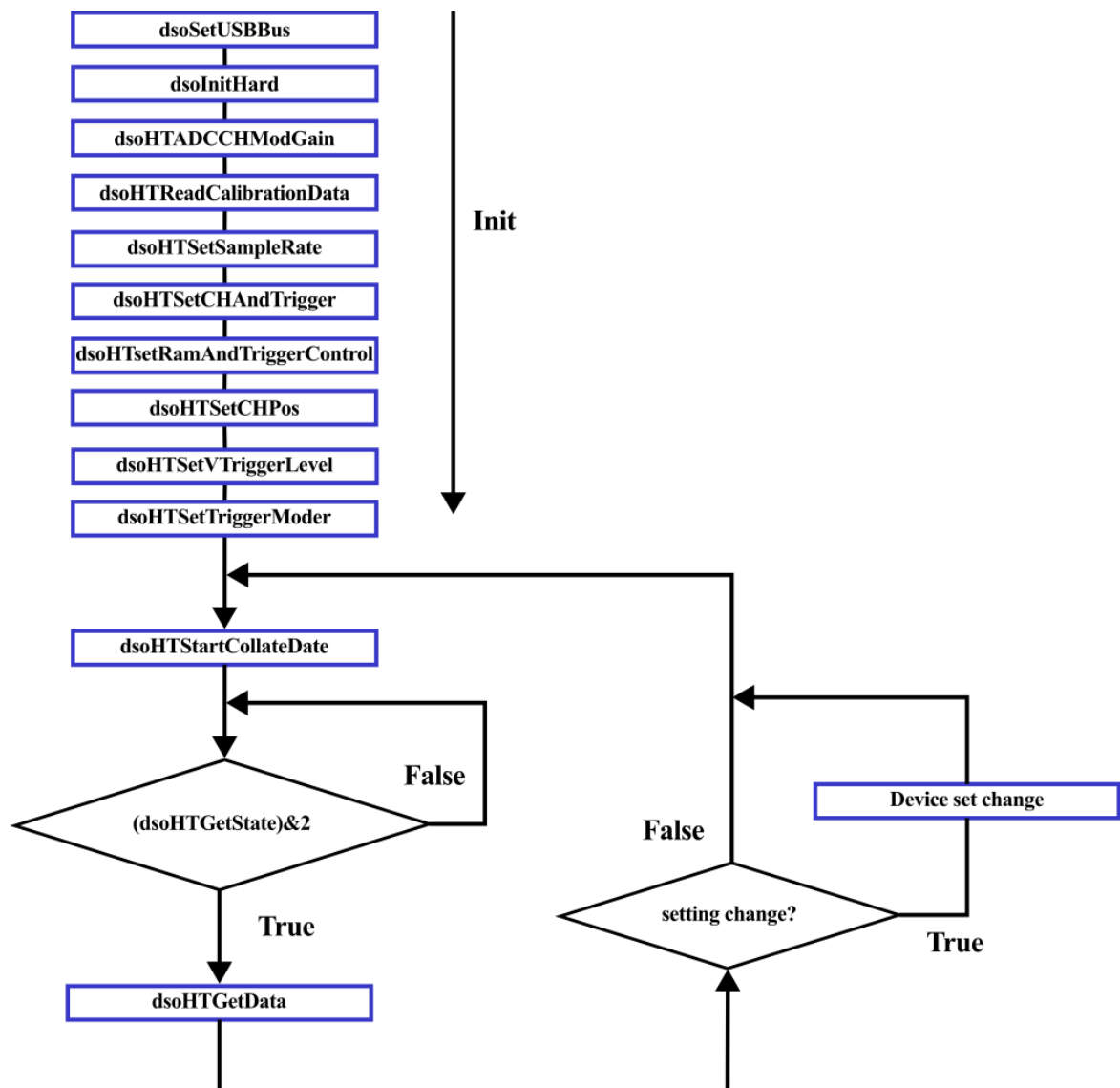
Figura 43 – Fluxo de trabalho da aplicação



Fonte: O autor.

O Hantek possui um conjunto de bibliotecas dinâmicas (DLL) que são responsáveis por configurar o dispositivo, capturar o sinal, exibir o sinal e realizar análises matemáticas. Porém o intuito deste trabalho é apenas a configuração e aquisição, a biblioteca responsável por essa tarefa é a "HTHardDll.dll" para o modelo de osciloscópio usado. Ela possui um fluxo de trabalho representado na Figura 44.

Figura 44 – Fluxo de trabalho da biblioteca HTHardDll.dll



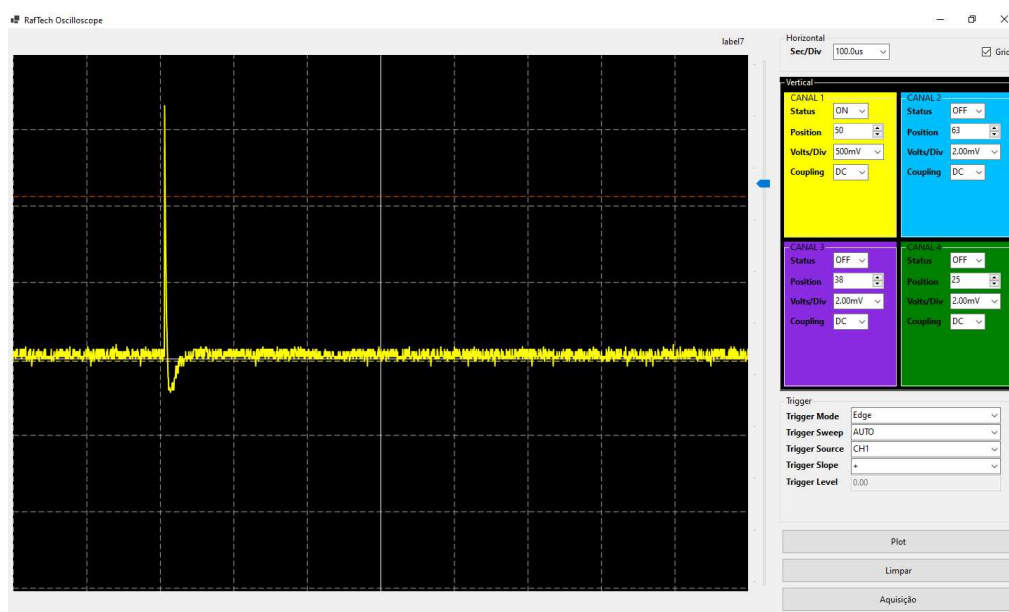
Fonte: Hantek, 2024 [28].

O processo se inicia ao verificar se existe um dispositivo na porta USB da máquina onde o osciloscópio está conectado. Em seguida, são iniciadas todas as variáveis responsáveis pela configuração inicial do osciloscópio. Logo após, é definida a quantidade de canais ativos no

Hantek, que pode ser 1, 2 ou 4 canais. Em seguida, é calibrado o nível de tensão zero do canal que será amostrado, seguido pela definição da taxa de amostragem, do canal responsável pelo controle do trigger, da forma como o trigger irá trabalhar (borda de subida ou descida), da posição dos canais, do nível de tensão do trigger e do modo do trigger. Após o término desta etapa de inicialização, é verificado se o osciloscópio está pronto para receber dados. Se o retorno for verdadeiro, será capturado o sinal e armazenado em um vetor. Durante o fluxo do algoritmo será verificado se algum parâmetro de configuração foi alterado. Se verdadeiro, todos os novos parâmetros serão reconfigurados no dispositivo e iniciar outra captura.

A aplicação inicia quando o usuário executa o programa desenvolvido em C# e solicita uma nova aquisição, conforme ilustrado na Figura 43. Na tela inicial, mostrada na Figura 45, o operador tem acesso a todas as configurações individuais por canal, como divisão de tensão elétrica, tipo de acoplamento (AC, DC e GND) e estado do canal (Ligado/Desligado), além de configurações globais como divisão de tempo e ajuste de trigger.

Figura 45 – Tela principal da aplicação



Fonte: O autor.

Após todos os parâmetros definidos, é possível iniciar uma nova aquisição pressionando o botão "Aquisição", o que resultará na criação de um arquivo contendo todos os parâmetros de configuração e chamando em segundo plano o programa em C++ que será responsável pela aquisição. O aplicativo em C++ irá receber os novos parâmetros e definir nas variáveis de configuração a serem utilizadas na DLL HTHardDll e criar um vetor para receber os dados a

serem capturados, com um tamanho de 16384 posições, onde cada canal ocupa 4096 posições. Em seguida, ele irá executar o fluxo de trabalho mostrado na Figura 44 e atribuir as variáveis de configuração. Na ausência de erros, o retorno será o vetor de dados preenchido com a informação lida pelos quatro canais. Posteriormente, o programa em C++ será finalizado. Após o processo de aquisição concluído, a aplicação em C# lê o vetor de dados e cria outros quatro novos vetores com o tamanho de 4096 posições, carregando as informações correspondentes ao seu respectivo canal. Em seguida, os vetores são interpretados por uma biblioteca gráfica que irá exibir a forma de onda dos quatro canais.

3.5 Validação do sistema

Nas seções anteriores, foi esclarecido o processo de desenvolvimento e fabricação do Agregador. A validação do equipamento finalizado foi realizada por meio de uma série de testes, os quais têm como objetivo verificar o pleno funcionamento de todos os recursos projetados e os limites de operação. O plano de teste pode ser visualizado na Tabela 8.

Tabela 8 – Plano de teste de validação do sistema

Nome do teste	Objetivo
T1 - Aquisição de dados	Verificar a fidelidade do sinal capturado pelo algoritmo
T2 - Carregamento do banco de baterias	Verificar o funcionamento do sistema de carregamento e proteções
T3 - Descarregamento do banco de baterias	Verificar o tempo de duração do banco de bateria
T4 - Estresse e estabilidade	Verificar o funcionamento do agregador quando submetido altas cargas de processamento

Fonte: O autor.

4 RESULTADOS

4.1 Aquisição de dados

Este teste teve como objetivo comparar o sinal de DP capturado pelo programa desenvolvido para o osciloscópio digital USB e utilizando um osciloscópio de bancada, com a finalidade de avaliar a similaridade entre ambos os sinais de DP capturados.

Para a geração do sinal de DP, foi utilizado um equipamento denominado calibrador de pulso, ilustrado na Figura 46, criado para simular um sinal de pulso de DP semelhante ao encontrado em sistemas defeituosos.

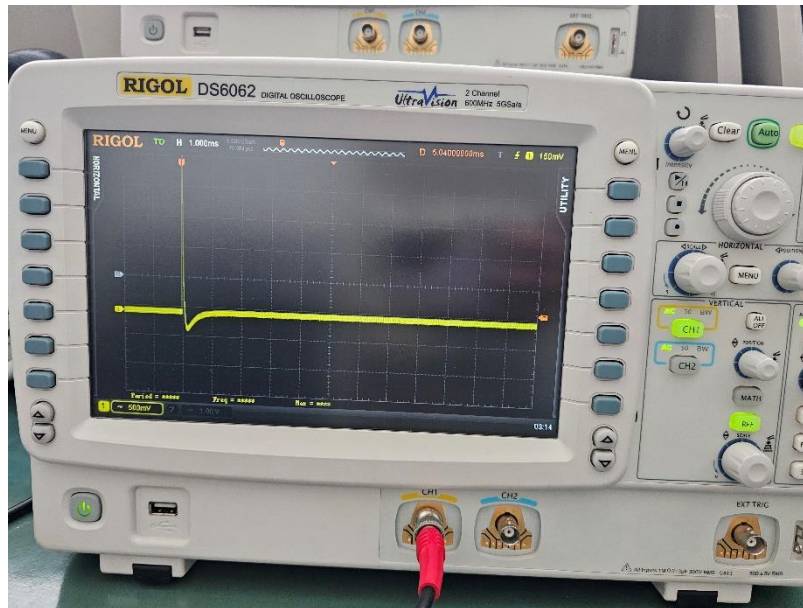
Figura 46 – Calibrador de pulso



Fonte: O autor.

O osciloscópio de bancada usado para coletar o sinal de referência foi o RIGOL DS6062, conforme mostrado na Figura 47, com largura de banda de 600MHz e taxa de amostragem de 5GSa/s.

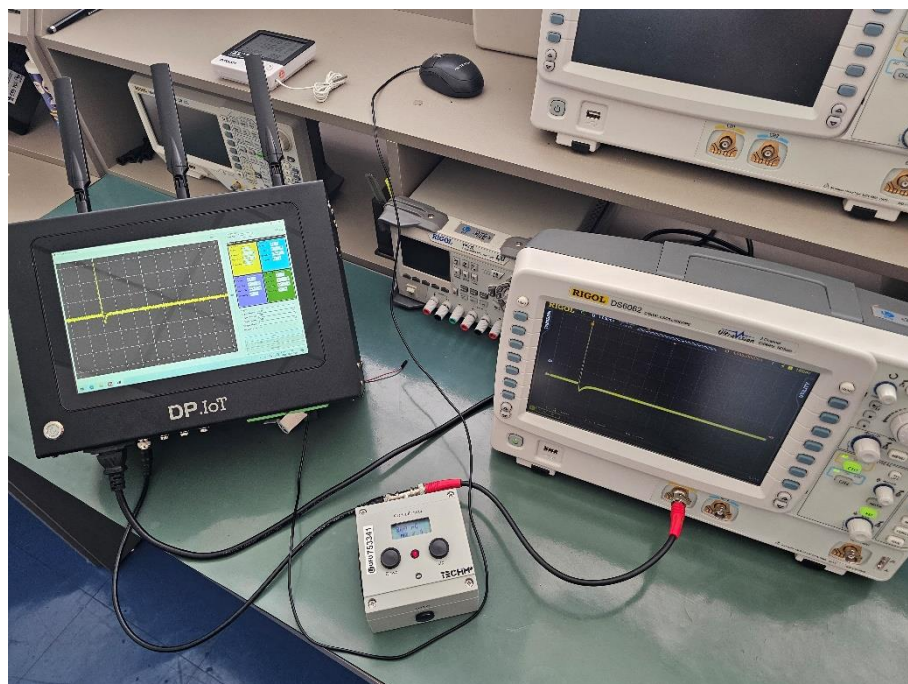
Figura 47 – RIGOL DS6062



Fonte: O autor.

Para o teste, um adaptador T BNC foi conectado ao calibrador de pulso, com um lado conectado ao canal 1 do osciloscópio USB interno do IED e o outro lado ao canal 1 do osciloscópio de bancada, conforme ilustrado na Figura 48.

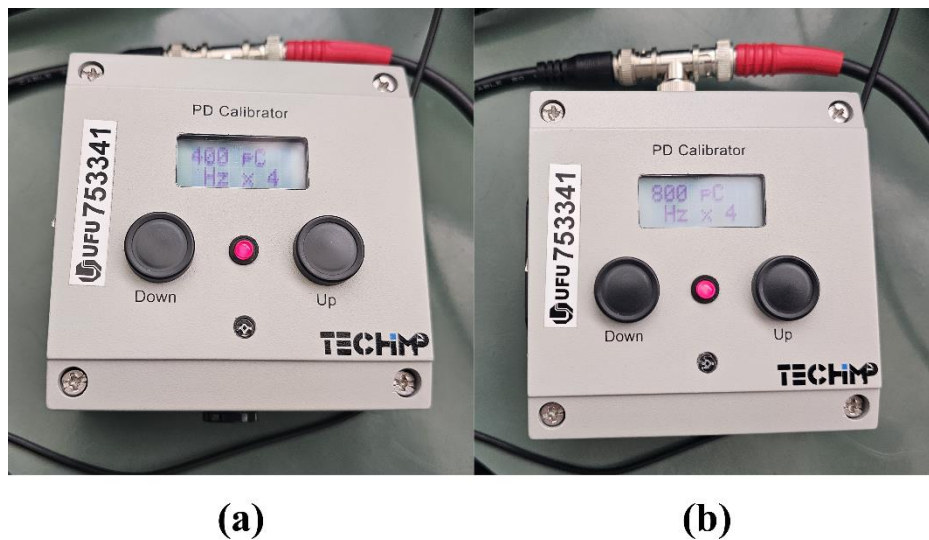
Figura 48 – Arranjo experimental



Fonte: O autor.

Foram realizados dois testes: o primeiro com o calibrador de pulso configurado para gerar um pulso com carga de 400pC (Figura 49.a) e o segundo teste com carga de 800pC (Figura 50.b). Ambos os testes foram realizados com intervalo entre pulsos de 0,25 segundos (*i.e.*, 4Hz).

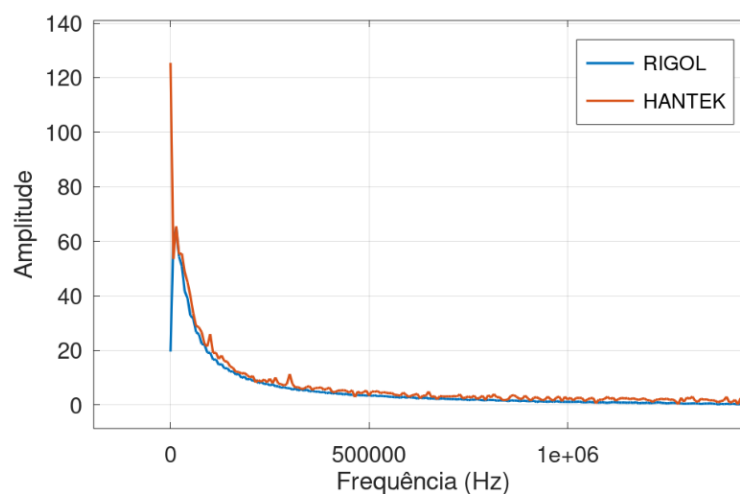
Figura 49 – Configuração do calibrador de pulso (a) 400pC e (b) 800pC



Fonte: O autor.

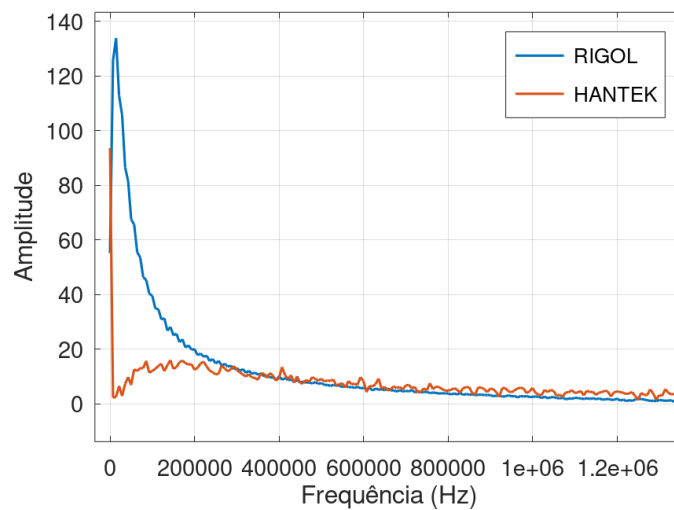
Durante os testes, as formas de onda capturadas pelo osciloscópio USB e de bancada foram exportadas em arquivos .CSV. Por meio de um script desenvolvido no GNU Octave, foi realizada uma comparação da FFT do sinal capturado nos testes de 400pC (Gráfico 1) e 800pC (Gráfico 2) entre os dois equipamentos.

Gráfico 1 – FFT do sinal há 400pC



Fonte: O autor.

Gráfico 2 – FFT do sinal há 800pC



Fonte: O autor.

Pode-se concluir que ambos os sinais apresentam um espectro visualmente semelhante, com as diferenças principalmente relacionadas à taxa de amostragem, sendo de 1GSa/s no RIGOL e de 125MSa/s no osciloscópio do IED. Este teste demonstra que nessas condições, é possível capturar pulsos de DP utilizando o software desenvolvido.

4.2 Carregamento do banco de baterias

O objetivo deste teste é verificar o sistema de carregamento e proteção do banco de baterias, além de determinar o tempo necessário para uma carga completa de todas as células. Inicialmente, foi verificado o nível de tensão do banco de baterias, conforme mostrado na Figura 50, onde a tensão foi medida em 13,634V. Considerando a tensão nominal calculada no Capítulo 3, de 16,8V, pode-se constatar que o banco está descarregado, embora não tenha atingido o nível de tensão mínimo de 8,4V, pois o objetivo não é estressar as células.

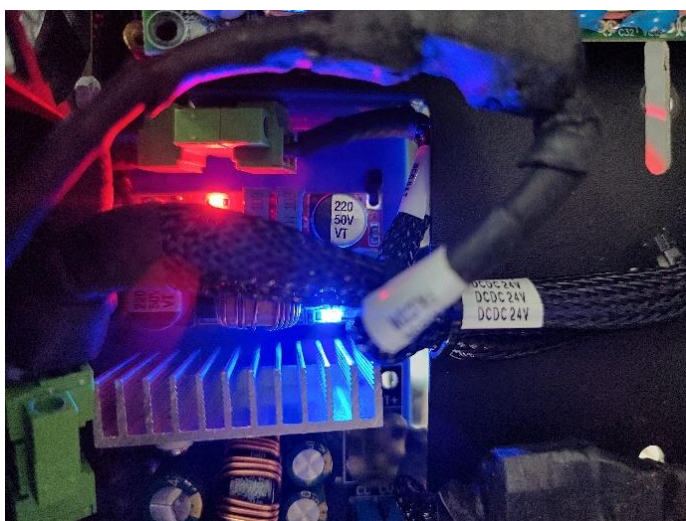
Figura 50 – Nível de tensão do banco de baterias antes do carregamento



Fonte: O autor.

Ao acionar o sistema elétrico, observou-se o funcionamento normal do conversor DC-DC *step down* responsável pelo carregamento do banco, conforme indicado pelas luzes de sinalização vermelha e azul, como ilustrado na Figura 51.

Figura 51 – Conversor DC-DC indicando o consumo de corrente



Fonte: O autor.

Para confirmar se os ajustes de tensão e corrente correspondem aos valores previamente configurados, foi instalado um multímetro na função amperímetro em série e outro na função

voltímetro em paralelo com a saída do conversor, obtendo-se os seguintes valores, conforme representado na Figura 52.

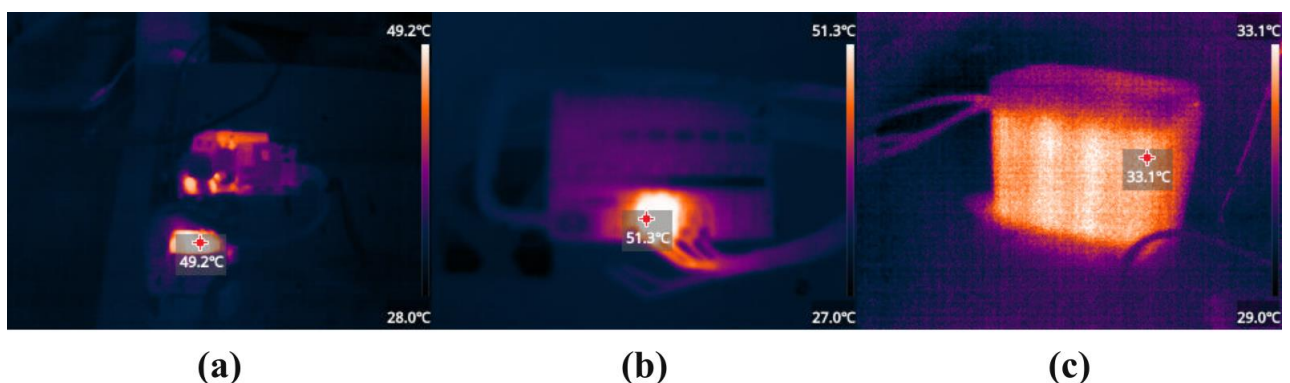
Figura 52 – Verificação da tensão e corrente durante



Fonte: O autor.

Próximo ao término do carregamento, foram capturadas imagens infravermelhas do conversor DC-DC (Figura 53.a), do BMS (Figura 53.b) e do banco de baterias (Figura 53.c), para analisar a presença de defeitos ou se a temperatura de operação desses módulos poderia, no futuro, tornar-se uma fonte de calor prejudicial para o sistema.

Figura 53 – Imagem infravermelho (a) conversor DC-DC, (b) BMS e (c) banco de baterias

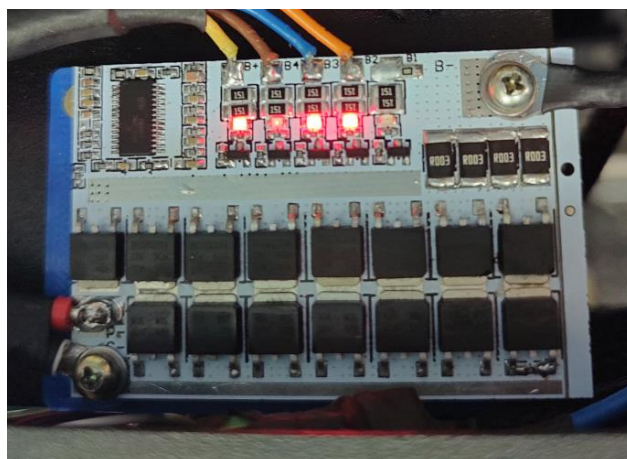


Fonte: O autor.

Também foi observado, próximo ao término do processo, o funcionamento do sistema de balanceamento do módulo BMS, como mostrado na Figura 54, onde os LEDs vermelhos

indicam que aquelas células não estão mais recebendo corrente, mas sim desviando para o banco de resistores.

Figura 54 – Sistema de balanceamento de células em funcionamento



Fonte: O autor.

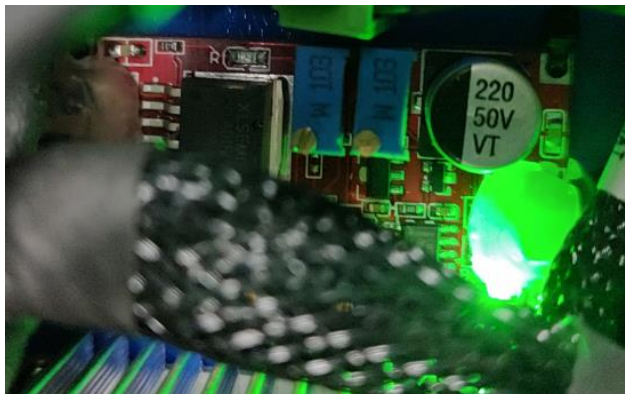
Quando o processo de carga foi concluído, houve uma queda na corrente fornecida pelo conversor DC-DC, como mostrado na Figura 55, indicando que o sistema de proteção de carregamento do BMS entrou em operação, reduzindo significativamente o fornecimento de corrente. Outro indicativo foi observado na luz verde do módulo, indicando que a carga em sua saída não estava drenando corrente em níveis significativos, como ilustrado na Figura 56.

Figura 55 – Corrente na saída no conversor DC-DC



Fonte: O autor.

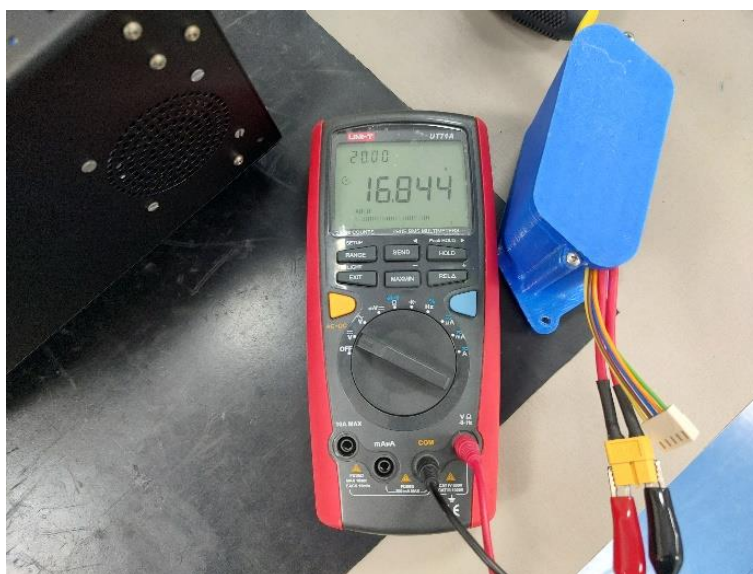
Figura 56 – Luz de indicação de término de carregamento do conversor DC-DC



Fonte: O autor.

Ao final do processo, a bateria foi removida e a tensão elétrica do banco foi medida, indicando aproximadamente 16,8V, conforme mostrado na Figura 57.

Figura 57 – Tensão elétrica do banco de baterias ao final do carregamento



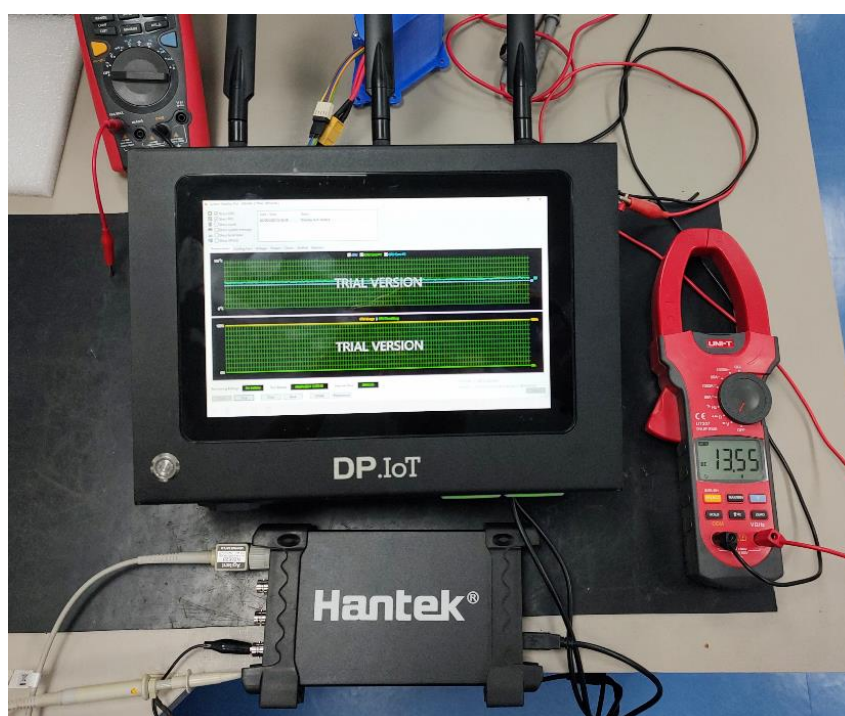
Fonte: O autor.

Neste teste, foi possível verificar o funcionamento do sistema de carregamento, onde o banco de baterias atingiu a tensão elétrica esperada de 16,8V (configurada na saída do conversor DC-DC). Também foi observado o funcionamento do sistema de balanceamento de carga do módulo BMS, assim como a atuação do sistema de proteção de carregamento, que reduziu a corrente na saída do conversor DC-DC quase a zero. O processo de carregamento levou aproximadamente 5 horas.

4.3 Descarregamento do banco de baterias

O propósito deste teste é verificar se o tempo de duração calculado corresponde ao tempo real de funcionamento do banco de baterias. Para isso, foi necessário aumentar o consumo do IED ao máximo possível, representando um uso agressivo do equipamento em campo. O teste foi realizado utilizando a ferramenta de estresse e estabilidade AIDA64, configurada para estressar a CPU e a FPU ao máximo. Conforme mostrado na Figura 58.

Figura 58 – Arranjo de teste de duração do banco de baterias



Fonte: O autor.

Durante o procedimento, o banco de baterias foi monitorado com um multímetro a cada 15 minutos para evitar que atingisse o nível de tensão crítico das células. A duração do banco de baterias foi definida como o tempo gasto para a tensão sair de 16,8V e chegar próximo a 8,4V.

Ao final, o teste teve a duração de 4 horas, e a tensão do banco de baterias atingiu 13,634V, não sendo necessário continuar o teste, pois o objetivo foi alcançado.

Conclui-se que o banco de baterias atendeu às expectativas para as quais foi projetado. O motivo pelo qual o banco de baterias ultrapassou o tempo de duração calculado é que o consumo geral do IED leva em consideração a potência total de todos os módulos internos de

acordo com as informações dos fabricantes. No entanto, muitos desses módulos têm requisitos de potência que dobram a potência real de operação, como no caso da tela sensível ao toque, que exige uma fonte de 3W, embora o consumo típico seja de 1,5W, conforme dados do fabricante.

4.4 Estresse e estabilidade

O objetivo deste teste é avaliar a estabilidade do IED quando submetido a um grande estresse computacional em um ambiente aquecido. Para isso, o agregador foi posicionado em uma sala com temperatura de 31.4°C e umidade relativa de 53%, conforme mostrado na Figura 59. A fim de induzir estresse na SBC, utilizou-se o programa de teste e estresse AIDA64 configurado para o máximo estresse de CPU e FPU, enquanto pulsos de DP eram aferidos durante o teste.

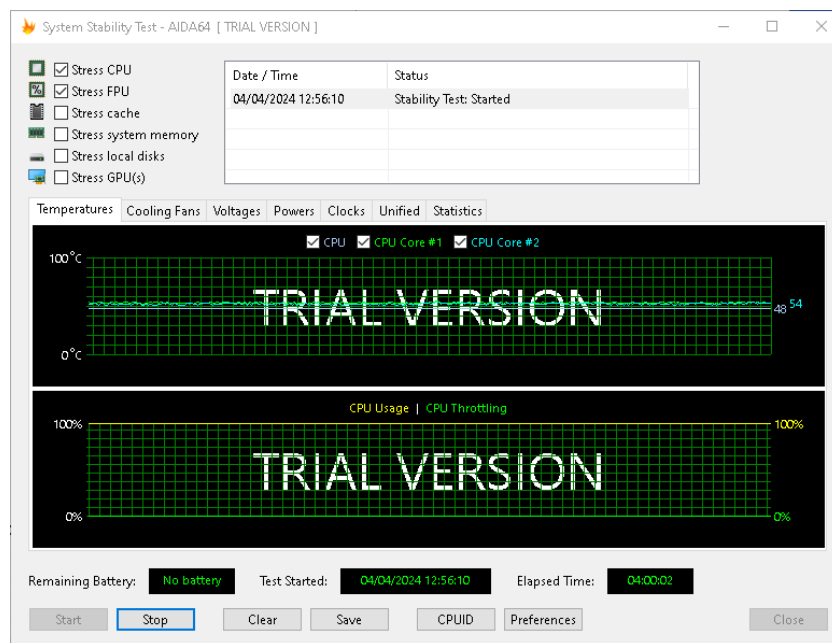
Figura 59 – Arranjo de teste de estresse



Fonte: O autor.

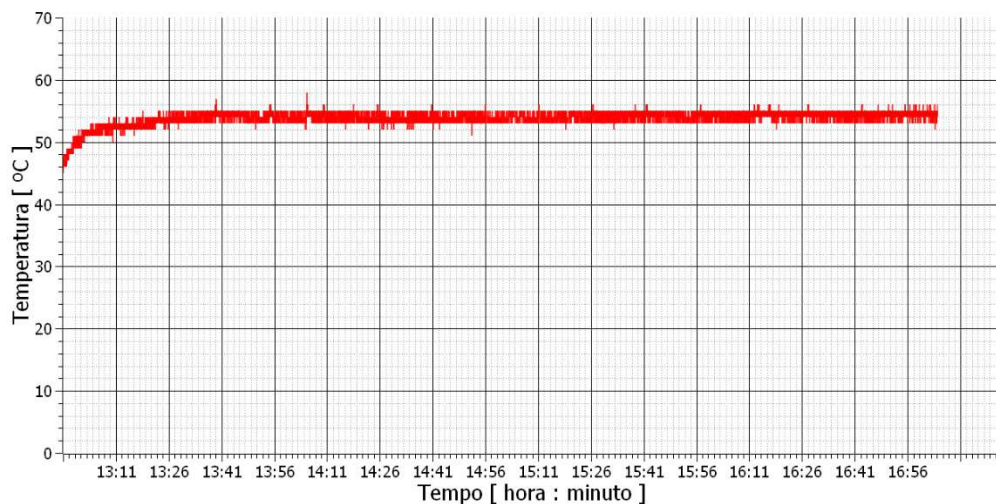
O teste teve duração de 4 horas, conforme mostrado na Figura 60. O comportamento da SBC pode ser observado no Gráfico 3, que exibe a temperatura ao longo do procedimento. Com o auxílio de uma câmera infravermelha, foram registradas as temperaturas de diferentes componentes: a fonte de alimentação primária atingiu 39,5°C no ponto mais quente (Figura 61.a), a SBC teve um pico de temperatura na placa de 49,6°C (Figura 61.b), e o osciloscópio digital registrou a temperatura mais alta de 49,6°C (Figura 61.c).

Figura 60– Janela de monitoramento do teste de estresse



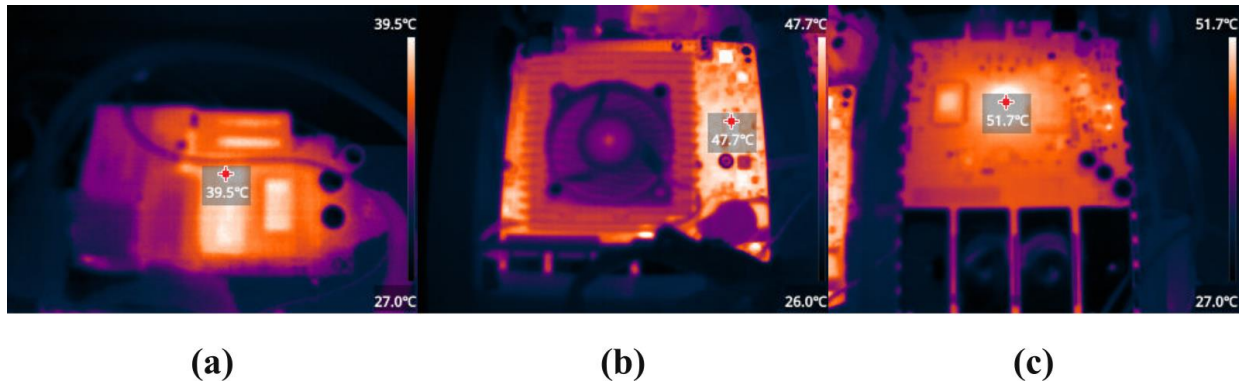
Fonte: O autor.

Gráfico 3 – Telemétrica da SBC



Fonte: O autor.

Figura 61 – Foto infravermelho (a) fonte de alimentação, (b) SBC e (c) osciloscópio



Fonte: O autor.

Assim, observa-se que a plataforma do IED suportou o teste e que o sistema de arrefecimento manteve uma temperatura adequada, não afetando o funcionamento dos dispositivos internos e garantindo que todos os módulos permanecessem dentro da faixa de temperatura de operação especificada pelo fabricante.

5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

O propósito deste projeto envolve-se no desenvolvimento prospectivo de uma plataforma tecnológica de medição que permitisse a aquisição de dados de descargas parciais em campo. De fato, o foco foi mais direcionado ao desenvolvimento da base tecnológica da plataforma do que em sua funcionalidade de detecção de descargas. Esta última deve ser objeto de estudos adicionais mais voltados para a natureza física e elétrica das descargas parciais.

Os testes realizados com o equipamento desenvolvido indicaram, em uma avaliação preliminar, que a plataforma projetada pode ser utilizada para a aquisição de sinais de descarga com base na escolha de um modelo OEM de osciloscópio. Os resultados demonstraram que as formas de onda podem ser registradas usando um gerador de sinais capaz de emitir até 4 pulsos de descarga por segundo. No entanto, não foram realizadas medições em situações reais, onde o número de descargas ao longo do tempo é muito maior, assim como sua taxa de repetição. Ainda assim, o foco principal foi demonstrar que um osciloscópio OEM integrado a todos os elementos de projeto auxiliares desenvolvidos nesta pesquisa possui grande potencial para se tornar um equipamento de medição de descargas parciais. Reconhece-se que o modelo de osciloscópio proposto não tem a capacidade de registrar várias descargas parciais em curtos intervalos de tempo, mas foi suficiente para mostrar o potencial da solução.

No teste de carregamento do banco de baterias, foi observado o funcionamento dos componentes, destacando-se a atuação dos sistemas de controle e proteção. Já no teste de descarregamento do banco de baterias, obteve-se uma autonomia de 4 horas, superando a estimativa teórica de duração. O teste básico de estresse evidenciou a capacidade do IED de operar em um ambiente confinado, exposto a uma temperatura ligeiramente elevada.

Por fim, os estudos e desenvolvimentos até o momento delineiam um conjunto de possibilidades para o aprimoramento da ferramenta de software e hardware. No âmbito do software, estão envolvidas diversas perspectivas, como a inclusão da análise e diagnóstico de descargas parciais. No hardware, isso inclui a eliminação do uso de chicotes elétricos, substituindo-os por uma única placa de circuito impresso (placa de integração ou backplane) destinada à distribuição elétrica para todos os dispositivos internos, além da utilização dos recursos de conectividade disponíveis na SBC.

REFERÊNCIAS

- [1] WIELEN, P.C.J.M. Online *Detection and Location of Partial Discharges in Medium Voltage Power Cable*. Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven – 2005. Thesis.
- [2] Bartnikas, R., McMahon, E. J. (Ed), *Engineering Dielectrics – Vol. 1. Corona Measurement And Interpretation Philadelphia: Astm Sepecial Technical Publication Stp 669*, 1979.
- [3] NBR IEC Publicação 60270. *Técnicas De Ensaio Elétricos De Alta-Tensão – Medição De Descargas Parciais*, 2017.
- [4] Hayt Jr, William H., and John A. Buck. *Eletromagnetismo*. Bookman Editora, 2013. 8ªEd.
- [5] SADIKU, Matthew N. O. *Elementos do Eletromagnetismo*. 3ª edição. Porto Alegre: Bookman, 2004.
- [6] N. Rosle, N. A. Muhamad, M. N. K. H. Rohani and M. K. M. Jamil, "Partial Discharges Classification Methods in XLPE Cable: A Review," in IEEE Access, vol. 9, pp. 133258-133273, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3115519.
- [7] T. Shahsavarian et al., "A Review of Knowledge-Based Defect Identification via PRPD Patterns in High Voltage Apparatus," in IEEE Access, vol. 9, pp. 77705-77728, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3082858.
- [8] Álvarez, F.; Garnacho, F.; Ortego, J.; Sánchez-Urán, M.Á. *Application of HFCT and UHF Sensors in On-Line Partial Discharge Measurements for Insulation Diagnosis of High Voltage Equipment*. *Sensors* 2015, 15, 7360-7387. <https://doi.org/10.3390/s150407360>
- [9] *Guidelines for Partial Discharge Detection using Conventional (IEC60270) and Unconventional Methods*, CIGRE WG D1.37 Technical Brochure 662, 2016.
- [10] S. Kornhuber, K. Jani, M. Boltze and G. Valtin, "Partial discharge (PD) detection on medium voltage switchgears using non-invasive sensing methods," in 2012 IEEE Int. Conf. on Condition Monitoring and Diagnosis, Bali, 2012, pp. 392-395, DOI: 10.1109/CMD.2012.6416462.
- [11] J. Benzing, C. L. Patterson, B. J. Cassidy, I. Blokhintsev and A. H. Loesch, "Continuous on-line partial discharge monitoring of médium voltage substations," 2012 IEEE-IAS/P CA 54th Cement Industry Tech. Conf., San Antonio, TX, 2012, pp. 1-12, DOI: 10.1109/CITCON.2012.621570.
- [12] CIGRE *Partial Discharge Detection in Installed HV Extruded Cable Systems*, CIGRE Tech. Brochure 182, CIGRE WG 21.16, Apr. 2001.
- [13] A. Kheirmand, M. Leijon, C. Tornkvist, "Detection and localization of partial discharge in high voltage power cable joints", IEEE ICSD '98, pp. 145 – 148.

- [14] Z.S. Zhang, D.M. Xiao, Y. Li, "*Rogowski air coil sensor technique for on-line partial discharge measurement of power cables*", Science, Measurement & Technology, IET, Volume: 3 , Issue: 3, Publication Year: 2009 , pp. 187 – 196.
- [15] M. H. Samimi, A. Mahari, M. A. Farahnakian and H. Mohseni, "*The Rogowski Coil Principles and Applications: A Review*," in *IEEE Sensors Journal*, vol. 15, no. 2, pp. 651-658, Feb. 2015, doi: 10.1109/JSEN.2014.2362940.
- [16] LATHI, Bhagwandas Pannalal, and Zhi Ding. "Sistemas de comunicações analógicos e digitais modernos." *LTC, Rio de Janeiro* (2012).
- [17] Willsky, Alan V. Oppenheim. "Sinais e Sistemas." (2000): 90-110.
- [18] ALVES, Mário ferreira. *ABC do osciloscópio: princípio de funcionamento e estado da tecnologia*. 3. ed. [S. l.: s. n.], 2007.
- [19] Z. Berler, A. Golubev, A. Romashkov and I. Blokhintsev, "A new method of partial discharge measurements," 1998 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (Cat. No.98CH36257), Atlanta, GA, USA, 1998, pp. 315-318 vol. 1, doi: 10.1109/CEIDP.1998.733991.
- [20] H. O. Mota and F. H. Vasconcelos, "A partial discharge data acquisition system based on programmable digital oscilloscopes," IMTC 2001. Proceedings of the 18th IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference. Rediscovering Measurement in the Age of Informatics (Cat. No.01CH 37188), Budapest, Hungary, 2001, pp. 994-999 vol.2, doi: 10.1109/IMTC.2001.928229.
- [21] R. Bartnikas e EJ McMahon, *Dielétricos de Engenharia Volume 1 - Medição e Interpretação de Corona*, Publicação ASTM STP 669, vol. 1, 1979.
- [22] K. Agarwal, G. Gerdin, P. Basappa and V. Lakdawala, "Development of a digital acquisition system for partial discharges," Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Cancun, Mexico, 2002, pp. 914-917, doi: 10.1109/CEIDP.2002.1048944.
- [23] G. C. Stone, "Partial discharge diagnostics and electrical equipment insulation condition assessment," in *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 12, no. 5, pp. 891-904, Oct. 2005, doi: 10.1109/TDEI.2005.1522184.
- [24] L. Hao, P. L. Lewin and S. G. Swinger, "Identification of multiple partial discharge sources," 2008 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, Beijing, China, 2008, pp. 118-121, doi: 10.1109/CMD.2008.4580244.

- [25] A. Jambula, V. Nimbole, V. Lakdawala and P. Basappa, "Development of a digital acquisition system for partial discharge measurement and analyses," 2009 IEEE Electrical Insulation Conference, Montreal, QC, Canada, 2009, pp. 60-63, doi: 10.1109/EIC.2009.5166324.
- [26] Kjær, Søren & Holboell, Joachim. (2018). System for detection and analysis of partial discharges under transient voltage application. Proceedings of the Nordic Insulation Symposium. 10.5324/nordis.v0i23.2460.
- [27] Chin, Kui Fern & Yii, Chai & Bakar, Asfarina & Saad, Ismail & Kin, Kenneth & Megat Hasnan, Megat Muhammad Ikhsan & Mohamad, Nur Aqilah. (2023). Fault localization on power cables using time delay estimation of partial discharge signals. International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE). 13. 6000. 10.11591/ijece.v13i6.pp6000-6015.
- [28] Mean Well, 2024. Disponível em: <https://www.meanwell.com>. Acesso em: 23/03/2024.
- [29] STA – Sistema e Tecnologia Aplicada, 2024. Disponível em: <https://www.sta-eletronica.com.br/>. Acesso em: 24/03/2024.
- [30] Up- Board, 2024. Disponível em: <https://up-board.org/>. Acesso em: 25/03/2024
- [31] Hantek, 2024. Disponível em: <https://www.hantek.com/>. Acesso em: 26/03/2024.