



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA DO PARÁ
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA E BIOMÉDICA

JOÃO DURVAL SOUZA MARRUAZ DA SILVA

SISTEMA DE MEDIÇÃO DE PARÂMETROS ELÉTRICOS PARA
GERAÇÃO AUXILIAR À COMBUSTÃO INTEGRADA A UMA
MICRORREDE DE DISTRIBUIÇÃO EM CORRENTE CONTÍNUA.

BELÉM

2026

JOÃO DURVAL SOUZA MARRUAZ DA SILVA

SISTEMA DE MEDIÇÃO DE PARÂMETROS ELÉTRICOS PARA
GERAÇÃO AUXILIAR À COMBUSTÃO INTEGRADA A UMA
MICRORREDE DE DISTRIBUIÇÃO EM CORRENTE CONTÍNUA.

Trabalho de Curso apresentado à
Faculdade de Engenharia Elétrica e
Biomédica da Universidade Federal do
Pará como requisito para obtenção do
título de Bacharel em Engenharia
Elétrica.

Orientador(a): Prof. Dr. Wilson Negrão
Macêdo

Coorientador(a): Prof. Dr. Marcos André
Barros Galhardo

BELÉM

2026

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

- M358s Marruaz, João Durval Souza Marruaz da Silva.
SISTEMA DE MEDIÇÃO DE PARÂMETROS ELÉTRICOS
PARA GERAÇÃO AUXILIAR À COMBUSTÃO INTEGRADA
A UMA MICRORREDE DE DISTRIBUIÇÃO EM CORRENTE
CONTÍNUA / João Durval Souza Marruaz da Silva Marruaz. —
2026.
96 f. : il. color.
- Orientador(a): Prof. Dr. Wilson Negrão Macêdo Macêdo
Coorientador(a): Prof. Dr. Marcos André Barros Galhardo
Trabalho de Curso (Graduação) - Universidade Federal do Pará,
Instituto de Tecnologia, Faculdade de Engenharia Elétrica, Belém,
2026.
1. Medidor de parâmetros elétricos. 2. Geração Híbrida. 3.
Microrrede. I. Título.

CDD 333.794

JOÃO DURVAL SOUZA MARRUAZ DA SILVA

**SISTEMA DE MEDIÇÃO DE PARÂMETROS ELÉTRICOS PARA GERAÇÃO
AUXILIAR À COMBUSTÃO INTEGRADA A UMA MICRORREDE DE DISTRIBUIÇÃO EM
CORRENTE CONTÍNUA**

Trabalho de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Elétrica e Biomédica da Universidade Federal do Pará como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador(a): Prof. Dr. Wilson Negrão Macêdo

Coorientador(a): Prof. Dr. Marcos André Barros Galhardo

Data da aprovação: 04/03/2026

Conceito: Excelente

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Wilson Negrão Macêdo
(Orientador – ITEC/UFPA)

Prof. Dr. Marcos André Barros Galhardo
(Coorientador – FEEB/ITEC/UFPA)

Eng. Me. Arthur Correa da Fonseca
(Membro – GEDAE/UFPA)

Eng. Me. Lucas dos Santos Bulhosa
(Membro – GEDAE/UFPA)

Eng. Anderson Marques Leal
(Membro – GEDAE/UFPA)

Dedico este trabalho a todos os meus amigos e familiares que me acompanharam durante toda esta trajetória. Em especial a minha companheira Amanda, que esteve comigo no início e agora no fim dessa minha jornada.

AGRADECIMENTOS

Expresso meus sinceros agradecimentos a toda a equipe do GEDAE, que auxiliou no desenvolvimento do protótipo do medidor utilizado neste trabalho, com um agradecimento especial aos meus amigos de graduação. Ao meu orientador, agradeço pela confiança depositada e pela oportunidade de integrar este grupo de pesquisa, que foi um pilar essencial em minha carreira acadêmica e profissional. Ademais, agradeço aos moradores da comunidade da Ilha da Onças que também me auxiliaram nesta minha jornada. Aos meus familiares, em especial aos meus pais, agradeço por serem os pilares da minha formação, eu não teria chegado aonde cheguei sem eles. Estendo minha gratidão à minha madrastra e aos meus sogros, que acompanharam minha trajetória desde o início e me ajudaram a superar os desafios. Por fim, agradeço à minha esposa, que esteve ao meu lado desde o começo do curso e testemunhou cada obstáculo vencido para que eu chegasse até este momento.

*"Os sonhos dos homens não têm fim!"
(Marshall D. Teach).*

RESUMO

A universalização do acesso à energia elétrica na região amazônica enfrenta barreiras logísticas e geográficas que impulsionam a adoção de sistemas de geração descentralizada em sistemas isolados. Na comunidade da Ilha das Onças (Barcarena-PA), uma das soluções encontradas para o acesso da energia elétrica foi com o uso de sistemas fotovoltaicos através de uma Microrrede de Distribuição em Corrente Contínua (MDCC) que atende à demanda local, mas sua geração de energia fica comprometida durante o período chuvoso ou de baixa irradiação solar, necessitando de um Sistema de Geração Auxiliar (SGA), o qual é composto por um alternador BOSCH HD10 acoplado a um motor TOYAMA, para manter a distribuição de energia. Este trabalho apresenta o desenvolvimento, a montagem e a validação de um sistema de instrumentação embarcada de baixo custo para o monitoramento de parâmetros elétricos provenientes do SGA. A solução desse problema baseou-se na plataforma *open-source* do arduino nano, integrando sensores de efeito hall e transdutor de tensão isolados para a aquisição de dados, com registro em memória não volátil. A construção física do protótipo utilizou uma fresadora CNC para a confecção das trilhas da Placa de Circuito Impresso (PCB). Para proteção, utilizou-se uma caixa hermética comercial, adaptada mecanicamente para a fixação dos componentes e conectores, visando à proteção contra as intempéries da região. Os testes de campo validaram a funcionalidade do protótipo, a partir do registro dos valores de tensão e corrente e comparando-as com um multímetro osciloscópio utilizado no momento do teste, tendo uma faixa de erro de medição de 0,01% a 0,4%. Além disso, observou-se a saturação do sensor de corrente nominal de 30 A frente aos picos de carga do alternador, limitando a medição da energia total, mas fornecendo dados para a comprovação. Conclui-se que a solução proposta é viável para monitorar e armazenar dados operacionais durante o acionamento do SGA, oferecendo uma alternativa acessível à instrumentação comercial.

Palavras-chave: microrrede CC, medidor de parâmetros elétricos, sistema de geração auxiliar.

ABSTRACT

The universalization of access to electrical energy in the Amazon region faces logistical and geographical barriers that drive the adoption of decentralized generation in isolated systems. In the community of Ilha das Onças (Barcarena-PA), one of the solutions found for electrical energy access was the use of photovoltaic systems through a Direct Current Microgrid (DCMG) that meets local demand, but its energy generation is compromised during the rainy season or periods of low solar irradiation, requiring an Auxiliary Generation System (AGS), which consists of a BOSCH HD10 alternator coupled to a TOYAMA motor, to maintain power distribution. This work presents the development, assembly, and validation of a low-cost embedded instrumentation system for monitoring electrical parameters from the AGS. The solution to this problem was based on the open-source Arduino Nano platform, integrating Hall effect sensors and an isolated voltage transducer for data acquisition, with logging in non-volatile memory. The physical construction of the prototype used a CNC milling machine to manufacture the traces of the Printed Circuit Board (PCB). For protection, a commercial hermetic box was used, mechanically adapted for fixing components and connectors, aiming to protect against the region's weather conditions. Field tests validated the prototype's functionality by recording voltage and current values and comparing them with an oscilloscope multimeter used at the time of testing, presenting a measurement error range of 0.01% to 0.4%. Additionally, saturation of the nominal current sensor was observed in the face of the alternator's load peaks, limiting the measurement of total energy but providing data for proof of concept. It is concluded that the proposed solution is viable for monitoring and storing operational data during the activation of the AGS, offering an accessible alternative to commercial instrumentation.

Keywords: DC microgrid; electrical parameters meter; auxiliary generation system.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Unidades federativas com os maiores indicadores de pobreza energética. ...	18
Figura 2 - Irradiação nacional durante os períodos do ano.....	20
Figura 3 - Modelo de configuração do SIGFI.	23
Figura 4 - Precipitação anual nas regiões da Ilha das Onças.....	26
Figura 5 - Modelo de geração híbrida.	27
Figura 6 - Modelo de um analisador de qualidade de energia.....	29
Figura 7 - Modelo de medidor por efeito hall.	31
Figura 8 - Exemplo de medição por resistor <i>shunt</i>	32
Figura 9 - Extensão da NDCC implantada na comunidade situada na Ilha das Onças. .	35
Figura 10 - Modelagem do sistema de geração.	36
Figura 11 - Motor Toyama XP 500cc utilizado como fonte primária.....	37
Figura 12 - Modelo do alternador Bosch utilizado.....	37
Figura 13 - Esquema de conexão do alternador.....	38
Figura 14 - Diagrama simplificado de medição de parâmetros em corrente contínua. ...	38
Figura 15 - Modelo do conversor utilizado.	39
Figura 16 - Descrição do microcontrolador utilizado.....	40
Figura 17 - Diagrama de conexão do MPE.	41
Figura 18 - Modelo do transdutor de corrente utilizado.....	42
Figura 19 - Configuração de conectividade da garra de hall.....	42
Figura 20 - Modelo de transdutor de tensão utilizado.	43
Figura 21 - Configuração de conectividade do transdutor de tensão.	44
Figura 22 - Modelo do módulo do microSD utilizado.	45
Figura 23 - Configuração de conexão do micro SD com o Arduino.	45
Figura 24 - Modelo de RTC utilizado.....	46
Figura 25 - Modelo de conexão do RTC.	46
Figura 26 - Modelo display LCD utilizado.	47
Figura 27 - Modelo da caixa hermética de proteção.	48
Figura 28 - Fonte utilizada como alimentadora na calibração.....	50
Figura 29 - Fonte passiva usada na calibração.	51
Figura 30 - Multímetro utilizado na calibração.	51
Figura 31 - Curva de calibração da corrente.....	53
Figura 32 - Gráfico de tendência para calibração do transdutor de tensão.....	54

Figura 33 - Diagrama do <i>firmware</i> do Arduino.	56
Figura 34 - Projeto de conexão no <i>software</i> KiCad.	57
Figura 35 - Criação e ligação das trilhas de conexão <i>software</i> no KiCad.	58
Figura 36 - Versão final e modelada pelo KiCad.	58
Figura 37 - Fabricação da PCB com a CNC.	59
Figura 38 - Posicionamento do hardware na caixa hermética.	60
Figura 39- Primeira tentativa de instalação do MPE.	62
Figura 40 - Desconfiguração do MPE na chegada da ilha.	63
Figura 41 - Multímetro Owon utilizado em campo.	64
Figura 42 - Medição do multímetro pelo aplicativo.	65
Figura 43 - Comparação da medição de corrente entre multímetro e o medidor desenvolvido.	66
Figura 44 - Comparação de medição de tensão entre o MPE e o multímetro.	66
Figura 45 - Nova configuração do sistema de geração auxiliar.	70
Figura 46 - Tensão da rede antes do desligamento dos sistemas através do MPE.	71
Figura 47 - Tensão na rede após o desligamento do sistema através do MPE.	71
Figura 48 - Gráfico de corrente de ruído do alternador.	72
Figura 49 - Medição do teste de conformidade do medidor.	73
Figura 50 - Configuração da MDCC na Etapa 1.	74
Figura 51 - Medição da corrente pelo multímetro na Etapa 1.	74
Figura 52 - Medição de corrente pelo MPE na etapa 1.	75
Figura 53 - Medição de tensão pelo MPE na Etapa 1.	75
Figura 54 - Medição de potência pelo MPE na Etapa 1.	76
Figura 55 - Configuração da MDCC na Etapa 2.	77
Figura 56 - Medição de corrente pelo multímetro na etapa 2.	77
Figura 57 - Medição de corrente pelo MPE na etapa 2.	78
Figura 58 - Medição da tensão pelo MPE na etapa 2.	78
Figura 59 - Medição da potência pelo MPE na etapa 2.	79
Figura 60 - Configuração da MDCC na etapa 3.	79
Figura 61 - Medição de corrente pelo multímetro na etapa 3.	80
Figura 62 - Medição de corrente pelo MPE na etapa 03.	80
Figura 63 - Medição de tensão pelo MPE na etapa 03.	81
Figura 64 - Medição de potência pelo MPE na etapa 03.	81
Figura 65 - Medição com o multímetro na etapa 04.	82

Figura 66 - Medição de corrente pelo MPE na etapa 04.	83
Figura 67 - Medição de tensão pelo MPE na etapa 04.	83
Figura 68 - Medição de potência na etapa 04.	84
Figura 69 - Resultado geral das 5 etapas.	84
Figura 70 - Análise de erro relativo durante o teste.	86

LISTA DE TABELA

Tabela 1 - Valores mensurados para calibração.....	52
Tabela 2 - Valores para calibração do medidor.....	54
Tabela 3 - Valores lidos no mostrador do medidor (Figura 40).....	63
Tabela 4 - Primeira medição de corrente.....	67
Tabela 5 -Segunda medição de corrente.....	67
Tabela 6 - Terceira medição de corrente.....	68
Tabela 7 - Medição de tensão inicial.....	68
Tabela 8 - Valores da Figura 49.....	73
Tabela 9 - Cronograma dos eventos.....	73
Tabela 10 - Resumo das medições de erros relativos.....	85

LISTA DE SIGLAS

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
- ADC – Analog-to-Digital Converter (Conversor Analógico-Digital)
- ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica
- AVR – Família de microcontroladores baseada em arquitetura RISC modificada
- CA – Corrente Alternada
- CC – Corrente Contínua
- CS – Chip Select (Seleção de Chip)
- CSV – Comma-Separated Values (Valores Separados por Vírgula)
- DC – Direct Current (Corrente Contínua)
- DSP – Digital Signal Processor (Processador Digital de Sinais)
- ESP – Família de microcontroladores desenvolvida pela Espressif Systems
- FFT – Fast Fourier Transform (Transformada Rápida de Fourier)
- GSM – Global System for Mobile Communications
- I2C – Inter-Integrated Circuit (Barramento de comunicação serial)
- IEC – International Electrotechnical Commission
- IDE – Integrated Development Environment (Ambiente de Desenvolvimento Integrado)
- IHM – Interface Homem-Máquina
- IoT – Internet of Things (Internet das Coisas)
- IP – Ingress Protection (Grau de Proteção / Índice de Proteção)
- LCD – Liquid Crystal Display (Display de Cristal Líquido)
- LoRa – Long Range (Tecnologia de modulação de rádio de longo alcance)
- MCU – Microcontroller Unit (Unidade Microcontroladora)
- MISO – Master In Slave Out (Entrada do Mestre, Saída do Escravo)

MOSI – Master Out Slave In (Saída do Mestre, Entrada do Escravo)

MPE – Medidor de Parâmetros Elétricos

NBR – Norma Brasileira

NDCC – Nanorrede de Corrente Contínua

PIC – Peripheral Interface Controller (Família de microcontroladores)

PQA – Power Quality Analyzer (Analisador de Qualidade de Energia)

PRODIST – Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional

RTC – Real Time Clock (Relógio de Tempo Real)

SCK – Serial Clock (Clock Serial)

SCL – Serial Clock (Clock do barramento I2C)

SD – Secure Digital (Padrão de cartão de memória)

SDA – Serial Data (Dados do barramento I2C)

SIN – Sistema Interligado Nacional

SPI – Serial Peripheral Interface (Interface Periférica Serial)

TCC – Trabalho de Conclusão de Curso

USB – Universal Serial Bus (Barramento Serial Universal)

Vcc – Tensão de Corrente Contínua

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	18
1.1. Contextualização	18
1.2. Problema de pesquisa	21
1.3. Objetivos.....	21
1.3.1. Objetivo geral	21
1.3.2. Objetivos específicos.....	21
1.3.3. Estrutura do trabalho	22
2. REFERÊNCIA TEÓRICO.....	23
2.1. O uso de energia fotovoltaica na Amazônia	23
2.2. Clima Amazônico e sua influência na geração fotovoltaica.....	25
2.3. Sistemas híbridos fotovoltaico–combustão em sistemas isolados.....	27
2.4. Sistemas de medição e monitoramento em sistemas energéticos.....	28
3. DESCRIÇÃO DO SISTEMA DA ILHA DAS ONÇAS.....	34
3.1. MDCC da comunidade da ilha das Onças.....	34
3.2. As dificuldades da MDCC durante os períodos de baixa geração.....	35
3.3. Sistema de Geração Auxiliar (SGA).....	35
4. DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA DE MONITORAMENTO.....	39
4.1. Alimentação do hardware.....	39
4.2. Arquitetura de hardware e diagrama de conexões.....	39
4.3. Conexão dos equipamentos.....	41
4.3.1. Equipamentos sensoriais.....	41
4.3.2. Configuração do <i>datalogger</i>	44
4.3.3. Interface de visualização.....	46
4.3.3. Proteção do <i>hardware</i>	47
4.4. Desenvolvimento do <i>firmware</i>	48
4.4.1. Estrutura do código e bibliotecas.....	48

4.4.1.1.	Calibração dos sensores de corrente e de tensão.	49
4.4.1.2.	Equacionamento da tensão	53
4.4.1.3.	Cálculo da corrente, tensão e potência.	54
4.4.2.	Exibindo os valores e armazenando.	55
4.5.	Projeto de <i>hardware</i> e manufatura da PCB	57
4.5.1.	Projeto da placa (KiCad)	57
4.5.2.	Fabricação via CNC.....	58
4.5.3.	Integração em caixa hermética	59
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	61
5.1.	Primeira tentativa de implementação.	61
5.2.	Segunda tentativa de realização do teste do MPE	63
5.3.	Nova configuração do sistema.....	70
5.4.	Verificação das condições iniciais.	70
5.5.	Caracterização da partida e acoplamento de carga	72
6.	CONCLUSÃO	87
6.1.	Das dificuldades enfrentadas.	87
6.2.	Trabalhos futuros	88
	REFERÊNCIAS	89

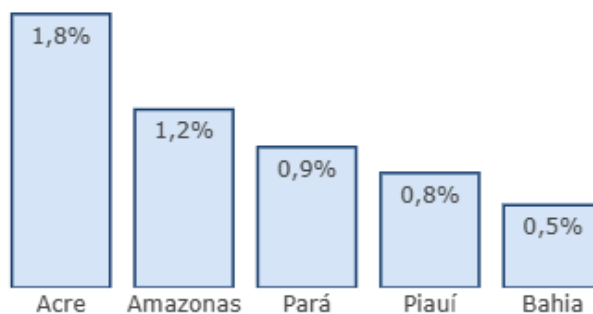
1. INTRODUÇÃO

1.1. Contextualização

O acesso à energia elétrica é reconhecido globalmente como um pilar fundamental para o desenvolvimento socioeconômico e a garantia de direitos básicos, como educação, saúde e segurança alimentar (Mazzone *et al.*, 2021). Contudo, apesar do avanço das redes de transmissão no território brasileiro, a universalização do serviço ainda enfrenta barreiras geográficas e econômicas significativas, especialmente na região da Amazônia Legal (Rebelato, 2025). De acordo com dados do Instituto de Energia e Meio Ambiente (IEMA, 2020), estima-se que cerca de um milhão de pessoas na Amazônia ainda vivem em regime de exclusão elétrica, a maioria concentrada em comunidades ribeirinhas, quilombolas e indígenas situadas em regiões isoladas.

Nesse contexto, compreender a realidade local exige a análise da pobreza energética, cujos maiores índices no Brasil estão concentrados na região Norte, conforme evidencia a Figura 1. Além disso, como discutido por Rebelato (2025), a pobreza energética no Brasil não se resume apenas à falta de conexão física à rede, mas também à incapacidade de usufruir de serviços energéticos adequados e modernos que possibilitem a melhoria da qualidade de vida.

Figura 1 – Unidades federativas com os maiores indicadores de pobreza energética.



Fonte: EPE (2022).

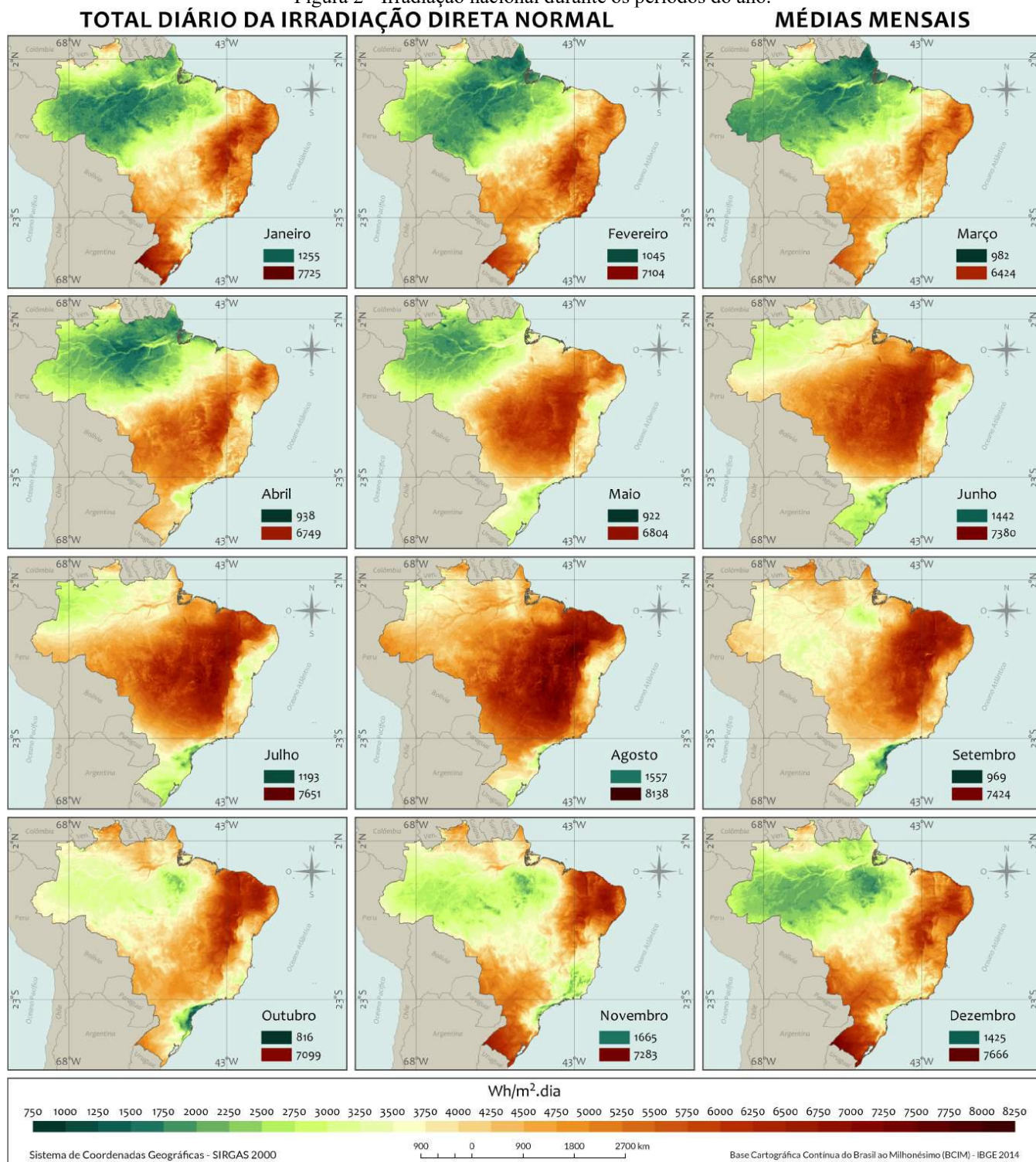
Para comunidades ribeirinhas como a da Ilha das Onças, em Barcarena-PA, as barreiras geográficas e o elevado custo de ampliação da infraestrutura convencional tornam os sistemas de geração descentralizada a alternativa técnica e economicamente mais viável para a garantia do acesso à energia (Freitas *et al.*, 2025).

Tradicionalmente, a eletrificação em áreas remotas baseou-se no uso de grupos geradores a combustão. Entretanto, sistemas fotovoltaicos off-grid tem sido utilizados como alternativa para fornecer energia elétrica em locais isolados onde não há

infraestrutura de rede elétrica, possibilitando o fornecimento de energia por meio de bancos de baterias e módulos solares. (Hammes *et al*, 2022). Neste contexto, as Microrredes de Distribuição em Corrente Contínua (MDCC) surgem como uma solução tecnológica para suprir, de forma eficiente e inovadora, essa demanda de carga (Moura *et al*, 2025). Ao priorizar a alimentação de cargas em Corrente Contínua (CC), esses sistemas eliminam as perdas associadas aos processos de inversão centralizada e simplificando a arquitetura da rede (Torres, 2019).

Todavia, a intermitência da fonte solar na região amazônica, caracterizada por elevados índices de nebulosidade durante o período chuvoso, que ocorre entre dezembro e maio, quando há redução da irradiação solar na região norte, como pode ser visto na Figura 2, ou seja, este fato pode exigir o uso de sistemas híbridos (Moura *et al*, 2025). Em uma das comunidades da Ilha das Onças, essa necessidade é suprida por meio de um grupo gerador composto por um motor a combustão acoplado a um alternador automotivo, por este motivo, a integração dessas fontes requer um monitoramento dos parâmetros elétricos para observar o comportamento desse Sistema de Geração Auxiliar (SGA).

Figura 2 - Irradiação nacional durante os períodos do ano.



Fonte: Pereira (2017)

1.2. Problema de pesquisa

A operação da MDCC em regiões de clima amazônico enfrenta o desafio de gerar suprimento energético em períodos de baixa irradiância solar. Embora a geração auxiliar por meio de um alternador seja uma solução prática, a ausência de dados sobre a tensão e a corrente fornecidas por essa fonte impede a análise da eficiência do sistema e o planejamento adequado da demanda de carga da região. Diante desse cenário, o problema central abordado nesta pesquisa consiste na carência de sistemas de instrumentação acessíveis que permitam monitorar o regime de operação de grupos geradores auxiliares. A ausência desses dados impede uma análise mais detalhada da geração do SGA e compromete a gestão do suprimento em períodos de baixa irradiância solar, exigindo, portanto, o desenvolvimento de uma solução de medição e registro de baixo adaptável a localidade de instalação.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver e validar a funcionalidade de um medidor de parâmetros elétricos para o monitoramento de grupo gerador auxiliar em uma microrrede de distribuição em corrente contínua.

1.3.2. Objetivos específicos

A etapa inicial consiste no projeto do hardware do medidor, integrando a plataforma de prototipagem *open-source* Arduino Nano a sensores de corrente (efeito hall) e de tensão. Simultaneamente, será desenvolvido o *firmware* para a aquisição e o processamento de sinais analógicos, assegurando o armazenamento dos valores reais em cartão MicroSD, com registro temporal via módulo RTC (*Real Time Clock*). Além disso, visando o ambiente de instalação do Medidor de Parâmetros Elétricos (MPE) que necessita suportar as condições de temperatura e umidade do ambiente amazônico, o dispositivo será colocado dentro de uma caixa hermética para garantir longevidade. Uma vez consolidado, o protótipo será instalado no sistema de geração auxiliar, assim, a coleta e análise dos dados operacionais validará o funcionamento do sistema de medição proposto.

1.3.3. Estrutura do trabalho

Este trabalho está organizado em cinco capítulos. Além desta Introdução, o Capítulo 2 apresenta a fundamentação teórica sobre o uso de sistemas fotovoltaicos, sistemas híbridos na Amazônia e instrumentação eletrônica. Depois, o capítulo 3 detalha a MDCC utilizada neste trabalho, junto ao seu sistema SGA. O Capítulo 4 detalha a metodologia de desenvolvimento do hardware, do software e da fabricação mecânica do MPE. No Capítulo 5, são apresentados os resultados dos testes e a análise dos dados coletados na Ilha das Onças. Por fim, o Capítulo 6 apresenta as conclusões sobre este trabalho, além de abordar as dificuldades enfrentadas e as melhorias para trabalhos futuros.

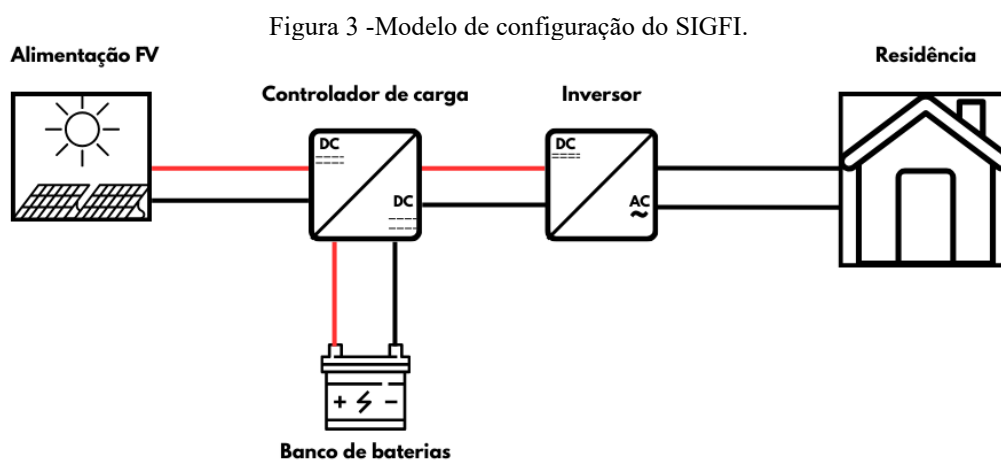
2. REFERÊNCIA TEÓRICO.

2.1. O uso de energia fotovoltaica na Amazônia

De acordo com o IBGE (2021) a Amazônia Legal representa aproximadamente 59% do território brasileiro e abriga diversas comunidades rurais isoladas, muitas das quais não estão conectadas ao Sistema Interligado Nacional (SIN). Nessas localidades, o fornecimento de energia elétrica frequentemente depende de sistemas de geração a combustão, que apresentam elevados custos de operação, dificuldades logísticas no transporte de combustível e impactos ambientais associados às emissões de gases poluentes (Silva; Pereira, 2010). Dessa forma, a substituição ou complementação desses sistemas por fontes renováveis tem sido amplamente discutida na literatura científica (Cumplido *et al*, 2020).

Entre as alternativas energéticas disponíveis, a energia solar fotovoltaica destaca-se como uma das tecnologias mais promissoras para o atendimento energético em regiões remotas da Amazônia (Nunez; Velázquez, 2025). Sistemas fotovoltaicos possuem vantagens como modularidade, baixo custo de operação, reduzida necessidade de manutenção e facilidade de instalação em áreas isoladas. Além disso, a região amazônica apresenta níveis adequados de radiação solar ao longo do ano, o que favorece a geração de energia por meio dessa tecnologia (Lacerda *et al*, 2024).

Historicamente, o atendimento a comunidades dispersas foi realizado por meio de Sistemas Individuais de Geração de Energia Elétrica com Fontes Intermitentes (SIGFI) (Araújo, 2014). Essa configuração, focada no suprimento básico de unidades consumidoras isoladas em localidades ribeirinhas, é apresentada na Figura 3.



Fonte: Autor (2026).

Entretanto, as limitações operacionais dos sistemas estritamente individuais e a necessidade de suprir cargas produtivas mais elevadas impulsionaram a evolução para arquiteturas de microrredes e sistemas híbridos (Pinho; Galdino, 2014).

De acordo com Torres *et al* (2018) microrredes podem ser definidas como sistemas elétricos de pequena escala capazes de operar de maneira independente ou conectados ao sistema elétrico convencional. Esses sistemas geralmente integram fontes renováveis, como a energia solar fotovoltaica, dispositivos de armazenamento de energia e sistemas de controle responsáveis pelo gerenciamento da geração e do consumo de energia. A arquitetura das microrredes permite maior confiabilidade no suprimento de energia, especialmente em regiões remotas ou com infraestrutura elétrica limitada.

Dentro desse contexto, as microrredes em corrente contínua têm ganhado destaque na literatura científica. Diferentemente dos sistemas tradicionais baseados em corrente alternada, as redes em corrente contínua apresentam vantagens técnicas quando utilizadas em conjunto com fontes renováveis e dispositivos eletrônicos modernos (Filho, 2025). Como grande parte das tecnologias de geração distribuída, armazenamento e cargas eletrônicas operam originalmente em corrente contínua, a utilização de redes CC reduz a necessidade de múltiplas conversões de energia, aumentando a eficiência global do sistema (Torres, 2019).

Um conceito associado às microrredes é o das nanorredes, que representam sistemas de distribuição elétrica ainda menores, geralmente destinados ao atendimento de edificações individuais ou pequenos agrupamentos de cargas. As nanorredes em corrente contínua são compostas por sistemas de geração distribuída, bancos de baterias e conversores eletrônicos interconectados por um barramento de corrente contínua, permitindo o compartilhamento de energia entre diferentes unidades de geração e consumo (Alves *et al*, 2024).

Pesquisas desenvolvidas pelo Grupo de Estudos e Desenvolvimento de Alternativas Energéticas (GEDAE), da Universidade Federal do Pará, têm contribuído significativamente para o avanço das nanorredes em corrente contínua aplicadas a comunidades isoladas da Amazônia. Nesse contexto, foram implementadas estruturas experimentais de nanorredes que utilizam geradores fotovoltaicos, bancos de baterias e conversores CC - CC interligados por barramentos de baixa tensão, possibilitando o

estudo de estratégias de controle, qualidade de energia e desempenho operacional desses sistemas, como pode ser visto em Fonseca *et al* (2022).

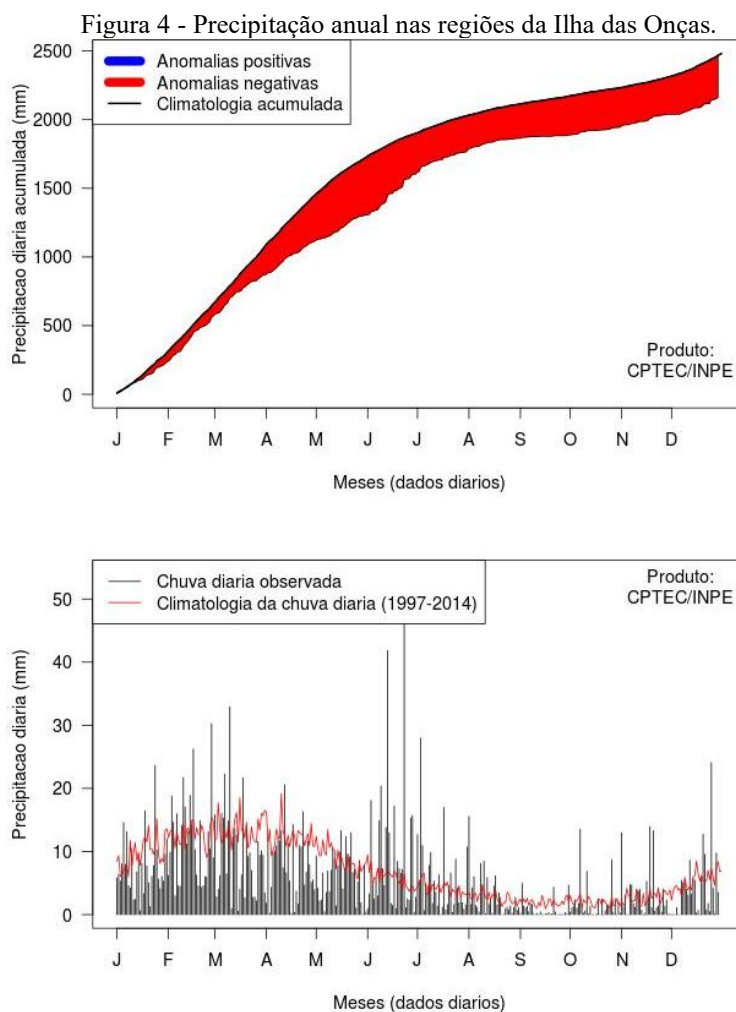
Dessa forma, as nanorredes e microrredes em corrente contínua representam uma solução tecnológica para a integração de fontes renováveis e para o atendimento energético de comunidades isoladas (Silva *et al*, 2024).

2.2. Clima Amazônico e sua influência na geração fotovoltaica.

A região amazônica apresenta características climáticas particulares que influenciam diretamente o potencial de geração de energia solar fotovoltaica (Pereira, 2017). O clima predominante na Amazônia é classificado como equatorial úmido, caracterizado por altas temperaturas médias, elevada umidade relativa do ar e altos índices pluviométricos ao longo do ano (IBGE, 2014).

A Amazônia não segue o padrão temperado de quatro estações definidas, mas rege-se por dois grandes períodos hidrológicos: o seco e o chuvoso. Popularmente conhecido como "inverno amazônico" (Furtado, 2025), este segundo período altera a disponibilidade do recurso energético na região norte.

Como observado na Figura 4, a região norte do Brasil apresenta concentração elevada de precipitação, majoritariamente no primeiro semestre do ano.



Fonte: CPTEC (2026).

Esses dados pluviométricos traduzem-se diretamente em desafios técnicos. De acordo com Pereira (2017), durante o inverno amazônico, a formação de nuvens de grande desenvolvimento vertical (como as *Cumulonimbus*), típicas da convecção tropical, bloqueia a passagem da luz solar direta.

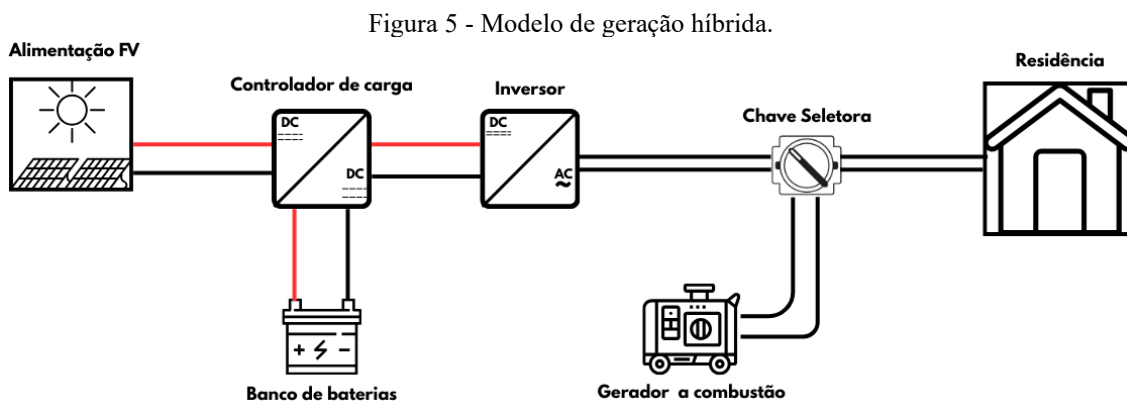
Apesar da elevada nebulosidade e da ocorrência frequente de chuvas, diversos estudos indicam que a Amazônia possui um potencial significativo para geração de energia solar. Isso ocorre porque, mesmo durante períodos nublados, uma parcela significativa da radiação solar difusa continua atingindo a superfície terrestre, possibilitando a geração de energia pelos módulos fotovoltaicos. Segundo o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (2023), a irradiação solar global média na região amazônica varia aproximadamente entre 4,0 e 5,5 kWh/m² por dia, valores considerados adequados para aplicações fotovoltaicas

Outro aspecto climático relevante é a elevada umidade relativa do ar presente na região amazônica, frequentemente superior a 80 %. A umidade pode acelerar processos de degradação em componentes elétricos e eletrônicos de sistemas fotovoltaicos, como conectores, cabos e inversores, favorecendo fenômenos como corrosão, delaminação e falhas elétricas (Dhimish; Alrashidi, 2020). Dessa forma, o projeto e a instalação de sistemas fotovoltaicos em regiões tropicais devem considerar medidas de proteção adequadas contra corrosão, infiltração de umidade e degradação de materiais, incluindo técnicas de encapsulamento e uso de materiais resistentes à corrosão (Rana et al., 2025).

2.3. Sistemas híbridos fotovoltaico–combustão em sistemas isolados.

Os sistemas híbridos fotovoltaico–combustão surgem como uma solução capaz de combinar as vantagens das fontes renováveis com a confiabilidade dos geradores convencionais. Em sistemas híbridos desse tipo, a geração fotovoltaica é utilizada como fonte primária de energia durante períodos de disponibilidade solar, enquanto os geradores a combustão são acionados apenas quando a geração renovável é insuficiente para atender à demanda energética (Hassan & Atia, 2024).

O modelo de uma configuração híbrida típica, que fundamenta o gerenciamento de energia em sistemas isolados, é visualizado na Figura 5.



Fonte: Autor (2026).

A utilização de sistemas híbridos apresenta benefícios significativos em comparação com sistemas baseados exclusivamente em combustíveis fósseis. Estudos recentes indicam que a integração de sistemas fotovoltaicos em sistemas isolados pode reduzir substancialmente o consumo de diesel, diminuindo os custos operacionais e as emissões de gases de efeito estufa. Além disso, a presença de geração renovável contribui para aumentar a segurança energética das comunidades atendidas (Pereira et al., 2024).

Outro aspecto importante refere-se à operação desses sistemas durante períodos de baixa disponibilidade de radiação solar. Em regiões tropicais úmidas, como a Amazônia, a estação chuvosa é caracterizada por elevada nebulosidade e frequentes precipitações, o que pode reduzir temporariamente a geração fotovoltaica. Nesses períodos, os geradores a combustão desempenham um papel fundamental ao garantir o atendimento da demanda energética quando a produção solar não é suficiente (Merino & Castro, 2024).

A operação coordenada entre as diferentes fontes de geração é geralmente realizada por sistemas de controle e gerenciamento energético. Esses sistemas monitoram continuamente o estado das fontes de geração, da carga e dos dispositivos de armazenamento, determinando quando cada fonte deve ser utilizada. Em muitos casos, a estratégia de controle prioriza o uso da energia solar sempre que disponível, acionando os geradores a combustão apenas quando necessário para manter a estabilidade do sistema (Hassan & Atia, 2024).

2.4. Sistemas de medição e monitoramento em sistemas energéticos

O monitoramento de sistemas elétricos é uma atividade essencial para garantir o funcionamento adequado, a segurança operacional e energética de instalações elétricas. Em sistemas de geração distribuída, microrredes e sistemas híbridos de geração, a medição de parâmetros elétricos como tensão, corrente, potência e energia torna-se fundamental para a análise do desempenho do sistema e para a identificação de possíveis falhas ou perdas energéticas (Paula, 2021).

Tradicionalmente, os sistemas de monitoramento elétrico utilizam equipamentos industriais dedicados, como analisadores de qualidade de energia, sistemas *Supervisory Control and Data Acquisition* (SCADA) e medidores digitais de energia, como mostra a Figura 6.

Figura 6 - Modelo de um analisador de qualidade de energia.



Fonte: Fluke (2026).

Entretanto, o elevado custo desses equipamentos pode limitar sua utilização em projetos experimentais ou sistemas de pequeno porte, como microrredes laboratoriais ou sistemas de geração distribuída em comunidades isoladas (Dezfouli *et al*, 2018)

Com o avanço da eletrônica embarcada e das plataformas de *hardware* livre, tornou-se possível desenvolver sistemas de medição de baixo custo baseados em microcontroladores. Essas soluções permitem a aquisição, o processamento e o armazenamento de dados elétricos em tempo real, ampliando as possibilidades de monitoramento em sistemas energéticos experimentais e em aplicações de pesquisa (Procopio, 2011).

Diversos trabalhos na literatura demonstram o uso de plataformas abertas para o monitoramento de parâmetros elétricos. Por exemplo, Akhtar e Iqbal (2024) desenvolveram um sistema de aquisição de dados baseado no microcontrolador Arduino para o monitoramento de sistemas fotovoltaicos conectados à rede. No trabalho, o Arduino foi utilizado como unidade central de aquisição de dados, coletando informações de sensores responsáveis pela medição de grandezas como irradiância solar, temperatura, tensão e corrente. Os dados coletados eram enviados em tempo real para o software Microsoft Excel, permitindo o armazenamento e a análise do desempenho do sistema fotovoltaico ao longo do tempo. Os resultados experimentais demonstraram que o sistema

proposto apresenta boa precisão e constitui uma solução de baixo custo para monitoramento de sistemas fotovoltaicos (AKHTAR; IQBAL, 2024).

De forma semelhante, Procopio *et al* (2011) desenvolveram um medidor de energia elétrica utilizando a plataforma de hardware livre Arduino com o objetivo de estudar o comportamento de cargas em redes elétricas inteligentes. Nesse trabalho, o sistema foi projetado para realizar a aquisição simultânea de amostras de tensão e corrente, permitindo a análise das formas de onda elétricas que alimentam as cargas conectadas à rede. O sistema também possibilita a transmissão dos dados coletados para um computador, permitindo a análise do comportamento das cargas e do consumo energético em ambientes de redes inteligentes (Procopio et al, 2011).

Além de sistemas baseados em Arduino, outras pesquisas têm explorado o uso de microcontroladores mais avançados para aplicações de monitoramento energético. Um exemplo é o trabalho desenvolvido por Amorim Jr., Ribeiro e Colistete Jr. (2019), que propuseram um sistema de medição remota de grandezas elétricas utilizando o microcontrolador ESP32. Nesse sistema, foi implementada uma arquitetura baseada em Internet das Coisas (IoT), na qual uma “ilha de medição” composta por sensores, circuitos de condicionamento de sinais e o microcontrolador ESP32 realiza a aquisição de dados elétricos em tempo real. O sistema desenvolvido é capaz de calcular grandezas como tensão eficaz, corrente eficaz, potência média e fator de potência, além de permitir a comunicação dos dados para sistemas externos de monitoramento e controle (Amorim jr.; Ribeiro; Colistete Jr, 2019).

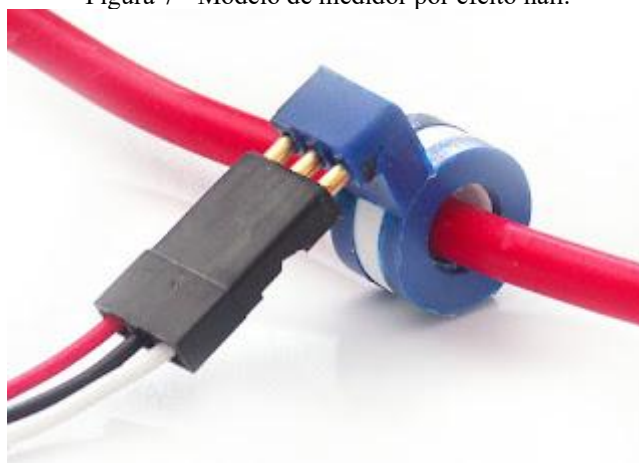
Dando continuidade a essa evolução tecnológica na instrumentação eletrônica, Paula (2021) desenvolveu um protótipo de medidor eletrônico de energia elétrica monofásico com integração à rede *Long Range* (LoRa) para transmissão de dados em longas distâncias. O trabalho teve como foco atender à necessidade de monitoramento a longas distâncias, com aplicação voltada especialmente para áreas rurais distantes de grandes centros urbanos e desprovidas de acesso convencional à internet. A arquitetura do sistema foi concebida utilizando uma placa Arduino Nano em conjunto com o módulo transmissor ESP32 LoRa, além de um sensor de corrente invasivo ACS712 e um display LCD para a interface local. O equipamento afere não apenas os parâmetros elétricos essenciais, aferindo a corrente, a tensão e calculando a potência ativa e o consumo total, mas também realiza a leitura de variáveis ambientais de temperatura e umidade que afetam a vida útil do hardware. Os dados coletados e processados localmente são enviados

via telemetria LoRa para uma interface gráfica no software Matlab e para um aplicativo mobile, demonstrando ser uma solução viável e segura para o acompanhamento remoto e a gestão do perfil de consumo das unidades monitoradas.

2.5. Métodos de medições dos parâmetros elétricos por meio dos microcontroladores.

Para realizar a medição das grandezas elétricas nesses sistemas, diferentes técnicas e sensores podem ser utilizados. No caso da medição de corrente elétrica, como afirma Silveira *et al* (2023), uma das soluções mais utilizadas é o emprego de sensores baseados no efeito hall, que permitem medir a corrente sem contato direto com o condutor, como mostra a Figura 7.

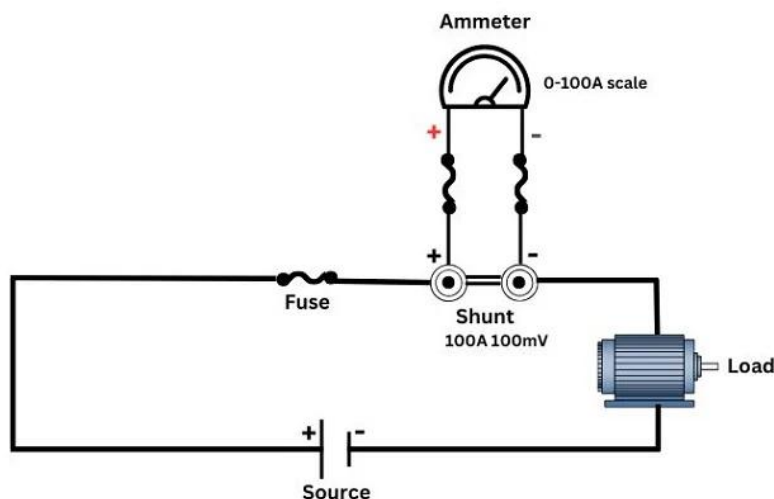
Figura 7 - Modelo de medidor por efeito hall.



Fonte: Eletrosim (2012).

Esses sensores detectam o campo magnético gerado pela corrente elétrica e produzem um sinal de tensão proporcional ao valor da corrente medida. Essa característica proporciona isolamento elétrico entre o circuito de potência e o sistema de medição, aumentando a segurança do sistema (Silveira *et al*, 2023).

Outra técnica frequentemente utilizada é a medição por meio de resistores *shunt*, nos quais um resistor de baixo valor é inserido em série com o circuito elétrico como mostra a Figura 8.

Figura 8 - Exemplo de medição por resistor *shunt*.

Fonte: Ahmad (2025).

De acordo com Thomazini (2011), a corrente que atravessa o resistor gera uma queda de tensão proporcional ao seu valor, que pode ser medida por um conversor analógico-digital do microcontrolador. Praticamente, a mensuração baseia na lei de ohm, representado na Equação 1.

$$I = \frac{V_{shunt}}{R_{shunt}} \quad (1)$$

Onde

- I é a corrente a ser medida,
- V_{shunt} é a tensão medida sobre o resistor shunt,
- R_{shunt} é o valor de resistência do shunt.

Embora essa técnica apresente boa precisão e baixo custo de implementação, ela não oferece isolamento elétrico entre o circuito de potência e o circuito de medição, o que pode representar uma limitação em determinadas aplicações (Boylestad; Nashelsky, 2013).

No caso da medição de tensão elétrica, são normalmente utilizados transdutores de tensão ou divisores resistivos, que reduzem a amplitude da tensão do sistema elétrico para níveis compatíveis com as entradas analógicas do microcontrolador. Em alguns sistemas, também são utilizados transformadores de potencial para garantir isolamento elétrico entre o sistema de medição e a rede elétrica (Capuano, 2014).

Dessa forma, a literatura demonstra que plataformas abertas baseadas em microcontroladores, como Arduino e ESP32, têm sido amplamente utilizadas no desenvolvimento de sistemas de monitoramento energético. Esses sistemas permitem a implementação de soluções de baixo custo para aquisição de dados elétricos, sendo particularmente úteis em pesquisas relacionadas a sistemas fotovoltaicos, microrredes e redes elétricas inteligentes (Amorim jr.; Ribeiro; Colistete Jr, 2019).

3. DESCRIÇÃO DO SISTEMA DA ILHA DAS ONÇAS

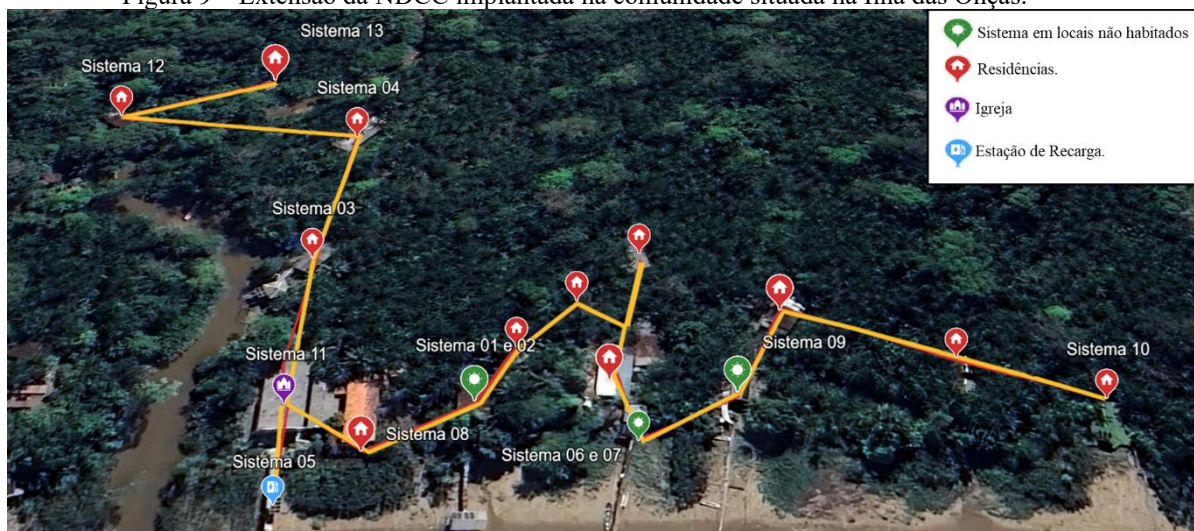
3.1. MDCC da comunidade da ilha das Onças.

A Microrrede de Distribuição em Corrente Contínua (MDCC) implantada na comunidade da Ilha das Onças apresenta uma arquitetura radial com a características: distribuída e modular (Alves *et al*, 2024). Atualmente, o sistema conta com uma capacidade instalada total de 13,3 kWp, distribuída em 13 sistemas de geração interligados. Essa infraestrutura cobre fisicamente a comunidade por meio de uma rede de distribuição de aproximadamente 560 metros de extensão, que supre a demanda energética de 12 residências, uma igreja e uma estação de recarga para embarcações elétricas de pequeno porte (Silva *et al*,2024).

Uma das características principais desse sistema é o seu barramento de tensão, projetado para operar a 24 Vcc. Segundo Torres (2019), a escolha por esse nível de tensão cumpre um duplo propósito: garante a segurança dos moradores, por ser uma extrabaixa tensão como caracteriza a NBR – 5410 (2004), e viabiliza o uso direto de equipamentos em CC, eliminando as perdas da conversão CA - CC.

Essa característica elétrica define o perfil de consumo da comunidade. O gerenciamento do fluxo de potência é realizado por controladores de carga descentralizados, como mostrado em Filho *et al* (2025). Conforme detalhado no estudo de impacto socioeconômico de Silva *et al* (2024), essa configuração permitiu a introdução de eletrodomésticos e equipamento alimentados diretamente em CC, como: refrigeradores, máquinas para o processamento de açaí e sistemas de iluminação LED, integrando a rotina produtiva e doméstica dos ribeirinhos à nova realidade energética. A Figura 9 ilustra o estágio atual da extensão da MDCC implantada.

Figura 9 – Extensão da NDCC implantada na comunidade situada na Ilha das Onças.



Fonte: Autor (2026).

Através da Figura 9 também é possível observar uma característica da comunidade que ajuda na qualidade de distribuição de energia, que é a sua morfologia. Por se tratar de um aglomerado pequeno, em que as residências estão dispostas próximas entre si, as distâncias entre os pontos de geração e de consumo são reduzidas. Esse fator geográfico é determinante para reduzir a queda de tensão, um desafio crítico em sistemas de baixa tensão, resultando em uma melhor distribuição de energia e menores perdas técnicas ao longo dos condutores (Mamede, 2017).

3.2. As dificuldades da MDCC durante os períodos de baixa geração.

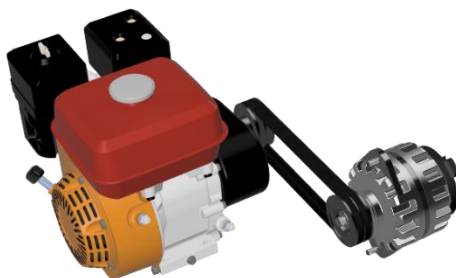
Por se tratar de uma região localizada na Amazônia, a MDCC sofre com as consequências práticas já esperadas: em períodos chuvas contínuas ou de nebulosidade persistente, o banco de baterias não atinge sua carga plena, comprometendo a autonomia do sistema durante a noite (Silva *et al*, 2024). Essa sazonalidade exige que o projeto de engenharia vá além do superdimensionamento fotovoltaico. Existem a possibilidade de ampliar os bancos de bateria, mas devido à baixa geração nesses períodos, torna-se essencial a adoção de um regime de operação híbrida, no qual uma fonte despachável, neste caso, o grupo gerador motor-alternador, entra em operação para garantir a confiabilidade do suprimento quando o recurso solar é insuficiente.

3.3. Sistema de Geração Auxiliar (SGA).

A confiabilidade de um sistema de distribuição fotovoltaico depende diretamente da capacidade de garantir o suprimento energético quando a fonte primária (solar) se torna

insuficiente (Einabadi; Kazerani, 2025). Para atender a essa demanda na Ilha das Onças, o projeto incorpora um sistema auxiliar, composto por um motor a combustão acoplado a um gerador elétrico (ver Figura 10).

Figura 10 - Modelagem do sistema de geração.



Fonte: Autor (2026).

A força motriz primária do sistema provém de um Motor de Combustão Interna (MCI). Especificamente, este projeto utiliza o motor estacionário TOYAMA 17HP 500CC de modelo TE180EK-XP, como mostra a Figura 11. (Toyama, 2021).

Historicamente, motores dessa classe são amplamente utilizados pela população ribeirinha para a propulsão de embarcações de médio porte e atividades produtivas locais (Silva *et al*, 2019). A escolha deste equipamento não é apenas técnica, mas também segue uma lógica de adequação sociotécnica. Conforme argumentam Silva e Pereira (2010), a sustentabilidade de projetos em comunidades isoladas depende da capacidade local de operação e manutenção. Ao adotar uma tecnologia já dominada pelos moradores, o projeto reduz a dependência de técnicos externos, facilitando a reposição de peças e os reparos mecânicos básicos já existentes na comunidade.

Figura 11 - Motor Toyama XP 500cc utilizado como fonte primária.



Fonte: Toyama (2026).

Com isso, acoplado ao eixo do motor, encontra-se o elemento responsável pela conversão mecânica - elétrica: um alternador automotivo do modelo Bosch HD10, apresentado na Figura 12 e suas conexões na Figura 13. Diferentemente de geradores síncronos convencionais de corrente alternada, que exigiriam retificação externa, este alternador foi projetado nativamente para carregar bancos de baterias em sistemas de 24 Vcc (BOSCH,2020), o que simplifica a sua integração à arquitetura da MDCC.

Figura 12 - Modelo do alternador Bosch utilizado.



Fonte: AUTODOC (2026).

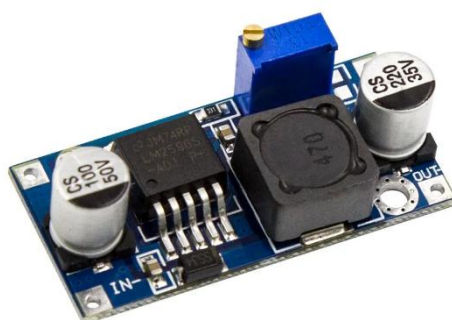
4. DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO.

Para garantir a funcionalidade do medidor no ambiente da Ilha das Onças, o projeto foi norteado pelas seguintes necessidades de mensuração, definidas com base nas características do grupo gerador composto e nas condições climáticas da região.

4.1. Alimentação do hardware.

A alimentação do circuito eletrônico é feita através da própria MDCC com uma tensão que varia entre 23 e 29 V, de acordo com os estudos de *Filho et al (2025)*, entretanto, para adequar a tensão a 9 V requeridos pela maioria dos microcontroladores, utilizou-se um conversor CC - CC do tipo *Buck* (abaixador de tensão), apresentado na Figura 15, evitando o superaquecimento típico de reguladores lineares (como o LM7805) quando submetidos a grandes diferenciais de tensão.

Figura 15 - Modelo do conversor utilizado.



Fonte: Components Explorer (2026).

4.2. Arquitetura de hardware e diagrama de conexões

Após configurar a alimentação do hardware, foi necessário selecionar a Unidade Microcontroladora (MCU). Para isso, foram avaliadas duas famílias de microcontroladores de baixo custo amplamente disponíveis no mercado: a linha ESP (especificamente o ESP8266/ESP32) e a plataforma Arduino (modelo Nano v3.0).

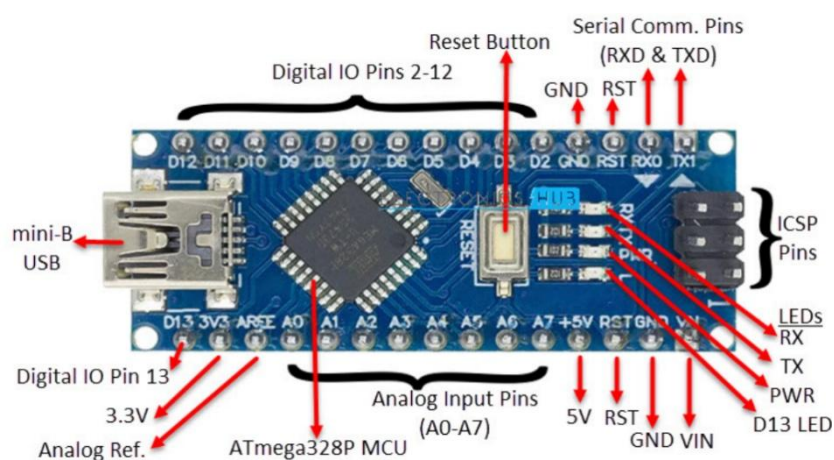
Embora os microcontroladores ESP ofereçam conectividade Wi-Fi nativa e maior poder de processamento — características exploradas nos trabalhos de Sena (2018) e Amorim Jr. *et al.* (2019) —, a sua aplicação neste projeto específico apresentou desvantagens técnicas. Primeiramente, o consumo energético: o chip ESP, devido ao seu transceptor de rádio-frequência, apresenta um consumo de corrente significativamente

superior (podendo ultrapassar 80 mA em operação), enquanto o Arduino Nano (baseado no ATmega328P) opera tipicamente com consumo inferior a 20-30 mA.

Além disso, o Arduino Nano oferece porta de alimentação de 5V e 3,3 V, o que simplifica o interfaceamento com os transdutores de corrente e tensão escolhidos, que também operam com tensão nominal de 5 V. O uso do ESP (que tem portas de alimentação somente em 3,3 V) exigiria circuitos adicionais de conversão de nível lógico, aumentando a complexidade do *hardware* e os pontos de falha. Por fim, considerando a premissa de armazenamento offline em cartão SD devido à internet instável na comunidade da ilha das Onças, os recursos de conectividade do ESP tornam-se supérfluos, consolidando o Arduino Nano como a escolha para este momento.

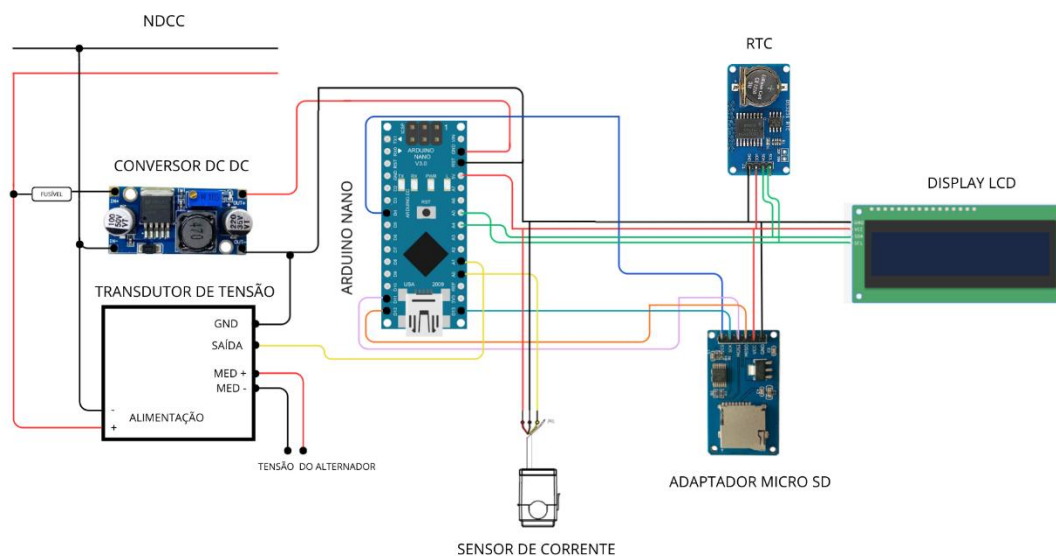
Dessa forma, o sistema embarcado foi desenvolvido em torno da plataforma de prototipagem Arduino Nano (Figura 16). A arquitetura de *hardware* integra sensores analógicos e módulos digitais de comunicação, organizados conforme o diagrama de blocos funcional e as necessidades discutidas acima (Figura 17).

Figura 16 - Descrição do microcontrolador utilizado.



Fonte: Detailspin (2026).

Figura 17 - Diagrama de conexão do MPE.



Fonte: Autor (2026)

4.3. Conexão dos equipamentos.

4.3.1. Equipamentos sensoriais.

Nominalmente, o alternador possui capacidade de geração de até 150 A, o que, idealmente, demandaria um transdutor com fundo de escala de 200 A. Entretanto, durante as operações realizadas, o equipamento não foi submetido à carga plena. Testes preliminares em campo indicaram que a corrente de operação varia, tipicamente, entre 10 A e 60 A. Isso correu devido a uso da correia e de polias não adequadas para o sistema.

Portanto, para a validação deste protótipo, optou-se por um transdutor HSTS016L, da fabricante YHDC, com escala de 30 A, como mostra a Figura 18. Esta escolha foi determinada devido a disponibilidade única deste material em laboratório. Embora esse dimensionamento restrinja a leitura de picos de corrente (saturação acima de 30 A), não invalida a funcionalidade do Medidor de Parâmetros Elétricos (MPE), pois, em valores inferiores ele consegue fazer a mensuração, permitindo a aquisição de dados e a comprovação da metodologia proposta nessa faixa operacional.

Figura 18 - Modelo do transdutor de corrente utilizado

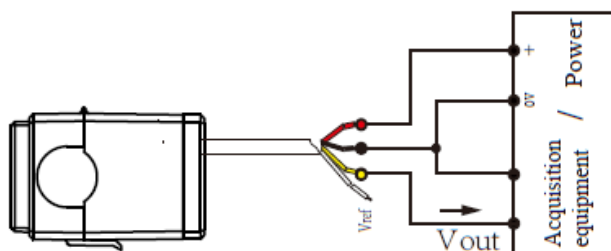


Fonte: YHDC (2020).

A aquisição das grandezas elétricas utiliza as portas do Conversor Analógico-Digital (CAD) do microcontrolador, configuradas para uma resolução de 10 bits (0 a 1023 níveis).

O sensor de efeito hall possui três terminais: Vcc, GND e Vout, tal como ilustrado na Figura 19. O sinal de saída analógico Vout, que varia em torno do *offset* de 2,5 V, é conectado diretamente à porta analógica A0 do Arduino.

Figura 19 - Configuração de conectividade da garra de hall.



Fonte: YHDC

Um desafio adicional na etapa de projeto foi a definição da topologia para a medição da tensão de saída do alternador. Embora a literatura apresente o divisor de tensão resistivo como uma alternativa de baixo custo, sua aplicação em sistemas de potência exige cautela. De acordo com Sena (2018), circuitos de condicionamento de sinal baseados apenas em resistores carecem de isolamento galvânico, o que expõe o microcontrolador a interferências eletromagnéticas e oscilações de terra, comuns em instalações com motores a combustão.

Diante dessa vulnerabilidade e visando otimizar o cronograma de desenvolvimento do protótipo, optou-se pela substituição do divisor resistivo por um transdutor de tensão da fabricante SECON, presente na Figura 20. Esta escolha técnica justifica-se pela capacidade do componente de fornecer isolamento entre a alta tensão do gerador e o circuito lógico, garantindo a precisão necessária e a segurança do sistema de aquisição de dados.

Figura 20 - Modelo de transdutor de tensão utilizado.



Fonte: SECON (2026)

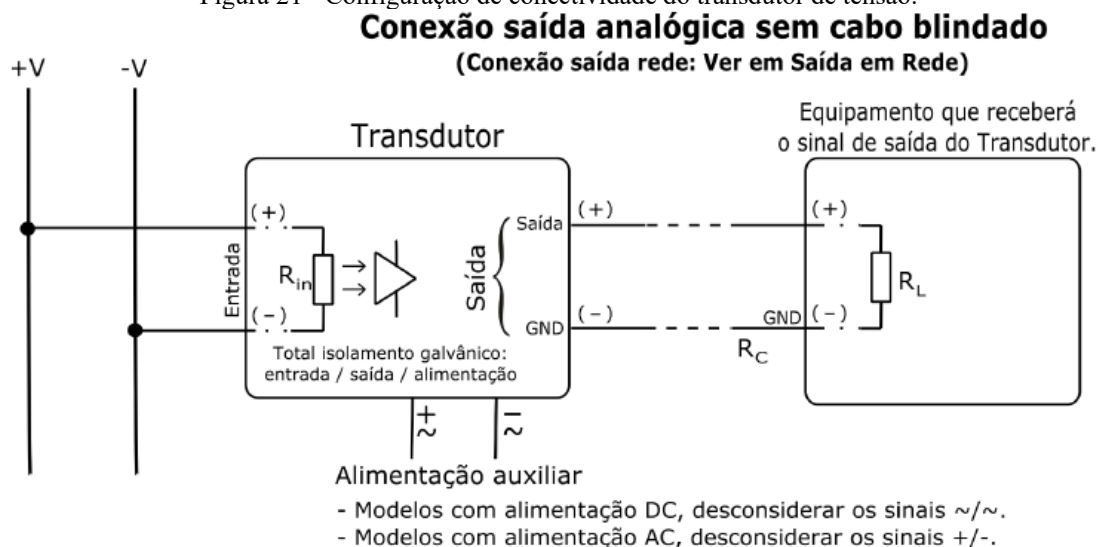
O transdutor de tensão realiza a atenuação e isolamento da tensão do barramento. Sua saída linear padronizada configurada para 0 – 5V proporcional à entrada 0 a 30V, por exemplo, é conectada à porta analógica A1(ver Figura 21). A equação 4 de conversão implementada no software considera a relação linear:

$$\text{Saída (V)} = \frac{5 \cdot V_p}{V_{\text{nom}}} \quad (1)$$

Onde:

- V_p é o valor de tensão medido.
- V_{nom} é a valor de tensão nominal.

Figura 21 - Configuração de conectividade do transdutor de tensão.



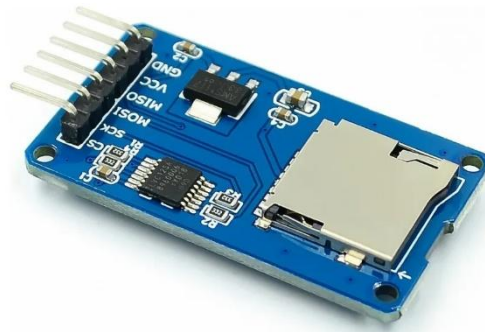
Fonte: SECON

4.3.2. Configuração do *datalogger*.

Complementando a etapa de medição, identificou-se a necessidade de registrar o histórico das grandezas elétricas para análise posterior. Dada a limitação de conectividade na região, optou-se por de um sistema de *datalogger* autônomo. Diferente de soluções de Internet das Coisas (IoT) dependentes de nuvem, esta arquitetura prioriza a integridade da informação por meio do armazenamento local em memória não volátil.

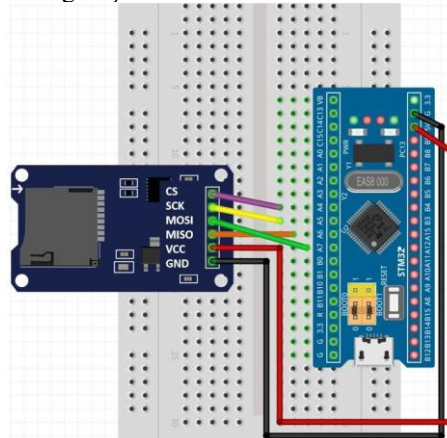
Para viabilizar essa função, integrou-se ao barramento do microcontrolador um Módulo de Cartão MicroSD, conforme as Figuras 22 e 23, operando por meio do protocolo *Serial Peripheral Interface* (SPI). Este dispositivo é responsável por salvar os dados estruturados (tensão, corrente e tempo) em intervalos regulares de 1 segundo (frequência de amostragem de 1 Hz). Segundo Akhtar e Iqbal (2024), essa estratégia de gravação local é fundamental para aplicações em áreas remotas, pois garante a persistência total dos dados mesmo em casos de descarga total da bateria ou de reinicialização do sistema, permitindo a recuperação das curvas de geração após a coleta do cartão em campo.

Figura 22 - Modelo do módulo do microSD utilizado.



Fonte: Indiamart (2026).

Figura 23 - Configuração de conexão do micro SD com o Arduino.



Fonte: Microcontrollerslab (2026).

As conexões físicas seguem o padrão do barramento SPI do ATmega328:

- MOSI: Pino D11
- MISO: Pino D12
- SCK: Pino D13
- CS (Chip Select): Pino D10

Para completar a arquitetura do sistema de aquisição, foi incorporado um módulo de *Real Time Clock* (RTC), ver figuras 24 e 25. A função deste *hardware* é garantir que os registros sejam gravados com a respectiva data e hora.

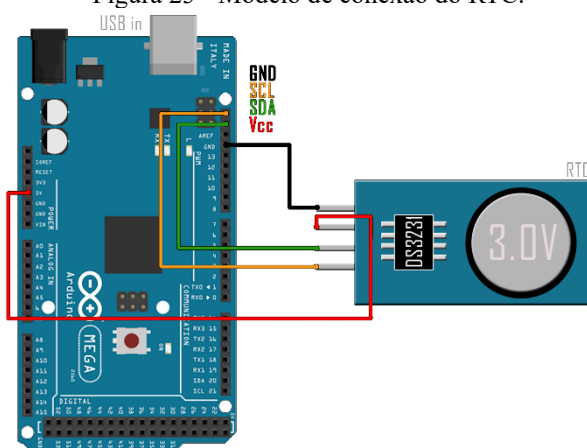
Dessa forma, é possível reconstruir o histórico de operação do sistema, identificando com exatidão os intervalos de funcionamento do gerador auxiliar e validando sua resposta dinâmica diante das variações de carga ao longo do dia.

Figura 24 - Modelo de RTC utilizado.



Fonte: Mointport (2026).

Figura 25 - Modelo de conexão do RTC.



Fonte: Electro Noobs (2026).

A conexão do módulo RTC (CI DS3231) utiliza os pinos A4 (SDA - *Serial Data*) e A5 (SCL - *Serial Clock*) do Arduino Nano. Este módulo possui bateria própria de 3,3 V, garantindo a manutenção do horário mesmo quando o sistema principal está desligado.

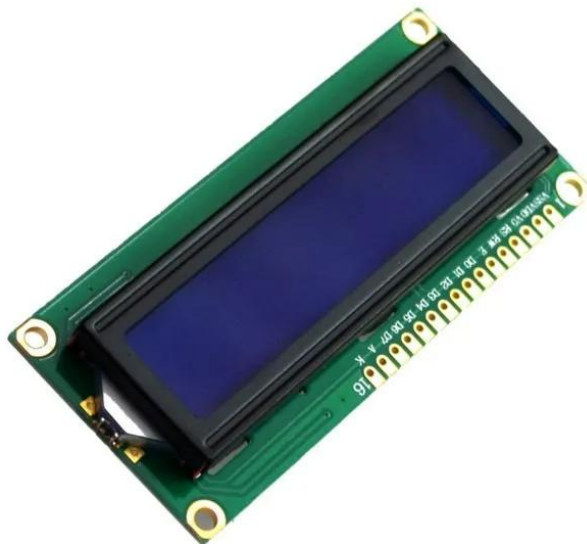
3.2.3. Interface de visualização.

Embora o armazenamento em cartão SD garanta a análise histórica dos dados, a operação em campo exige *feedback* imediato. Para aderir ao sistema, a funcionalidade prática de um multímetro digital foi implementada por meio de uma Interface Homem-Máquina (IHM) de visualização local.

O componente escolhido para essa função foi um Display de Cristal Líquido (LCD) modelo 1602 (16 colunas por 2 linhas) com *backlight* azul e caracteres brancos (Figura 26). Esta interface permite ao operador monitorar, em tempo real, as grandezas

instantâneas de Tensão (V), Corrente (I) e Potência (P), possibilitando verificar o status de funcionamento do gerador auxiliar sem a necessidade de interromper o processo de gravação ou remover fisicamente o cartão de memória para leitura em computador.

Figura 26 - Modelo display LCD utilizado.



Fonte: KanbKam (2026).

Além disso, para reduzir a complexidade da fiação, o display LCD foi acoplado a um adaptador serial I2C (expansor de I/O PCF8574), conectando-se ao mesmo barramento do RTC (nos pinos A4 e A5), com endereços lógicos.

4.3.3. Proteção do *hardware*.

Considerando o regime de operação contínua e a exposição do equipamento às condições ambientais da Ilha das Onças, o acondicionamento dos circuitos eletrônicos torna-se um requisito crítico de projeto. A norma brasileira NBR 5410 (ABNT, 2004) estipula que componentes instalados em locais sujeitos a poeira e umidade devem possuir um Grau de Proteção (IP) compatível com as influências externas, recomendando-se, como mínimo, a classe IP54.

Para atender a essa especificação mínima e garantir uma margem de segurança adicional, o projeto adotou um invólucro do tipo caixa hermética (Figura 27), classificado IP65. Segundo a norma NBR IEC 60529 (2017), este grau assegura total estanqueidade contra a entrada de poeira (Nível 6) e proteção contra jatos de água em todas as direções (Nível 5), blindando o sistema de aquisição contra a agressividade do clima local.

Figura 27 - Modelo da caixa hermética de proteção.



Fonte: Unicaserv (2026).

4.4. Desenvolvimento do *firmware*.

O funcionamento lógico do sistema embarcado é regido por um *firmware* desenvolvido em C++, utilizando o IDE integrado do Arduino. O software foi estruturado para operar de forma determinística, garantindo a aquisição cíclica dos sinais analógicos, o processamento matemático dos dados, a apresentação das informações em interface local e a persistência dos registros em memória não volátil.

4.4.1. Estrutura do código e bibliotecas

O código-fonte adota uma arquitetura modular, valendo-se de bibliotecas específicas para adaptação correta dos periféricos de hardware. Com isso, foram empregadas as seguintes bibliotecas principais:

- <Wire.h>: Responsável pelo gerenciamento da comunicação no barramento I2C, utilizado pelo módulo RTC e pelo display LCD.
- <RTCLib.h>: Interface para o módulo de Relógio de Tempo Real (DS3231), permitindo a extração e a formatação precisas de data e hora.
- <SPI.h> e <SD.h>: Conjunto de bibliotecas para comunicação via protocolo SPI com o módulo de cartão MicroSD e manipulação do sistema de arquivos FAT.
- <LiquidCrystal_I2C.h>: Facilita o controle da interface visual (display 16x2) por meio de comandos de alto nível.

Para minimizar os erros de quantização inerentes ao Conversor Analógico-Digital (ADC) de 10 bits, definiu-se via *software* uma tensão de referência calibrada de $V_{ref} = 5,135 \text{ V}$. Este valor foi obtido experimentalmente através de medição direta nos terminais do microcontrolador, substituindo o valor nominal de $5,0 \text{ V}$ nas equações de conversão para garantir maior fidelidade nas leituras

Além disso, o algoritmo de aquisição foi projetado para operar em tempo discreto, realizando a amostragem síncrona dos canais analógicos. Para mitigar o ruído eletromagnético inerente ao ambiente de operação (gerador a combustão), o *firmware* implementa uma janela de observação temporal (T_{janela}), como mostra a Equação 5.

O ciclo de leitura é controlado pelas constantes definidas no cabeçalho do código (AMOSTRAS = 100 e GAP = 10). O microcontrolador executa um laço de repetição que coleta $N = 100$ amostras consecutivas. Entre cada iteração, insere-se um atraso determinístico de $\Delta t = 10 \text{ ms}$. Desta forma, o período total de integração para compor um único dado de registro é de:

$$T_{janela} = N \cdot \Delta t \quad (2)$$

$$T_{janela} = 100 \cdot 10 \text{ ms} = 1,0 \text{ s}$$

Esta estratégia atua como um filtro passa-baixa digital, suavizando oscilações transientes e fornecendo valores médios representativos do regime de operação.

4.4.1.1. Calibração dos sensores de corrente e de tensão.

Para a leitura da corrente elétrica, o sistema processa o sinal do sensor de efeito hall. A conversão da leitura digital para tensão elétrica utiliza uma referência ajustada via *software* ($V_{REF}=5,135 \text{ V}$), obtida experimentalmente na alimentação do microcontrolador.

Diferentemente da abordagem teórica que utiliza a sensibilidade nominal ($V_{REF} = 5,0 \text{ V}$), este trabalho implementou uma curva de calibração baseada em regressão linear. A corrente calibrada ($I_{calibrada}$) é obtida a partir da tensão lida no sensor (V_{hall}) pela equação 6:

$$I_{calibrada} = 15,722 \cdot V_{hall} - 38,686 \quad (3)$$

Esta função corrige simultaneamente o ganho do sensor e o deslocamento do ponto zero. Esta equação de calibração foi obtida em laboratório, utilizando duas fontes, uma como fonte ativa e outra como carga.

A fonte programável utilizada no experimento como fonte foi o modelo XDC 60-100 da fabricante Xantrex (Figura 28), capaz de fornecer tensão de saída de 0 a 60 V, corrente de até 100 A e potência máxima de 6 kW. Segundo o manual do equipamento (Xantrex, 2006), a precisão do medidor interno é de $\pm 0,15\%$ da tensão máxima para tensão e $\pm 0,5\%$ da corrente máxima para corrente, resultando em aproximadamente $\pm 0,09$ V e $\pm 0,5$ A, respectivamente.

Além disso, a carga eletrônica bidirecional utilizada o modelo IT-M3432 do fabricante ITECH (Figura 29). No modo fonte, o equipamento fornece tensão de 0 a 60 V, corrente de até 30 A e potência máxima de 800 W. No modo carga, pode absorver corrente de 30 A, com potência máxima de 800 W. A precisão de programação é $0,02\% + 0,02\%$ para tensão e $\leq 0,1\% + 0,1\%$ para corrente, com resolução de 1 mV e 10 mA, respectivamente (ITECH, 2022).

A calibração foi feita com o auxílio de um multímetro, do modelo UT210E da fabricante UNI-T (Figura 30). Esse modelo tem um fator precisão da medição de corrente é de $\pm (0,1\% \text{ do valor medido} + 0,1\% \text{ da escala completa})$. Já para a tensão, a precisão é inferior a $0,1\%$ do valor máximo da escala do equipamento.

Figura 28 - Fonte utilizada como alimentadora na calibração.



Fonte: Xantrex Technology Inc. (2006).

Figura 29 - Fonte passiva usada na calibração.



Fonte: ITECH (2022).

Figura 30 - Multímetro utilizado na calibração.



Fonte: UNI -T (2018).

Com a ajuda do multímetro que media a tensão de saída da garra de hall, a qual média a corrente alimentação da carga, conseguiu-se obter os resultados de acordo com a Tabela 1.

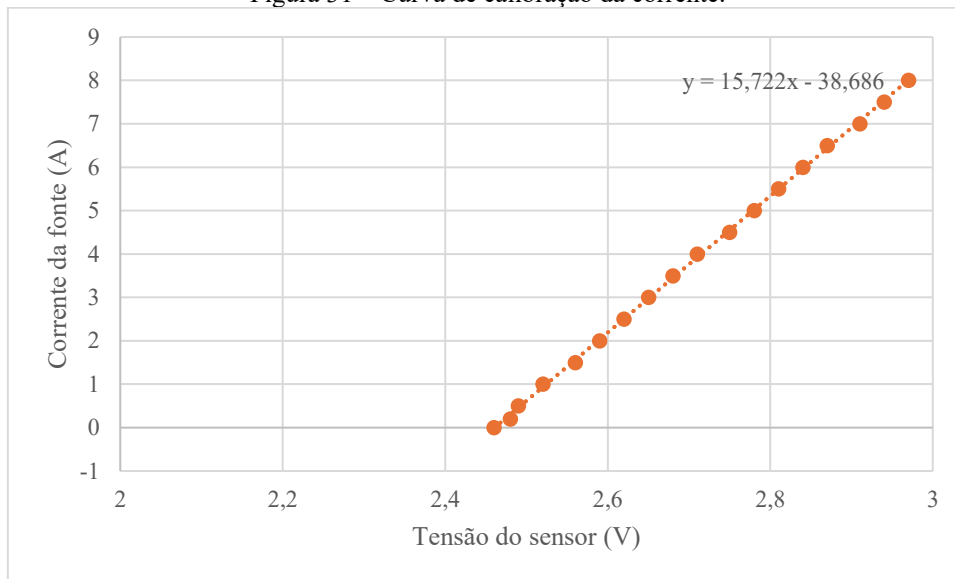
Tabela 1 - Valores mensurados para calibração.
Tensão do Sensor de hall (V) Corrente CC do MPE(A)

Tensão do Sensor de hall (V)	Corrente CC do MPE(A)	Fonte Ativa(A)
2,46	-1,1	0
2,48	-0,62	0,2
2,49	-0,28	0,5
2,52	0,72	1
2,56	1,65	1,5
2,59	2,62	2
2,62	3,56	2,5
2,65	4,51	3
2,68	5,44	3,5
2,71	6,44	4
2,75	7,37	4,5
2,78	8,35	5
2,81	9,28	5,5
2,84	10,26	6
2,87	11,24	6,5
2,91	12,18	7
2,94	13,14	7,5
2,97	14,06	8

Fonte: Autor (2026).

Na etapa da calibração, verificou-se que a medição de corrente do MPE estava com um grau de diferença considerável da corrente gerada da fonte ativa, isto é visto ao comparar os valores do medidor com os valores de corrente da fonte. Por isso, foi feita a plotagem do gráfico de dispersão para gerar a curva de calibração, como mostra a Figura 31.

Figura 31 – Curva de calibração da corrente.



Fonte: Autor (2026).

Dessa forma, obteve-se a equação da linha de tendência, que serviu como referência para a calibração. Adicionalmente, o *firmware* implementa uma lógica híbrida para a região de histerese próxima ao zero (quando $2,47 \text{ V} \leq V_{\text{hall}} \leq 2,48 \text{ V}$), aplicando a equação 7, para casos de maior sensibilidade para minimizar erros em cargas residuais:

$$I_{temp} = \frac{V_{hall} - 2,430}{0,11112} \quad (4)$$

Essa equação foi definida após verificar medições próximas a zero, e medir com o multímetro os valores de tensão de saída da garra de hall.

4.4.1.2. Equacionamento da tensão

A aquisição da tensão do barramento CC utiliza um transdutor com isolamento galvânico. A função de transferência implementada no código corrige a atenuação e o *offset* do componente, reconstruindo a tensão real da microrrede ($V_{\text{calibrada}}$) através da relação linear demonstrada na equação 8:

$$V_{\text{calibrada}} = 5,9763 \cdot V_{\text{transdutor}} + 0,0266 \quad (5)$$

O fator 5,9763 compensa a razão de transformação do transdutor, adequando a escala de leitura (0-30V) à faixa tensão de saída (0-5V).

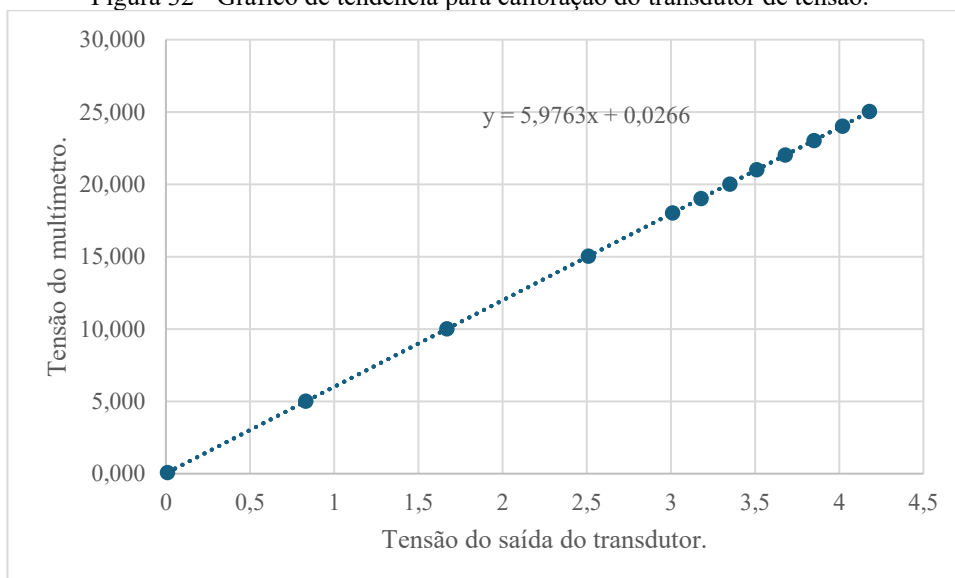
A equação 8 foi obtida pelo mesmo processo de calibração do sensor de Hall, ou seja, variando a tensão, medindo com o multímetro e comparando os valores com os da tensão do transdutor, como visto na Tabela 2.

Tabela 2 - Valores para calibração do medidor.

Tensão Bits do Medidor (V)	Tensão do multímetro (V)
0,01	0,073
0,83	5,005
1,67	10,010
2,51	15,030
3,01	18,020
3,18	19,020
3,35	20,020
3,51	21,020
3,68	22,030
3,85	23,030
4,02	24,030
4,18	25,030

Fonte: Autor (2026).

Figura 32 - Gráfico de tendência para calibração do transdutor de tensão.



Fonte: Autor (2026).

4.4.1.3. Cálculo da corrente, tensão e potência.

Visando a aproveitamento no uso da memória RAM do Arduino nano, o algoritmo não armazena as amostras em vetores. Utiliza-se a técnica de acumulação em tempo real: a cada iteração do laço, os valores instantâneos e seus quadrados são acumulados.

Ao término do ciclo (T_{janela}), o sistema consolida as grandezas finais:

- Valores Médios CC:** Calculados pela média aritmética simples dos acumuladores, representando pela Equação 9.

$$I_{DC} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N I_{calibrada}[k] \quad (6)$$

- b) **Valores Eficazes (RMS):** Calculados através da raiz quadrada da média dos quadrados, permitindo a avaliação do ripple gerado pelo alternador, apresentado na equação 10.

$$I_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (I_{calibrada}[k])^2} \quad (7)$$

- c) **Potência Ativa:** A potência ativa (P_{ativa}), como mostra a equação 11, é tratada como uma grandeza escalar. O algoritmo calcula a potência instantânea.

$$p[k] = v[k] \cdot i[k] \quad (8)$$

E a cada amostragem ela acumula o resultado. O valor final registrado é a média desses produtos, refletindo a transferência real de potência, como visa a equação 12:

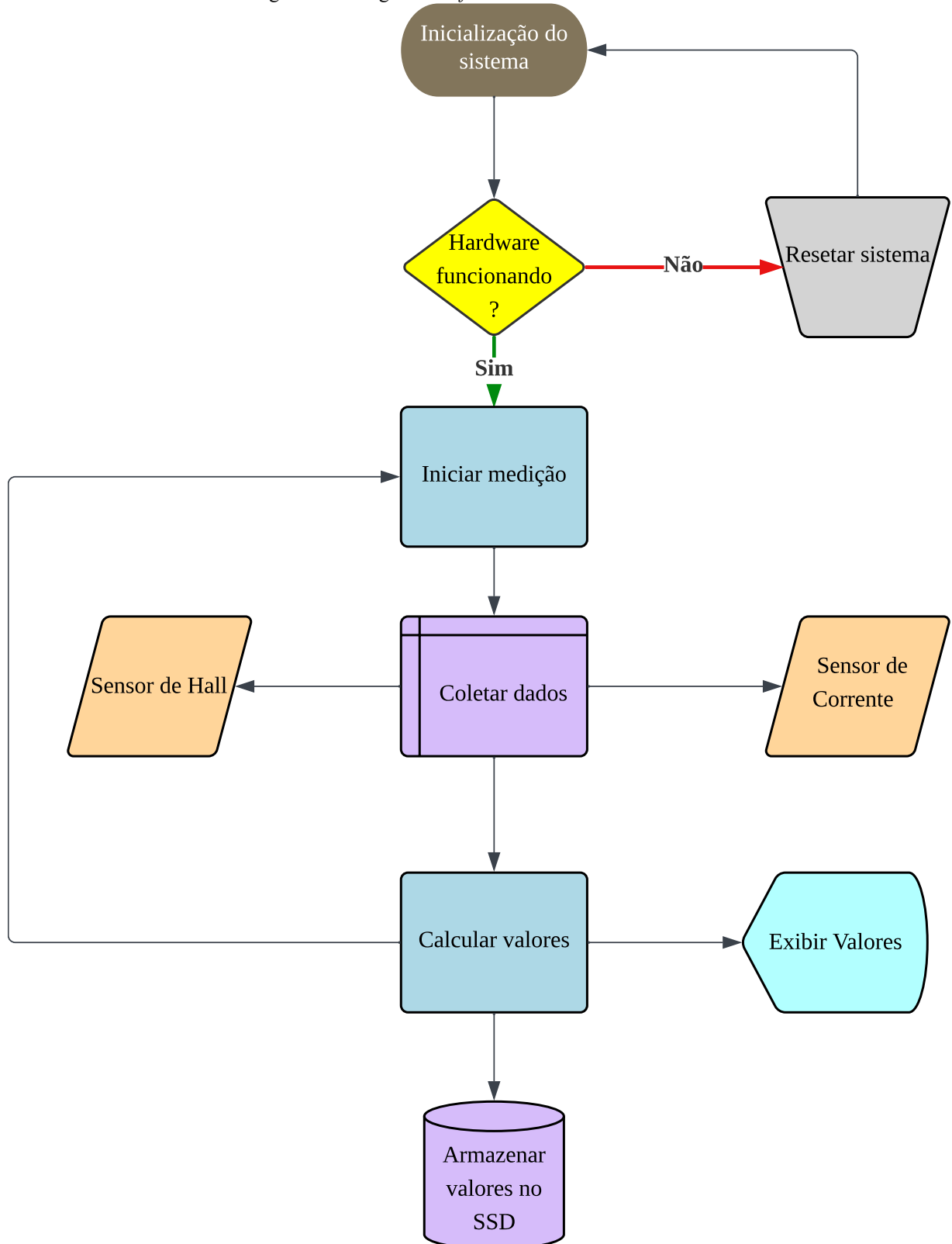
$$P_{ativa} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (V_{calibrada}[k] \cdot I_{calibrada}[k]) \quad (9)$$

4.4.2. Exibindo os valores e armazenando.

Após o processamento, as informações são direcionadas para duas saídas:

- Interface Homem-Máquina (IHM):** O display LCD é atualizado com os valores médios de Tensão (V), Corrente (A) e Potência Ativa (W), calculada pelo produto das componentes DC.
- Datalogger:** Os dados são formatados em uma *string* de texto no padrão *Comma-Separated Values* (CSV), utilizando o ponto e vírgula como delimitador, e anexados ao arquivo “DADOS.CSV” no cartão SD. A rotina de gravação garante a abertura e fechamento do arquivo a cada ciclo de escrita, assegurando a integridade dos dados em caso de interrupção de energia.

Por fim, a configuração final do processo de funcionamento do firmware, pode ser representada pela Figura 33.

Figura 33 - Diagrama do *firmware* do Arduino.

Fonte: Autor (2026).

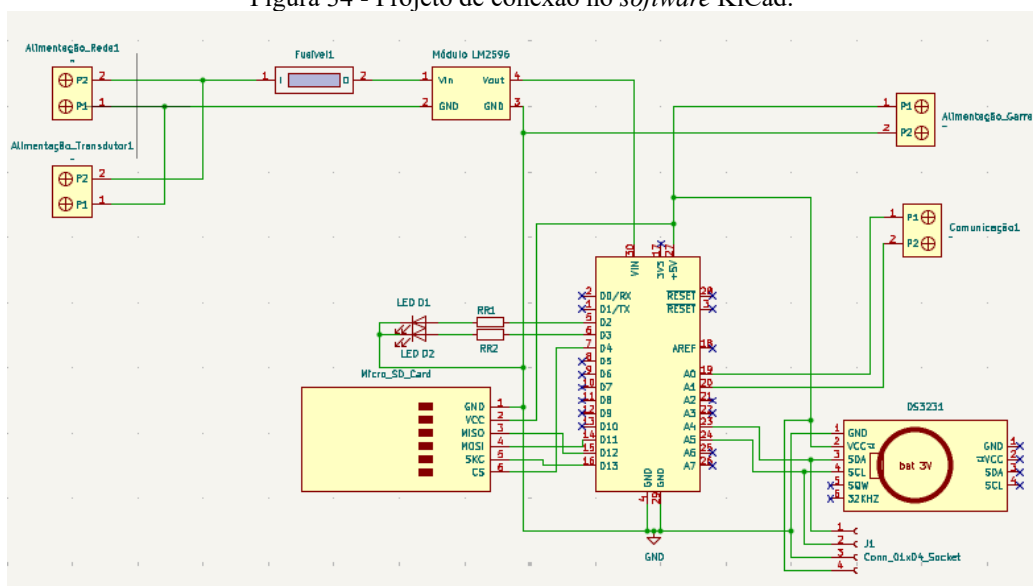
4.5. Projeto de *hardware* e manufatura da PCB

A materialização do circuito eletrônico seguiu um fluxo de trabalho de prototipagem rápida, integrando ferramentas de *design* eletrônico assistido por computador e de manufatura subtrativa, eliminando a necessidade de processos químicos de corrosão.

4.5.1. Projeto da placa (KiCad)

O layout da Placa de Circuito Impresso (PCI) foi desenvolvido no software *open source* KiCad. O processo iniciou-se com a captura esquemática, onde todos os componentes (Arduino Nano, RTC, e outros módulos) foram conectados logicamente, como mostra a Figura 34.

Figura 34 - Projeto de conexão no software KiCad.



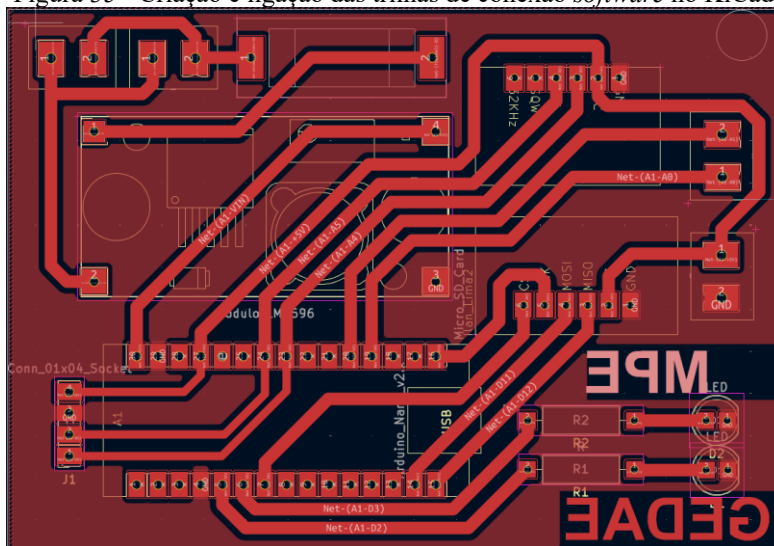
Fonte: Autor (2026).

Em seguida, procedeu-se ao roteamento das trilhas na etapa de *PCB Editor*, ver Figura 35. Para adequação ao processo de fabricação mecânica, foram definidos parâmetros específicos de *design*, como a largura mínima das trilhas e o espaçamento de isolamento (*clearance*), compatíveis com a resolução da ferramenta de corte da CNC.

Para finalização do processo de criação e modelagem da placa, fez-se a plotagem de 3D do circuito, como pode ser visto na Figura 36, na qual pode-se ver como fica a dispersão dos *hardwares* na PCB.

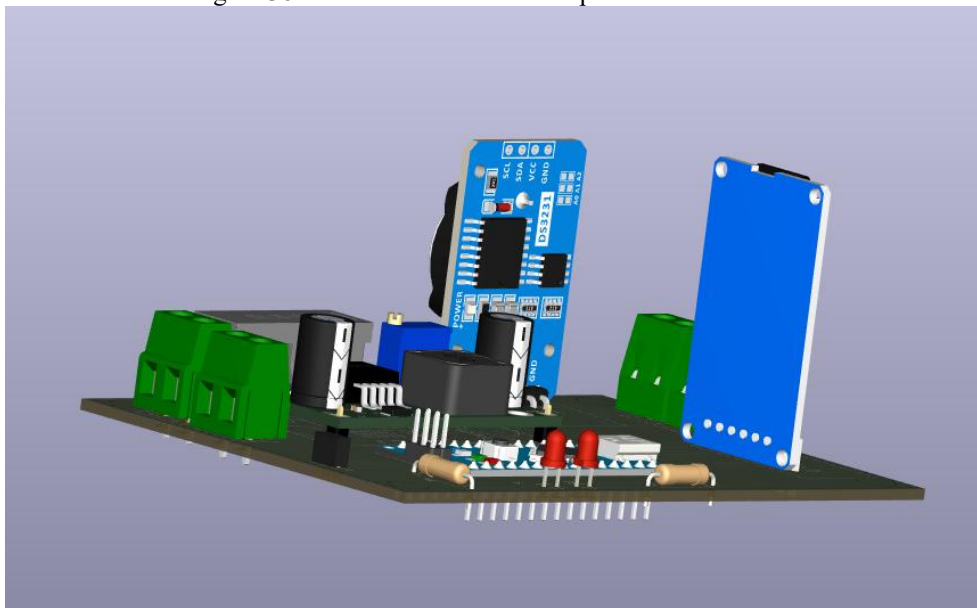
O arquivo final de manufatura foi exportado e convertido em código de máquina (G-Code) por meio de software de CAM específico para o isolamento (*FlatCAM*).

Figura 35 - Criação e ligação das trilhas de conexão *software* no KiCad.



Fonte: Autor (2026).

Figura 36 - Versão final e modelada pelo KiCad.



Fonte: Autor (2026).

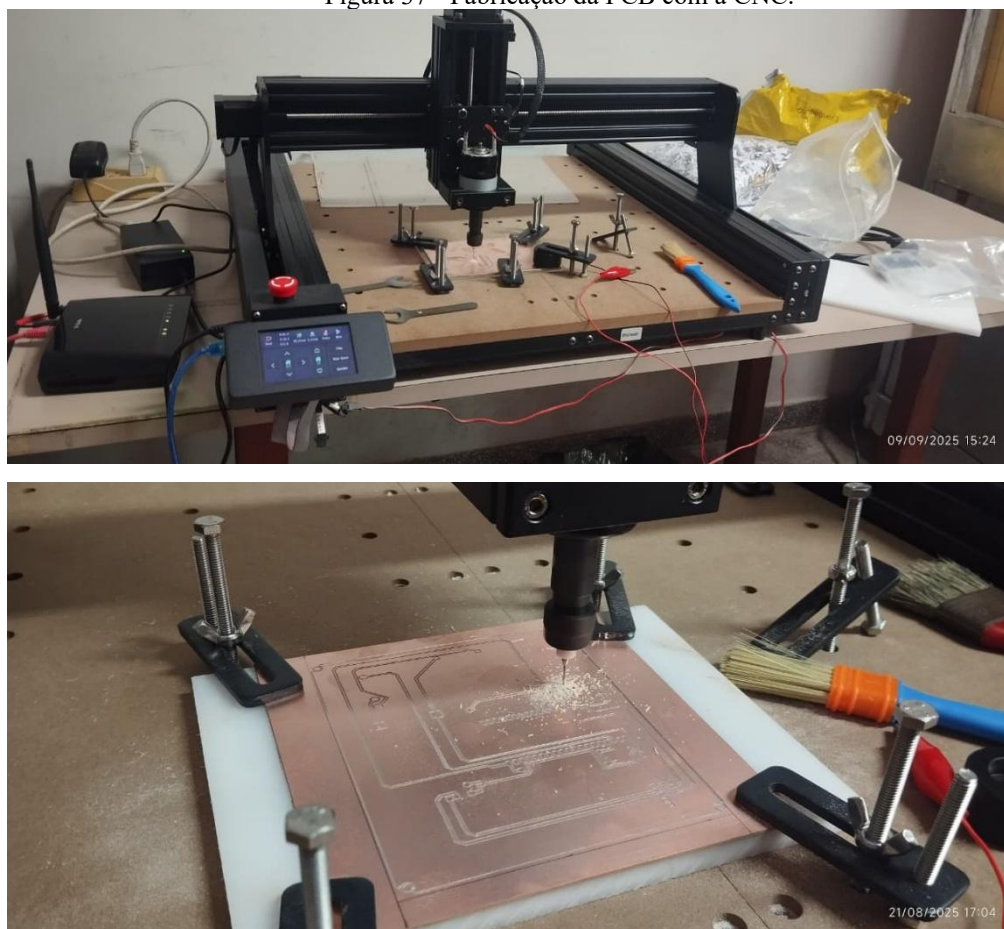
4.5.2. Fabricação via CNC.

A confecção física da placa utilizou o método de fresagem de isolamento em uma máquina CNC. O processo consistiu na remoção seletiva da camada de cobre de uma placa virgem de fenolite, como mostra a Figura 37.

O procedimento ocorreu em duas etapas:

1. **Fresagem das Trilhas:** A CNC percorreu o contorno do desenho gerado no KiCad, removendo o cobre apenas nas bordas das conexões para isolar eletricamente as trilhas do restante do plano de terra.
2. **Furação Automática:** Com a troca da ferramenta por uma broca de diâmetro adequado, a própria máquina executou a furação dos *pads* para a inserção dos componentes *Through-Hole* (PTH), garantindo precisão milimétrica no alinhamento.

Figura 37 - Fabricação da PCB com a CNC.



Fonte: Autor (2025).

4.5.3. Integração em caixa hermética

Para finalizar o projeto, seria necessária à operação em campo, o circuito finalizado foi instalado no interior de uma caixa hermética industrial, presente na Figura 38. O invólucro possui vedação emborrachada na tampa, conferindo proteção contra umidade e poeira. A placa foi fixada internamente através de espaçadores, e as conexões

externas (sensores e alimentação) foram realizadas através de prensa-cabos instalados nas laterais da caixa, mantendo o grau de proteção (IP) do conjunto.

Figura 38 - Posicionamento do hardware na caixa hermética.



Fonte: Autor (2025).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo apresenta e discute os dados obtidos durante o comissionamento do MPE na MDCC da Ilha das Onças. A validação experimental foi conduzida em condições reais de operação, seguindo as etapas de instalação do alternador, do medidor e de verificação das condições iniciais antes do acionamento da carga.

5.1. Primeira tentativa de implementação.

As atividades de campo preliminares ocorreram em 30/10/2025, servindo como teste inicial do sistema de medição, embora problemas mecânicos com a polia do alternador tenham impedido a coleta de dados de carga plena naquela ocasião.

Como pode ser visto na Figura 39.c, o medidor foi instalado na comunidade da ilha das onças. Mas nesse dia, ao iniciar o teste, como é visto na figura 39.a e 39.b, a polia do alternador terminou perdendo o rosqueamento e com isso terminou ejetando do eixo e ficando sem atrito para fixar novamente.

Figura 39 - Primeira tentativa de instalação do MPE.

(a)



(b)



(c)



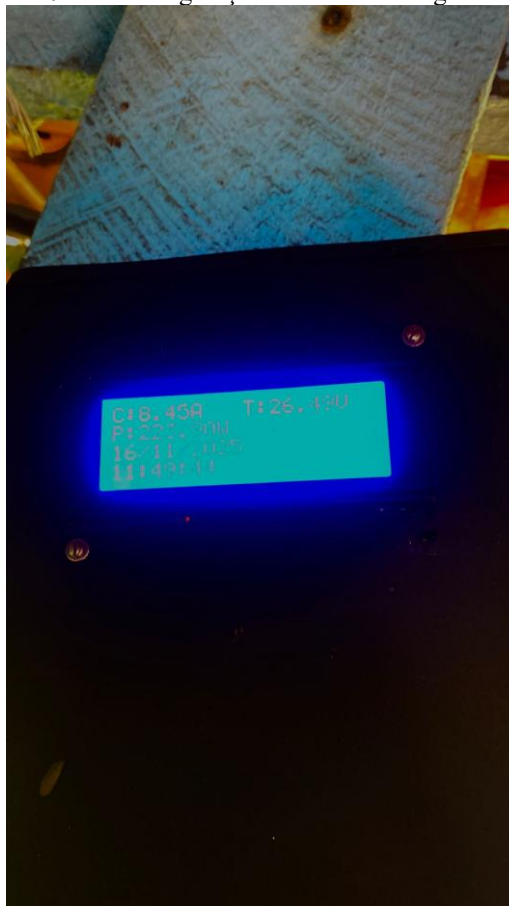
Fonte: Autor (2025).

Devido a isso, o teste teve que ser adiado para poder ser feito o ajuste da polia e assim, pode haver geração corretamente.

5.2. Segunda tentativa de realização do teste do MPE

A etapa definitiva de validação ocorreu em 31/01/2026. Ao iniciar os procedimentos, identificou-se uma desconfiguração no Relógio de Tempo Real (RTC) do protótipo, devido ao esgotamento da bateria auxiliar CR2032, como está representado na Figura 40 e na Tabela 3. Foi realizada a manutenção corretiva imediata (troca da bateria e ressincronização do relógio) para garantir a integridade temporal dos registros.

Figura 40 - Desconfiguração do MPE na chegada da ilha.



Fonte: Autor (2026).

Tabela 3 - Valores lidos no mostrador do medidor (Figura 40).

Dados	Valores
Corrente	8,49 A
Tensão	26,47 V
Potência	223,90 W
Data	16/11/2025
Horário	11:49:44

Fonte: Autor (2026)

Após fazer a configuração, verificou-se que o funcionamento do medidor estava coerente com o que era previsto através das medições de tensão e corrente da rede naquele momento e comparou-se com o multímetro, do modelo Owon CMS101.

A escolha pela substituição do multímetro utilizado em campo em relação ao utilizado em laboratório ocorreu devido à questão de funcionalidade, uma vez que o multímetro Owon CMS101 (Figura 41) possui função de osciloscópio. Dessa forma, por meio de conexão via *bluetooth*, foi possível gerar os gráficos apresentados na Figura 42 e utilizar os dados exportados em arquivo .zip para realizar a comparação com o MPE, como mostra a Figura 43 e 44.

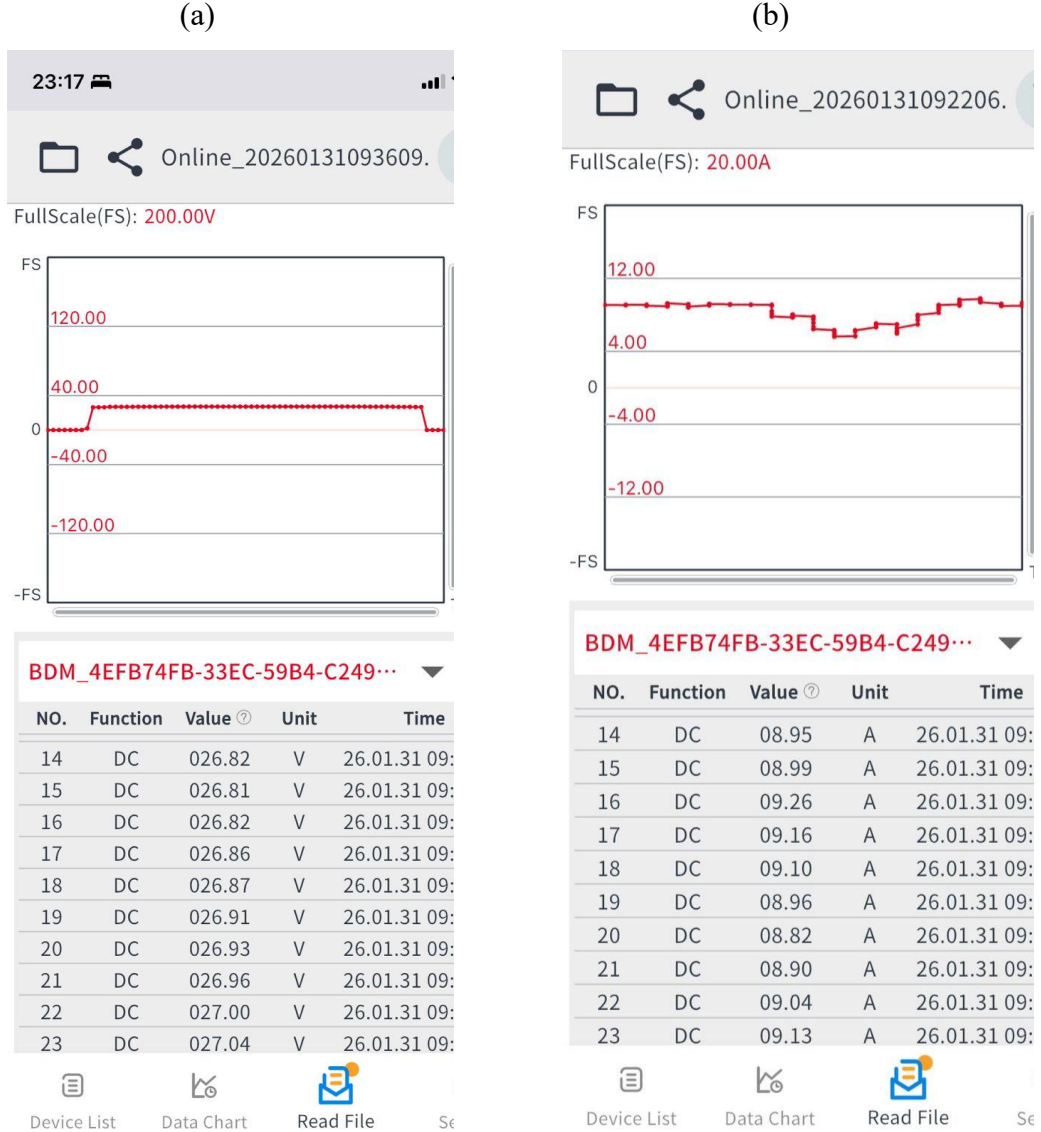
Outro detalhe a ser considerado é que o alicate amperímetro CMS101 apresenta erro de medição de aproximadamente $\pm 0,1\%$ a $\pm 0,8\%$ da leitura para tensão e entre $\pm 2\%$ e $\pm 3\%$ para corrente (Owon, 2026). Em comparação, o multímetro modelo UT210E possui precisão semelhante para medições de tensão, porém apresenta erro ligeiramente menor em algumas faixas de corrente, indicando desempenho metrológico comparável entre os instrumentos utilizados.

Figura 41 - Multímetro Owon utilizado em campo.



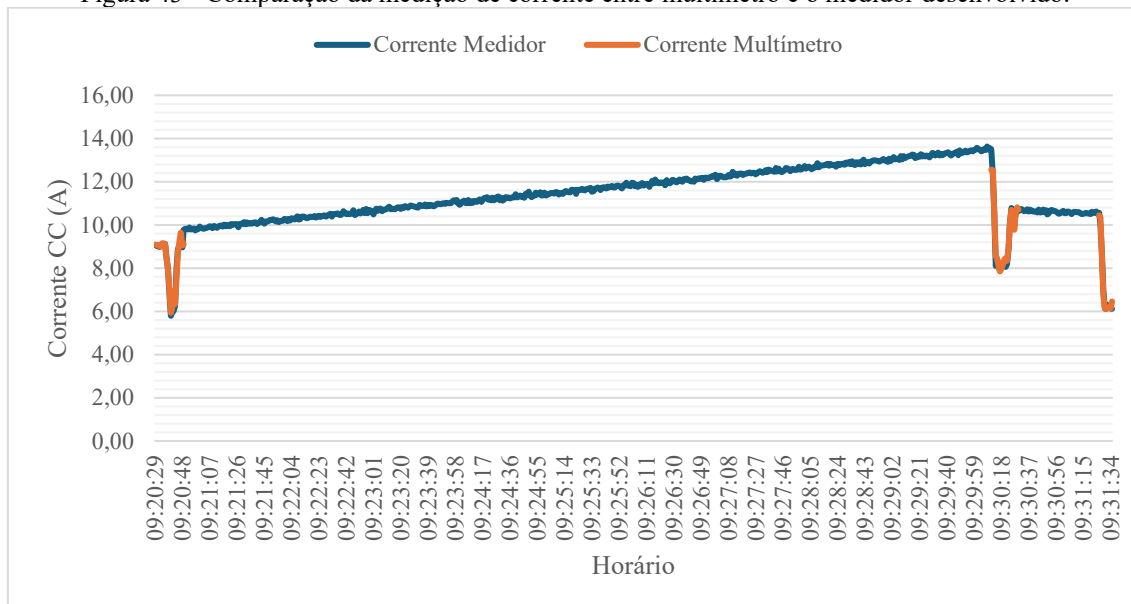
Fonte: Autor (2026)

Figura 42 - Medição do multímetro pelo aplicativo.



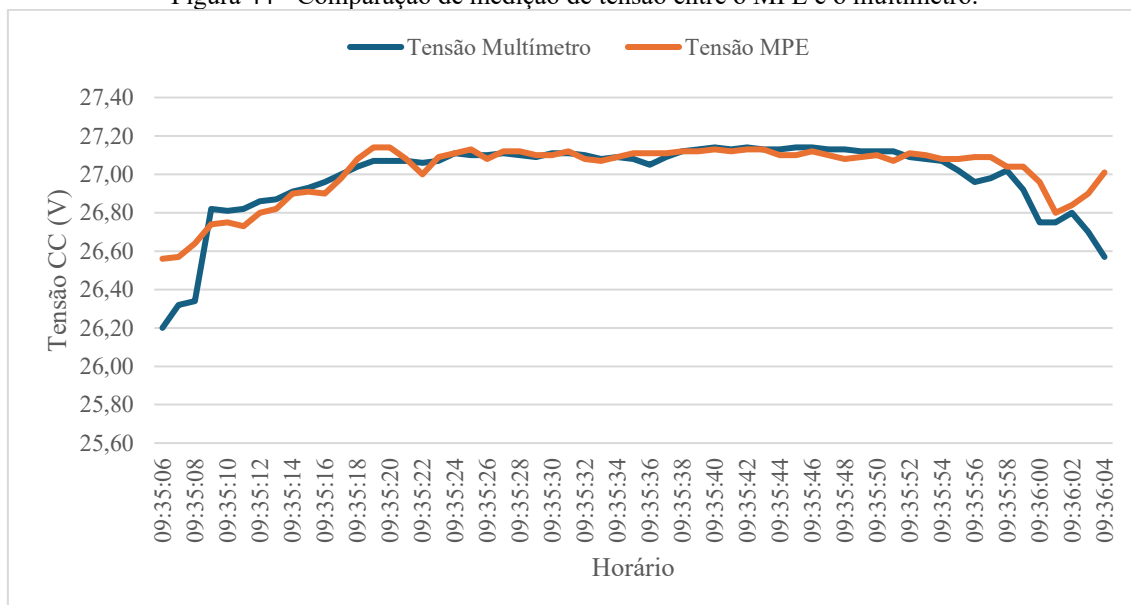
Fonte: Autor (2026).

Figura 43 - Comparação da medição de corrente entre multímetro e o medidor desenvolvido.



Fonte: Autor (2026).

Figura 44 - Comparação de medição de tensão entre o MPE e o multímetro.



Fonte: Autor (2026).

Pelo gráfico da Figura 43, é perceptível que, em alguns momentos, não foi possível aferir a corrente no sistema devido às atividades realizadas na configuração do alternador mecânica do alternador, como: aceleração, partida ou manuseios necessários. A Figura mostra 44 os momentos de medição de tensão, que devido a condições necessárias para manuseio do multímetro, foram constantes. Ademais, as Tabelas de 4 a

7 mostram os valores medidos e coletados e calculam a taxa de erro da medição do MPE comparados o multímetro, dada pela equação 12.

$$E_r\% = \left(\frac{V_{\text{med}} - V_{\text{ref}}}{V_{\text{ref}}} \right) \times 100 \quad (10)$$

Onde:

- V_{med} é o valor medido pelo medidor.
- V_{ref} é o valor medido pelo multímetro

Tabela 4 – Primeira medição de corrente.

Corrente CC do MPE (A)	Corrente CC do Multímetro (A)	Corrente RMS do MPE (A)	Data	Hora	Erro Relativo (A)
9,07	9,09	9,07	31/01/2026	09:20:29	-0,22%
9,04	9,082	9,04	31/01/2026	09:20:30	-0,46%
9,07	9,066	9,08	31/01/2026	09:20:31	0,04%
8,98	9,014	8,98	31/01/2026	09:20:32	-0,38%
9,02	8,988	9,02	31/01/2026	09:20:33	0,36%
9,1	9,148	9,11	31/01/2026	09:20:34	-0,52%
9,14	9,13	9,14	31/01/2026	09:20:35	0,11%
9,13	9,116	9,13	31/01/2026	09:20:36	0,15%
8,54	8,488	8,55	31/01/2026	09:20:37	0,61%
7,97	7,906	7,98	31/01/2026	09:20:38	0,81%
6,93	7,128	7	31/01/2026	09:20:39	-2,78%
5,79	5,932	5,8	31/01/2026	09:20:40	-2,39%
5,94	6,134	5,94	31/01/2026	09:20:41	-3,16%
6,03	6,938	6,04	31/01/2026	09:20:42	-13,09%
6,24	6,334	6,25	31/01/2026	09:20:43	-1,48%
8,08	7,64	8,09	31/01/2026	09:20:44	5,76%
8,87	8,732	8,88	31/01/2026	09:20:45	1,58%
9,06	9,26	9,06	31/01/2026	09:20:46	-2,16%
9,27	9,646	9,27	31/01/2026	09:20:47	-3,90%
8,97	9,048	8,97	31/01/2026	09:20:48	-0,86%
9,78	9,1025	9,79	31/01/2026	09:20:49	-0,22%

Fonte: Autor (2026).

Tabela 5 -Segunda medição de corrente.

Corrente CC do MPE (A)	Corrente CC do Multímetro	Corrente RMS do MPE(A)	Data	Hora	Erro Relativo (A)
13,49	12,56	13,5	31/01/2026	09:30:11	7,40%
12,29	12,53	12,31	31/01/2026	09:30:12	-1,92%
10,75	10,67	10,77	31/01/2026	09:30:13	0,75%
8,1	8,56	8,1	31/01/2026	09:30:14	-5,37%
8,42	8,46	8,43	31/01/2026	09:30:15	-0,47%
8,08	8,07	8,09	31/01/2026	09:30:16	0,12%

7,87	7,85	7,88	31/01/2026	09:30:17	0,25%
8,02	7,98	8,02	31/01/2026	09:30:18	0,50%
8,18	8,15	8,19	31/01/2026	09:30:19	0,37%
8,21	8,41	8,21	31/01/2026	09:30:20	-2,38%
8,05	8,46	8,06	31/01/2026	09:30:21	-4,85%
8,18	8,34	8,19	31/01/2026	09:30:22	-1,92%
8,89	8,92	8,9	31/01/2026	09:30:23	-0,34%
10,06	10,06	10,07	31/01/2026	09:30:24	0,00%
10,78	10,7	10,79	31/01/2026	09:30:25	0,75%
10,71	10,53	10,71	31/01/2026	09:30:26	1,71%
9,94	9,78	9,96	31/01/2026	09:30:27	1,64%
10,56	10,56	10,57	31/01/2026	09:30:28	0,00%
10,63	10,81	10,63	31/01/2026	09:30:29	-1,67%
10,65	10,71	10,66	31/01/2026	09:30:30	-0,56%

Fonte: Autor (2026).

Tabela 6 - Terceira medição de corrente.

Corrente CC do MPE (A)	Corrente CC do Multímetro	Corrente RMS do MPE (A)	Data	Hora	Erro Relativo (A)
10,56	10,44	10,57	31/01/2026	09:31:26	1,15%
10,01	10,37	10,02	31/01/2026	09:31:27	-3,47%
8,52	8,44	8,53	31/01/2026	09:31:28	0,95%
6,99	6,74	7	31/01/2026	09:31:29	3,71%
6,12	6,11	6,13	31/01/2026	09:31:30	0,16%
6,12	6,12	6,13	31/01/2026	09:31:31	0,00%
6,27	6,15	6,28	31/01/2026	09:31:32	1,95%
6,2	6,19	6,21	31/01/2026	09:31:33	0,16%
6,13	6,13	6,14	31/01/2026	09:31:34	0,00%
6,12	6,45	6,46	31/01/2026	09:31:35	-5,12%

Fonte: Autor (2016).

Tabela 7 - Medição de tensão inicial.

Tensão Multímetro (V)	Tensão CC do MPE (V)	Data	Horário	Erro Relativo (V)
26,20	26,56	31/01/2026	09:35:06	1,37%
26,32	26,57	31/01/2026	09:35:07	0,95%
26,34	26,64	31/01/2026	09:35:08	1,14%
26,82	26,74	31/01/2026	09:35:09	-0,30%
26,81	26,75	31/01/2026	09:35:10	-0,22%
26,82	26,73	31/01/2026	09:35:11	-0,34%
26,86	26,8	31/01/2026	09:35:12	-0,22%
26,87	26,82	31/01/2026	09:35:13	-0,19%
26,91	26,9	31/01/2026	09:35:14	-0,04%
26,93	26,91	31/01/2026	09:35:15	-0,07%
26,96	26,9	31/01/2026	09:35:16	-0,22%
27,00	26,98	31/01/2026	09:35:17	-0,07%
27,04	27,08	31/01/2026	09:35:18	0,15%
27,07	27,14	31/01/2026	09:35:19	0,26%
27,07	27,14	31/01/2026	09:35:20	0,26%
27,07	27,08	31/01/2026	09:35:21	0,04%

27,06	27	31/01/2026	09:35:22	-0,22%
27,07	27,09	31/01/2026	09:35:23	0,07%
27,11	27,11	31/01/2026	09:35:24	0,00%
27,10	27,13	31/01/2026	09:35:25	0,11%
27,10	27,08	31/01/2026	09:35:26	-0,07%
27,11	27,12	31/01/2026	09:35:27	0,04%
27,10	27,12	31/01/2026	09:35:28	0,07%
27,09	27,1	31/01/2026	09:35:29	0,04%
27,11	27,1	31/01/2026	09:35:30	-0,04%
27,11	27,12	31/01/2026	09:35:31	0,04%
27,10	27,08	31/01/2026	09:35:32	-0,07%
27,08	27,07	31/01/2026	09:35:33	-0,04%
27,09	27,09	31/01/2026	09:35:34	0,00%
27,08	27,11	31/01/2026	09:35:35	0,11%
27,05	27,11	31/01/2026	09:35:36	0,22%
27,09	27,11	31/01/2026	09:35:37	0,07%
27,12	27,12	31/01/2026	09:35:38	0,00%
27,13	27,12	31/01/2026	09:35:39	-0,04%
27,14	27,13	31/01/2026	09:35:40	-0,04%
27,13	27,12	31/01/2026	09:35:41	-0,04%
27,14	27,13	31/01/2026	09:35:42	-0,04%
27,13	27,13	31/01/2026	09:35:43	0,00%
27,13	27,1	31/01/2026	09:35:44	-0,11%
27,14	27,1	31/01/2026	09:35:45	-0,15%
27,14	27,12	31/01/2026	09:35:46	-0,07%
27,13	27,1	31/01/2026	09:35:47	-0,11%
27,13	27,08	31/01/2026	09:35:48	-0,18%
27,12	27,09	31/01/2026	09:35:49	-0,11%
27,12	27,1	31/01/2026	09:35:50	-0,07%
27,12	27,07	31/01/2026	09:35:51	-0,18%
27,09	27,11	31/01/2026	09:35:52	0,07%
27,08	27,1	31/01/2026	09:35:53	0,07%
27,07	27,08	31/01/2026	09:35:54	0,04%
27,02	27,08	31/01/2026	09:35:55	0,22%
26,96	27,09	31/01/2026	09:35:56	0,48%
26,98	27,09	31/01/2026	09:35:57	0,41%
27,02	27,04	31/01/2026	09:35:58	0,07%
26,92	27,04	31/01/2026	09:35:59	0,45%
26,75	26,96	31/01/2026	09:36:00	0,79%
26,75	26,8	31/01/2026	09:36:01	0,19%
26,80	26,84	31/01/2026	09:36:02	0,15%
26,70	26,9	31/01/2026	09:36:03	0,75%
26,57	27,01	31/01/2026	09:36:04	1,66%

Fonte: Autor (2026).

A análise estatística do intervalo entre 09:20:29 e 09:31:35 revelou que o sistema de medição apresenta uma média de erro de -0,41%. Contudo, observou-se uma variação

significativa entre a o desvio mais negativo (-13,09%) e o maior desvio positivo (+7,44%), evidenciando uma considerável dispersão dos dados.

Como visto nas Tabelas 4 e 6, com a medições de corrente, ocorrem erros superiores de 1%. Esse fator pode ser considerado como erros ocorridos durante o manuseio dos equipamentos (MPE e multímetro). Pois, são momento de ocorrência que não perduram ao comparar com a faixa de medição em geral.

Isso também ocorre na Tabela 7, mesmo com taxa de erros elevados em dados momentos, a média erro da faixa da faixa de medição ente o MPE e o multímetro não são elevadas. Dessa forma, esses dados confirma a funcionalidade do medidor para a medição de parâmetros elétricos.

5.3. Nova configuração do sistema

Após verificar a conformidade do medidor, foram trocadas as polias do alternador para a mais adequada para o sistema, como pode ser visto na Figura 45.

Figura 45 -Nova configuração do sistema de geração auxiliar.



Fonte: Autor (2026).

Com esta nova configuração, a rotação do alternador permitiu a geração que anteriormente não ocorria. Dessa forma, permitindo o início do teste de validação do medidor.

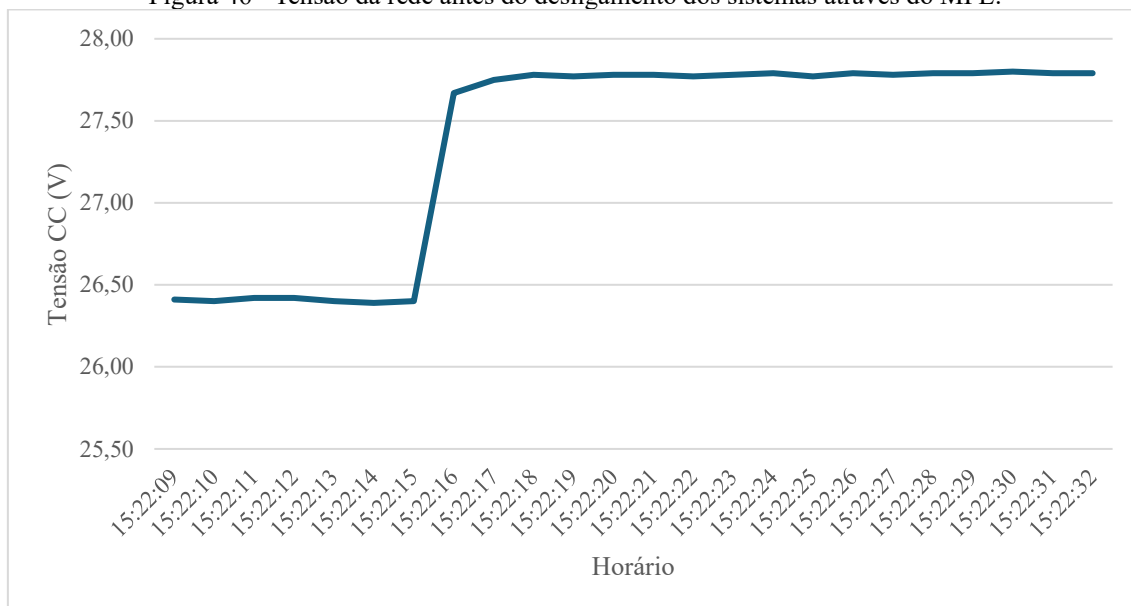
5.4. Verificação das condições iniciais.

Antes de proceder ao acionamento do motor e ao teste de geração, realizou-se a verificação das condições iniciais do sistema. O objetivo é reconhecer as condições iniciais do teste.

Verificou-se através da tela do medidor que a tensão de saída naquele momento variava entre 27 ~ 28 V, como mostra a Figura 46. Pensando em atingir a melhor eficácia

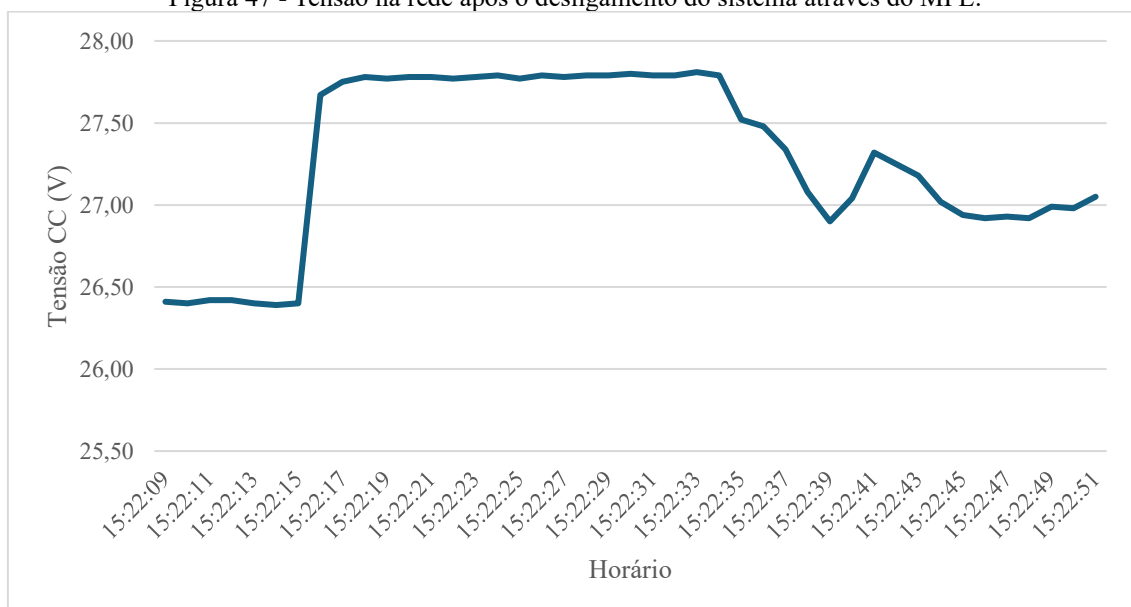
do sistema, optou-se por desligar os sistemas 01 e 02 de geração, representado na Figura 47. Dessa forma, reduz-se a tensão na rede da MDCC naquele ponto.

Figura 46 - Tensão da rede antes do desligamento dos sistemas através do MPE.



Fonte: Autor (2026).

Figura 47 - Tensão na rede após o desligamento do sistema através do MPE.



Fonte: Autor (2026).

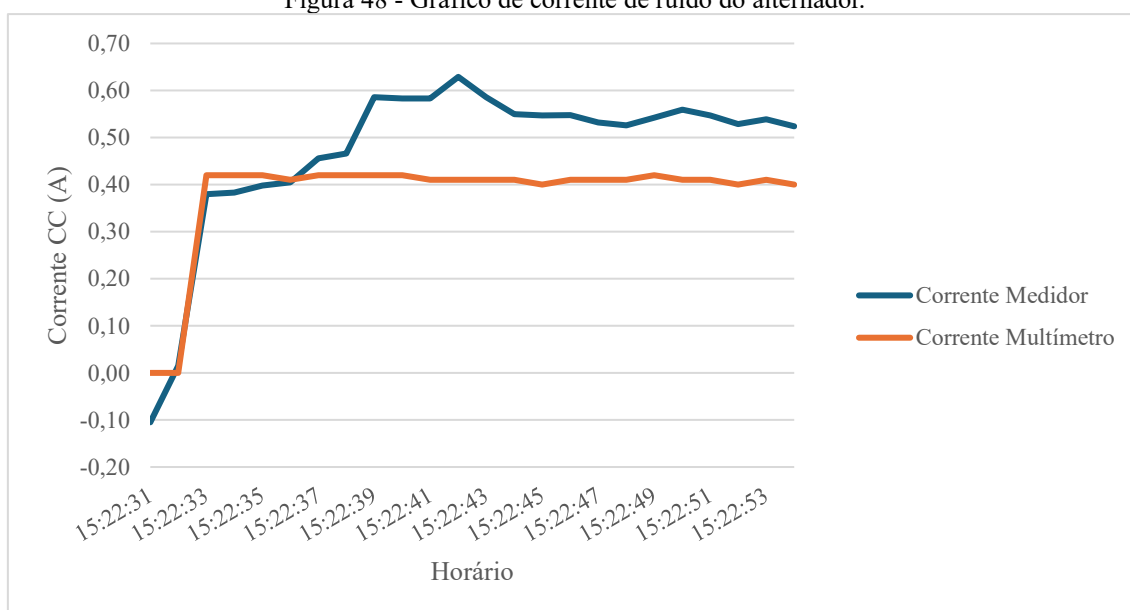
Mesmo com a redução do sistema, a tensão da MDCC ainda permaneceu elevada. Isso ocorre devido à geração fotovoltaica no momento dos testes.

5.5. Caracterização da partida e acoplamento de carga

Após a verificação de operação inicial do MPE, o grupo gerador foi acionado e o comportamento do sistema foi monitorado em dois estágios distintos:

1. **Ruído em aberto (15:22:31 – 15:22:54):** Com o motor em funcionamento, mas a chave seccionadora ainda aberta, verificou-se o nível de ruído do sensor. O sistema registrou apenas oscilações residuais próximas a zero, visto na Figura 48, confirmando que não havia falsa detecção de corrente antes da conexão.

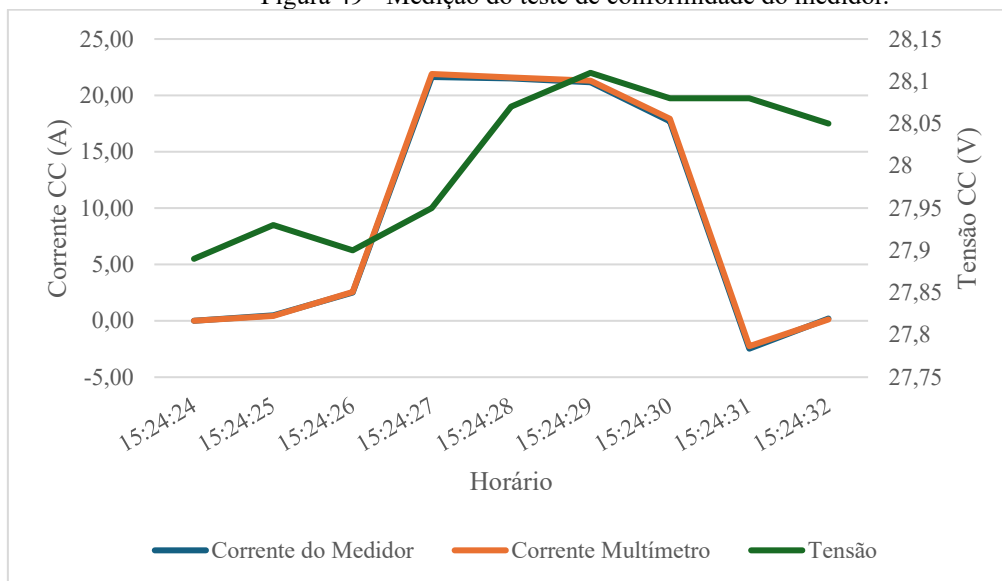
Figura 48 - Gráfico de corrente de ruído do alternador.



Fonte: Autor (2026).

2. **Acoplamento de Carga (15:24:24):** Procedeu-se ao fechamento da chave seccionadora, conectando o alternador ao barramento da microrrede. Neste instante, o medidor registrou a elevação imediata da corrente e a estabilização da tensão em 28V, visto na Figura 49 e detalhado na Tabela 9.

Figura 49 - Medição do teste de conformidade do medidor.



Fonte: Autor (2026).

Tabela 8 - Valores da Figura 49.

Corrente CC do MPE (A)	Corrente Multímetro CC (A)	Corrente RMS do MPE (A)	Tensão do MPE CC (V)	Tensão RMS (V)	Potência Ativa (W)	Data	Hora	Erro Relativo (%)
0,01	0,00	0,02	27,89	27,89	0,16	31/01/2026	15:24:24	—
0,50	0,42	0,51	27,93	27,93	13,29	31/01/2026	15:24:25	18,57
2,50	2,57	2,51	27,90	27,90	67,33	31/01/2026	15:24:26	2,65
21,63	21,90	21,64	27,95	27,95	588,88	31/01/2026	15:24:27	1,21
21,49	21,60	21,50	28,07	28,07	587,91	31/01/2026	15:24:28	0,52
21,17	21,30	21,18	28,11	28,11	577,54	31/01/2026	15:24:29	0,61
17,71	17,92	17,72	28,08	28,08	480,55	31/01/2026	15:24:30	1,16
-2,47	-2,25	-2,45	28,08	28,08	-66,44	31/01/2026	15:24:31	9,78
0,21	0,13	0,22	28,05	28,05	5,61	31/01/2026	15:24:32	61,54

Fonte: Autor (2026).

Com a geração estabelecida, iniciou-se o teste do sistema (duração aproximada de 40 minutos), manipulando os sistemas de geração da microrrede para variar a demanda sobre o alternador. A Tabela 9 detalha a cronologia.

Tabela 9 - Cronograma dos eventos.

Etapa	Horário	Ação Realizada	Comportamento Observado
01	15:25	Início do teste (Sistemas 01 e 02 desligados)	Geração estável inicial.
02	15:35	Desligamento dos Sistemas 08 e 11	Aumento da corrente fornecida pelo alternador.
03	15:45	Desligamento dos Sistemas 03 e 05	Pico de geração (corrente e potência máximas).
04	15:55	Restabelecimento de todos os sistemas	Redução gradativa da corrente do alternador.

05	16:00	Desligamento do Alternador	Encerramento do ensaio e coleta final de dados.
----	-------	----------------------------	---

Fonte: Autor (2026)

Dessa forma, a configuração visual da MDCC ao iniciar a etapa 1 está representada na Figura 50. Logo depois, está representado as medições realizadas nas Figura 51 a 54.

Figura 50 - Configuração da MDCC na Etapa 1.



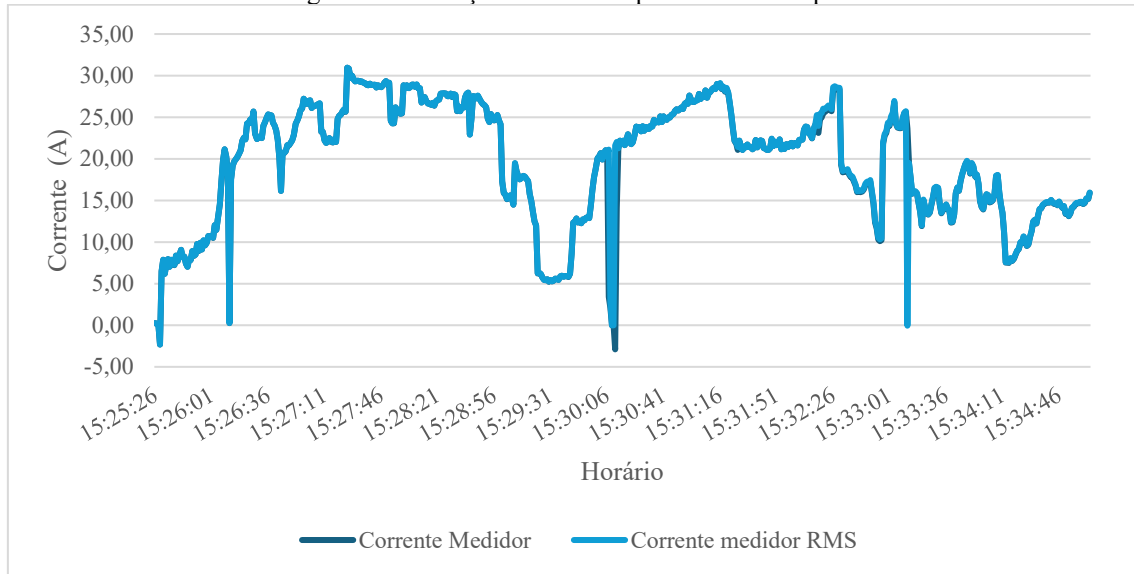
Fonte: Autor (2026).

Figura 51 - Medição da corrente pelo multímetro na Etapa 1.



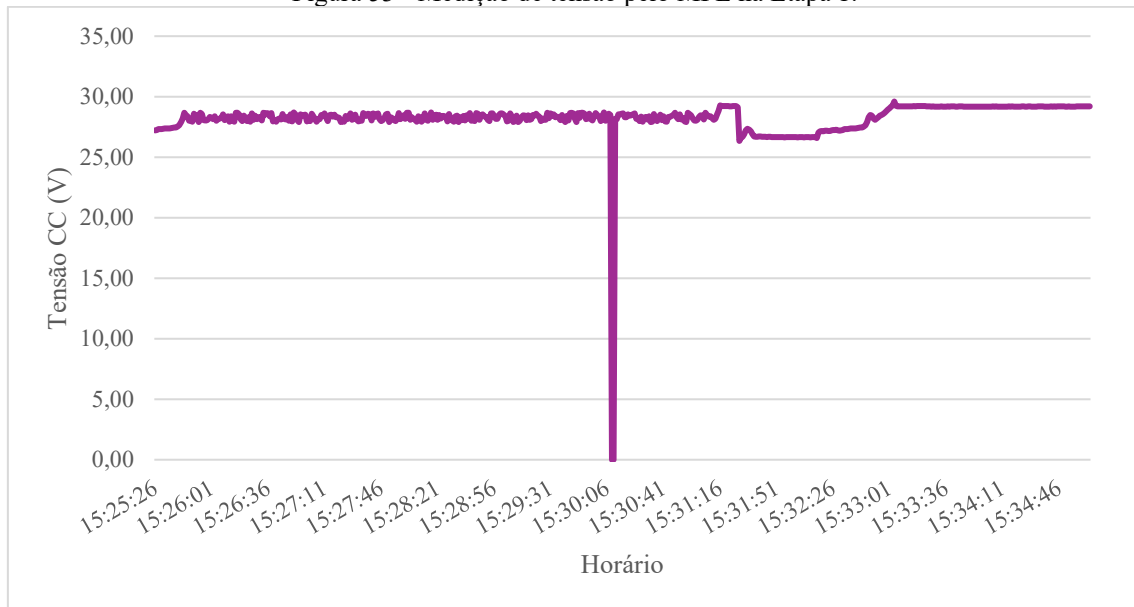
Fonte: Autor (2026).

Figura 52 - Medição de corrente pelo MPE na etapa 1.



Fonte: Autor (2026).

Figura 53 - Medição de tensão pelo MPE na Etapa 1.



Fonte: Autor (2026).

Figura 54 - Medição de potência pelo MPE na Etapa 1.



Fonte: Autor (2026).

Durante a etapa 1, verificou-se que em certo momento da as medições zeravam e depois retornavam. Isso ocorreu, devido a problemas mecânicos e de uso dos equipamentos. Pois em certos momentos, o multímetro se desprendia dos cabos de medição, como pode ser visto na Figura 51, e com relação ao MPE, o medidor, devido a algum impacto, seja humano ou pela vibração do sistema auxiliar, reiniciava. Este evento pode ser visto na Figura 52 e 53. Entretanto, mesmo com estas intercorrências foi possível aferir os parâmetros elétricos.

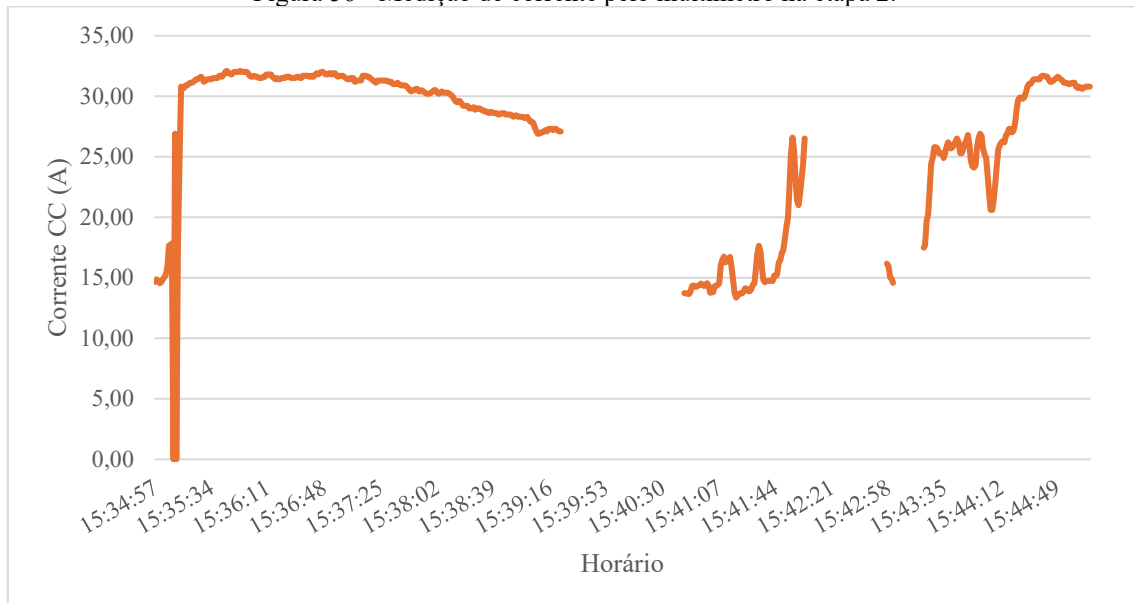
Além disso, de acordo com a figura 54, a potência da rede estava tendenciando ao declínio, isso ocorreu devido ao aumento da irradiação no local. Com isso, foi iniciada a etapa 2, com a configuração nova configuração visual da MDCC representada na Figura 55 e os valores registrados pelo medições nas Figuras de 56 a 59.

Figura 55 - Configuração da MDCC na Etapa 2.



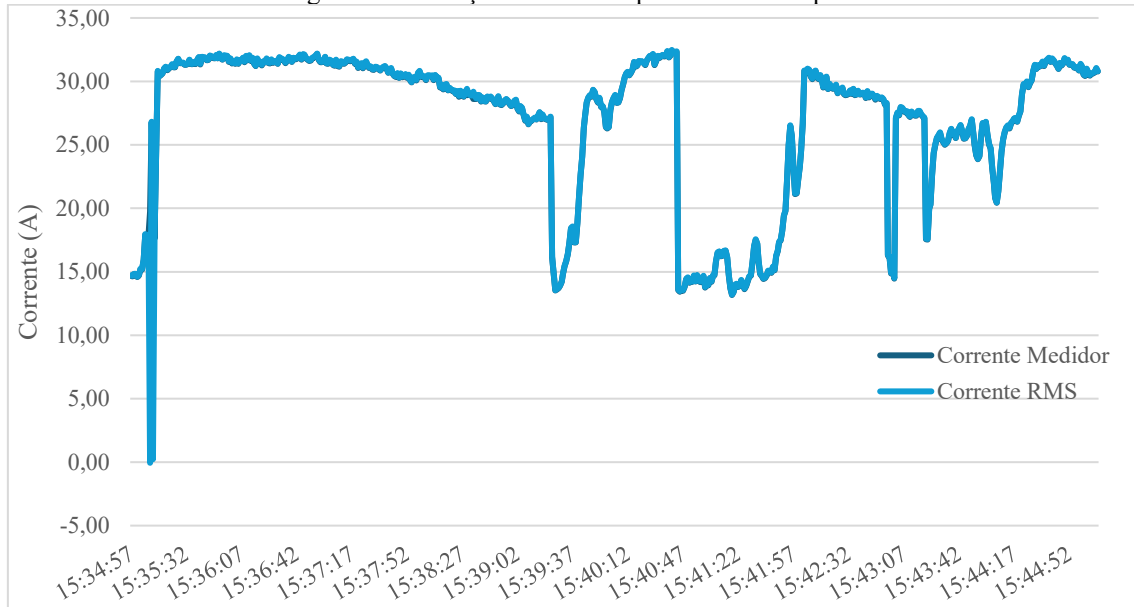
Fonte: Autor (2026).

Figura 56 - Medição de corrente pelo multímetro na etapa 2.



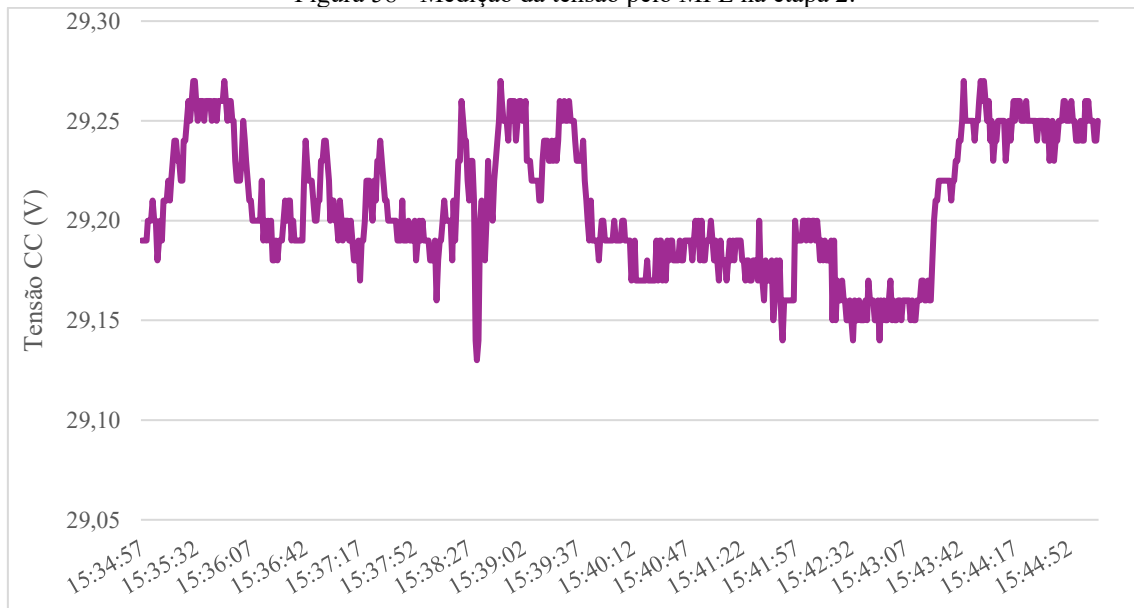
Fonte: Autor (2026).

Figura 57 - Medição de corrente pelo MPE na etapa 2.



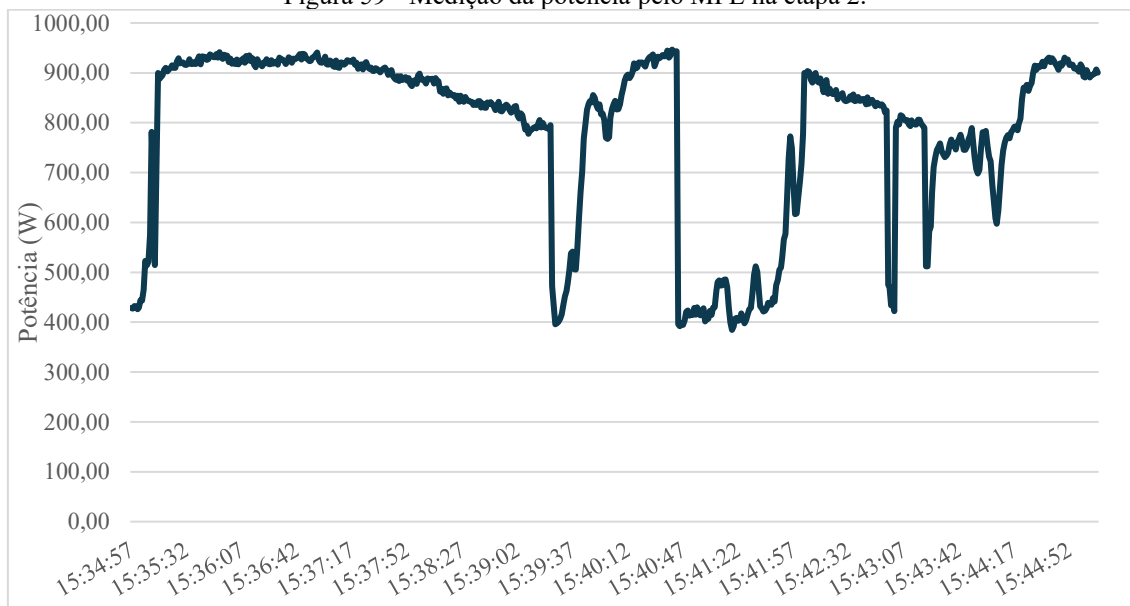
Fonte:Autor (2026).

Figura 58 - Medição da tensão pelo MPE na etapa 2.



Fonte: Autor (2026).

Figura 59 - Medição da potência pelo MPE na etapa 2.



Fonte: Autor (2026).

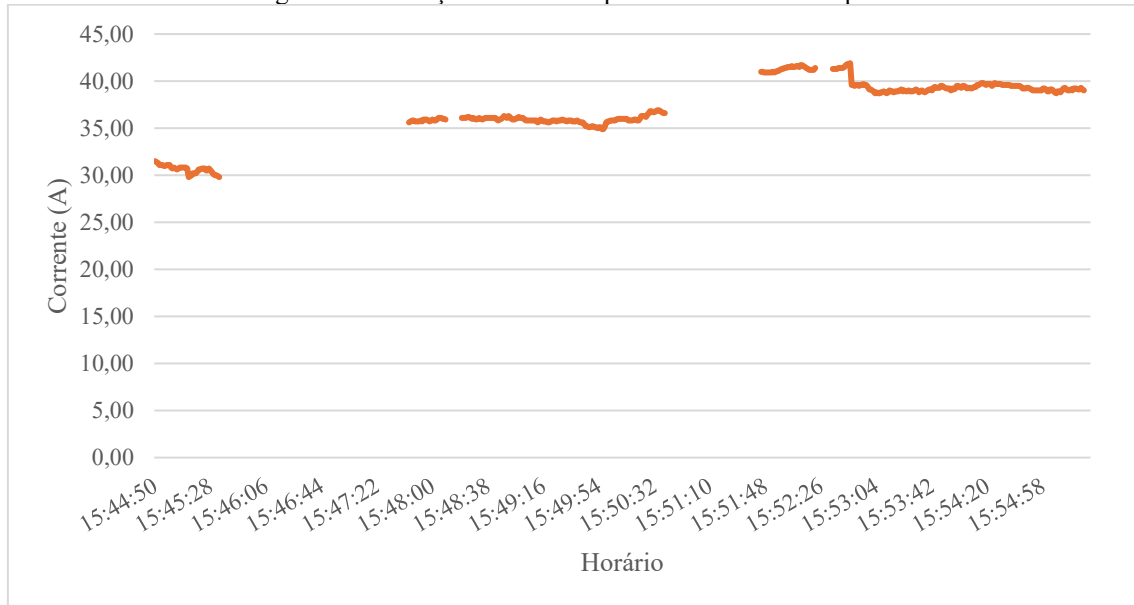
Mesmo com a etapa 2 e a redução dos sistemas, a geração ainda tendia a diminuir ao longo do tempo, como mostra a Figura 59. Além disso, foi possível ver novamente que o MPE acompanhou de forma aproximada os valores de tensão e de corrente, obtidos durante certos intervalos de medição com multímetro (Figura 56), como mostram as Figuras 57 e 58. Com isso, foram desligados mais 2 sistemas da rede, iniciando a etapa 3, como mostra a Figura 60.

Figura 60 - Configuração da MDCC na etapa 3.



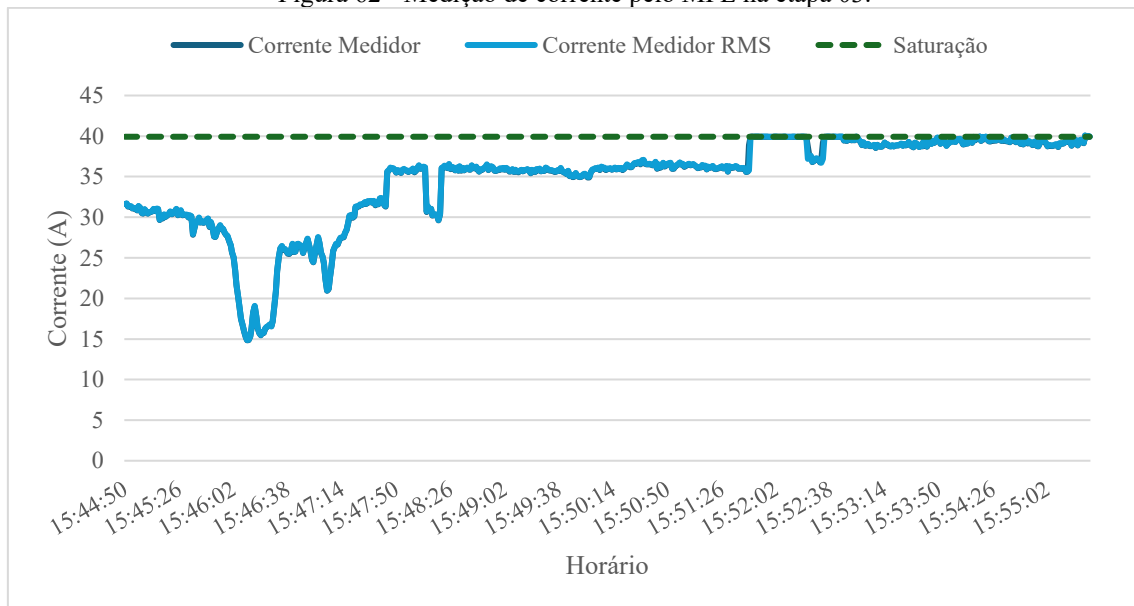
Fonte: Autor (2026)

Figura 61 - Medição de corrente pelo multímetro na etapa 3.



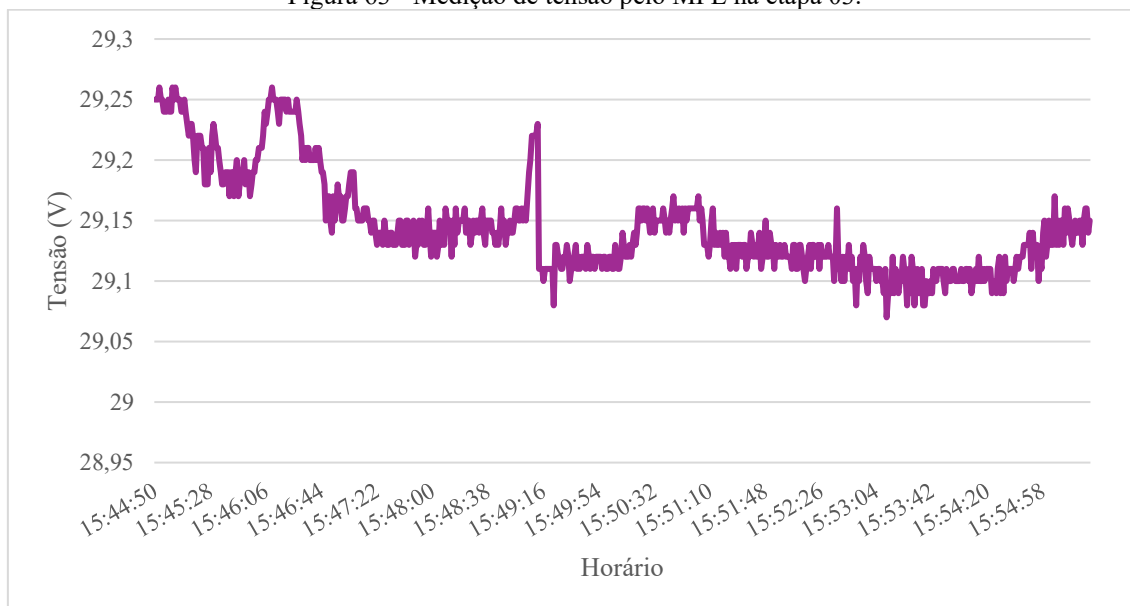
Fonte: Autor (2026).

Figura 62 - Medição de corrente pelo MPE na etapa 03.



Fonte: Autor (2026).

Figura 63 - Medição de tensão pelo MPE na etapa 03.



Fonte: Autor (2026).

Figura 64 - Medição de potência pelo MPE na etapa 03.



Fonte: Autor (2026)

Após desligar os sistemas 03 e 05, foi possível observar um aumento considerável na geração por meio do MPE, como fica evidenciado na Figura 64. Chegando a atingir valores próximos de 1200 W. Entretanto, mesmo com o aumento da rotação do motor, foi possível observar que a estabilidade da geração foi se mantendo contínua. De acordo com a Figura 61 e 62, a estabilização ficou entre 35 e 40 A. Com isso, também foi perceptível a queda de tensão da rede ao se compararem os valores MPE das figuras 58 e 63.

Ademais, como foi explicado no Capítulo 4, o medidor de corrente YHDC, é para corrente de 30 A, conseguindo medir valores a mais, entretanto, com risco de saturar em determinado instante. Isso ocorreu em momentos em que a corrente foi superior a 39,92 A, como mostra a Figura 62. Assim, determinou-se que o ponto de saturação da garra estava na faixa de correntes superiores a 39,9 A.

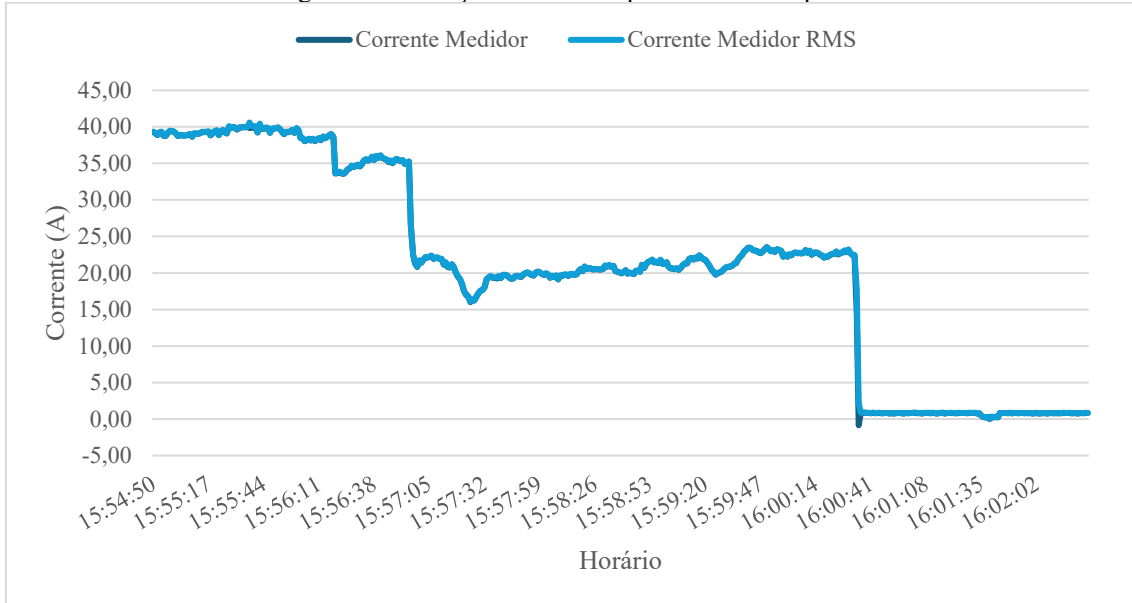
Logo em seguida, iniciou-se o processo de religamento do sistema de geração, gradativamente, na mesma ordem em que foi desligado. Dessa forma, dando início à etapa 4.

Figura 65 - Medição com o multímetro na etapa 04.



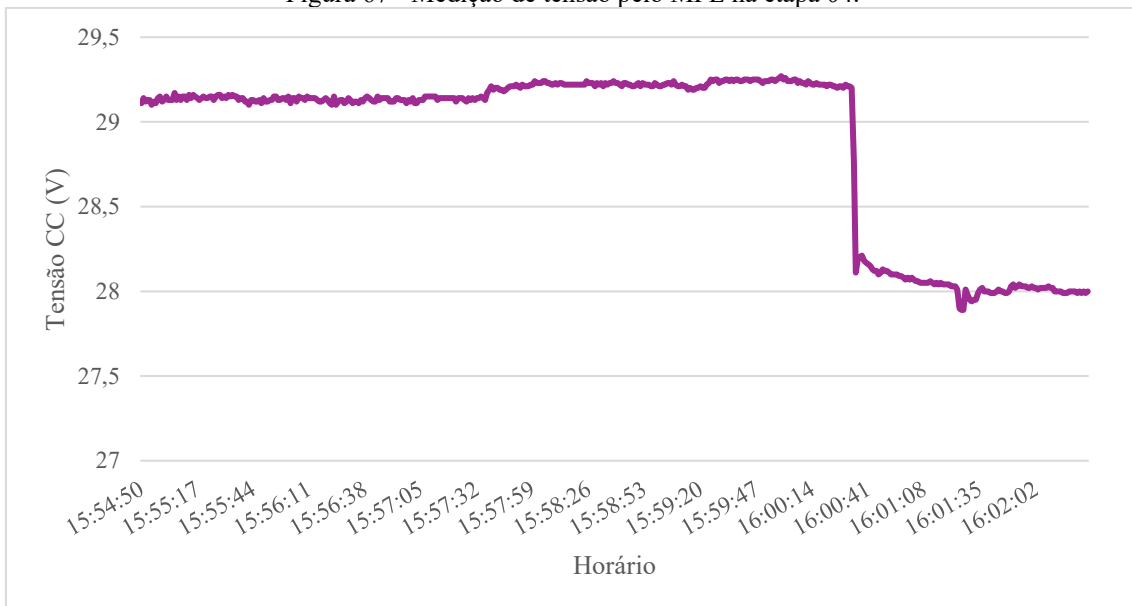
Fonte: Autor (2026).

Figura 66 - Medição de corrente pelo MPE na etapa 04.



Fonte: Autor (2026).

Figura 67 - Medição de tensão pelo MPE na etapa 04.



Fonte: Autor (2026).

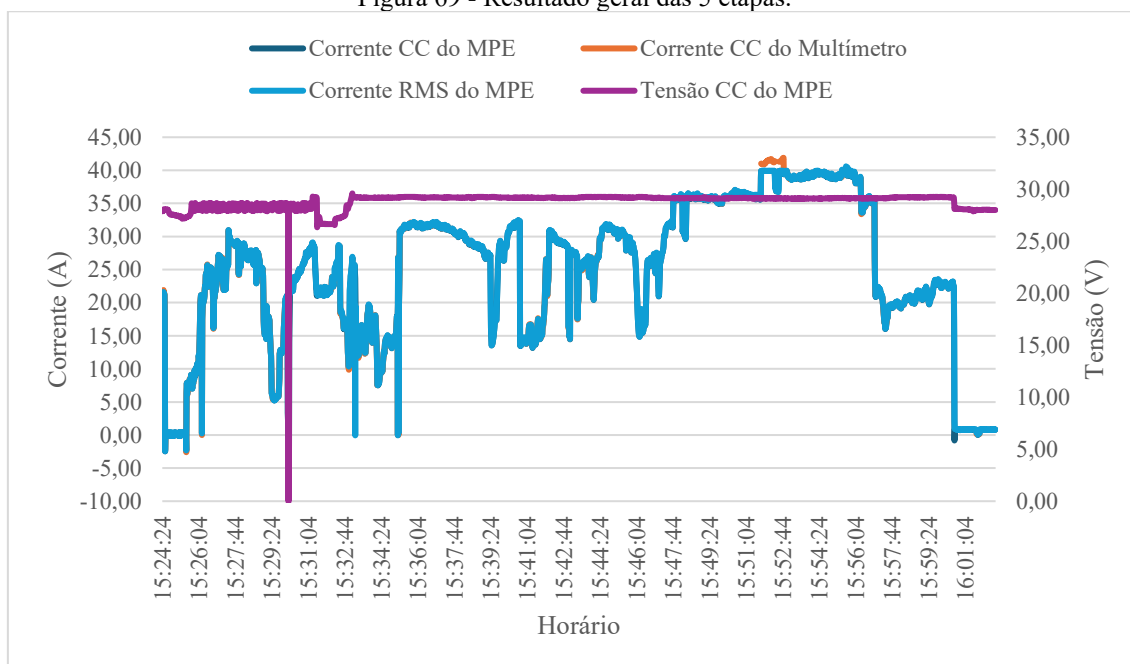
Figura 68 - Medição de potência na etapa 04.



Fonte: Autor (2026).

Como esperado, com a sequência do religamento dos sistemas, a tensão da rede passou a aumentar e a geração do alternador a diminuir, como pode ser visto na figura 65 a 68, onde o gráfico da potência (Figura 68) começa a decair. A partir das 16:00, quando iniciou a etapa 05 e foi finalizado o experimento. Dessa forma, as etapas do experimento podem ser resumidas de acordo com a Figura 69.

Figura 69 - Resultado geral das 5 etapas.



Fonte: Autor (2026).

Por fim, ao analisar os erros relativos, pode-se interpretar as seguintes situações.

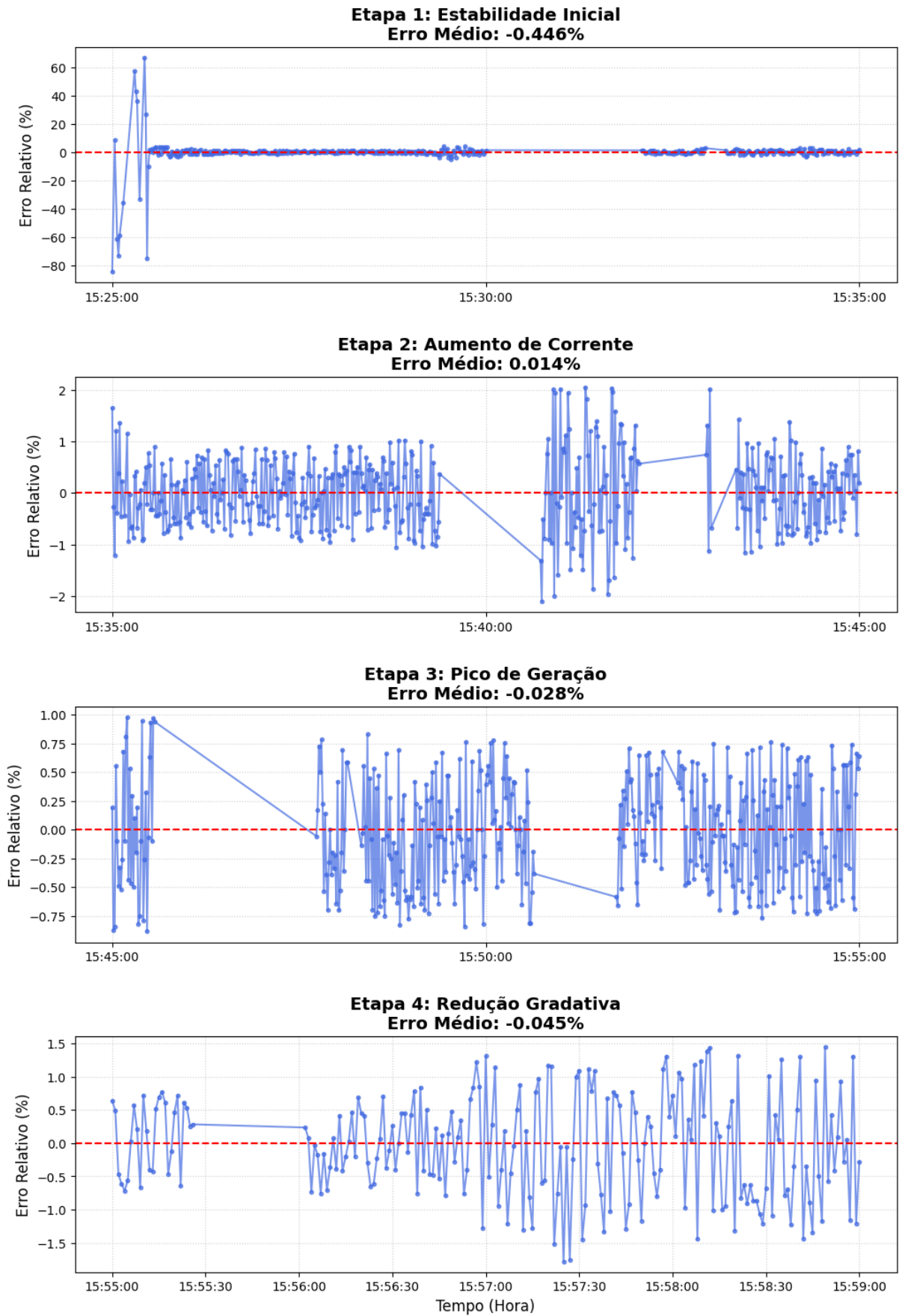
- **Etapa 1 (Estabilidade Inicial):** Observa-se alta dispersão dos erros (picos de até 66%), como mostra a Tabela 11. Isso ocorre porque o sistema está operando com correntes residuais (abaixo de 1A), em que a relação sinal-ruído do sensor é desfavorável.
- **Etapas 2 e 3 (Crescimento e Pico):** Com o aumento da carga, o erro médio cai drasticamente para próximo de zero (0,01% a 0,02%), evidenciado na Tabela 11. Isso indica que o medidor trabalhou com maior precisão em faixas de corrente mais elevadas (acima de 10).
- **Linearidade:** O comportamento gráfico da Figura 70 indica que o sensor "estabiliza" à medida que a corrente aumenta, evidenciando a melhoria da eficiência de medição.

Tabela 10 - Resumo das medições de erros relativos.

Etapa	Descrição	Erro Médio (%)	Erro Máximo (%)	Erro Mínimo (%)
01	Início/Estabilidade (Carga Mínima)	-0,446	+66,67	-84,61
02	Aumento de Corrente (Sist. 08, 11, 13 OFF)	+0,014	+2,05	-2,11
03	Pico de Geração (Sist. 03, 05 OFF)	-0,028	+0,98	-0,88
04	Restabelecimento e Redução Gradativa	-0,044	+1,44	-1,78

Fonte: Autor (2026).

Figura 70 - Análise de erro relativo durante o teste.



Fonte: Autor (2026).

6. CONCLUSÃO

O presente trabalho atingiu seu objetivo principal ao desenvolver, calibrar e validar, em campo, um sistema de instrumentação embarcada capaz de monitorar os parâmetros elétricos de um gerador auxiliar em uma microrrede de distribuição em corrente contínua.

Sob o ponto de vista técnico, os ensaios experimentais demonstraram a qualidade da arquitetura baseada no microcontrolador Arduino Nano e no armazenamento local (*datalogger*). Além disso, foi possível observar o comportamento de regulação de tensão da máquina, que oscilou entre 24 V e 28 V em resposta à demanda da MDCC.

A validação metrológica do protótipo revelou um comportamento dual, condizente com a natureza dos transdutores de efeito Hall. Nas etapas de baixa corrente (residuais abaixo de 1 A), o sistema apresentou erros elevados devido à relação sinal-ruído desfavorável. Entretanto, na faixa nominal de operação do gerador (correntes entre 10 A e 60 A), o Medidor de Parâmetros Elétricos (MPE) atingiu excelente estabilidade, com erros médios na ordem de 0,01% a 0,4%. Esses resultados validam o dispositivo como uma ferramenta confiável para a gestão do SGA, oferecendo uma alternativa prática comparado a medidores comerciais.

Outro ponto positivo é que o MPE facilita a análise do sistema, visto que certos medidores comerciais, como apresentado no capítulo 2, não apresentam sistema de *datalogger*. Dessa forma, torna-se possível analisar a geração da SGA e realizar estudos mais completos. Além disso, por se tratar de um sistema baseado em microcontrolador, é possível realizar adaptações no MPE por meio de alterações em seu *firmware*.

6.1. Das dificuldades enfrentadas.

Mesmo com a validação do funcionamento do MPE, vale ressaltar as dificuldades enfrentadas durante a realização deste experimento.

Primeiramente, houve dificuldades relacionadas ao manuseio da SGA, em especial do motor-alternador, uma vez que se tentou adaptar um modelo de polia que não se adequou corretamente ao alternador. Dessa forma, a polia acabava se soltando do eixo. Outra dificuldade foi relacionada à correia, pois o laboratório não dispunha do modelo adequado para esse sistema mecânico-elétrico, o que ocasionou o aquecimento dela. Além disso, esses fatores acabaram interferindo na geração, já que a relação entre as

polias não foi atendida corretamente, fazendo com que o alternador não rotacionasse de acordo com o esperado.

Ademais, o sensor de corrente acabou saturando, o que impediu a leitura completa da geração da SGA pelo MPE.

Outro fator a se destacar é a falta de um suporte adequado para a SGA, o que dificultava o manuseio do equipamento, visto que em determinados momentos de medição era necessária intervenção manual.

Entretanto, mesmo com essas dificuldades, foi possível realizar o experimento e obter resultados satisfatórios para o desenvolvimento do trabalho.

6.2. Trabalhos futuros

Visando o aperfeiçoamento contínuo do sistema e a mitigação das limitações identificadas neste estudo, sugerem-se as seguintes linhas de pesquisa para trabalhos futuros:

- a) **Expansão da Faixa de Medição:** Substituição do transdutor de corrente atual (30 A) por um modelo de 100 A ou 200 A, permitindo o registro dos picos de potência do alternador sem risco de saturação do sensor.
- b) **Implementação de Telemetria:** Integração de módulos de rádio de longo alcance (LoRa) para a transmissão dos dados coletados até um concentrador (*gateway*) com acesso à internet, eliminando a necessidade de coleta manual dos dados do cartão SD.
- c) **Ajustes mecânicos:** Será necessário ajustar a configuração mecânica do sistema (polia e correia) para que em futuros teste e pesquisas, poder-se utilizar da geração máxima do SGA.
- d) **Automação da Geração:** Desenvolvimento de uma malha de controle que atue no acelerador do motor a combustão, com base na leitura de tensão do MPE, acelerando o motor automaticamente quando a rede estiver com baixa tensão e desacelerando quando estiver com tensão elevada, otimizando o consumo de combustível

REFERÊNCIAS

AHMAD, Munir. Shunt Resistors and Applications in the Field of Instrumentation. Technical Article, Control.com, 08 jan. 2025. Disponível em: <https://control.com/technical-articles/shunt-resistors-and-applications-in-the-field-of-instrumentation/>. Acesso em: 09 mar. 2026.

AKHTAR, Muhammad Umair; IQBAL, Muhammad Tariq. Development and Evaluation of an Arduino-Based Data Logging System Integrated with Microsoft Excel for Monitoring On-Grid Photovoltaic Systems. *European Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, [S. l.], v. 8, n. 3, p. 29–37, 2024. DOI: 10.24018/ejece.2024.8.3.622. Disponível em: <https://eu-opensci.org/index.php/ejece/article/view/19622>. Acesso em: 9 mar. 2026.

ALVES, Victor Parente de Oliveira; FONSECA, Arthur Correa da; BARBOSA, Claudomiro Fábio de Oliveira; MACÊDO, Wilson Negrão. Nanorredes em corrente contínua: principais configurações e um caso prático aplicado na Amazônia. *Revista Conexão na Amazônia*, [S. l.], v. 12, n. 242, p. 1-15, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.35265/2236-6717-242-12928>. Acesso em: 20 fev. 2026.

AMORIM JR, José Paulo; RIBEIRO, Claudio M.; COLISTETE JR, Roberto. Medição remota de parâmetros elétricos usando IoT baseada no microcontrolador ESP32. In: ENCONTRO CIENTÍFICO DE FÍSICA APLICADA, 10., 2019, Vitória. Blucher Proceedings... São Paulo: Blucher, 2019. p. 45-48.

ARAÚJO, Cinthia de Freitas. Eletrificação rural em comunidades isoladas na Amazônia: introdução da energia solar fotovoltaica na Reserva Extrativista do Rio Unini, AM. 2014. Dissertação (Mestrado em Ciências do Ambiente e Sustentabilidade na Amazônia) – Centro de Ciências do Ambiente, Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5410: instalações elétricas de baixa tensão. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR IEC 60529: graus de proteção proporcionados por invólucros (Código IP). Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

AUTODOC. BOSCH – peça automotiva. [S. l.: s. n., 202-?]. Disponível em: <https://www.autodoc.co.uk/bosch/7995181>. Acesso em: 7 mar. 2026.

BOSCH. Alternadores Heavy Duty: Catálogo Técnico 2020/2021. Campinas: Robert Bosch Ltda, 2020.

BOYLESTAD, Robert; NASHELSKY, Louis. Dispositivos eletrônicos e teoria de circuitos. São Paulo: Pearson, 2013.

CAPUANO, Francisco G.; IDOETA, Ivan Valeije. Elementos de eletrônica digital. São Paulo: Érica, 2014.

COMPONENTS EXPLORER. LM2596 DC-DC buck converter datasheet. [S. l.: s. n., 202-?]. Disponível em: <https://componentsexplorer.com/lm2596-dc-dc-buck-converter-datasheet>. Acesso em: 7 mar. 2026.

CUMPLIDO, Meiriele Alvarenga; GONÇALVES, André Rodrigues; PEREIRA, Enio Bueno; RÜTHER, Ricardo. Energia solar fotovoltaica combinada com hidrogênio verde: uma estratégia para redução das emissões e da vulnerabilidade na Amazônia. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR - CBENS, 2024, [S. l.]. Anais [...]. [S. l.]: CBENS, 2024. DOI: 10.59627/cbens.2024.2506. Disponível em: <https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/2506>. Acesso em: 8 mar. 2026.

DETAILSPIN. Arduino Due SPI header pinout. [S. l.: s. n., 202-?]. Disponível em: <https://detailspin.com/arduino/arduino-due-spi-header-pinout.html>. Acesso em: 7 mar. 2026.

DHIMISH, Mahmoud; ALRASHIDI, Abdullah. Photovoltaic degradation rate affected by different weather conditions: a case study based on PV systems in the UK and Australia. *Electronics*, [S. l.], v. 9, n. 4, p. 650, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics9040650>.

EINABADI, Nasrin; KAZERANI, Mehrdad. Nanogrids in modern power systems: a comprehensive review. *Smart Cities*, Basel, v. 8, n. 1, art. 11, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/smartcities8010011>.

EL HAMMOUMI, Anas; MOTAHHIR, Saad; CHALH, Abdelaziz et al. Low-cost virtual instrumentation of PV panel characteristics using Excel and Arduino in comparison with traditional instrumentation. *Renewables*, [S. l.], v. 5, n. 3, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40807-018-0049-0>.

ELETROSIM. Sensores de efeito hall. Eletricidade e Eletrônica: Sensores de efeito Hall, 09 maio 2012. Disponível em: <https://eletrosim.blogspot.com/2012/05/sensores-de-efeito-hall.html>. Acesso em: 09 mar. 2026.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). Observatório Brasileiro de Erradicação da Pobreza Energética (OBEPE): painel de indicadores. [S. l.]: EPE, [2022]. Disponível em: <https://dashboard.epe.gov.br/apps/OBEPE/>. Acesso em: 9 mar. 2026.

FILHO, José de Arimatéia Alves Vieira; FONSECA, Arthur Correa; SILVA, Orlando Lemos de Lima; ALVES, Victor Parente de Oliveira; BARROS GALHARDO, Marcos André; FERREIRA TORRES, Pedro; WILLIAMSON, Samuel; NEGRÃO MACÊDO, Wilson. Exploring the impact of passive direct current microgrids on off-grid energy transition: concept development, testing, and implementation in a remote Amazonian community. *Energy for Sustainable Development*, [S. l.], v. 86, art. 101690, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.esd.2025.101690>.

FONSECA, Arthur Correa da; ALBUQUERQUE, Luana Oliveira de; MACÊDO, Wilson Negrão; GALHARDO, Marcos André Barros. Qualidade de energia em uma nanorrede de distribuição em corrente contínua. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR - CBENS, 2022, [S. l.]. Anais [...]. [S. l.]: CBENS, 2022. p. 1-10. DOI: 10.59627/cbens.2022.1114. Disponível em: <https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/1114>. Acesso em: 8 mar. 2026.

FREITAS, Aícia Ester Araújo de Souza; SANTOS, Fernanda Barba dos; GOES, Jhonatan Alves; NOGUEIRA, Kallyan Araujo. Dimensionamento de sistemas fotovoltaicos off-grid para abastecimento de casas em localidades ribeirinhas. *Revista FT, Engenharias*, [S. l.], v. 29, ed. 144, mar. 2025. DOI: <https://doi.org/10.69849/revistaft/ch10202503251856>.

FURTADO, Mairon de Sousa; MOURA, Gustavo Goulart Moreira. “O tempo amazônico”: uma revisão necessária sobre povos e comunidades tradicionais. *Desenvolvimento e Meio Ambiente*, [S. l.], v. 65, p. 1-18, 2025. DOI: <https://doi.org/10.5380/dma.v65i.91186>.

HAMMES, Maicon Rafael; BRUM, Argemiro Luis; GARLET, Igor Miguel Uzeika; KLEINPAUL, Anderson Felipe. Impactos dos sistemas fotovoltaicos na geração distribuída de energia elétrica. In: SIMPÓSIO LATINO-AMERICANO DE ESTUDOS

DE DESENVOLVIMENTO REGIONAL (SLAEDR), 2022, [S. 1.]. Anais [...]. [S. 1.]: SLAEDR, 2022.

HASSAN, Ali; ATIA, Dalal. Optimizing microgrid integration of renewable energy for sustainable solutions in off/on-grid communities. *Journal of Electrical Systems and Information Technology*, [S. 1.], 2024. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1186/s43067-024-00186-6>. Acesso em: 9 mar. 2026.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). *Amazônia Legal*. Rio de Janeiro: IBGE, 2021. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br>. Acesso em: 9 mar. 2026.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). *Potencial de agressividade climática na Amazônia Legal*. Rio de Janeiro: IBGE, 2014. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv95900.pdf>. Acesso em: 8 mar. 2026.

INSTITUTO DE ENERGIA E MEIO AMBIENTE (IEMA). *Exclusão elétrica na Amazônia Legal: quem ainda está sem acesso à energia elétrica?*. São Paulo: IEMA, 2020. Disponível em: <https://energiaeambiente.org.br/produto/exclusao-eletrica-na-amazonia-legal-quem-ainda-esta-sem-acesso-a-energia-eletrica>. Acesso em: 29 dez. 2025.

ITECH ELECTRONIC CO., LTD. *IT-M3400 Series User Manual*. Versão 1.2. [S. 1.]: Itech Electronic Co., 2022.

LACERDA, Gabriel Yúri Campos; LIRA, Jaiane Silva; OLIVEIRA, Luís Henrique Silva de; SANTOS, Mayara Yasmin Sampaio dos; RAMOS, Karina Ninni; SILVA, Lázaro João Santana da; SANTOS, Manoel Roberval Pimentel. *Implantação de um sistema fotovoltaico off-grid em uma comunidade da Resex Tapajós-Arapiuns: Porto Rico*. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR - CBENS, 2024, [S. 1.]. Anais [...]. [S. 1.]: CBENS, 2024. DOI: 10.59627/cbens.2024.2486. Disponível em: <https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/2486>. Acesso em: 8 mar. 2026.

MAMEDE FILHO, João. *Instalações elétricas industriais*. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2017.

MAZZONE, Antonella; CRUZ, Talita; BEZERRA, Paula; RATHMANN, Régis; LUCENA, André Felipe Pereira; SCHAEFFER, Roberto; SZKLO, Alexandre Salem. *A multidimensionalidade da pobreza no Brasil: um olhar sobre as políticas públicas e*

desafios da pobreza energética. *Revista Brasileira de Energia*, [S. l.], v. 27, n. 3, 2023. DOI: <https://doi.org/10.47168/rbe.v27i3.644>.

MERINO, Carlos; CASTRO, Rui. Optimization of a hybrid solar–wind microgrid for sustainable development. *Sustainability*, [S. l.], v. 16, n. 9, 3668, 2024. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/16/9/3668>. Acesso em: 9 mar. 2026.

MOURA, Maria Eduarda Leonardo de; JESUS, Aurea Messias de; REIS, Alan Kardec Candido dos. Análise geral dos desafios na geração, transmissão e distribuição de energia elétrica na Amazônia Legal: aspectos técnicos, econômicos, sociais e de planejamento estratégico. *Revista Caderno Pedagógico*, Curitiba, v. 22, n. 1, p. 1-18, 2025.

NUNEZ, Marcela de Pinho; VELÁZQUEZ, Sílvia Maria Stortini González. Projeto de um sistema de geração de energia solar fotovoltaica para comunidades isoladas. *Revista Mackenzie de Engenharia e Computação*, [S. l.], v. 23, n. 1, p. 149–173, 2023. DOI: <https://doi.org/10.5935/RMEC.v23n1p149-173>.

OWON TECHNOLOGY. CMS101 – 20A/1000A Smart AC/DC Clamp Meter and Oscilloscope. [S. l.]: Owon Technology, [202-?]. Disponível em: <https://www.owontechnology.eu/product/21287445/owon-cms101-20a-1000a-smart-ac-dc-clamp-meter-and-oscilloscope>. Acesso em: 7 mar. 2026.

PAULA, Railma Lima de. Desenvolvimento de protótipo de medidor eletrônico de energia elétrica monofásico utilizando rede LoRa. 2021. Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia de Processos) – Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2021.

PEREIRA, Enio Bueno et al. *Atlas Brasileiro de Energia Solar*. 2. ed. São José dos Campos: INPE, 2017.

PEREIRA, Osvaldo Soliano; REIS, Tereza Mousinho; RÜTHER, Ricardo. Amazon energy transition: the need to accelerate emission reduction by the extensive adoption of solar photovoltaics and storage in Brazil. *Energy for Sustainable Development*, [S. l.], v. 80, p. 101445, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.esd.2024.101445>.

PINHO, João Tavares; GALDINO, Marco Antônio. *Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos*. Rio de Janeiro: CEPEL/CRESESB, 2014.

PROCOPIO, Edson T. et al. Implementação de medidor de energia elétrica em plataforma de hardware livre para estudo do comportamento de redes inteligentes. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE EDUCAÇÃO EM ENGENHARIA (COBENGE), 39., 2011, Blumenau. Anais... Blumenau: ABENGE, 2011.

RANA, Z. et al. Solar panel corrosion: a review. International Journal of Molecular Sciences, [S. l.], v. 26, n. 13, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms26135960>.

REBELATO, Michele Dürks. Como o Brasil entende o conceito de pobreza energética na atualidade?: uma revisão da literatura, visando compreender além do conceito, as políticas públicas aplicadas à redução das desigualdades. 2025. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Administração) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2025. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/266234>. Acesso em: 10 fev. 2026.

SECON. Transdutor de tensão contínua com saída isolada: Datasheet 1056. [S. l.]: Secon Sensores e Instrumentos, 2021.

SENA, Gerson Evandro de Oliveira. Medidor de consumo de energia elétrica com acesso local e remoto usando plataforma ESP8266. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Pampa, Alegrete, 2018.

SILVA, Corbiniano; PEREIRA, Marcio Giannini. O desafio do atendimento elétrico na Amazônia. Estudos Avançados, São Paulo, v. 24, n. 68, p. 173-188, 2010.

SILVA, João Durval Souza Marruaz da; PANTOJA, Mayron Robert Souza; LOBATO, Pedro Bentes; GALHARDO, Marcos André Barros; MACÊDO, Wilson Negrão. Impactos socioeconômicos após implantação de uma nanorrede de distribuição em corrente contínua em uma comunidade isolada na Amazônia. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR – CBENS, 10., 2024, Natal. Anais... Natal: Associação Brasileira de Energia Solar, 2024. DOI: <https://doi.org/10.59627/cbens.2024.2519>.

SILVEIRA, Ryanna Marques Da et al. Investigando a relação entre a intensidade da corrente elétrica e a intensidade do campo magnético utilizando um sensor hall. In: CONGRESSO NACIONAL DE EDUCAÇÃO (CONEDU), 9., 2023, Campina Grande. Anais [...]. Campina Grande: Realize Editora, 2023. Disponível em: <https://editorarealize.com.br/artigo/visualizar/98050>. Acesso em: 9 mar. 2026.

THOMAZINI, Daniel; ALBUQUERQUE, Pedro. Sensores industriais: fundamentos e aplicações. São Paulo: Érica, 2011.

TORRES, Pedro Ferreira. Desenvolvimento e modelagem de uma nanorrede de distribuição em corrente contínua em baixa tensão com sistemas de geração distribuída. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2019.

TORRES, Pedro Ferreira; FILHO, José de Arimatéia Alves Vieira; WILLIAMSON, Samuel James; PINHO, João Tavares; GALHARDO, Marcos André Barros; MACÊDO, Wilson Negrão. Concepção de estrutura laboratorial para realização de estudos em microrrede em corrente contínua de baixa tensão. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR - CBENS, 2018, [S. l.]. Anais [...]. [S. l.]: CBENS, 2018. DOI: 10.59627/cbens.2018.289. Disponível em: <https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/289>. Acesso em: 8 mar. 2026.

TOYAMA. Manual do proprietário – Motor XP 500. Guaratinguetá, SP: Toyama, 2021. Disponível em: https://toyama.com.br/manuais/TY_TDE_XP_MA_M.pdf. Acesso em: 23 fev. 2026.

TOYAMA. Motor Gasolina TE180EK-XP. [S. l.]: Toyama, [202-?]. Disponível em: <https://toyama.com.br/produto/motor-gasolina-te180ek-xp/>. Acesso em: 7 mar. 2026.

UNI-T. UT210E: user manual. Rev. 2. [S. l.]: Uni-T, maio 2018. Disponível em: <https://meters.uni-trend.com/download/ut210e-user-manual/>. Acesso em: 8 mar. 2026.

XANTREX TECHNOLOGY INC. XDC 6000 Watt and 12000 Watt Series Digital Programmable DC Power Supply: operating manual. [S. l.]: Xantrex Technology Inc., 2006. Disponível em: <https://www.manualslib.com/manual/195453/Xantrex-Xdc-10-1200.html>. Acesso em: 7 mar. 2026.

YHDC. SCT-013 Series: non-invasive AC Current Sensor Datasheet. Beijing: YHDC, 2020.