



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

RODRIGO BARROSO GADELHA

**ESPECIFICAÇÃO DE HARDWARE PARA GERENCIAMENTO DE ENERGIA E
DESENVOLVIMENTO DE SOFTWARE PARA MONITORAMENTO DE UMA
MICRORREDE FOTOVOLTAICA ISOLADA COM ARMAZENAMENTO EM
HIDROGÊNIO VERDE.**

DM 16/2025

UFPA / ITEC / PPGEE

Campus Universitário do Guamá

Belém-Pará-Brasil

2025

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

RODRIGO BARROSO GADELHA

**ESPECIFICAÇÃO DE HARDWARE PARA GERENCIAMENTO DE ENERGIA E
DESENVOLVIMENTO DE SOFTWARE PARA MONITORAMENTO DE UMA
MICRORREDE FOTOVOLTAICA ISOLADA COM ARMAZENAMENTO EM
HIDROGÊNIO VERDE.**

Dissertação submetida à Banca Examinadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFPA para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica na área de Sistemas de Energia Elétrica.

Linha de Pesquisa: Sistemas de Energia.

Orientador: Prof. Dr. João Paulo Abreu Vieira.

UFPA / ITEC / PPGEE

Campus Universitário do Guamá

Belém-Pará-Brasil

2025

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

RODRIGO BARROSO GADELHA

**ESPECIFICAÇÃO DE HARDWARE PARA GERENCIAMENTO DE ENERGIA E
DESENVOLVIMENTO DE SOFTWARE PARA MONITORAMENTO DE UMA
MICRORREDE FOTOVOLTAICA ISOLADA COM ARMAZENAMENTO EM
HIDROGÊNIO VERDE.**

Dissertação submetida à Banca Examinadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFPA para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica na área de Sistemas de Energia Elétrica.

Linha de Pesquisa: Sistemas de Energia.
Orientador: Prof. Dr. João Paulo Abreu
Vieira.

UFPA / ITEC / PPGEE

Campus Universitário do Guamá

Belém-Pará-Brasil

2025

**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)**

G124e Gadelha, Rodrigo Barroso.
ESPECIFICAÇÃO DE HARDWARE PARA
GERENCIAMENTO DE ENERGIA E DESENVOLVIMENTO
DE SOFTWARE PARA MONITORAMENTO DE UMA
MICRORREDE FOTOVOLTAICA ISOLADA COM
ARMAZENAMENTO EM HIDROGÊNIO VERDE. / Rodrigo
Barroso Gadelha, . — 2025.
82 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. João Paulo Abreu Vieira
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará,
Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica, Belém, 2025.

1. Armazenamento de energia. 2. Hidrogênio verde. 3.
Microrrede isolada. 4. Monitoramento em tempo real. I.
Título.

CDD 621.310285

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ

INSTITUTO DE TECNOLOGIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

ESPECIFICAÇÃO DE HARDWARE PARA GERENCIAMENTO DE ENERGIA E DESENVOLVIMENTO DE SOFTWARE PARA MONITORAMENTO DE UMA MICRORREDE FOTOVOLTAICA ISOLADA COM ARMAZENAMENTO EM HIDROGÊNIO VERDE.

AUTOR: RODRIGO BARROSO GADELHA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA À BANCA EXAMINADORA APROVADA PELO COLEGIADO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA, SENDO JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA NA ÁREA DE SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA.

APROVADA EM: 23/06/2025

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. João Paulo Abreu Vieira

(Orientador – PPGEE/ITEC/UFPA)

Prof. Dr^a. Carolina de Mattos Affonso

(Avaliador Interno –

PPGEE/ITEC/UFPA)

Prof. Dr. Filipe De Oliveira Saraiva

(Avaliador Externo – ICEN/UFPA)

Prof. Dr. Gustavo Marchesan

(Avaliador Externo-UFSM)

VISTO:

Prof. Dr. Diego Lisboa Cardoso

(Coordenador do

PPGEE/ITEC/UFPA)

Dedicatória

Dedico este trabalho à minha mãe, aos meus tios, que estiveram presentes em minha jornada, proporcionando felicidade, conselhos e apoio nos momentos difíceis e nas conquistas.

Agradecimentos

Primeiramente, expresso minha gratidão à minha mãe, Ana, cujo esforço em fornecer uma base sólida para alcançar meus objetivos é inestimável, sempre acompanhado de seu amor, incentivo e apoio.

À Universidade Federal do Pará e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, pela oportunidade de acesso à educação e as condições propícias para realizar minha pesquisa e elaborar minha dissertação.

Ao meu orientador, João Paulo Abreu, por sua compreensão, paciência e oportunidade para a realização da minha dissertação. Também estendo meu agradecimento à equipe do GSEI, pelo ambiente propício para a concretização da pesquisa.

De maneira especial, agradeço ao meu amigo e Coorientador, André Leão, cujo suporte e conforto foram fundamentais durante todo o período da minha pesquisa.

Aos meus valorosos amigos, profissionais de Saúde que, com inabalável dedicação, entregaram suas vidas no combate à pandemia da COVID-19. Sua memória será eterna.

Dedico meu sincero agradecimento à minha grande amiga, Professora Vânia Carneiro, pelo apoio leal que me fortaleceu em cada passo da minha caminhada.

O carinho de vocês, meus queridos alunos, foi um farol em meio às tempestades dos últimos anos. Sou imensamente grato por terem me mantido firme.

Ao meu falecido Pai, Odimar Fares Gadelha, que partiu precocemente e deixa muitas saudades.

Aos meus amigos, Welisson Lohan, Fábio Monteiro e Vitor Batista, pelo apoio à minha trajetória durante no mestrado.

Por fim, expresso meu agradecimento a todos que contribuíram direta ou indiretamente para a realização da minha pesquisa.

SUMÁRIO

LISTA DE ILUSTRAÇÕES	10
LISTA DE TABELAS	12
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	13
RESUMO	15
ABSTRACT	16
CAPÍTULO 1-INTRODUÇÃO.....	21
1.1- CONTEXTO.....	21
1.2- JUSTIFICATIVA DO DESENVOLVIMENTO DO PROJETO	23
1.3- MOTIVAÇÃO	24
1.4- OBJETIVOS.....	25
1.4.1- Objetivos Específicos	25
1.4- ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	26
CAPÍTULO 2- ARQUITETURA DA MICRORREDE FOTOVOLTAICA ISOLADA COM ARMAZENAMENTO DE ENERGIA EM HIDROGÊNIO VERDE (MIRAHV).....	27
2.1- INTRODUÇÃO	27
2.2- COMPONENTES DA MIRAHV	28
2.3- ARQUITETURA DA MIRAHV.....	29
2.4- FILOSOFIA DE OPERAÇÃO DA MIRAHV	30
CAPÍTULO 3- ESPECIFICAÇÃO DE PLATAFORMA DE HARDWARE PARA GERENCIAMENTO DE ENERGIA DA MIRAHV	31
3.1- INTRODUÇÃO	31
3.2- ESTRUTURA BÁSICA DE UM HARDWARE PARA GERENCIAMENTO DE ENERGIA DE MICRORREDES.....	31
3.2.1- SMART GRIDS.....	31
3.2.2- Automação em Sistemas de Distribuição	32
3.2.3- Controle e Automação em Microrredes	33
3.2.4- Microrredes e Geração Distribuída	33
3.2.5- Estratégias de Controle em Microrredes	34
3.2.6- Desafios na proteção em Microrredes	34
3.2.7- Desafios da Automação em Microrredes Isoladas	35
3.3- AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DE DADOS	36
3.3.1- Sistemas Supervisórios e Aquisição de Dados(SCADA)	36
3.3.2- Sistemas Embarcados	37
3.3.3- Aquisição de dados de um sistema supervisorio	38
3.3.4- Fundamentos para obtenção de Dados.....	38

3.4- COMUNICAÇÃO	39
3.4.1-Redes Industriais.....	40
3.4.2- Ethernet Industrial	40
3.4.3- Protocolos de Comunicação Industrial.	41
3.4.3.1- Modbus	41
3.4.3.2- DNP3	43
3.3.3.3- IEC 61850	43
3.4.3.4- OPC UA	44
3.4.3.5- Arquitetura TCP/IP.....	45
3.3.3.6- Conceitos básicos da arquitetura TCP/IP aplicado a Redes Industriais.	45
3.5- ARQUITETURA DA REDE DE COMUNICAÇÃO	46
3.5.1- Comunicação com Sistemas SCADAS.....	47
CAPÍTULO 4- ESPECIFICAÇÃO DO HARDWARE	49
INTRODUÇÃO	49
4.1- HARDWARE PADRÃO INDUSTRIAL	49
4.1.2- CPU Industrial	50
4.1.3- Placa mãe padrão Industrial	50
4.2- SISTEMAS OPERACIONAIS PARA HARDWARE DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO.	51
4.3- REQUISITOS DE IMPLEMENTAÇÃO DO HARDWARE	52
4.4- SOLUÇÕES DE HARDWARE NO MERCADO PARA MICRORREDES	53
4.4.1- SEL 3555	53
4.4.2- SSC 600.....	54
4.4.3- RPV-311	54
CAPÍTULO 5- DESENVOLVIMENTO DO SOFTWARE DA PLATAFORMA DE MONITORAMENTO DA MIRAHV	56
5.1- INTRODUÇÃO	56
5.2- DESCRIÇÃO SIMPLIFICADA DA ESTRATÉGIA DE GESTÃO DE ENERGIA	56
5.3- ESTRUTURA DO SOFTWARE PROPOSTO	57
5.3.1 – Arquitetura em Camadas.....	58
5.3.2 – Módulos Funcionais	58
5.4 - DESENVOLVIMENTO EM PYTHON	59
5.5- INTERFACE GRÁFICA	60
5.5.1- Histórico de Monitoramento do Sistema.....	62
5.5.2- Modo de Testes de Desempenho-Offline.....	63
5.5.3- Segurança e Acesso	64

CAPITULO 6- RESULTADOS	66
6.1- INTRODUÇÃO	66
6.2- TESTES PARA ESPECIFICAÇÃO DO HARDWARE	66
6.2.1- Etapas dos Testes em Cenários com Máquinas Virtuais.....	67
6.2.2- Descrição das simulações offline	69
6.2.3- Cenários de Testes utilizando o Gerenciamento de Hardware do VirtualBox.....	75
6.3- VALIDAÇÃO DA ESPECIFICAÇÃO DO HARDWARE	79
CAPITULO 7- CONCLUSÕES	80
7.1- CONSIDERAÇÕES FINAIS	80
7.2- TRABALHOS FUTUROS	81
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	82

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1- Esquema Proposto para o Projeto MIRAHV.	28
Figura 2.2- Arquitetura da MIRAHV.	29
Figura 3.1- Fatores motivadores da introdução de Smart Grids e Microrredes.....	31
Figura 3.2- Configuração de uma Microrrede.....	35
Figura 3.3- Sistemas de Monitoramento.....	38
Figura 3.4- Gerenciamento de Comunicações entre dispositivos.....	39
Figura 3.10- Topologia de Redes Industrial.....	40
Figura 3.11- Arquitetura Mestre e Escravo.....	42
Figura 3.12- Protocolo MODBUS.....	42
Figura 3.13- Modelo de Arquitetura TCP/IP.....	45
Figura 3.14- Arquitetura SCADA genérica para Sistemas de Geração Distribuída.....	47
Figura 4.1- Rotina básica do Hardware Industrial.....	50
Figura 4.2- Placa Mãe padrão Industrial.....	51
Figura 4.3- Embarque do Sistema Operacional.....	52
Figura 4.4- RTAC 3555.....	54
Figura 4.5- SSC 600.....	54
Figura 4.6- RPV-311GE.....	54
Figura 5.1- Algoritmo de Gerenciamento de Energia.....	57
Figura 5.2- Arquitetura interna do software MIRAHV.....	58
Figura 5.3- Estrutura de Desenvolvimento.....	59
Figura 5.4- Interface de Iniciação da MIRAHV.....	61
Figura 5.5- Interface Software MIRAHV.....	61
Figura 5.6- Histórico de Monitoramento.....	62
Figura 5.7- Teste de Desempenho-Offline.....	63
Figura 5.8- Transferência de Dados.....	64
Figura 5.9- Tela de controle de Acesso.....	64
Figura 6.1- Fluxograma do Processo de Especificação do Hardware.....	68
Figura 6.2- Interface do Painel de Testes Offline(Período de 7 dias).....	69
Figura 6.3- Gráficos das leituras das potências(7 dias).....	70
Figura 6.4 - Gráfico de Produção e Consumo de Hidrogênio(7dias).....	70
Figura 6.5 - Gráfico de Eficiência do Sistema e SoC de H ₂ (7 dias).....	71
Figura 6.6- Interface do Painel de Testes Offline(Período de 30 dias).....	71
Figura 6.7- Gráficos das leituras das potências(30 dias).....	72
Figura 6.8 - Gráfico de Produção e Consumo de Hidrogênio(30 dias).....	72
Figura 6.9 - Gráfico de Eficiência do Sistema e SoC de H ₂ (30 dias).....	73
Figura 6.10- Interface do Painel de Testes Offline(Período de 6 meses).....	73
Figura 6.11- Gráficos das leituras das potências(6 meses).....	74
Figura 6.12 - Gráfico de Produção e Consumo de Hidrogênio(6 meses).....	74
Figura 6.13 - Gráfico de Eficiência do Sistema e SoC de H ₂ (6 meses).....	75
Figura 6.14- Cenário 1.....	76
Figura 6.15- Cenário 2.....	77
Figura 6.16- Cenário 3.....	78

Figura 6.17- Cenário 4.....79

LISTA DE TABELAS

Tabela 1-Comparativa dos Protocolos de Redes Industriais.....	44
Tabela 2- Comparativo entre as soluções de mercado.....	55

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

MIRAHV- Microrrede Fotovoltaica Isolada com Armazenamento de energia elétrica em Hidrogênio Verde.

ANEEL- Agência Nacional de Energia Elétrica.

RT-ONS DPL - Regulamentação Técnica - ONS - Diretoria de Planejamento.

GEE- Gases de Efeito Estufa

MME-Ministério de Minas e Energia.

NESA- NORTE ENERGIA AS.

RTAC- Controlador de Automação em Tempo Real.

SEL- Schweitzer Engineering Laboratories.

UHE- Usina Hidrelétrica.

ONS- Operador Nacional do Sistema.

GW- GIGA WATT

TCP/IP- Protocolo de Controle de Transmissão e Internet Protocolo.

RTU- Unidade Terminal Remota.

SCADA- Controle de Supervisão e Aquisição de Dados.

CLP- Controlador Lógico Programável.

IED- Dispositivo eletrônico inteligente.

DNP3- Protocolo de rede distribuída 3.

OPC UA- Arquitetura unificada de comunicações de plataforma aberta.

ASCII- Código Padrão Americano para Intercâmbio de Informações.

RNP-Rede Nacional de Pesquisas

GD- Geração Distribuída

DACS-Cartões de Aquisição de Dados

ODBC-Open Data Base Connectivity

DAO-Data Access Objects

IBM- Corporação Internacional de Máquinas Comerciais.

SEE-Sistemas de Energia Elétrica.

TI- Tecnologia da Informação.

UDP/IP- Protocolo de Datagrama do Usuário e Internet Protocolo

IEC 61850- Define uma convenção de modelagem de dados e nomenclatura dos IEDs

CPU-Unidade Central de Processamento.

MEMORIA RAM- Memória Acesso Aleatório.

SO- Sistema Operacional.

SSC 600- Controle Inteligente de Subestações 600.

RPV-311- Registrador Digital Multifuncional de Perturbações 311.

GSEI-Grupo Sistemas de Energia e Inovação.

UFPA- Universidade Federal do Pará

RTAC- Controlador de automação em tempo real.

IEC 61131- Padrão internacional que define como programar controladores lógicos programáveis (CLPs)

E/S- Entrada e Saída de Dados.

SFV- Sistema Fotovoltaico.

SIH-Sistema Integrado de Hidrogênio.

PYTHON- Linguagem de Programação.

VIRTUALBOX- Emulador de Hardware e Sistemas Operacionais.

Nm³/h- Normal metro cúbico por hora.

kWh- Quilowatt-hora.

AMR- Leitura automática de medidores.

AMI- Infraestrutura avançada de medição.

DERs- Fontes de energia distribuída.

RESUMO

A crescente adoção de fontes renováveis, especialmente a energia solar fotovoltaica, tem impulsionado soluções sustentáveis para a eletrificação de comunidades isoladas, reduzindo a dependência de combustíveis fósseis e seus impactos ambientais. Contudo, a intermitência dessas fontes impõe desafios técnicos, como a necessidade de sistemas de armazenamento e controle que garantam estabilidade, confiabilidade e autonomia. Neste contexto, a especificação adequada de hardware e o uso de software de monitoramento e controle são essenciais para assegurar o desempenho, a segurança e a longevidade dos sistemas, viabilizando a operação autônoma em regiões remotas e otimizando o uso dos recursos renováveis disponíveis. A dissertação propõe a especificação de hardware para gestão de energia e o desenvolvimento de software para monitoramento de uma microrrede fotovoltaica isolada com armazenamento de hidrogênio verde. As simulações realizadas em ambiente virtual validaram a arquitetura proposta e demonstraram o impacto da escolha adequada de hardware e software na eficiência e na segurança do sistema. Dessa forma, o estudo contribui com uma abordagem integrada e replicável para a concepção de microrredes autônomas, sustentáveis e robustas, voltadas ao atendimento das demandas energéticas de regiões remotas da Amazônia e de outros contextos isolados.

Palavras-chave: Armazenamento de energia; Hidrogênio verde; Microrrede isolada; Monitoramento em tempo real; Sustentabilidade.

ABSTRACT

The increasing adoption of renewable energy sources, especially solar photovoltaic power, has driven the development of sustainable solutions for the electrification of isolated communities, reducing dependence on fossil fuels and their environmental impacts. However, the intermittency of these sources poses technical challenges, such as the need for storage and control systems that ensure stability, reliability, and autonomy. In this context, the proper specification of hardware and the use of monitoring and control software are essential to ensure the performance, safety, and longevity of these systems, enabling autonomous operation in remote areas and optimizing the use of available renewable resources. This dissertation proposes the design and validation of an isolated microgrid with photovoltaic generation and green hydrogen storage (MIRAHV), integrating clean technologies and long-term energy storage solutions. The work focuses on developing monitoring software, specifying embedded hardware, and creating a real-time supervision platform with historical data logging and decision-making algorithms. Simulations conducted in a virtual environment validated the proposed architecture and demonstrated the impact of choosing appropriate hardware and software on the system's efficiency and security. The study thus contributes an integrated and replicable approach to designing autonomous, sustainable, and robust microgrids aimed at meeting the energy needs of remote regions in the Amazon and other isolated areas.

Keywords: Energy storage; Green hydrogen; Isolated microgrid; Real-time monitoring; Sustainability.

CAPÍTULO 1-INTRODUÇÃO

1.1- CONTEXTO

A declaração de que “todos precisam de energia sustentável” é retórica, enquanto a indisponibilidade dela para muitas pessoas ainda é uma realidade, a exemplo de comunidades indígenas e daquelas isoladas em diversas ilhas da Amazônia. É verdade que, em muitas localidades isoladas, existe o fornecimento de energia elétrica. No entanto, esse fornecimento é, por vezes, limitado a determinados períodos do dia e, em sua grande maioria, é garantido por sistemas de geração a diesel(ANEEL, 2024; ONS, 2023), os quais produzem significativas quantidades de gases de efeito estufa(GEE). Isso confirma que, em muitas das soluções implementadas, os aspectos de eficiência energética, ecológica e os custos ambientais foram relegados a um segundo plano(CAO, 2020).

A criação dessas soluções, contudo, requer a superação de desafios técnicos, como a otimização da energia elétrica produzida por fontes intermitentes, o armazenamento eficiente da energia excedente para superar a sazonalidade desses recursos e o uso de equipamentos de baixo custo e fácil manutenção. Tudo isso visa garantir o atendimento da demanda local nos períodos de indisponibilidade das fontes e melhorar a relação “investimento x retorno”, inserindo nessa equação valores ecológicos e ambientais, por vezes menosprezados em momentos anteriores(HASAN, 2022).

As microrredes são definidas como sistemas autônomos que podem operar de modo isolado ou conectado ao sistema de distribuição da concessionária(BrasilEnergia, 2024). A geração local de energia pode viabilizar o fornecimento para comunidades onde a expansão de redes pode ser dificultada ou mesmo impossibilitada por condições geográficas, financeiras, ambientais entre outras circunstâncias. A criação de microrredes surge como uma alternativa sustentável para essas regiões. Ela pode utilizar fontes renováveis de energia, como solar e eólica, entre outros, e funcionar através da integração inteligente de recursos de geração, baterias de armazenamento e monitoramento(NeoEnergia, 2023).

Dispondo de uma matriz elétrica com 84,8% de participação de fontes renováveis, o Brasil convive com um terrível paradoxo: boa parte da energia consumida em comunidades isoladas na Amazônia, santuário da biodiversidade, é produzida por usinas termelétricas à combustíveis fósseis. Segundo dados do Ministério de Minas e Energia(MME, 2024), 3.1 milhões de pessoas na região amazônica são atendidas por 211 sistemas isolados de energia produzida a partir dessas fontes fósseis. Nesses sistemas, o óleo diesel representou, no ano passado, 76% da matriz elétrica (BrasilEnergia, 2024).

Além da poluição, o custo da energia produzida é elevado, sendo rateado entre os consumidores de todo o país por meio da Conta de Consumo de Combustíveis(CCC, 2023). Em 2023, essa conta atingiu um total de R\$ 11,3 bilhões. Outro fator negativo desses sistemas de geração é o elevado nível de perdas, que pode atingir 80%(BrasilEnergia, 2024).

Além dos danos ambientais causados por esses sistemas de geração, há também impactos econômicos significativos. As limitações no fornecimento de energia na região são frequentemente mencionadas como obstáculos ao desenvolvimento de alternativas econômicas que possibilitem o uso sustentável dos recursos naturais do bioma.

O projeto intitulado “Microrrede Fotovoltaica Isolada com armazenamento de energia em Hidrogênio Verde para atendimento contínuo de carga(MIRAHV)” - P&D ANEEL - 07427-0422/2022, uma parceria entre a Universidade Federal do Pará(UFPA) e a Norte Energia S.A.(NESA), possibilitou o desenvolvimento do Software MIRAHV para planejamento, operação, supervisão, controle e proteção de sistemas isolados com armazenamento energético em hidrogênio verde, cujo proposta é suprir a demanda elétrica de comunidades distantes dos grandes centros, criando um modelo de operação que garanta o controle de tensão, controle de frequência, estabilidade e proteção da microrrede, além da gestão energética. Nesta microrrede a energia elétrica produzida pelo sistema fotovoltaico isolado, que exceder a demandada pela carga, será armazenada em hidrogênio verde para posterior reconversão em eletricidade. As microrredes dimensionadas pelo software e hardware terão flexibilidade, escalabilidade e replicabilidade, e poderão atender praticamente a qualquer demanda requerida, desde que haja disponibilidade de água e luz solar.

O projeto prevê a especificação do hardware para gerenciamento de energia de uma microrrede fotovoltaica isolada com armazenamento em hidrogênio verde, objeto desta dissertação, visa garantir a supervisão, o monitoramento integrado de todos os componentes da Planta Piloto MIRAHV. Esse hardware foi concebido para permitir a comunicação eficiente entre os principais sistemas — incluindo os painéis fotovoltaicos, o banco do baterias, o eletrolisador, os tanques de armazenamento de hidrogênio e a célula a combustível — assegurando a operação otimizada e segura da microrrede. Seu dimensionamento foi fundamentado em modelagem computacional e testes experimentais, considerando os requisitos técnicos e as soluções tecnológicas disponíveis no mercado. A proposta integra múltiplas funções de gerenciamento energético em um sistema compacto e eficiente, com o objetivo de viabilizar a futura implementação física do projeto, atendendo às demandas operacionais e de pesquisa da Planta Piloto MIRAHV instalada na UHE Belo Monte.

1.2- JUSTIFICATIVA DO DESENVOLVIMENTO DO PROJETO

A criação e utilização de microrredes isoladas, principalmente as que contemplam tecnologias consideradas limpas para a geração de energia elétrica(fotovoltaica, eólica, biogás, biomassa, entre outras), somente há poucos anos se tornaram uma realidade, na sua maioria através de projetos pilotos pelo mundo, a exemplo da experiência promissora na Ilha de Fernando de Noronha(P&D estratégico da ANEEL 21/2016). Nas microrredes supridas por fontes intermitentes (fotovoltaica, eólica), os impactos da sazonalidade têm sido minimizados pelo armazenamento energético de um excedente de geração e posteriormente repassadas às cargas, nos momentos em que ocorre indisponibilidade da fonte. O armazenamento energético tem ocorrido historicamente em baterias das mais diversas tecnologias(Chumbo/Ácido, Lítio/Ion etc.), sendo um processo bem conhecido, mas que apesar dos esforços dos fabricantes, tem limitações de caráter técnico e econômico, quando, por exemplo, existe a necessidade de armazenamento de grandes quantidades de blocos de energia ou armazenagem por longos períodos, situações agravadas pela necessidade de manutenções contínuas e elevados custos de substituição delas.

A possibilidade de utilização de hidrogênio verde como vetor de armazenamento energético é recente, favorecida pela popularização dos sistemas fotovoltaicos, que possibilitou uma redução drástica dos investimentos requeridos para utilização destes sistemas, que somados a sua vida longa(superior a 25 anos de uso), contribui para estudos da aplicação do hidrogênio como elemento de armazenamento. Ressalta-se que para o hidrogênio ser classificado como “verde”, uma das prerrogativas é o uso de eletricidade limpa na sua produção, requisito no qual se enquadra a energia provinda dos sistemas fotovoltaicos. Por outro lado, o sistema de armazenamento(cilindros de gases) e o uso da energia armazenada em hidrogênio verde são escaláveis e modulares, apresentando custos inversamente proporcionais ao aumento da quantidade de energia a ser armazenada, diferentemente do que ocorre com o armazenamento em baterias(BARATTA, 2023).

A grande maioria dos sistemas isolados em operação no mundo utilizam eletricidade fornecida por sistemas geradores a diesel ou por outros combustíveis fósseis(IRENA, 2022), que se por um lado têm custos financeiros acessíveis, por outro apresentam impactos ambientais gigantescos. O governo federal publicou recentemente o Decreto Nº 11.075, em 19 de maio de 2022, que regula o mercado de carbono no Brasil, com foco em exportação de créditos, especialmente para países e empresas que precisam compensar emissões para cumprir com seus compromissos de neutralidade de carbono, ação que converge para o movimento mundial de redução de gases de efeito estufa.

A microrrede fotovoltaica isolada terá como retaguarda energética a eletricidade fornecida por um sistema de célula a combustível a hidrogênio, dando visibilidade para o mercado nacional e mundial de uma solução economicamente viável e ambientalmente correta, que apresenta um grande potencial para atender tanto demandas isoladas, como de países e empresas que pretende cumprir os compromissos assumidos quanto a neutralidade do carbono.

1.3- MOTIVAÇÃO

A especificação de hardware para o gerenciamento de energia em microrredes isoladas é motivada por fatores tecnológicos e estratégicos essenciais à operação eficiente, confiável e sustentável desses sistemas, especialmente em regiões remotas onde a infraestrutura de energia convencional é inexistente ou limitada. Esse cenário é comum em comunidades isoladas da Amazônia e em outros contextos semelhantes, onde o fornecimento de eletricidade depende, em sua grande maioria, de geradores a diesel ou de outros combustíveis fósseis, com altos custos operacionais e impacto ambiental significativo.

Um dos principais motivadores deste trabalho é a necessidade de otimizar o gerenciamento energético de microrredes baseadas em fontes renováveis, como a solar fotovoltaica, integradas a sistemas de armazenamento de longa duração, com destaque para o hidrogênio verde. Em função da intermitência natural das fontes renováveis, o equilíbrio entre oferta e demanda torna-se um desafio crítico. A adoção de hardware adequado, associado a uma plataforma de monitoramento e controle em tempo real, possibilita o acompanhamento preciso da geração, do armazenamento e do consumo de energia. Essa integração viabiliza ajustes dinâmicos na operação, garantindo o suprimento de cargas essenciais, a maximização do uso de energia limpa e a redução da dependência de geradores fósseis.

Além da especificação do hardware, o desenvolvimento de um software dedicado para monitoramento, supervisão e controle da microrrede é fundamental para a operação integrada do sistema. Esse software permite a visualização gráfica das variáveis operacionais, o registro histórico dos dados e a implementação de algoritmos inteligentes para tomada de decisão, contribuindo para a automação e o gerenciamento eficiente da microrrede em tempo real. A plataforma possibilita identificar rapidamente falhas, otimizar o desempenho do sistema e adaptar a operação às condições variáveis de geração e consumo.

Outro fator central está relacionado ao aumento da confiabilidade, da estabilidade e da autonomia da microrrede. A interação entre o hardware e o software embarcado da plataforma MIRAHV permite a detecção e o tratamento de falhas de forma rápida e eficaz, fator fundamental em áreas de difícil acesso, onde manutenções emergenciais são custosas e

demoradas. Além disso, o sistema contribui para a manutenção dos parâmetros de qualidade da energia, assegurando estabilidade de tensão e frequência, mesmo diante das variações de geração e carga típicas de sistemas isolados.

A proposta também responde à urgência de reduzir os impactos ambientais associados ao uso intensivo de combustíveis fósseis. Ao integrar fontes renováveis e sistemas de armazenamento com hidrogênio verde, o hardware e software desenvolvidos neste projeto contribuem diretamente para a redução das emissões de gases de efeito estufa, alinhando-se às metas globais de transição energética e sustentabilidade.

Por fim, destaca-se a importância social da solução. O sistema proporciona maior qualidade no fornecimento de energia elétrica às comunidades atendidas, promovendo desenvolvimento local, inclusão social e condições mais dignas de vida, ao mesmo tempo em que fortalece a autonomia energética das regiões isoladas.

1.4- OBJETIVOS

A dissertação propõe a especificação de hardware para gestão de energia e o desenvolvimento de software para monitoramento de uma microrrede fotovoltaica isolada com armazenamento de hidrogênio verde(MIRAHV).

1.4.1- Objetivos Específicos

1. Analisar os requisitos operacionais de uma microrrede isolada com base em fontes renováveis e armazenamento em hidrogênio verde, considerando os desafios de intermitência, estabilidade e confiabilidade no contexto de comunidades remotas.
2. Analisar os possíveis conjuntos de hardwares necessários para o gerenciamento energético da MIRAHV, incluindo dispositivos para aquisição de dados, comunicação, processamento local e supervisão da operação.
3. Desenvolver uma plataforma de software para monitoramento da microrrede, com interface gráfica interativa, capacidade de visualização em tempo real, registro histórico de variáveis e integração com algoritmos de tomada de decisão.
4. Simular, em ambiente computacional, o funcionamento do sistema proposto, avaliando o desempenho do hardware e do software frente a diferentes cenários de operação e perfis de carga típicos de comunidades isoladas.
5. Validar a arquitetura integrada de hardware e software quanto à sua capacidade de garantir estabilidade, confiabilidade e eficiência no gerenciamento da energia elétrica gerada, armazenada e consumida na microrrede.

1.5- ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Além desta introdução, a dissertação está estruturada em sete capítulos. O Capítulo 2 apresenta a arquitetura da Microrrede Fotovoltaica Isolada com Armazenamento de Energia em Hidrogênio Verde (MIRAHV), detalhando sua concepção técnica e operacional. No Capítulo 3, descreve-se a especificação da plataforma de hardware para o gerenciamento de energia da MIRAHV, incluindo um panorama das condições locais e das demandas energéticas.

O Capítulo 4 aborda a especificação detalhada do hardware, enquanto o Capítulo 5 trata do desenvolvimento do software da plataforma de monitoramento da MIRAHV, discutindo os desafios e as soluções tecnológicas aplicáveis a esse contexto.

No Capítulo 6, são apresentados os resultados obtidos. Por fim, o Capítulo 7 reúne as conclusões do trabalho e propostas para pesquisas futuras, destacando os principais resultados alcançados e sugerindo caminhos para ampliar o impacto tecnológico e social das soluções propostas.

CAPÍTULO 2- ARQUITETURA DA MICRORREDE FOTOVOLTAICA ISOLADA COM ARMAZENAMENTO DE ENERGIA EM HIDROGÊNIO VERDE (MIRAHV)

2.1- INTRODUÇÃO

A microrrede fotovoltaica isolada com armazenamento de energia em hidrogênio verde para atendimento contínuo de carga(MIRAHV) terá o seu controle centralizado em um hardware, onde será capaz de realizar a operação, supervisão e controle de sistemas isolados 100% renováveis. A MIRAHV será capaz de suprir a demanda elétrica de comunidades distantes dos grandes centros, criando um modelo de operação com garantia de estabilidade e proteção da microrrede, além da gestão energética. Como no modelo proposto a energia elétrica excedente, produzida pelo sistema fotovoltaico isolado, será armazenada em hidrogênio verde para posterior utilização em uma célula a combustível de hidrogênio para produção de eletricidade, as microrredes dimensionadas pelo software terão flexibilidade, escalabilidade e replicabilidade.

As principais contribuições originais do projeto são: 1) Desenvolver uma metodologia para dimensionamento ótimo dos componentes da MIRAHV, garantindo atendimento contínuo de cargas específicas por meio de um sistema totalmente isolado e 100% renovável, tendo autonomia energética, mesmo na ausência de recurso solar, conforme especificação do cliente; 2) Desenvolver uma metodologia para gerenciamento ótimo de energia da MIRAHV, na finalidade de minimizar a energia produzida pela célula a combustível a hidrogênio verde (com atendimento à carga via conversor de plena capacidade), melhorando dessa forma a relação custo-benefício e garantir os requisitos técnicos de despachabilidade do sistema; e 3) Aplicar uma nova tecnologia de sistema de geração de energia elétrica constituído por uma microturbina geradora que utilize como combustível propulsor o Hidrogênio Verde, aplicando a solução em sistemas isolados para atendimento contínuo de cargas(ex: diversos perfis de consumidores), criando assim um sistema híbrido 100% renovável(fotovoltaico e hidrogênio verde).

A eficiência do Hardware embarcado proposto será comprovada através de simulações computacionais, bem como através da sua implementação MIRAHV piloto, onde deverá ser o “responsável” pela operação, supervisão, controle e proteção da MIRAHV, após concluídos todos os testes de funcionamento e realizados os ajustes definitivos dos seus parâmetros.

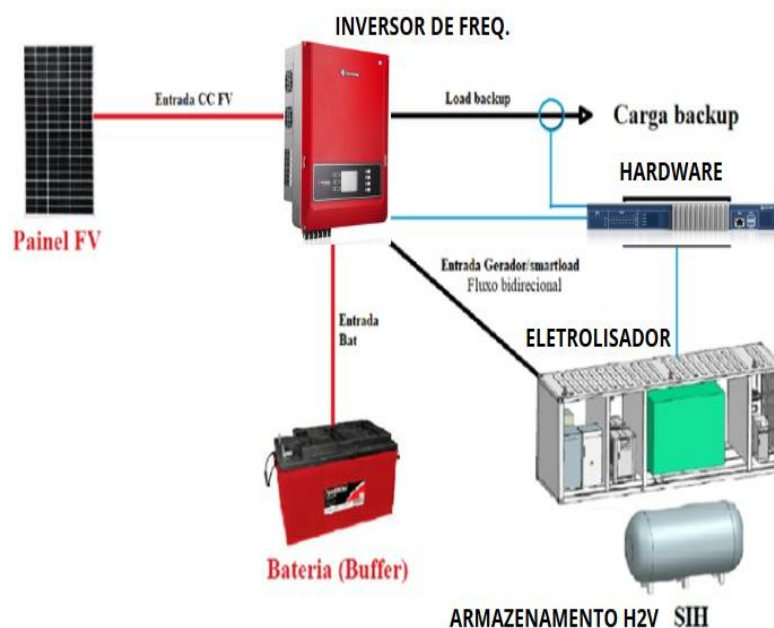
2.2- COMPONENTES DA MIRAHV

A MIRAHV é composta por geradores solares fotovoltaicos, eletrolisadores — equipamentos capazes de produzir hidrogênio verde —, um sistema de armazenamento de hidrogênio e uma célula a combustível alimentada por esse hidrogênio. Essa configuração permite que a microrrede atenda a uma carga específica de forma ininterrupta, pelo tempo estabelecido em projeto, mesmo na ausência de recurso solar.

Para garantir a autonomia da microrrede e a despachabilidade da potência necessária, o hidrogênio verde produzido é acumulado e utilizado como combustível zero carbono na geração de eletricidade, operando no modo conhecido como power-to-power.

A microrrede proposta, intitulada MIRAHV, é inédita, estando prevista a instalação de sua planta piloto na área da UHE de Belo Monte. Ela contará com um gerador solar fotovoltaico de 25 kWp de potência instalada, eletrolisador de 12,5 kW, sistema de armazenamento de H₂ de 45 kg a 40 bar de pressão e uma célula a combustível de H₂V com potência nominal de saída de 10 kW. A MIRAHV piloto tem como meta garantir o atendimento de uma carga de potência elétrica de 2 kW, durante 48 horas, mesmo na ausência de recurso solar durante este período(Figura 2.1).

Figura 2.1- Esquema Proposto para o Projeto MIRAHV.



Fonte: Autor.

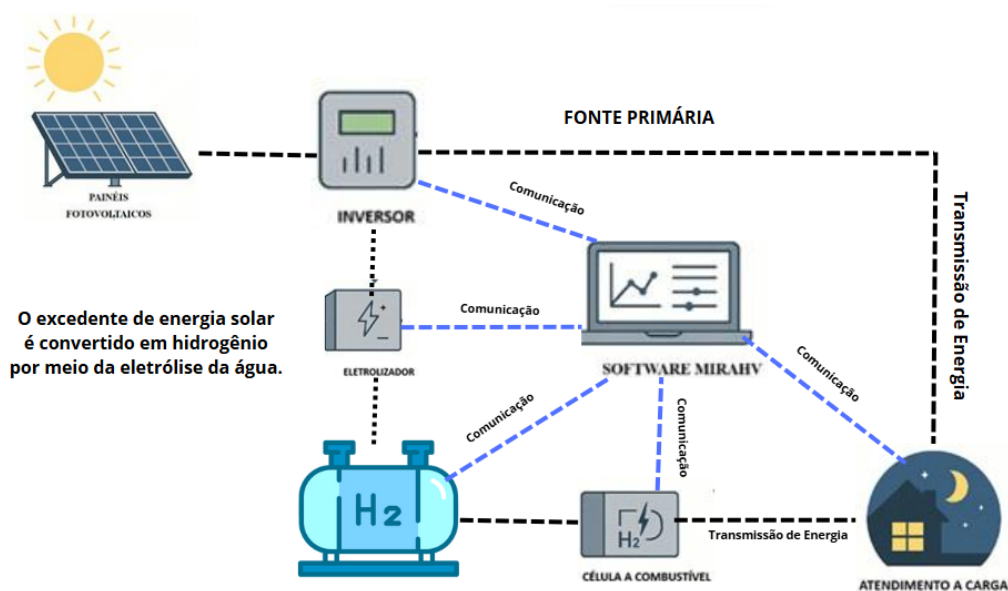
2.3- ARQUITETURA DA MIRAHV

A arquitetura da MIRAHV (Figura 2.2) foi projetada com base em confiabilidade, modularidade e operação contínua. A principal fonte de energia é o sistema fotovoltaico isolado, que atua como fonte primária. O excedente de energia solar é convertido em hidrogênio por meio da eletrólise da água. Este hidrogênio, por sua vez, é armazenado em cilindros pressurizados e reconvertido em eletricidade quando necessário.

O sistema de reconversão funciona como retaguarda energética, utilizando a célula a combustível para suprir a carga nos momentos de ausência de sol. Toda essa operação *deve ser* coordenada pelo Software MIRAHV, que integra o monitoramento e controle em tempo real, além de permitir o dimensionamento de novas plantas MIRAHV para diferentes localidades e demandas.

A planta piloto da MIRAHV, que será instalada na UHE Belo Monte, foi desenhada para atender a perfis de carga típicos de comunidades remotas, nos quais há maior consumo de energia durante a noite. Essa característica reforça a necessidade de um sistema de armazenamento eficiente, que permita a operação confiável mesmo em cenários de baixa irradiação solar.

Figura 2.2- Arquitetura da MIRAHV



Sistema de reconversão funciona como retaguarda energética, utilizando a célula a combustível para suprir a carga nos momentos de ausência de sol.

Fonte: Autor.

2.4- FILOSOFIA DE OPERAÇÃO DA MIRAHV

A Filosofia Operacional da MIRAHV foi refinada ao longo de execução do projeto, período em que passou por diversos ajustes e atualizações — alguns motivados por limitações técnico-operacionais e outros pela necessidade de substituir equipamentos que deixaram de estar disponíveis (como a turbina a hidrogênio). Essa filosofia tem como objetivo assegurar o fornecimento contínuo de energia à carga por até 48 horas, mesmo na ausência de radiação solar, seguindo a seguinte lógica operacional:

- i. Primeira etapa (inicialização): toda a energia elétrica gerada pelo sistema fotovoltaico (25 kWp) será direcionada para a produção de hidrogênio verde (H_2V), até que o armazenamento atinja 80% (oitenta por cento) de sua capacidade. A partir desse ponto, o sistema é liberado para avançar à segunda etapa.
- ii. Segunda etapa (atendimento à carga): a geração fotovoltaica prioriza o suprimento da carga (2 kW), utilizando qualquer excedente para continuar a produção e o armazenamento de H_2V . Esse hidrogênio será posteriormente reconvertido em eletricidade por meio de uma célula a combustível, assegurando o fornecimento durante os períodos noturnos ou quando não houver radiação solar, por até 48 horas.
- iii. Terceira etapa: o sistema retorna às condições iniciais definidas para a etapa de inicialização. O Software MIRAHV é capaz de restabelecer o atendimento à carga assim que os requisitos mínimos forem novamente atendidos.

CAPÍTULO 3- ESPECIFICAÇÃO DE PLATAFORMA DE HARDWARE PARA GERENCIAMENTO DE ENERGIA DA MIRAHV

3.1- INTRODUÇÃO

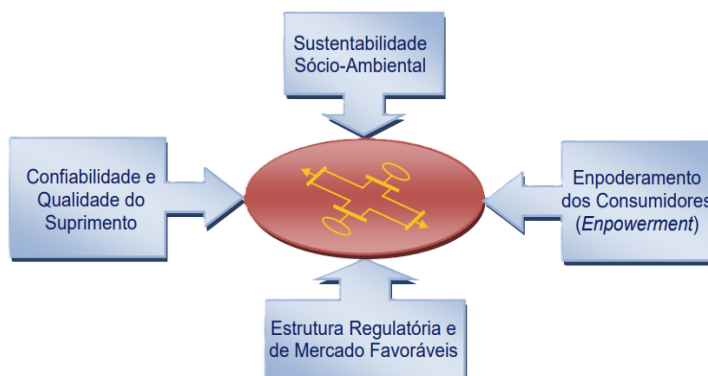
Este capítulo detalha os fundamentos técnicos e conceituais para a especificação do hardware responsável pela supervisão e controle da microrrede isolada MIRAHV. A proposta visa assegurar uma operação autônoma, contínua e eficiente, especialmente em comunidades remotas com acesso restrito à infraestrutura elétrica. São abordados aspectos como geração distribuída, automação, proteção, protocolos industriais e requisitos computacionais necessários à plataforma de hardware embarcado.

3.2- ESTRUTURA BÁSICA DE UM HARDWARE PARA GERENCIAMENTO DE ENERGIA DE MICRORREDES

3.2.1- SMART GRIDS

A expressão Smart Grid (Rede Inteligente) deve ser entendida mais como um conceito do que uma tecnologia ou equipamento específico (Figura 3.1). Ela carrega a idéia da utilização intensiva de tecnologia de informação e comunicação na rede elétrica, através da possibilidade de comunicação do estado dos diversos componentes da rede, o que permitirá a implantação de estratégias de controle e otimização da rede de forma muito mais eficiente que as atualmente em uso (FALCÃO, 2009).

Figura 3.1- Fatores motivadores da introdução de Smart Grids e Microrredes.



Fonte: FALCÃO, 2009.

A expressão Smart Grid pode ser entendida como a sobreposição dos sistemas unificados de comunicação e controle, à infra-estrutura de energia elétrica existente, para prover a informação correta para a entidade correta (equipamentos de uso final, sistemas de controle de T&D, consumidores, etc.), no instante correto, para tomar a decisão correta. É um sistema que otimiza o suprimento de energia, minimizando perdas de várias naturezas, é auto-

recuperável, e possibilita o surgimento de uma nova geração de aplicações energeticamente eficientes(EPRI, 2008).

3.2.2- Automação em Sistemas de Distribuição

Os sistemas de distribuição de energia elétrica são os que mais têm se beneficiado com as novas tecnologias das chamadas Redes Elétricas Inteligentes, ou Smart Grids(FORTES, 2017).

Uma das principais mudanças está na forma como a energia é medida. Os antigos medidores, que apenas marcavam quantos quilowatts-hora(kWh) foram consumidos, estão sendo substituídos por medidores eletrônicos modernos, conhecidos como medidores inteligentes ou Smart Meters. Esses novos aparelhos oferecem muito mais funcionalidades e permitem inovações importantes, como:

- Leitura automática de medidores(AMR): Em vez de enviar um funcionário para anotar os números de consumo em cada residência, o sistema faz essa leitura automaticamente e envia os dados para a empresa de energia. Isso reduz custos, evita erros de leitura e agiliza o processo. Essa comunicação pode ser feita por redes sem fio (como Wi-Fi ou outras) ou até pela própria fiação elétrica.
- Infraestrutura avançada de medição(AMI): vai além da simples leitura. Com essa tecnologia, é possível monitorar o consumo de energia em tempo real e até enviar sinais aos consumidores para incentivar o uso mais consciente, como, por exemplo, informar quando a energia está mais cara ou mais barata. O sistema também permite que a empresa se comunique diretamente com aparelhos nas casas dos clientes e vice-versa, o que torna o controle mais eficiente.

Smart Grids trazem outras vantagens importantes, como:

- Identificar e corrigir falhas na rede de forma automática, restabelecendo o fornecimento de energia mais rapidamente;
- Controlar melhor a tensão da rede, o que melhora a qualidade da energia que chega até o consumidor;
- Permitir a integração de novas formas de geração de energia, como fotovoltaica e pequenos geradores instalados nas próprias casas ou comunidades.

3.2.3- Controle e Automação em Microrredes

O controle e a automação em microrredes dependem fortemente do uso de inversores eletrônicos de potência, os quais atuam como interfaces fundamentais entre as fontes de energia distribuída (DERs) e a rede elétrica. Segundo Lasseter (2004), os inversores proporcionam a flexibilidade necessária para uma operação do tipo plug-and-play, permitindo que novas unidades geradoras (microsources) sejam adicionadas ao sistema sem a necessidade de modificar o equipamento existente. Além disso, esses dispositivos viabilizam o controle independente da potência ativa e reativa, adaptando-se de forma dinâmica às variações das cargas.

Conforme destacado por Peças, Galdino e Oliveira (2020), a aplicação de soluções de controle em comunidades isoladas na Amazônia ainda enfrenta diversos desafios técnicos, logísticos e ambientais, o que reforça a necessidade de sistemas robustos, inteligentes e adaptados à realidade local. A ausência de infraestrutura de comunicação confiável, a variação climática intensa e a limitação de suporte técnico local exigem que o hardware de controle seja autônomo, resiliente e modular.

Além da atuação autônoma dos inversores, descrita por Lasseter (2004), é essencial adotar uma abordagem hierárquica de controle para garantir a estabilidade e a eficiência da microrrede como um todo. Segundo Hatziargyriou (2014), o controle de microrredes pode ser organizado em três níveis principais:

- Controle Primário: executado localmente por cada unidade por meio de estratégias como o controle droop, operando de forma rápida e descentralizada.
- Controle Secundário: realiza ajustes finos na frequência e tensão da microrrede, geralmente implementado via comunicação com um controlador central ou distribuído.
- Controle Terciário: responsável por otimizar o fluxo de potência entre a microrrede e a rede principal, ou entre diferentes microrredes, visando o uso eficiente dos recursos energéticos.

3.2.4- Microrredes e Geração Distribuída

As microrredes, que consistem em um grupo de cargas e unidades de geração distribuída operando para aumentar a qualidade e confiabilidade do sistema (DIAS, 2005). Uma microrrede inclui também um sistema de controle hierárquico suportado por um sistema de comunicações, como as tecnologias PLC (Power Line Carrier) ou sem fio (DECMANN, 2015). Para o sistema elétrico, as microrredes podem responder rapidamente aos comandos do operador, trazendo mais segurança e contribuindo para mudanças da matriz energética. Já para

os consumidores, elas oferecem uma forma confiável de fornecimento de energia(DIAS, 2005).

3.2.5- Estratégias de Controle em Microrredes

Estratégias de controle em microrredes são utilizadas para fornecer controle de tensão e frequência, o equilíbrio entre geração e demanda, a qualidade de energia necessária e a comunicação entre os componentes da microrrede. Cada conversor eletrônico de potência utilizado como interface para as unidades de GD e unidades de armazenamento de energia emprega esquemas de controle de alto desempenho.(Altin e Sefa, 2012). Dessa forma, os conversores têm alta capacidade de controle. No entanto, isso não é suficiente para ter o desempenho desejado da microrrede. Para atingir condições de operação estáveis em uma microrrede, cada fonte ou unidade de armazenamento está em harmonia entre si e com a rede. Portanto, o controle de todos os componentes dentro de uma microrrede é uma tarefa muito importante.

No controle do sistema de energia, duas arquiteturas de controle são aplicadas: centralizada e descentralizada. Em um sistema de controle totalmente centralizado, a coleta de dados, a execução dos cálculos necessários e a geração dos comandos de controle para todas as unidades são realizadas pelo controle central das informações recebidas dos controladores de fonte de energia(Olivares et al., 2014).

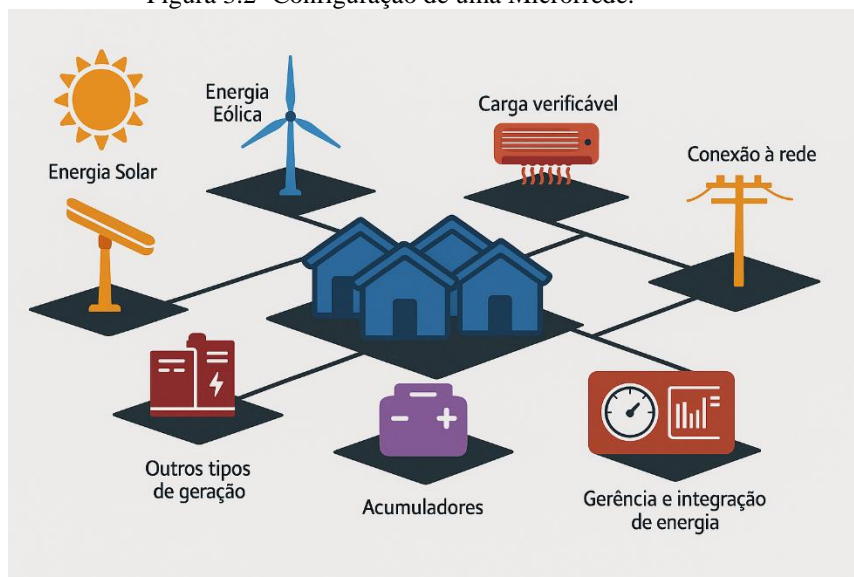
Portanto, requer uma ampla infraestrutura de comunicação. Ao contrário, em um sistema de controle completamente descentralizado, cada unidade é controlada por seu próprio controlador local. Portanto, ele requer apenas informações sobre o sistema local e gera apenas comandos para o sistema local. Nem os sistemas de controle totalmente centralizados nem totalmente descentralizados são viáveis devido às extensas necessidades de comunicação e computação e ao forte acoplamento entre as respostas das diferentes unidades (Olivares et al., 2014).

3.2.6- Desafios na proteção em Microrredes

A sociedade atual apresenta uma crescente demanda por uma energia de melhor qualidade, um com número menor de interrupções *de* fornecimento. Paralelamente, são cada vez maiores a necessidade e a pressão por uma transição para uma sociedade sustentável, buscando a redução de emissões de CO₂ através da utilização de fontes alternativas ao petróleo e o aumento da eficiência energética. Neste contexto, as redes de distribuição de energia convencionais estão sofrendo uma grande mudança, transformando-se de redes radiais de fluxo unidirecional de potência para redes ativas em que o fluxo de potência se dá em múltiplas

direções(Figura 3.2) devido à presença cada vez maior da geração distribuída(SETOR ELÉTRICO, 2025).

Figura 3.2- Configuração de uma Microrrede.



Fonte: SETOR ELÉTRICO, 2025.

3.2.7- Desafios da Automação em Microrredes Isoladas

Microrredes isoladas são sistemas de geração e distribuição de energia elétrica que operam de forma autônoma, sem conexão com o sistema elétrico nacional. Embora sejam fundamentais para levar energia a regiões remotas, sua automação apresenta desafios singulares devido à complexidade técnica, limitações de infraestrutura e necessidades específicas das comunidades atendidas(VASQUEZ, 2017).

- **Estabilidade e Controle:** Em microrredes isoladas, a ausência da rede elétrica principal exige que todas as configurações do sistema, como frequência e tensão, sejam tratadas localmente. Isso se torna mais desafiador em sistemas que utilizam fontes renováveis, como a solar e a eólica.
- **Previsibilidade e Gestão da Energia:** A automação precisa considerar o comportamento de carga e geração. Sistemas de previsão e algoritmos de otimização são essenciais para alocar recursos de forma eficiente, priorizando cargas críticas e minimizando desperdícios.
- **Integração de Fontes e Armazenamento:** A combinação de diferentes fontes de energia (fotovoltaica, baterias, hidrogênio verde) e seus respectivos controladores exigem um sistema de automação sofisticado, capaz de coordenar operações simultâneas com respostas rápidas a variações de carga e geração.

- **Desafios Sociais e Humanos:** A automação não deve ser apenas técnica eficiente, mas também adequada ao contexto social. Capacitar operadores locais, promover o uso consciente da energia e adaptar a operação às rotinas da comunidade são fatores decisivos para o sucesso do longo prazo do sistema.
- **Cibersegurança e Confiabilidade:** Com a crescente digitalização e automação, também surgem preocupações com a segurança cibernética. Ataques maliciosos ou falhas de software podem comprometer a operação da microrrede. Sistemas robustos e redundantes são necessários para garantir a confiabilidade e a resiliência.

3.3- AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DE DADOS

3.3.1- Sistemas Supervisórios e Aquisição de Dados(SCADA)

Os Sistemas Supervisórios controlam as variáveis do processo, operando e visualizando o processo por meio de gráficos, independente da sua aplicação no processo de automatização. Com acesso aos dados do processo, de qualquer local do mundo que tenha acesso à internet, trazendo mais eficiência e segurança das informações, favorecendo o aumento da competitividade no mercado(DA SILVA, 2019).

Um dos resultados que se espera de um sistema supervisório é que todo o processo seja controlado e também analisado para, assim, se obter o máximo de utilidade. O conhecimento do processo é de inquestionável relevância, pois ao juntar todas as informações necessárias nas diversas fontes, passa-se a conhecer a planta e tudo o que pode ser aproveitado pelo sistema, dividindo o processo em etapas e determinando as variáveis a serem monitoradas (LIMA, 2014).

A responsabilidade de fornecer informações por meio de Protocolos Ethernet TCP/IP para subestações, usinas de geração de energia e linhas de transmissão recai sobre a RTU(Remote Terminal Unit). Esse dispositivo eletrônico, controlado por um microprocessador, possibilita a conexão dos componentes a um sistema SCADA(Supervisory Control and Data Acquisition) através de telemetria, utilizando meios de conexão específicos para cada sistema. Além disso, a RTU tem a capacidade de transferir os dados coletados para um sistema mestre dentro da estrutura.

Quanto ao banco de dados, sua estrutura permite a manipulação das variáveis que serão utilizadas, garantindo a organização das informações. Destaca-se, nesse contexto, a importância da lista de alarmes, dos fluxos do processo e da lista de endereços dos dados no Hardware.

No banco de dados, que armazena variáveis de controle, sejam elas analógicas ou digitais, é fundamental desenvolver um sistema de nomenclatura lógico para as variáveis, definir a frequência de leitura e utilizar pastas de arquivos para manter a organização.

Além disso, os alarmes desempenham um papel importante, consistindo em mensagens programadas pelo responsável do processo para alertar o operador sobre possíveis anormalidades nas variáveis de controle. Esses alarmes são definidos de forma independente e possuem características essenciais, como o envio de mensagens quando ativados, a exibição de textos específicos para cada ocorrência, a visualização da região afetada por meio de uma interface gráfica e a possibilidade de configurar ações automáticas. Ademais, todos os eventos podem ser registrados e impressos e a criação de uma rotina de filtragem de dados para não haver repetições e evitar falhas no armazenamento do hardware.

3.3.2- Sistemas Embarcados

Os sistemas embarcados ou embedidos são sistemas que utilizam microprocessadores para realizarem determinadas tarefas que estejam previamente determinadas na configuração de um dispositivo. São encapsulados, isso quer dizer que são integrados ao sistema operacional maior controlador e que não podem ser vistos, mas podem ser acessados através de interfaces digitais, displays ou outro mecanismo(NOERGAARD, 2012).

A vantagem dos sistemas embarcados é que eles podem realizar pequenas tarefas ou atividades e com isso maximizar os custos e recursos envolvidos nas operações. É importante compreender que os sistemas embarcados, em regra, não podem sofrer alterações em sua funcionalidade, pois para isso seria necessário a reprogramação do computador ou processador de propósito geral(WOLF, 2012).

Conforme representado no diagrama, o processador ou microcontrolador atua como o núcleo do sistema, sendo responsável por coordenar os módulos de interface com o usuário, comunicação, sensores, atuadores e os canais de entrada e saída(I/O). O software(firmware) embarcado fornece as instruções que governam o comportamento do sistema, garantindo respostas precisas e em tempo real.

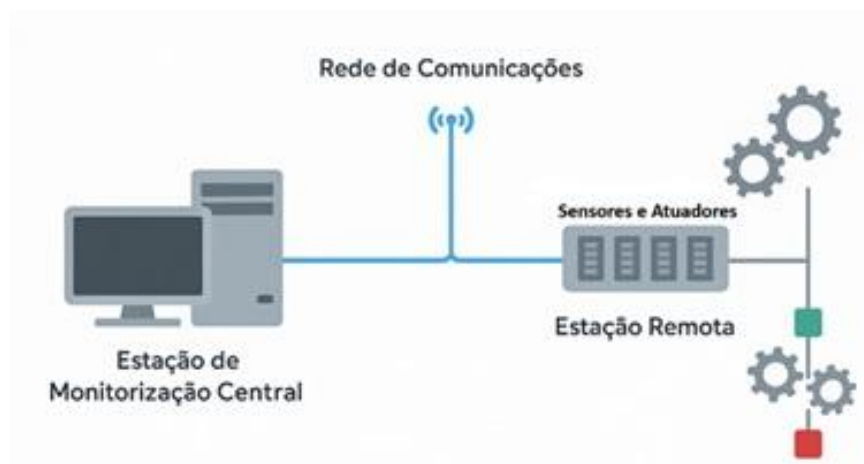
Com a contínua evolução tecnológica, os sistemas embarcados industriais tendem a se tornar cada vez mais inteligentes, autônomos e conectados, abrindo novas possibilidades para a Indústria 4.0, como a integração com IoT, aprendizado de máquina e monitoramento remoto.

3.3.3- Aquisição de dados de um sistema supervisório

A definição de aquisição de dados em um Sistema de Monitoramento(Figura 3.3) se dá na transformação de fenômenos físicos em sinais elétricos. Estes são medidos e convertidos em sinais digitais, podendo, dessa forma, ser analisados, processados e manipulados. Aqui, ainda são usados computadores com interface gráfica apurada, que tornam possíveis o monitoramento de vários dispositivos e variáveis de uma planta complexa(BORGES, 2018).

São de grande importância os sistemas de aquisição e controle de dados, aderidos pela maior parte das indústrias de um país. As aplicações da tecnologia SCADA(Supervisory Control and Data Acquisition) preenchem quase todas as necessidades do setor produtivo, como na distribuição de energia elétrica. Descrevendo algumas especificações da arquitetura SCADA para aquisição de dados(Mendes, 2007).

Figura 3.3- Sistemas de Monitoramento.



Fonte: Autor.

3.3.4- Fundamentos para obtenção de Dados

O sistema de controle e aquisição de dados precisa da autonomia de processamento e da flexibilidade do computador, constituído, se necessário, de uma variedade de hardwares. O dever do sistema é integrar esses componentes, de maneira que se transformem em um sistema único de trabalho. O SCADA lê a medida e logo, envia ao CLP (Controlador Lógico Programado) ou IED (Dispositivos Eletrônicos Inteligentes), que por sua vez compara tal valor com o desejado, e age para controlar a variável(MENDES, 2007).

Os sensores e transdutores funcionam como uma ponte entre o mundo físico e os sistemas de aquisição de dados, sendo responsáveis por receber e responder a estímulos do ambiente. O termo transdutor é utilizado para se referir a dispositivos que convertem grandezas físicas — como temperatura, pressão, luminosidade ou força — em sinais elétricos, ópticos ou mecânicos, que podem ser interpretados por sistemas automatizados.

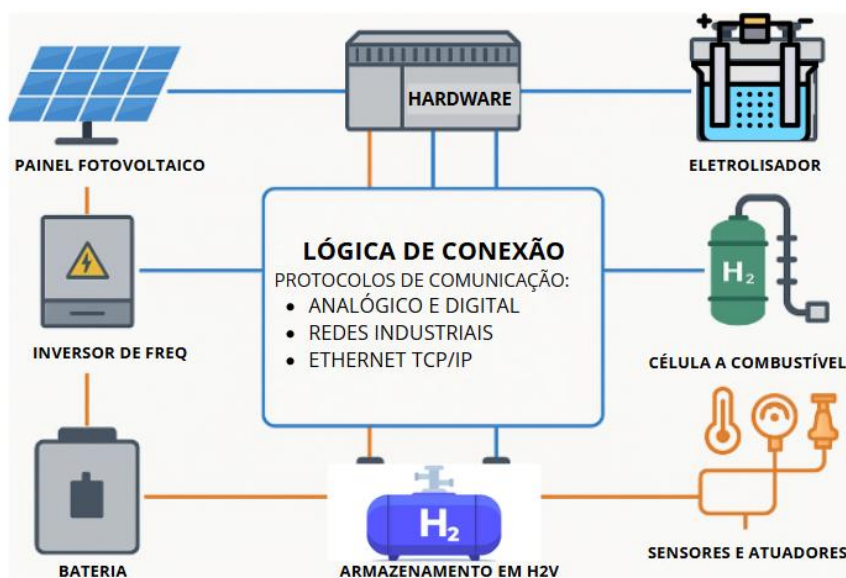
3.4- COMUNICAÇÃO

O gerenciamento eficiente de energia em microrredes fotovoltaicas isoladas com armazenamento em hidrogênio verde depende, de forma essencial, da comunicação integrada entre os diversos dispositivos e subsistemas — como inversores, drivers de eletrólise, células a combustível, sensores e atuadores. Essa comunicação abrange tanto a conexão física (fiação, interfaces elétricas, condicionamento de sinais analógicos e digitais) quanto a conexão lógica, viabilizada por protocolos de comunicação que asseguram a troca eficaz de dados entre os elementos do sistema de gerenciamento energético.

As interfaces devem ser compatíveis com protocolos industriais padronizados, como Modbus RTU/TCP e protocolos baseados em TCP/IP (como Modbus TCP/IP e Ethernet/IP), garantindo confiabilidade, sincronização e interoperabilidade entre equipamentos heterogêneos (Hatziargyriou, 2014; Lasseter & Paigi, 2004). Além disso, a implementação de sistemas SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition), operando sobre redes TCP/IP, possibilita o monitoramento em tempo real, a coleta de dados históricos e a aplicação de algoritmos de otimização, visando maximizar a eficiência operacional e prolongar a vida útil dos componentes (Colson & Nehrir, 2012).

A integração dessas tecnologias físicas e lógicas de comunicação (Figura 3.4) é essencial para lidar com os desafios impostos pela variabilidade da geração renovável e pelo controle das operações de armazenamento em hidrogênio, assegurando um fornecimento de energia confiável e sustentável em comunidades remotas (Arifujaman, 2020).

Figura 3.4- Gerenciamento de Comunicações entre dispositivos.

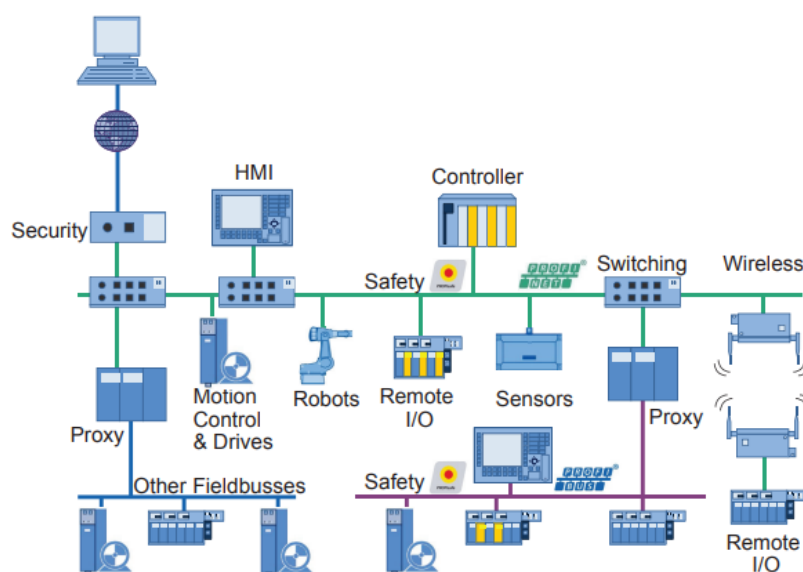


Fonte: Autor.

3.4.1-Redes Industriais

A Topologia de Redes Industriais(Figura 3.10) são sistemas complexos que interligam máquinas, equipamentos, dispositivos e outros recursos em um ambiente industrial, permitindo a comunicação e o compartilhamento de dados entre eles. Essas redes desempenham um papel fundamental na otimização de processos, no aumento da eficiência e na melhoria da tomada de decisões nas indústrias. O aumento das informações na indústria gerou incentivos em informatização de equipamentos com diferentes características, cuja troca de informações é necessária e, dessa forma, originaram-se as redes industriais. Um processo industrial robusto possui equipamentos diversos com sistemas autônomos independentes, ou seja, cada um executa uma tarefa específica e apresenta hardwares diferentes(SILVA, 2020).

Figura 3.10- Topologia de Redes Industrial.



Fonte: PROFINET, 2014.

3.4.2- Ethernet Industrial

Embora ambas as tecnologias compartilhem a fundação da Ethernet, a principal distinção reside no ambiente de aplicação e na robustez necessária. A Ethernet "comercial" é projetada para ambientes controlados como escritórios e residências, priorizando a flexibilidade e o custo-benefício. Já a Ethernet Industrial é uma versão fortificada, construída para suportar condições extremas de fábricas e instalações industriais, como altas temperaturas, vibrações, poeira e interferência eletromagnética. Além disso, a Ethernet Industrial é otimizada para a comunicação em tempo real e determinística, crucial para sistemas de controle e automação, utilizando protocolos específicos para garantir a entrega precisa e pontual dos dados, algo que a Ethernet comercial não garante(Schimidt, 2011).

A Ethernet Industrial permite a alta velocidade de troca de um elevado volume de informação, dado que a dinâmica de comunicação ágil entre os elementos que atuam nos processos das indústrias é essencial. A utilização de protocolos baseados em Ethernet também possibilita que múltiplas ações, com propósitos completamente diferentes, sejam aplicadas simultaneamente e coexistam no mesmo cabo, compartilhando dados entre si sem perdas de funcionalidade ou de desempenho(MENDES, 2019).

No quesito comunicação, a rede Ethernet Industrial permite a conexão de uma ampla variedade de dispositivos, como sensores, atuadores, controladores, sistemas de monitoramento, sistemas de planejamento de recursos empresariais(Enterprise Resource Planning) e sistemas de gerenciamento de produção(Manufacturing Execution System) em uma única rede. Isso facilita a troca de dados em tempo real e fornece uma visão abrangente das operações industriais, o que proporciona uma coordenação e tomada de decisões mais eficientes, rápidas e sincronização precisa entre dispositivos.

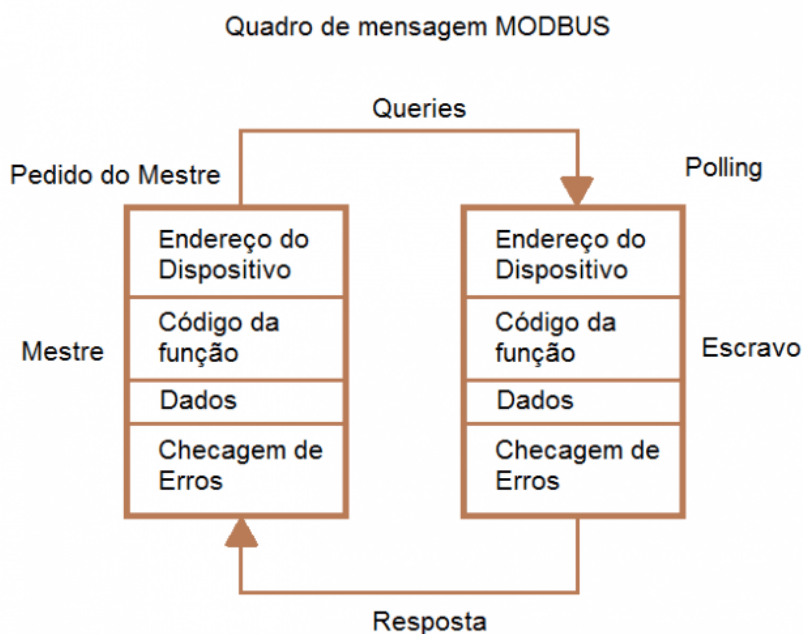
3.4.3- Protocolos de Comunicação Industrial.

Existem vários protocolos amplamente utilizados no contexto de Ethernet Industrial, os quais fornecem as especificações e diretrizes necessárias para permitir a comunicação confiável e eficiente entre os dispositivos industriais em uma rede Ethernet. Neste documento, serão abordados os mais comumente usados: Modbus, DNP3, IEC 61850 e OPC UA.

3.4.3.1- Modbus

O protocolo Modbus é um protocolo de comunicação serial amplamente utilizado em sistemas de automação industrial para conectar dispositivos como controladores lógicos programáveis(CLPs), sensores, atuadores e outros equipamentos. Ele permite a troca de dados entre um dispositivo mestre (que envia as solicitações) e um ou mais dispositivos escravos (que respondem às solicitações) (Figura 3.11).

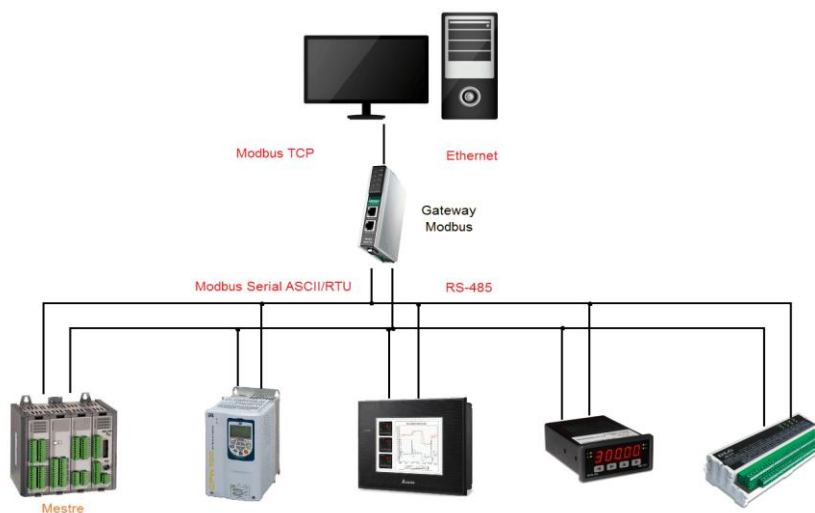
Figura 3.11- Arquitetura Mestre e Escravo.



Fonte: MODBUS, 2025.

Na figura abaixo (Figura 3.12), vemos um exemplo de rede com o protocolo Modbus, com um gateway fazendo a conexão entre os dois tipos de Modbus, o serial em RS-485 e o TCP/IP em ethernet. No mercado ainda existe a opção do gateway Modbus wireless. O mestre da rede, que nesse caso é um CLP (Controlador Lógico Programável) envia e recebe dados dos escravos, que são posteriormente um inversor de frequência, uma IHM (Interface Homem Máquina), um controlador de temperatura e uma interface de I/O remota Modbus (Modbus, 2025).

Figura 3.12- Protocolo MODBUS.



Fonte: MODBUS, 2025.

Existem diferentes tipos de Modbus, que variam de acordo com o meio físico utilizado e o formato dos dados:

- Modbus RTU: Utiliza comunicação serial RS-232 ou RS-485 e dados binários. É o tipo de Modbus mais comum em sistemas de automação industrial.
- Modbus ASCII: Utiliza comunicação serial RS-232 ou RS-485 e caracteres ASCII. É menos utilizado que o Modbus RTU.
- Modbus TCP/IP: Utiliza comunicação Ethernet TCP/IP e dados binários. Permite a comunicação entre dispositivos Modbus através de redes Ethernet.

3.4.3.2- DNP3

É um padrão de comunicação utilizado em arquitetura SCADA e em sistemas de monitoramento remoto, especialmente em setores como energia elétrica, água e gás. Ele é projetado para comunicação confiável e eficiente em redes com baixa largura de banda e alta latência, como as encontradas em infraestruturas remotas(DNP3, 2025).

O DNP3 opera no modelo mestre-escravo, onde a estação mestre envia solicitações para os dispositivos remotos (escravos) para obter dados ou executar comandos. Os dispositivos remotos respondem às solicitações da estação mestre. O protocolo define uma série de objetos e eventos que podem ser monitorados e controlados, suas aplicações mais comuns são:

- Setor de energia elétrica: Automação de subestações, monitoramento de redes de energia, controle de dispositivos de proteção.
- Setor de água e gás: Monitoramento de estações de bombeamento, controle de válvulas, medição de consumo.
- Automação industrial: Coleta de dados de sensores, controle de processos industriais.

3.4.3.3- IEC 61850

O protocolo IEC 61850 é um padrão internacional para comunicação em subestações de energia elétrica e sistemas de automação. Ele define um protocolo comum para dispositivos de diferentes fabricantes, permitindo a troca de informações de forma eficiente e confiável (IEC 61850, 2025).

O protocolo IEC 61850 é um padrão fundamental para a modernização de subestações de energia elétrica e sistemas de automação na integração de dispositivos. Sua capacidade de promover a interoperabilidade, flexibilidade, eficiência e confiabilidade o torna uma ferramenta essencial para garantir o funcionamento seguro e eficiente das redes elétricas. O

protocolo IEC 61850 é utilizado em diversas aplicações em subestações de energia elétrica, como:

- **Proteção e controle:** Permite a comunicação entre relés de proteção, controladores e outros dispositivos para realizar funções de proteção e controle da subestação.
- **Supervisão e automação:** Facilita a comunicação entre os dispositivos e o sistema de supervisão da subestação, permitindo o monitoramento e o controle remoto.
- **Medição:** Permite a coleta de dados de medição de medidores inteligentes e outros dispositivos para fins de faturamento, análise e controle.

3.4.3.4- OPC UA

O protocolo OPC UA (Open Platform Communications Unified Architecture) é um padrão de comunicação industrial que permite a troca de dados entre diferentes dispositivos e sistemas de forma interoperável e segura. Ele é amplamente utilizado em diversos setores, como automação industrial, energia, água, alimentos e bebidas, entre outros (OPC UA, 2025).

O OPC UA utiliza uma arquitetura baseada em serviços, onde os clientes podem solicitar diferentes tipos de serviços aos servidores, como leitura de dados, escrita de dados, inscrição em eventos e navegação no modelo de dados. Os servidores respondem às solicitações dos clientes, fornecendo os dados ou executando as ações solicitadas. O OPC UA é utilizado em diversas aplicações, como:

- **Automação industrial:** Coleta de dados de sensores, controle de processos, monitoramento de equipamentos.
- **Energia:** Monitoramento de redes elétricas, controle de subestações, gestão de energia.
- **Água:** Monitoramento de estações de tratamento de água, controle de bombas e válvulas, gestão de recursos hídricos.
- **Alimentos e bebidas:** Controle de processos de produção, rastreamento de produtos, gestão de qualidade.

Tabela 1-Comparativa dos Protocolos de Redes Industriais.

Protocolos	Distância	Taxa de Transmissão	Latência	Confiabilidade	Custo	Aplicações
Modbus	Curta	Baixa	Baixa	Média	Baixo	Simple sistemas de controle
DNP3	Média	Média	Média	Alta	Médio	Automação de subestações
IEC 61850(GOOSE)	Média-Longa	Alta	Baixa	Alta	Alto	Subestações inteligentes
OPC UA	Curta-Média	Alta	Baixa	Alta	Médio-Alto	Indústria 4.0, sistemas complexos.

Fonte: Autor.

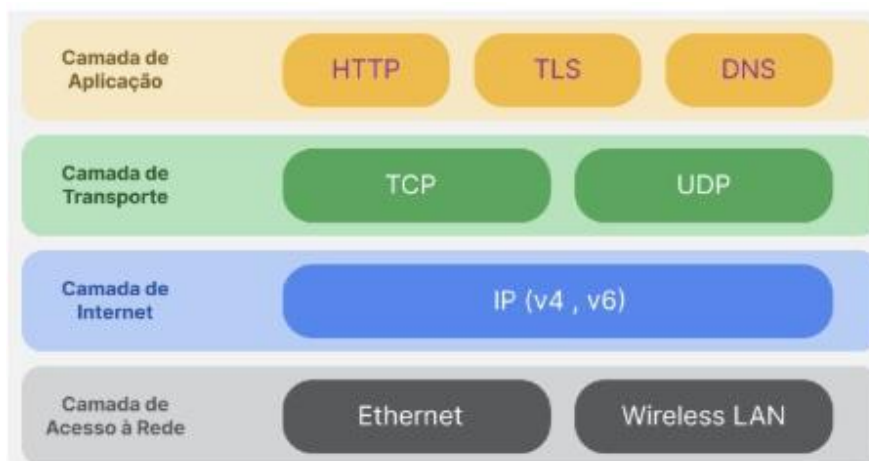
3.4.3.5- Arquitetura TCP/IP

A arquitetura TCP/IP é um conjunto de protocolos de comunicação entre computadores em rede que se caracteriza pela definição de um modelo de camadas padrão para implementação na arquitetura de redes. Com objetivo semelhante ao modelo OSI (Open Systems Interconnection) no que se refere à divisão da arquitetura em camadas, o TCP/IP consiste na junção dos protocolos TCP (Transmission Control Protocol) e IP (Internet Protocol), dois dos mais utilizados (RNP, 2024).

3.3.3.6- Conceitos básicos da arquitetura TCP/IP aplicado a Redes Industriais.

O modelo de arquitetura TCP/IP (Figura 3.13) tem suas funções divididas em camadas da mesma forma que o OSI. A principal diferença nessas estruturas é o número de camadas encontradas em cada modelo: no OSI encontramos 7 camadas, enquanto no TCP/IP são apenas 4: Aplicação, Transporte, Rede e Interface de Rede (RNP, 2024).

Figura 3.13- Modelo de Arquitetura TCP/IP



Fonte: RNP, 2025.

A arquitetura TCP/IP, originalmente desenvolvida para a internet, tem se tornado cada vez mais relevante no contexto das redes industriais. Sua capacidade de padronização, interoperabilidade e escalabilidade oferece vantagens significativas para o setor.

- **Interoperabilidade:** TCP/IP permite a comunicação entre diferentes dispositivos e sistemas industriais, independentemente do fabricante.
- **Acesso remoto:** Facilita o monitoramento e controle de processos industriais a partir de locais remotos através da interface IHM.
- **Integração com Sistemas Operacionais:** Permite a integração com Sistemas Operacionais disponíveis no mercado.

3.5- ARQUITETURA DA REDE DE COMUNICAÇÃO

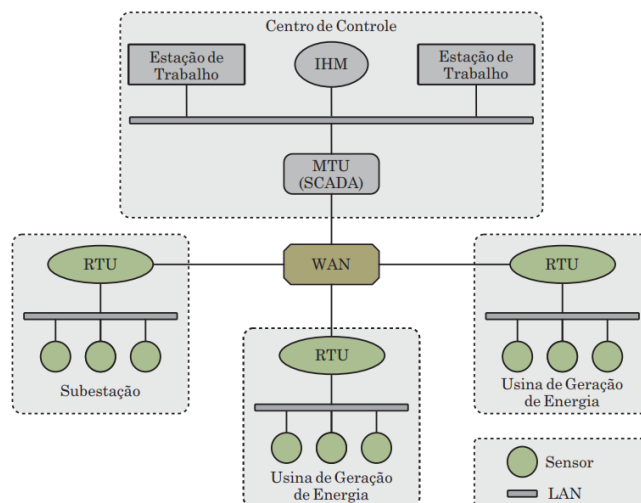
O sistema de supervisão e aquisição de dados(SCADA) refere-se a uma estrutura capaz de monitorar e controlar plantas de diversos processos distintos(BOYER, 2009). Os principais setores que utilizam essa tecnologia são: sistemas de geração de energia elétrica, indústrias de petróleo ou gás, sistemas de irrigação, entre outros processos(KRUTZ, 2006). Esse tipo de arquitetura originou-se em sistemas isolados e concentrados, atuando somente em estruturas pequenas(BOYER, 2009).

Com o avanço de diversas tecnologias como sistemas de comunicação, melhorias e redução de valores de processadores, os sistemas SCADA obtiveram um avanço tecnológico considerável proporcionando as funcionalidades comuns disponibilizadas nesses sistemas atualmente. Além disso, com a inovação tecnológica as arquiteturas SCADA passaram a contar com estações de controle e dispositivos remotos(KRUTZ, 2006), tornando necessário a conexão dessas estruturas com a Internet para atender completamente essa melhoria. Sendo assim, diversos setores adotaram essas medidas, como é o caso de sistemas de energia elétrica.

Os Sistemas de energia elétrica também evoluíram e adaptaram-se à realidade e necessidade atual, o que possibilitou o desenvolvimento do conceito denominado Smart Grid, ou Rede Elétrica Inteligente. Esse formato é voltado a eficiência e sustentabilidade de energia realizado por meio dos benefícios provenientes da integração da tecnologia da informação a sistemas de geração, transmissão e distribuição.

Um diagrama representando Figura 3.14 os componentes de uma estrutura SCADA genérica desenvolvida para sistemas de GD. Essa estrutura é composta por diversos elementos fundamentais, como IHM(Interface Homem-Máquina), MTU(Master Terminal Unit), rede de comunicação e RTU's (KRUTZ, 2006). O centro de controle é a base do sistema SCADA. No centro de controle é realizado o monitoramento e a operação do sistema. Normalmente, esse nível é composto por uma IHM e estações de trabalho. A IHM refere-se a uma aplicação demonstrada em tela, que simplifica o processo para o operador do sistema, tornando eficaz a compreensão de informações repassadas entre humano e máquina.

Figura 3.14- Arquitetura SCADA genérica para Sistemas de Geração Distribuída.



Fonte: KRUTZ, 2006.

3.5.1- Comunicação com Sistemas SCADAS

Sistemas SCADA são muito utilizados em indústrias para o controle e aquisição de dados de processos industriais (Daneels, 1999). Tais sistemas podem ser separados em duas camadas: a “camada do cliente” que é responsável a interação entre o usuário e o sistema por meio de uma interface; e a “camada do servidor de dados”, responsável pela comunicação entre o sistema de controle e aquisição de dados e os dispositivos periféricos, como sensores e CLPs (Daneels, 1999). Para conhecer melhor a aplicabilidade dos Sistemas SCADA e algumas especificações técnicas e funcionalidades do Sistema SCADA:

- **Interface gráfica:** A criação da interface com o usuário é feita de maneira simples e rápida. Vários recursos visuais estão disponíveis, como animações, displays, botões, gráficos e outros ligados diretamente com as variáveis de campo (tags). Além disso, os Softwares de desenvolvimento SCADA contam com uma extensa biblioteca gráfica de desenhos e possibilita importar imagens de vários formatos de modo a facilitar a criação de telas. Interfaces para visualização e análise dos dados, como gráficos, tabelas e dashboards.
- **Conectividade com equipamentos:** Existem várias maneiras para trocar informações com equipamentos de aquisição de dados como CLPs (Controladores Lógicos Programáveis), DACs (Cartões de Aquisição de Dados), RTUs (Unidades Remotas), controles e outros tipos de equipamentos.
- **Acesso remoto ao sistema:** Permitir o acesso remoto a outras aplicações via rede de computadores. O método utilizado baseia-se no conceito de Aplicações Remotas, no qual os dados de uma aplicação qualquer (Servidor) são acessados por um Operador autorizado, que

poderá realizar a leitura e escrita de qualquer parâmetro. Visualização das ligações entre os objetos: A ferramenta de referência cruzada permite que, em qualquer momento da configuração, o usuário visualize todos os pontos no qual um determinado Tag ou objeto é referenciado.

- **Históricos:** Os históricos são estruturas responsáveis pelo registro dos dados do processo monitorado para sua posterior análise. Podem ser utilizados para processos contínuos ou descontínuos, armazenando dados em intervalos de tempo fixos ou por eventos. A ferramenta de análise histórica pode ser empregada para uma visualização mais eficiente dos dados, permitindo zoom e filtros de dados.
- **Bancos de Dados - fácil integração:** A integração com qualquer base de dados é muito simples através de recursos ODBC (Open Data Base Connectivity) e DAO (Data Access Objects). Wizards auxiliam no processo de conexão ou criação de uma base de dados qualquer, entre elas as linguagens de Banco de Dados: SQL Server®, MariaDB, Oracle® e PostgreSQL.

CAPÍTULO 4- ESPECIFICAÇÃO DO HARDWARE

INTRODUÇÃO

O setor de energia elétrica passou por transformações significativas nos últimos anos, impulsionadas pela Indústria 4.0, pela desregulamentação dos segmentos de geração, transmissão e distribuição, e pelo aumento da inserção de fontes de geração distribuída. Tais mudanças exigem a modernização das redes elétricas, promovendo a incorporação de tecnologias inteligentes, segurança cibernética e maior integração entre sistemas(ANEEL, 2021).

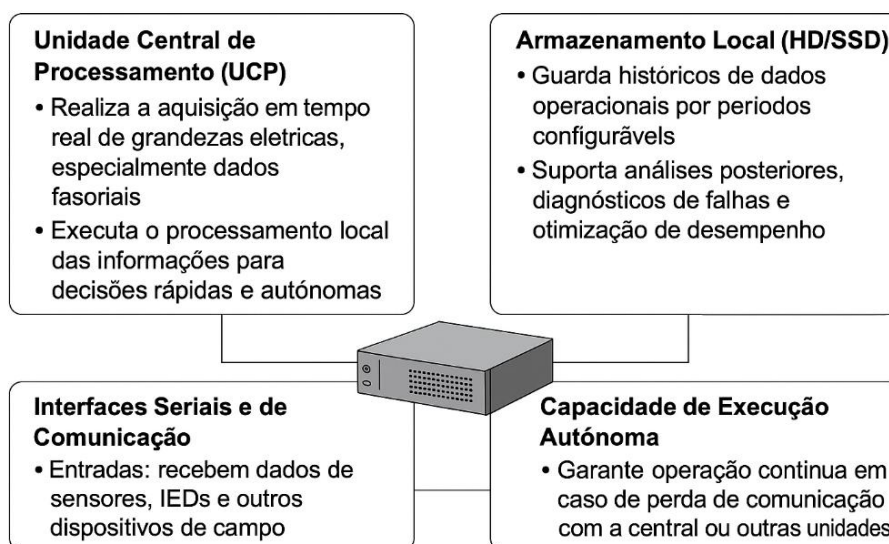
Como consequências, os Sistemas de Energia Elétrica(SEE) devem manter o compromisso de atendimento à demanda crescente, considerando-se requisitos de qualidade e continuidade na operação, levando em consideração que sua expansão está sujeita a restrições socioambientais. Ainda, como reflexo da viabilização econômica de novas tecnologias de geração de energia, as redes de transmissão devem estar preparadas para absorver a entrada de fontes de geração distribuída(conectadas aos sistemas de distribuição) e novas fontes de energia (eólica, solar, biomassa), algumas delas com características intermitentes(LIRA, 2010).

4.1- HARDWARE PADRÃO INDUSTRIAL

Na era da automação e indústria 4.0, a demanda por tecnologias robustas e confiáveis aumentou significativamente. Nesse contexto, o computador industrial tem ganhado destaque como uma solução eficiente em diversos setores.

Os Hardwares padrão industrial(Figura 4.1) tem como padronização computadores industriais são projetados para oferecer alta confiabilidade, durabilidade e desempenho em ambientes industriais exigentes. Suas características os tornam ideais para aplicações como automação industrial, controle de processos, monitoramento de máquinas e sistemas de supervisão.

Figura 4.1- Rotina básica do Hardware Industrial.



Fonte: Autor.

4.1.2- CPU Industrial

Um CPU industrial, ou unidade central de processamento industrial, é o "cérebro" de um computador industrial. Ele executa as instruções de programas de computador, realizando operações aritméticas, lógicas e de entrada/saída básicas. Os CPUs industriais são projetados para operar em ambientes industriais exigentes, caracterizados por:

- **Robustez:** São construídos com materiais resistentes para suportar vibrações, choques, temperaturas extremas e poeira.
- **Confiabilidade:** Projetados para operação contínua 24 horas por dia, 7 dias por semana, com alta taxa de disponibilidade.
- **Longa vida útil:** Os CPUs industriais geralmente têm um ciclo de vida mais longo do que os CPUs de consumo, garantindo suporte de longo prazo para sistemas industriais.
- **Conectividade:** Oferecem uma variedade de interfaces de comunicação, como Ethernet industrial, serial e barramentos de campo, para conectar-se a outros dispositivos industriais.

4.1.3- Placa mãe padrão Industrial

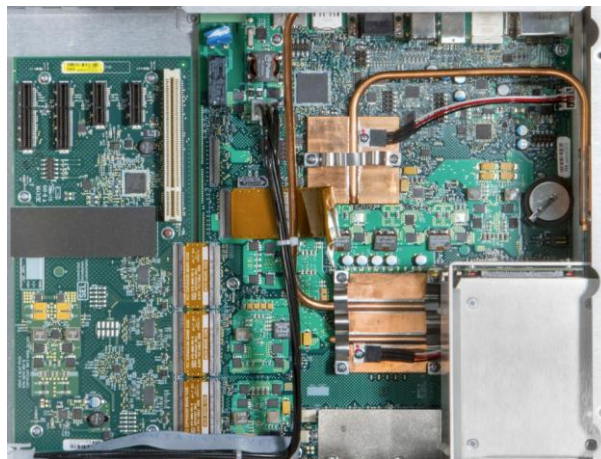
Uma placa-mãe padrão industrial (Figura 4.2) é o componente central de um computador industrial, responsável por conectar e coordenar todos os outros componentes do sistema. Ela se diferencia das placas-mãe de consumo por sua robustez, confiabilidade e capacidade de operar em ambientes industriais adversos, entre elas suas características principais:

- **Durabilidade:** Construídas com materiais de alta qualidade para suportar vibrações, choques, temperaturas extremas e poeira. Projetadas para operação contínua 24 horas por dia, 7 dias

por semana, com alta taxa de disponibilidade, Longa vida útil, garantindo suporte de longo prazo para sistemas industriais.

- **Conectividade:** Oferecem uma variedade de interfaces de comunicação, como Ethernet industrial, serial e barramentos de campo, para conectar-se a outros dispositivos industriais. Suporte a diversos padrões de comunicação industrial, como Modbus, DNP3, IEC 61850 e OPC UA.
- **Armazenamento de Dados:** Oferecem uma variedade de opções de armazenamento de dados, tanto integradas quanto expansíveis, para atender às necessidades de aplicações exigentes.
- **Refrigeração:** Evitar partes móveis, como ventoinhas e utilizar dissipadores de calor robustos, feitos de materiais como alumínio ou cobre, são utilizados para dissipar o calor gerado pelos componentes da placa-mãe.
- **Vibração e Choques:** Em vez de usar conectores de encaixe, os componentes são soldados diretamente na placa-mãe, aumentando a resistência a vibrações e choques.

Figura 4.2- Placa Mãe padrão Industrial.



Fonte: SEL, 2025.

4.2- SISTEMAS OPERACIONAIS PARA HARDWARE DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO.

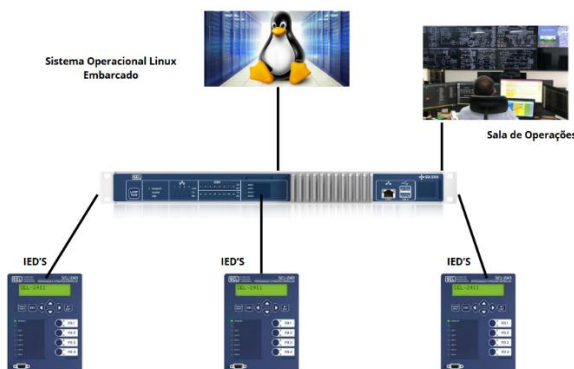
A escolha do sistema operacional para um Hardware de controle e automação é importante e depende de vários fatores, como desempenho, confiabilidade, segurança e custo.

A Integração de um SO(Sistema Operacional), serve para apenas gerenciar todo hardware da placa mãe, sem a necessidade de ambiente gráfico, pois toda a operação será pela IHM. O uso de SO facilita em atualizações de Firmware.

Muitas empresas estão optando para gerenciamento do hardware, versões embarcadas do Sistema Operacional LINUX(Figura 4.3), pois se trata de software livre. Tem facilitado a

integração de protocolos de comunicação, com outros equipamentos e habilitação do Banco de Dados para a coleta das medições, assim mostrando ao operador através da Interface IHM.

Figura 4.3- Embarque do Sistema Operacional.



Fonte: Autor.

4.3- REQUISITOS DE IMPLEMENTAÇÃO DO HARDWARE

A análise de requisitos para o desenvolvimento de um Hardware, para microrredes em comunidades isoladas com armazenamento energético em hidrogênio verde, representa um desafio técnico e uma oportunidade única para promover a sustentabilidade energética e melhorar a qualidade de vida em regiões remotas.

Projetos em microrredes isoladas representam soluções inovadoras e sustentáveis para o fornecimento de energia elétrica em áreas remotas ou com infraestrutura limitada. Esse projeto busca garantir o acesso à energia de forma confiável e eficiente, utilizando fontes renováveis e tecnologias avançadas.

Para o desenvolvimento de uma plataforma de aquisição de dados de medição sincronizada, existem diferentes aspectos a serem considerados. O equipamento encarregado desta tarefa deve ter as seguintes funcionalidades básicas: aquisição de medidas com sincronização temporal; capacidade de correlacionar etiquetas de tempo; armazenamento eficiente em base de dados; disponibilizar dados para aplicações em tempo real e para estudos off-line e operação contínua com prioridade de tempo real.

Compreender os requisitos de hardware para gerenciamento energético envolve considerar alguns aspectos importantes, especialmente no contexto de sistemas de medição em fonte de energias. Aqui estão alguns pontos importantes:

- Alta performance computacional: O sistema deve ser capaz de processar grandes volumes de dados e operações complexas com rapidez, minimizando latências e utilizando os recursos de hardware de maneira eficiente.

- Sistema eficiente para armazenamento de dados: É essencial contar com mecanismos que garantam não só o armazenamento seguro e confiável das informações, mas também uma recuperação rápida e uma organização que facilite o acesso e a manipulação dos dados.
- Confiabilidade e disponibilidade: O sistema deve operar de forma contínua, mesmo diante de falhas ou picos de demanda, através de mecanismos de redundância, backup e tolerância a erros, garantindo que os serviços estejam sempre acessíveis aos usuários.
- Capacidade de comunicação: É necessário que haja uma infraestrutura robusta para a comunicação entre os diversos componentes do sistema, suportando protocolos e interfaces que permitam a integração com outros sistemas e dispositivos.
- Atendimento a variados tipos de aplicações: Um sistema versátil deve ser capaz de suportar desde aplicações simples até soluções complexas e críticas, ajustando seus recursos conforme as necessidades específicas de cada aplicação.
- Facilidade de integração: A arquitetura deve ser desenhada para permitir a integração com outras plataformas e tecnologias de diferentes fabricantes, facilitando a interoperabilidade e a expansão das funcionalidades sem a necessidade de grandes reformas.
- Modularidade e expansibilidade: Uma abordagem modular permite que o sistema seja composto de partes independentes, facilitando a manutenção, atualização e expansão conforme novas demandas surgem, sem comprometer a estabilidade do conjunto.
- Segurança de Dados e Controle: Garantir a proteção dos dados sensíveis e das operações. Eles podem ser equipados com recursos de criptografia, autenticação, proteção contra malware e acesso restrito, evitando o acesso não autorizado e protegendo informações valiosas.

4.4- SOLUÇÕES DE HARDWARE NO MERCADO PARA MICRORREDES

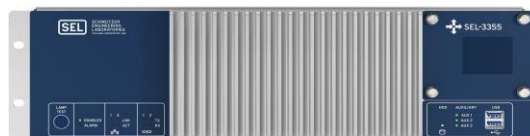
No setor de energia elétrica, as soluções comerciais Hardwares para gerenciamento de microrredes, desempenham um papel importante na modernização e otimização das operações. Essas soluções visam coletar, processar e analisar dados de diversas fontes, permitindo um monitoramento mais eficiente e uma tomada de decisões mais precisa, dentre elas algumas soluções no mercado:

4.4.1- SEL 3555

O RTAC 3555(Figura 4.4), ou Controlador de Automação em Tempo Real SEL-3555, é um dispositivo da Schweitzer Engineering Laboratories(SEL) projetado para automação de sistemas de energia elétrica. Ele desempenha um papel fundamental em aplicações que exigem

alta velocidade, confiabilidade e segurança, como automação de subestações, controle de microrredes e automação de distribuição(SEL, 2024).

Figura 4.4- RTAC 3555.



Fonte: SEL, 2024.

4.4.2- SSC 600

O SSC600(Figura 4.5), da ABB, é um sistema de proteção e controle de subestações inteligentes. Ele foi projetado para centralizar todas as funções de proteção e controle em um único dispositivo digital, em vez de usar vários dispositivos separados. Isso simplifica o projeto, a instalação e a manutenção de subestações, além de melhorar o desempenho e a confiabilidade do sistema(ABB, 2024).

Figura 4.5- SSC 600.



Fonte: ABB, 2024.

4.4.3- RPV-311

O Módulo de Processamento RPV-311GE(Figura 4.6) em conjunto com os Módulos de aquisição de dados que constituem o Registrador de Perturbações Digital Multifunção Distribuído utilizado para aquisição, monitoração e registro de grandezas normalmente associadas aos equipamentos de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica(GE, 2024).

Figura 4.6- RPV-311GE.



Fonte: GE, 2025.

Tabela 2- Comparativo entre as soluções de mercado.

ESPECIFICAÇÕES	RTAC 3355(SEL)	SSC 600(ABB)	RPV-311(GE)
CPU	2-Intel Xeon E3-1505L quad-core 2,0 GHz 64 bits	2-processadores Intel® Xeon® Gold	Intel ATOM D510 1.66GHz
Sistemas Operacional(LINUX)	Sim	Sim	Não
ARMAZENAMENTO Expansível	Sim	Sim	Não
RAID	Sim	Sim	Não
Chassi para Rack de 19 POL	Sim	Sim	Sim
Slots de expansão	Sim	Sem Expansão	Sem Expansão
Fonte de Alimentação (120/220/240 Vca)	Sim	Sim	Sim
Interface para Monitores	Sim	Não	Não
Portas USB's	Sim	Sim	Não
Ethernet e Fibra Óptica	Sim	Sim	Sim
Serial	Sim	Sim	Não possui
Áudio	Sim	Não possui	Não possui
Alarme/Contato de saída	Sim	Não	Não
Sistemas Operacionais Suportados(Terceiros)	Sim	Sim	Sim
Web IHM	Sim	Sim	Sim
Controle de Usuários	Sim	Sim	Sim
Suporte a protocolo Industriais	Sim	Sim	Sim
Classe de Gabinete	IP30	IP30	Sem informação

Fonte: Autor.

CAPÍTULO 5- DESENVOLVIMENTO DO SOFTWARE DA PLATAFORMA DE MONITORAMENTO DA MIRAHV

5.1- INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta o desenvolvimento do software responsável pelo monitoramento energético da microrrede fotovoltaica isolada com armazenamento em hidrogênio verde(MIRAHV). O sistema está sendo desenvolvido em ambiente web, seguindo a tendência das soluções do mercado para microrredes, nas quais toda a operação ocorre via navegador de internet, na forma de WIHM(Web Interface Human-Machine). O objetivo é permitir a operação autônoma em ambientes remotos, com foco em resiliência, segurança e eficiência. O sistema prevê a integração de funções para aquisição de dados, visualização, processamento e tomada de decisão em tempo real, visando garantir o fornecimento contínuo de energia à carga.

5.2- DESCRIÇÃO SIMPLIFICADA DA ESTRATÉGIA DE GESTÃO DE ENERGIA

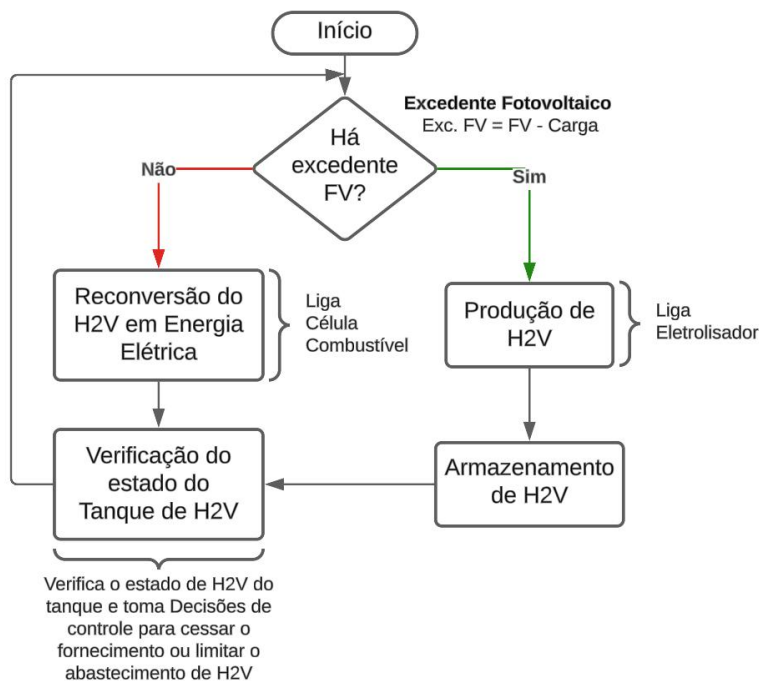
A metodologia de gerenciamento energético desenvolvida para o monitoramento da MIRAHV tem como objetivo garantir a máxima eficiência operacional e o fornecimento ininterrupto de energia elétrica à carga associada por um período mínimo de 48 horas, mesmo em situações de ausência total de recurso solar. Essa abordagem é parte fundamental do Software MIRAHV e está sendo configurada para atender aos requisitos específicos de sistemas isolados, cuja produção e armazenamento de hidrogênio verde(H₂V) ocorrem localmente.

Para atingir esse objetivo, a metodologia parte de premissas operacionais fundamentais da filosofia da MIRAHV, com ênfase na resiliência e na continuidade do fornecimento. Entre os principais focos do desenvolvimento está a mitigação de riscos relacionados à insuficiência de H₂V no sistema de armazenamento, o que poderia acarretar na paralisação das operações. Dessa forma, o monitoramento contínuo do nível de hidrogênio no tanque foi considerado um parâmetro essencial, permitindo ações preditivas e reativas com base no status energético do sistema.

A Figura 5.1, apresenta o fluxograma de gerenciamento energético da microrrede destacando a lógica de operação automatizada baseada na disponibilidade de excedente fotovoltaico. Quando a geração solar é superior à demanda da carga, o sistema ativa o eletrolisador para produzir hidrogênio verde(H₂V), que é armazenado em um tanque específico. Caso contrário, na ausência de excedente solar, a microrrede aciona a célula a combustível para reconverter o hidrogênio armazenado em energia elétrica, garantindo o suprimento contínuo da carga. Em ambas as situações, o sistema realiza a verificação do estado

do tanque de H2V, tomando decisões de controle para manter a operação segura e eficiente. Essa estratégia assegura a autonomia energética da MIRAHV, priorizando o uso de fontes renováveis e a gestão inteligente dos recursos disponíveis, especialmente em comunidades isoladas sem acesso à rede elétrica convencional.

Figura 5.1- Algoritmo de Gerenciamento de Energia.

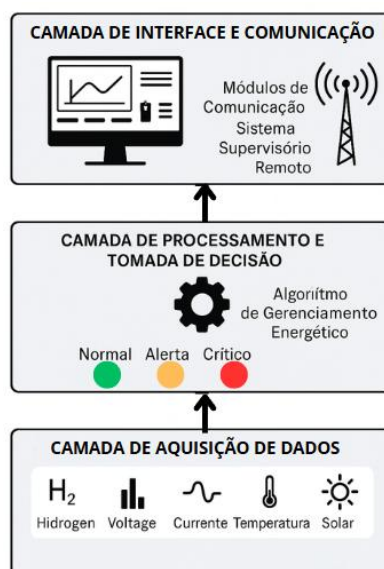


Fonte: Autor.

5.3- ESTRUTURA DO SOFTWARE PROPOSTO

Neste subcapítulo, apresenta-se a arquitetura interna do software MIRAHV, detalhando seus módulos funcionais, suas interações e os princípios que nortearam seu desenvolvimento. O foco está na modularidade, escalabilidade e compatibilidade com os recursos computacionais embarcados na MIRAHV, visando facilitar a manutenção, atualizações futuras e a integração com sensores e atuadores.

Figura 5.2- Arquitetura interna do software MIRAHV.



Fonte: Autor

A estrutura do software foi organizada em camadas lógicas e funcionais, conforme descrito a seguir:

5.3.1 – Arquitetura em Camadas

O software foi dividido em três camadas principais:

- Camada de Aquisição de dados: Responsável pela leitura contínua de variáveis como tensão, corrente, irradiância e pressão do tanque de hidrogênio.
- Camada de Processamento e Tomada de Decisão: Onde ocorre a aplicação do algoritmo de controle, classificando o estado da microrrede (normal, alerta, crítico) e acionando as rotinas apropriadas.
- Camada de Interface e Comunicação: Compreende a IHM e os protocolos de comunicação com o sistema SCADA ou supervisório remoto.

5.3.2 – Módulos Funcionais

A estrutura modular do software permite uma abordagem orientada a serviços, com os seguintes módulos principais:

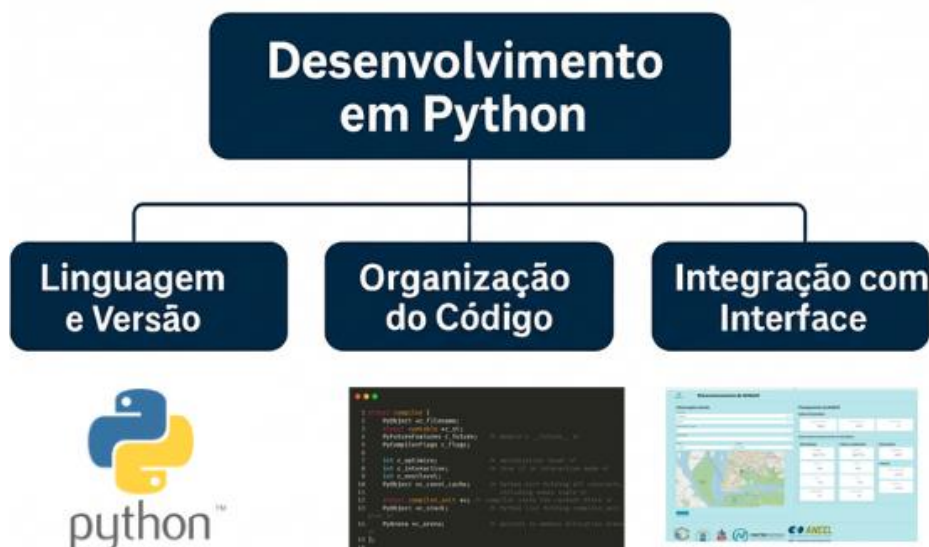
- Módulo de Monitoramento: Coleta e exibe dados em tempo real do sistema energético. Permite a visualização gráfica dos níveis de H₂, estado da carga, status dos dispositivos e alertas ativos.
- Módulo de Controle Inteligente: Implementa o algoritmo de decisão baseado em regras e histórico de consumo. Inclui rotinas para ativação/desativação de cargas, priorização de consumo e otimização do uso do H₂ disponível.
- Módulo de Armazenamento e Logs: Realiza a gravação de dados operacionais e eventos em memória local e/ou em banco de dados remoto, com redundância e sincronização periódica.
- Módulo de Comunicação e Segurança: Gerencia a troca de informações com a nuvem e sistemas remotos, utilizando criptografia e autenticação segura, além de incluir rotinas de verificação de integridade do sistema.

5.4 - DESENVOLVIMENTO EM PYTHON

O desenvolvimento do software MIRAHV foi realizado utilizando a linguagem Python, versão 3.12, escolhida por sua robustez, versatilidade e ampla adoção no meio acadêmico e industrial. Python oferece uma sintaxe simples e legível, o que facilita a manutenção e a escalabilidade do código, além de possuir uma vasta biblioteca de ferramentas específicas para cálculos numéricos, otimizações e visualização gráfica, todos essenciais para o projeto. Outro fator decisivo foi sua compatibilidade com ambientes embarcados e integração com sensores permitindo que o MIRAHV possa evoluir futuramente para aplicações em tempo real.

A estrutura do código que está em desenvolvimento de forma modular (Figura 5.3), com organização em pacotes e classes específicas para cada bloco funcional do software: entrada de dados, cálculos de otimização, simulação dinâmica, geração de relatórios e interface gráfica. Isso permite que cada módulo seja desenvolvido, testado e atualizado independentemente, aumentando a eficiência do processo de desenvolvimento e garantindo a estabilidade do sistema.

Figura 5.3- Estrutura de Desenvolvimento.



Fonte: Autor.

Além das funcionalidades de cálculo e simulação, foi integrada uma interface gráfica usando a biblioteca PyQt6, que facilita a interação do usuário com o software. A interface conecta os módulos internos com elementos visuais amigáveis, como formulários de entrada, botões de ação, abas temáticas e gráficos dinâmicos. Esse desenvolvimento exigiu atenção especial à usabilidade, já que o software é destinado a operadores com diferentes níveis de conhecimento técnico. Como resultado, foi criado um sistema intuitivo, capaz de guiar o usuário por todas as etapas do processo, desde a configuração inicial até a análise dos resultados finais.

Por fim, todo o desenvolvimento foi acompanhado por testes unitários e de integração, assegurando que os cálculos fossem precisos e os módulos comunicassem entre si

corretamente. O uso do Python como base tecnológica possibilita futuras expansões, incluindo a integração com sensores físicos, comunicação e futuras implementações de algoritmos de inteligência artificial para otimizar o gerenciamento energético das microrredes. Assim, o Software MIRAHV se estabelece não apenas como uma ferramenta de planejamento, mas como uma plataforma aberta para inovação contínua no contexto da energia sustentável.

5.5- INTERFACE GRÁFICA

O processo de inicialização do software MIRAHV(Figura 5.4), que está sendo desenvolvido, foi projetado para garantir a integridade e o correto funcionamento de toda a microrrede antes do início do monitoramento em tempo real. Na primeira etapa, o sistema carrega os módulos essenciais, ativando as funções principais do software e preparando a interface para operação. Em seguida, realiza-se a verificação dos sensores e atuadores, validando a conectividade e o estado de todos os dispositivos responsáveis pela medição e atuação no sistema.

Logo após, o software MIRAHV estabelece a comunicação com o hardware, assegurando que a troca de informações entre o software e os equipamentos ocorra de forma estável e segura. Com a comunicação devidamente estabelecida, o sistema inicia o monitoramento dos fluxos de energia da microrrede, registrando dados sobre geração, armazenamento e consumo. A sequência de inicialização prossegue com a configuração final dos parâmetros do sistema, garantindo que todas as definições técnicas estejam ajustadas conforme o projeto.

Somente após essa checagem completa e criteriosa o MIRAHV informa que está pronto para operação, liberando o painel de monitoramento para que o usuário possa acompanhar o desempenho do sistema e tomar decisões baseadas nos dados coletados.

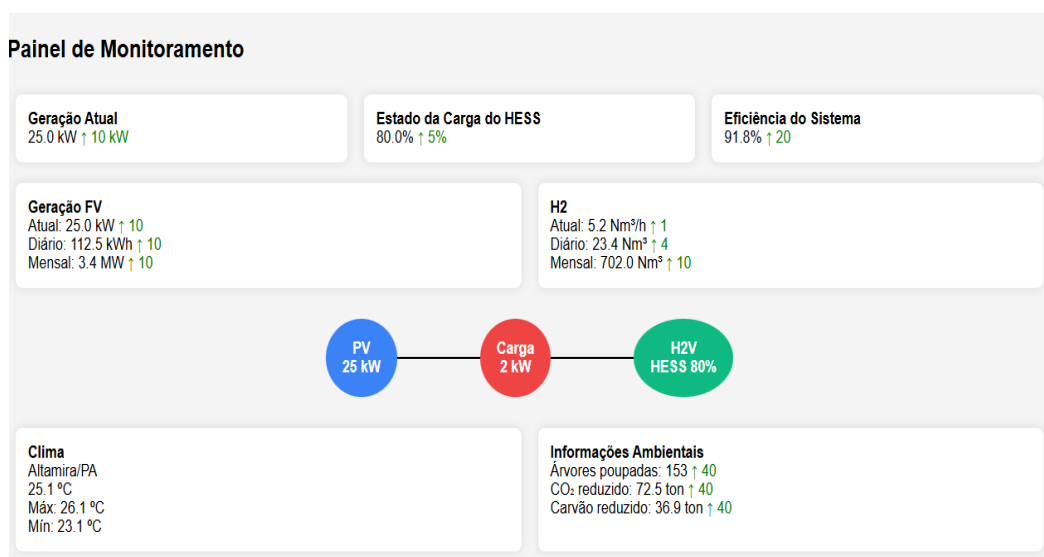
Figura 5.4- Interface de Iniciação da MIRAHV.



Fonte: Autor.

Após a inicialização o módulo de monitoramento entra em execução(Figura 5.5) foi desenvolvido com o objetivo de proporcionar uma experiência de uso intuitiva, acessível e eficiente, mesmo para operadores com diferentes níveis de conhecimento técnico. Por se tratar de uma aplicação voltada a comunidades isoladas e sistemas de microrredes renováveis, era essencial garantir que a interação entre o usuário e o software ocorresse de forma simples e fluida, evitando complexidades desnecessárias.

Figura 5.5- Interface Software MIRAHV.



Fonte: Autor.

Um diagrama central ilustra o fluxo de energia entre os três principais blocos do sistema:

- PV(Geração Fotovoltaica) – responsável pela produção de energia elétrica;
- H2V(Sistema de Armazenamento em Hidrogênio) – atua como buffer energético;
- Carga – representa o consumo final de energia pela comunidade.

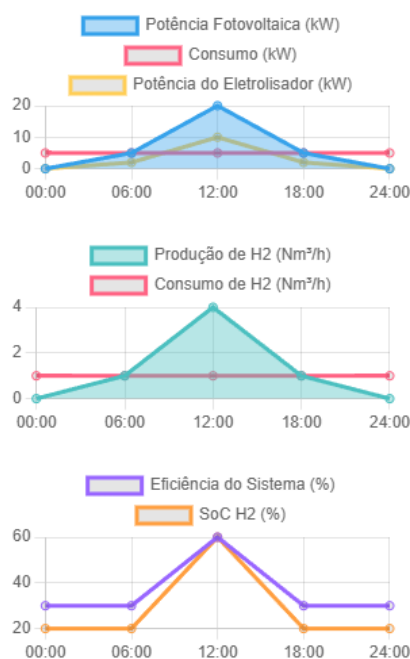
As setas do diagrama indicam a direção e intensidade dos fluxos energéticos, atualizados dinamicamente, facilitando a análise por técnicos ou operadores em campo.

Além de facilitar a configuração inicial e o acompanhamento dos resultados, a interface inclui um módulo de monitoramento em tempo real, permitindo visualizar o fluxo de energia entre os principais componentes do sistema: geração fotovoltaica (PV), armazenamento em hidrogênio(H₂) e carga final. Através de gráficos dinâmicos e indicadores visuais, o operador pode acompanhar a produção e o consumo de energia, identificar excedentes e déficits, monitorar a eficiência dos equipamentos e avaliar o estado de carga dos sistemas de armazenamento. Essas informações são fundamentais para a tomada de decisões operacionais e para a manutenção preditiva do sistema.

5.5.1- Histórico de Monitoramento do Sistema

O módulo de histórico de monitoramento do software MIRAHV(Figura 5.6) permite o acompanhamento gráfico e em tempo real do desempenho energético da microrrede ao longo do tempo. A ferramenta é fundamental para análise técnica, diagnóstico operacional e avaliação da eficiência do sistema.

Figura 5.6- Histórico de Monitoramento.



Fonte: Autor.

A interface é composta por três gráficos principais:

- Gráfico de potência(kW): representa a geração fotovoltaica, o consumo da carga e a ativação do eletrolisador ao longo do dia, permitindo a identificação de excedentes e déficits energéticos.
- Gráfico de hidrogênio(Nm³/h): monitora a produção e o consumo de H₂, evidenciando o funcionamento do eletrolisador e da célula a combustível conforme a disponibilidade solar.
- Gráfico de indicadores(%): exibe a eficiência do sistema e o estado de carga do armazenamento de hidrogênio(SoC), fornecendo uma visão da autonomia e do rendimento global da microrrede.

A navegação é facilitada por filtros temporais(diário, mensal, anual e total) e seleção de datas específicas. Os dados são apresentados em curvas coloridas com legenda lateral, permitindo leitura intuitiva e rápida correlação entre variáveis.

Esse módulo amplia a capacidade de gestão energética do operador local, oferecendo subsídios para tomada de decisão, manutenção preditiva e ajustes operacionais. Também serve como base para relatórios técnicos e exportação de dados históricos.

5.5.2- Modo de Testes de Desempenho-Offline

O módulo off-line foi desenvolvido para permitir testes e validação do painel de monitoramento da microrrede MIRAHV antes da integração com os equipamentos reais. Ele simula a leitura de dados, a transmissão ao hardware e a exibição gráfica dos principais parâmetros da microrrede em funcionamento.

Durante os testes, o operador pode carregar um arquivo CSV com dados simulados de geração, consumo e armazenamento de energia. Esses dados são apresentados em gráficos em tempo real, com atualização automática a cada 30 segundos, reproduzindo o comportamento do sistema em operação(Figura 5.7).

Figura 5.7- Teste de Desempenho-Offline.



Fonte: Autor.

O painel possui controles de reprodução que permitem iniciar, pausar ou avançar uma linha por vez na simulação. Essa funcionalidade é essencial para analisar o comportamento do software e do hardware embarcado em diferentes condições operacionais.

Além dos gráficos de potência, produção e eficiência, o módulo inclui uma simulação de transferência de dados para teste de armazenamento interno. O painel exibe o total de dados

transferidos ao hardware e distribui esse tráfego entre os principais componentes: eletrolisador, inversor de frequência, célula de carga, tanque de hidrogênio e carga(Figura 5.8).

Figura 5.8- Transferência de Dados.



Fonte: Autor.

5.5.3- Segurança e Acesso

Outro destaque importante da interface gráfica é o sistema de controle de acesso, que organiza os níveis de permissão em três perfis principais: administrador, técnico e operador. Cada perfil possui diferentes níveis de acesso às funções do software, garantindo segurança das informações e evitando alterações indevidas nos parâmetros críticos do sistema. As sessões são protegidas por autenticação de senha, e os dados podem ser armazenados localmente ou em servidores seguros com criptografia, alinhando-se às melhores práticas de segurança cibernética(Figura 5.9).

Figura 5.9- Tela de controle de Acesso.

H₂ MIRAHV

Login

Usuário:

Senha:

Entrar

Fonte: Autor.

Todas as sessões são protegidas por autenticação de senha e as informações são armazenadas de forma local ou em servidor com criptografia de dados, respeitando práticas de segurança cibernética.

Em síntese, o software MIRAHV representa uma plataforma tecnológica robusta, modular e segura, capaz de integrar controle, monitoramento e interface de forma eficiente. Seu desenvolvimento em Python, associado a uma arquitetura em camadas, módulos especializados e uma interface gráfica acessível, estabelece uma base sólida para o gerenciamento energético sustentável em regiões remotas. O sistema não apenas resolve os desafios operacionais imediatos, como também está preparado para futuras expansões e inovações no campo das energias renováveis.

CAPITULO 6- RESULTADOS

6.1- INTRODUÇÃO

Na sequência da abordagem do capítulo anterior — que tratou do desenvolvimento e da estrutura funcional do software responsável pelo monitoramento energético da microrrede da MIRAHV- este capítulo apresenta os principais resultados obtidos por meio de simulações, testes computacionais e validações em ambientes virtuais.

Com o desenvolvimento do modo offline do software MIRAHV, foi possível realizar testes de embarque em diferentes configurações de hardware, utilizando o VirtualBox como ferramenta de virtualização hardware. Esse módulo foi criado especificamente para permitir a análise de desempenho computacional, viabilizando a instalação e execução do software em cenários variados até se alcançar a configuração ideal. Durante esses testes, o software foi embarcado em máquinas virtuais com diferentes características, executando simulações que permitiram avaliar sua robustez e eficiência.

6.2- TESTES PARA ESPECIFICAÇÃO DO HARDWARE

A validação das especificações de hardware teve como objetivo identificar:

A configuração ideal para suportar operações mais complexas e cenários de maior demanda computacional.

Essa análise tomou como referência soluções de hardware disponíveis no mercado, tanto para aplicações em microrredes isoladas quanto para configurações compatíveis com nível industrial.

1. Foram realizados testes em laboratório(GSEI-UFPA) com as seguintes configurações do computador:

- Processador: AMD Ryzen 9 5900X (12 núcleos, 24 threads, 3.7 GHz)
- Memória RAM: 64 GB
- Armazenamento: 4 TB NVMe
- Sistema operacional: Windows 64 bits

2. Máquinas virtuais (VirtualBox):

- Sistema operacional: Linux-Debian (modo não gráfico, para reduzir o consumo de recursos).
- Configurações variadas de CPU e memória para simular diferentes condições de hardware.

3. O modo offline do software MIRAHV foi instalado e configurado nas máquinas virtuais para:

- Avaliar o desempenho em cenários com diferentes alocações de recursos.
- Executar o sistema em ambiente web, acessível via navegador por dispositivos como smartphones, notebooks e computadores de campo.
- Realizar operações de gerenciamento, cálculos de monitoramento e geração de relatórios.

Essa abordagem permitiu analisar a robustez e a eficiência do sistema em diferentes cenários, contribuindo para a definição dos requisitos mínimos e ideais de hardware para aplicação prática em campo.

6.2.1- Etapas dos Testes em Cenários com Máquinas Virtuais

O processo de validação da especificação do hardware iniciou-se com a criação das máquinas virtuais no VirtualBox. Essas máquinas foram configuradas com o sistema operacional Linux-Debian vista em modo não gráfico, com o objetivo de reduzir o consumo de recursos. Além disso, foram ajustadas as alocações de CPU e memória RAM em diferentes níveis, de forma a simular cenários variados de capacidade computacional.

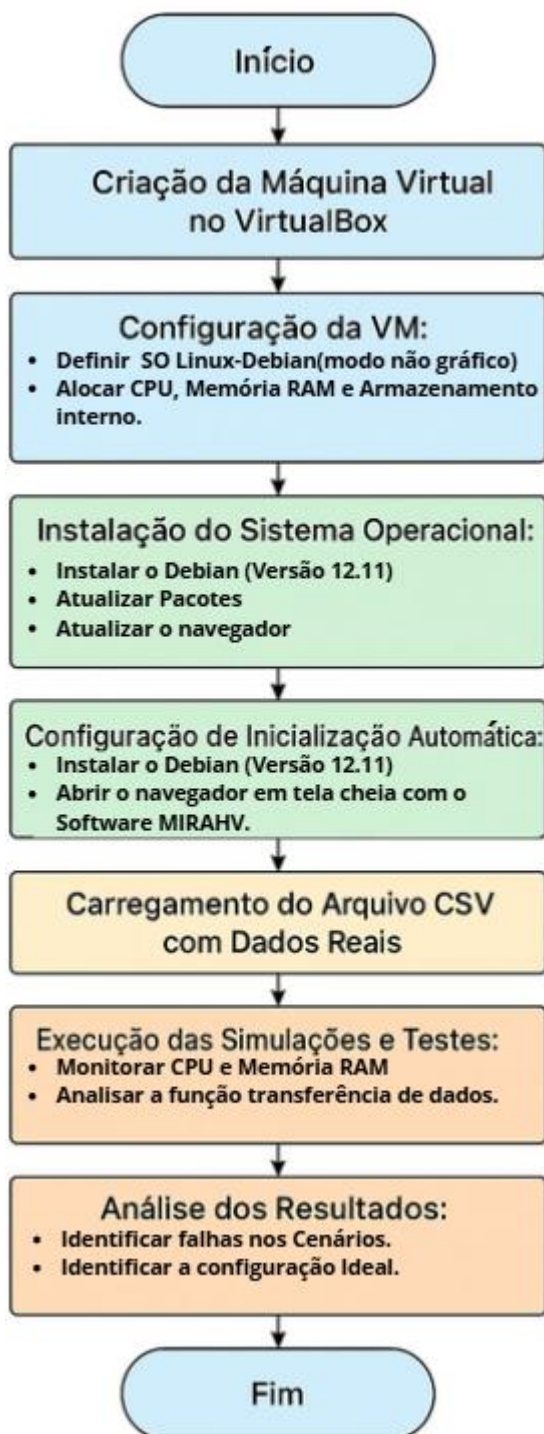
Após a criação e configuração das máquinas virtuais, procedeu-se à instalação do sistema operacional Debian. Foram realizadas as atualizações dos pacotes e a instalação de um navegador, garantindo um ambiente funcional e otimizado para o funcionamento do software MIRAHV. Na sequência, o software foi instalado e configurado para execução em ambiente web, facilitando o acesso às suas principais funcionalidades, como o monitoramento e a geração de relatórios.

Em seguida, foi realizada a configuração da inicialização automática das máquinas virtuais. O objetivo era garantir que, ao ligar o sistema, o login ocorresse de forma automática e o navegador fosse aberto em tela cheia diretamente na interface do software MIRAHV. Essa configuração assegura praticidade e agilidade no uso do sistema, especialmente em condições de campo, onde os recursos são mais limitados.

Por fim, o arquivo CSV contendo dados reais de seis meses de simulações computacionais e foi carregado no sistema, com leitura das variáveis a cada 30 segundos e nos filtros de 7 dias, 30 dias e 6 meses. O software realizou as simulações e os testes, monitorando o uso de CPU, memória RAM, a transferência dos dados em cada período especificado e a resposta geral do sistema. Esses testes possibilitaram gerar gráficos e relatórios que embasaram a análise final. Os resultados permitiram identificar a configuração ideal do hardware para a operação eficiente do MIRAHV em campo.

O fluxograma da Figura 6.1 apresenta as etapas do processo de validação da especificação do hardware, desde a criação das máquinas virtuais até a análise dos resultados obtidos com os testes realizados.

Figura 6.1- Fluxograma do Processo de Especificação do Hardware.



Fonte: Autor.

6.2.2- Descrição das simulações offline

Durante a simulação do arquivo CSV, são gerados automaticamente gráficos que ilustram o comportamento das principais variáveis do sistema, como geração fotovoltaica, consumo da carga, acionamento do eletrolisador, produção e consumo de hidrogênio, eficiência energética e estado de carga do armazenamento.

A análise desses gráficos permite compreender a dinâmica energética da microrrede, identificar padrões de funcionamento e verificar se os componentes atuam de forma coordenada e eficiente, especialmente quando o sistema é submetido a diferentes configurações computacionais em máquinas virtuais.

1- Análise dos Gráficos de Desempenho da Microrrede(Simulação de 7 dias)

Para avaliar o comportamento energético da microrrede fotovoltaica com armazenamento em hidrogênio verde, foi realizada uma simulação de sete dias utilizando o modo de testes offline do software MIRAHV. Essa simulação baseou-se em um conjunto de dados reais previamente registrados, com leituras a cada 30 segundos, gerando 17.281 linhas. A execução ocorreu a partir do carregamento de um arquivo CSV no ambiente virtual. O período simulado foi de 28 de outubro a 3 de novembro de 2024, e os dados foram processados pelo software a fim de reproduzir as condições operacionais da microrrede em tempo contínuo (Figura 6.2)

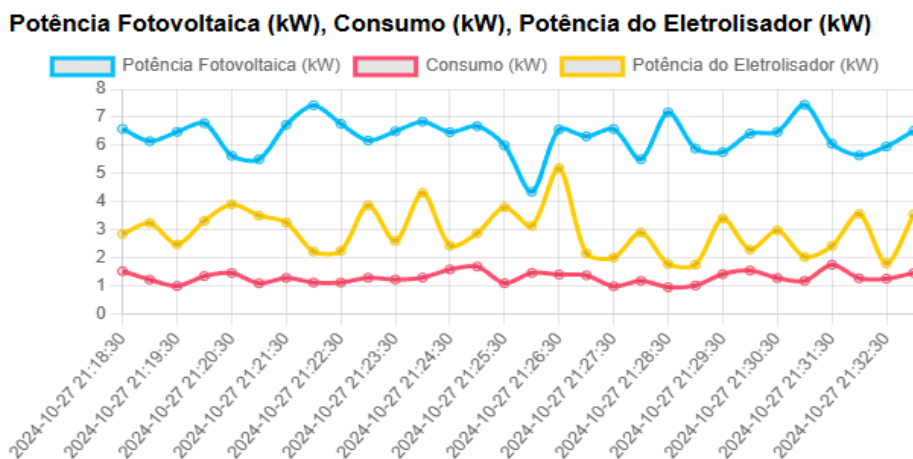
Figura 6.2– Interface do Painel de Testes Offline(Período de 7 dias)



Fonte: Autor.

-A Figura 6.3 apresenta o gráfico de desempenho do sistema MIRAHV no período de sete dias, exibindo a potência fotovoltaica gerada, o consumo da carga e o acionamento do eletrolisador.

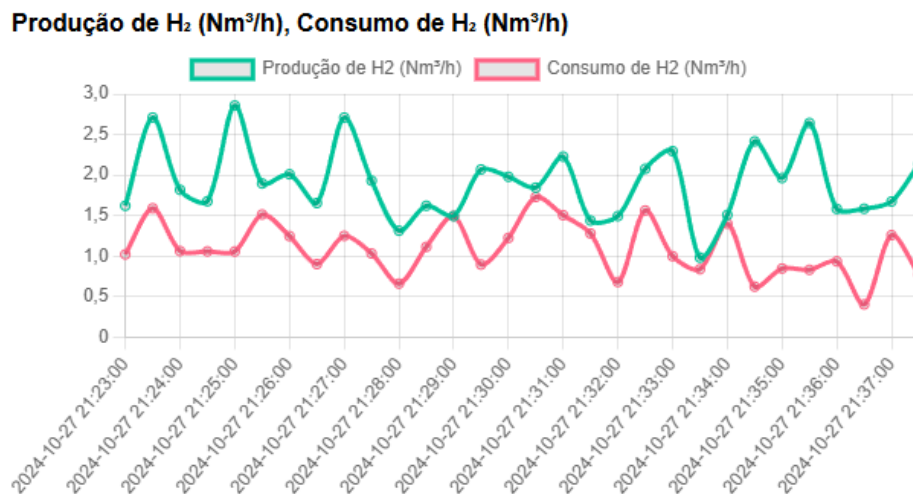
Figura 6.3– Gráficos das leituras das potências(7 dias)



Fonte: Autor.

-A Figura 6.4 ilustra a produção e o consumo de hidrogênio (Nm^3/h) ao longo dos sete dias de teste.

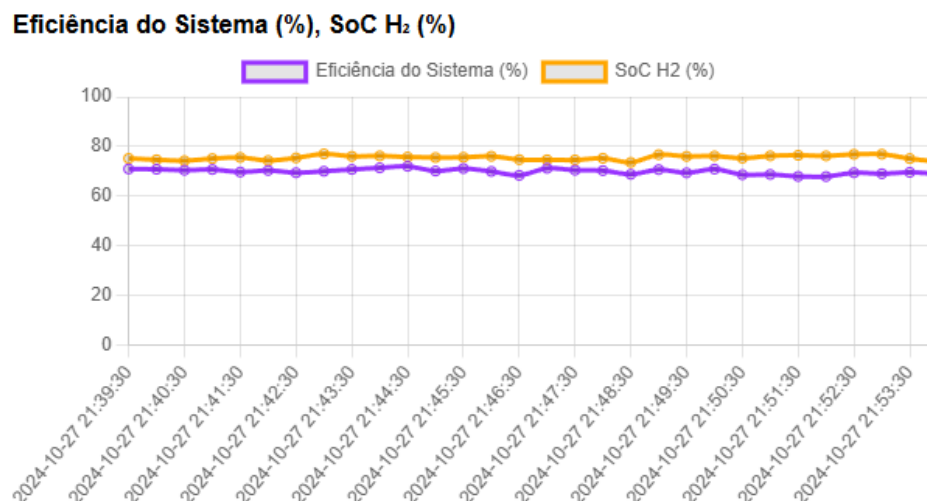
Figura 6.4 – Gráfico de Produção e Consumo de Hidrogênio(7dias)



Fonte: Autor.

- A Figura 6.5 mostra a eficiência do sistema (%) e o estado de carga (SoC) do armazenamento de hidrogênio ao longo do teste de sete dias.

Figura 6.5 – Gráfico de Eficiência do Sistema e SoC de H₂(7 dias)



Fonte: Autor.

2- Análise dos Gráficos de Desempenho da Microrrede(Simulação de 30 dias)

A Figura 6.6 apresenta a tela do modo de testes de desempenho offline do software MIRAHV, com o arquivo CSV carregado e filtro aplicado para o período de 30 dias, totalizando 83.521 linhas analisadas.

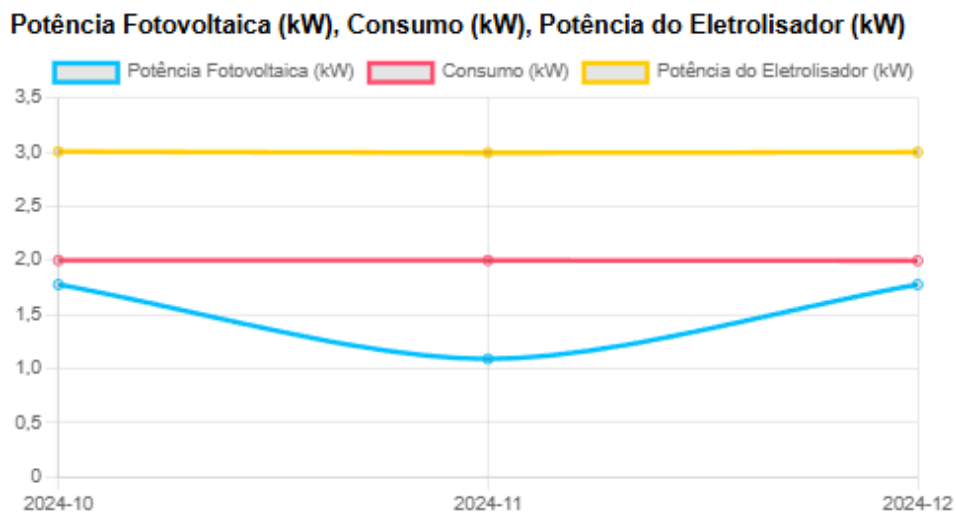
Figura 6.6– Interface do Painel de Testes Offline(Período de 30 dias)



Fonte: Autor.

-A Figura 6.7 apresenta o gráfico de desempenho do sistema MIRAHV no período de trinta dias, exibindo a potência fotovoltaica gerada, o consumo da carga e o acionamento do eletrolisador.

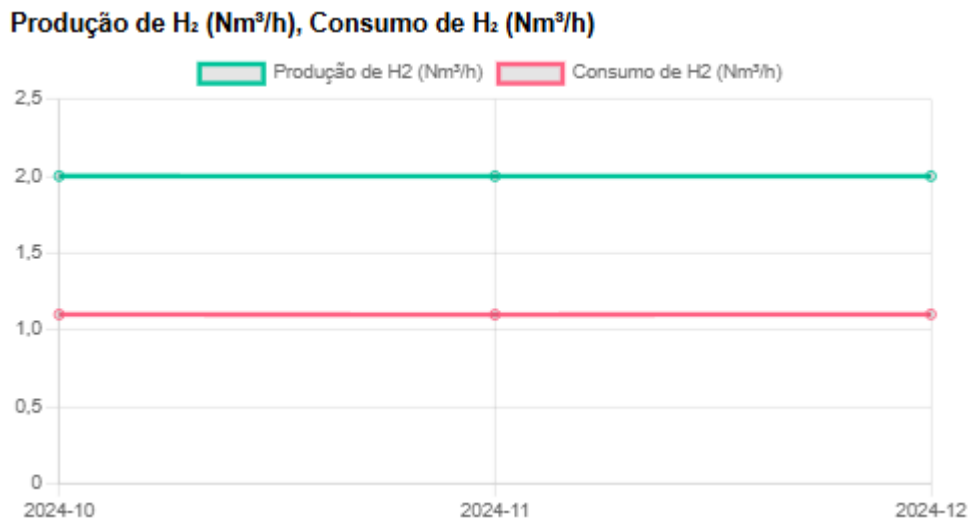
Figura 6.7– Gráficos das leituras das potências(30 dias)



Fonte: Autor.

-A Figura 6.8 ilustra a produção e o consumo de hidrogênio (Nm^3/h) ao longo dos trinta dias de teste.

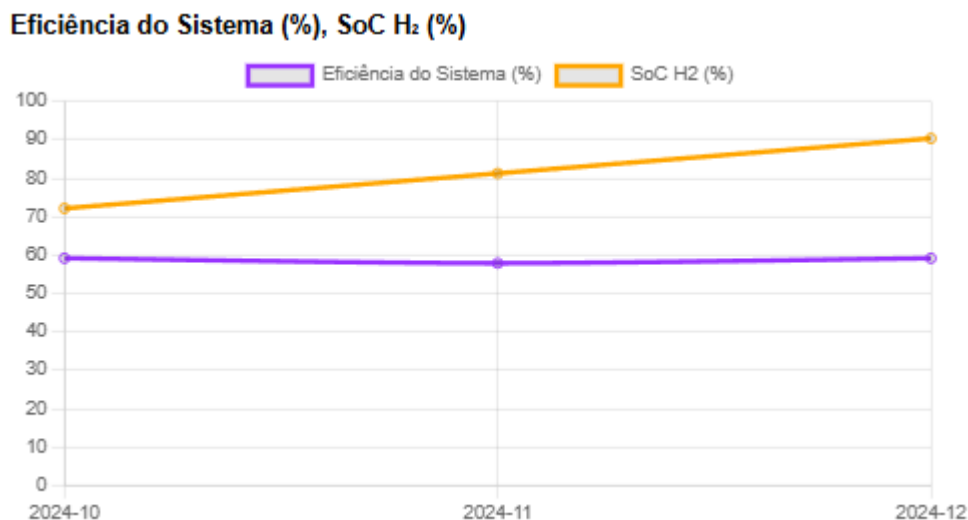
Figura 6.8 – Gráfico de Produção e Consumo de Hidrogênio(30 dias)



Fonte: Autor.

-A Figura 6.9 mostra a eficiência do sistema (%) e o estado de carga (SoC) do armazenamento de hidrogênio ao longo do teste de trinta dias.

Figura 6.9 – Gráfico de Eficiência do Sistema e SoC de H₂(30 dias)



Fonte: Autor.

3- Análise dos Gráficos de Desempenho da Microrrede(Simulação de 6 meses)

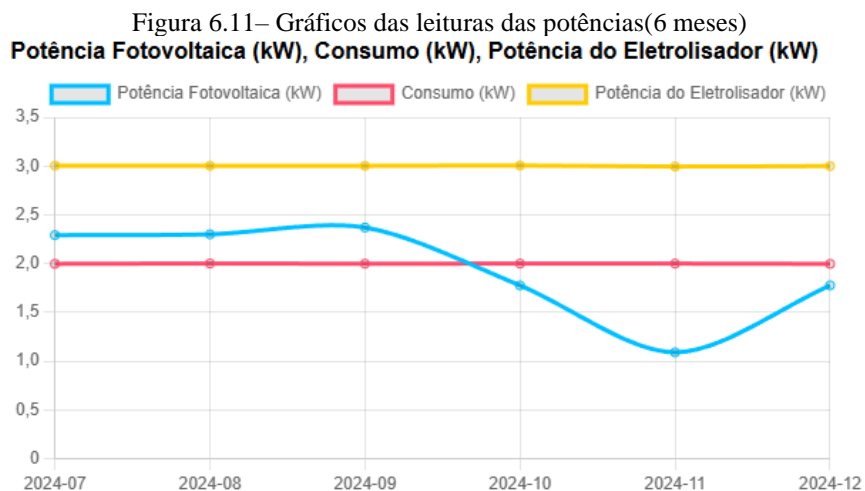
A Figura 6.10 apresenta o Painel MIRAHV operando no modo de testes de desempenho offline, com filtro aplicado aos dados do período de 01/07/2024 a 30/12/2024, totalizando 523.801 linhas analisadas.

Figura 6.10– Interface do Painel de Testes Offline(Período de 6 meses)



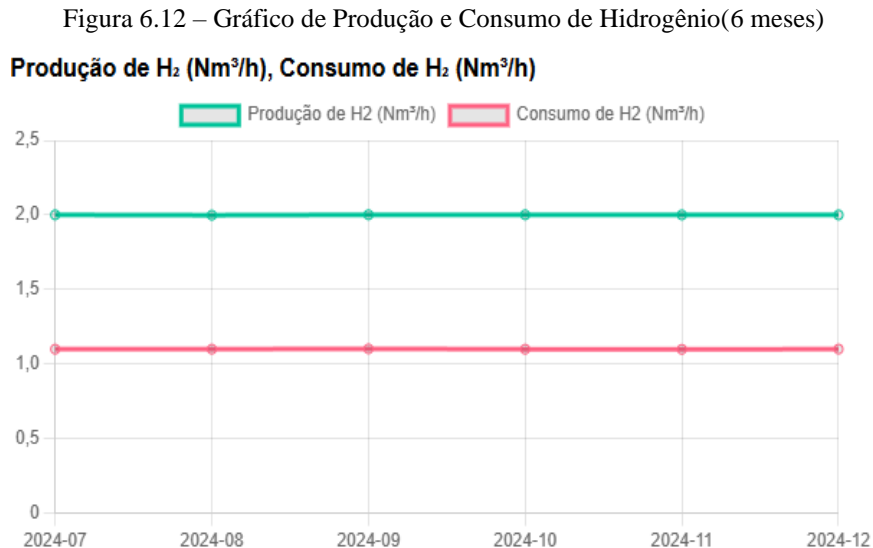
Fonte: Autor.

-A Figura 6.11 apresenta o gráfico de desempenho do sistema MIRAHV no período de seis meses, exibindo a potência fotovoltaica gerada, o consumo da carga e o acionamento do eletrolisador.



Fonte: Autor.

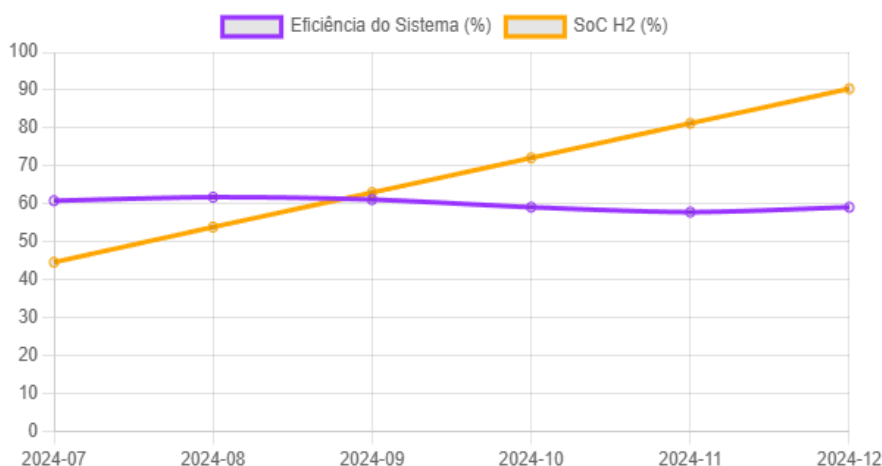
-A Figura 6.12 ilustra a produção e o consumo de hidrogênio (Nm^3/h) ao longo dos seis meses de teste.



Fonte: Autor.

-A Figura 6.5 mostra a eficiência do sistema (%) e o estado de carga (SoC) do armazenamento de hidrogênio ao longo do teste de seis meses.

Figura 6.13 – Gráfico de Eficiência do Sistema e SoC de H₂(6 meses)
Eficiência do Sistema (%), SoC H₂ (%)



Fonte: Autor.

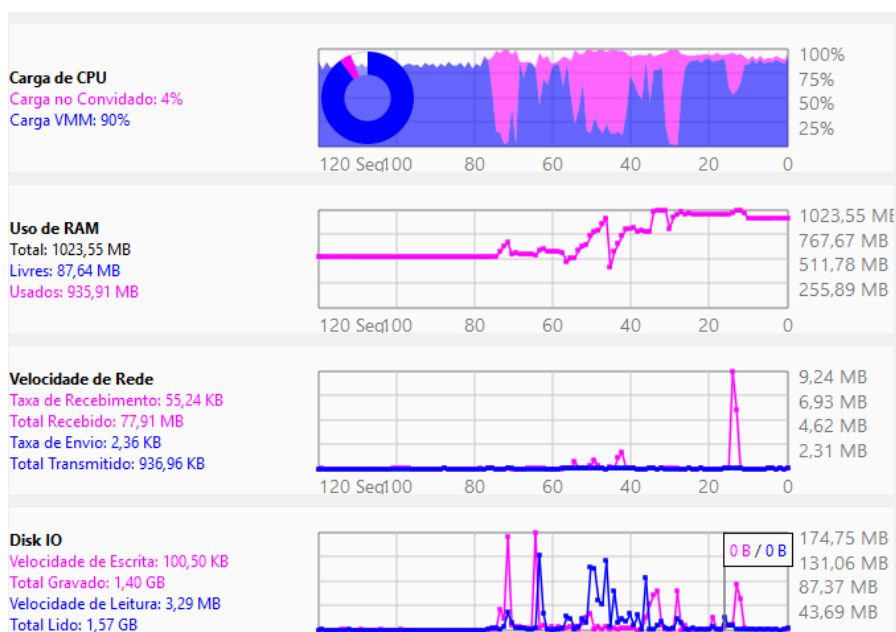
6.2.3- Cenários de Testes utilizando o Gerenciamento de Hardware do VirtualBox

Para avaliar o desempenho e a viabilidade de operação do software MIRAHV em ambientes com diferentes capacidades computacionais, foram definidos três cenários de teste por meio da criação e gerenciamento de máquinas virtuais (VMs) no VirtualBox. Esses cenários foram executados sobre o mesmo host físico, com variações intencionais nos recursos alocados a cada VM:

1. Cenário 1

No Cenário 1, a máquina virtual foi configurada com 1 núcleo virtual de CPU, 1 GB de memória RAM e 20 GB de armazenamento em HDD virtual, executando o sistema operacional Debian 11 em modo não gráfico. Essa configuração mínima visava simular um ambiente com recursos extremamente limitados. Durante os testes, observou-se que o sistema apresentava lentidão excessiva, além de interrupções recorrentes causadas por sobrecarga no uso de CPU e memória, que resultaram no reinício automático do sistema operacional. Tais instabilidades impossibilitaram a execução completa do teste de 7 dias, tornando esse cenário inadequado para qualquer aplicação prática (Figura 6.14).

Figura 6.14- Cenário 1

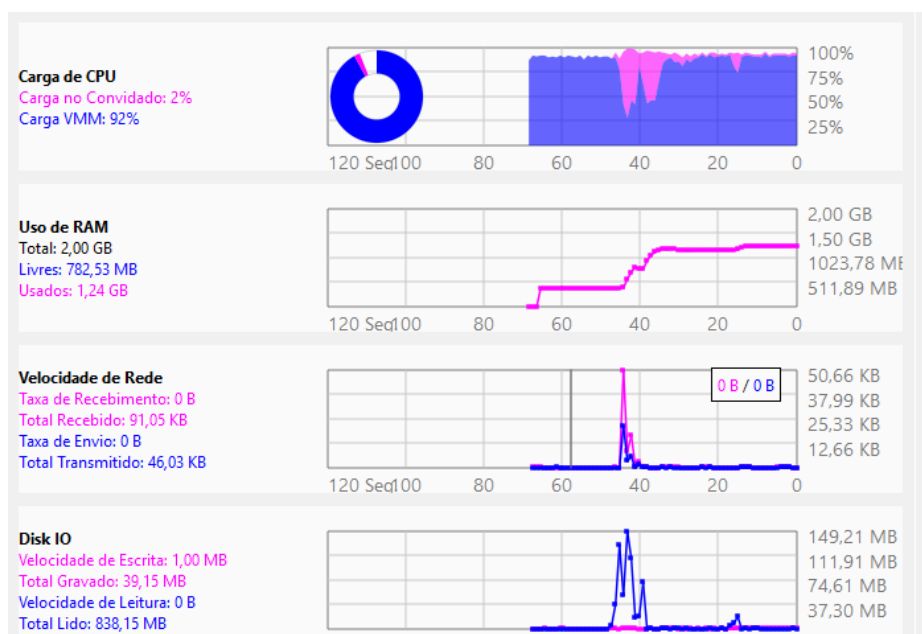


Fonte: Autor.

2. Cenário 2

O Cenário 2 trouxe uma leve melhoria, com 2 núcleos virtuais de CPU e 2 GB de RAM, mantendo o mesmo sistema operacional e 30 GB de armazenamento. Apesar de oferecer maior capacidade computacional que o primeiro cenário, os problemas de desempenho persistiram. A execução do software resultou novamente em travamentos e reinicializações espontâneas, especialmente durante picos de processamento causados pelo carregamento contínuo das variáveis e geração de gráficos. Dessa forma, esta configuração também foi considerada insuficiente para suportar o funcionamento mínimo do sistema MIRAHV em modo offline com dados em tempo real(Figura 6.15).

Figura 6.15- Cenário 2

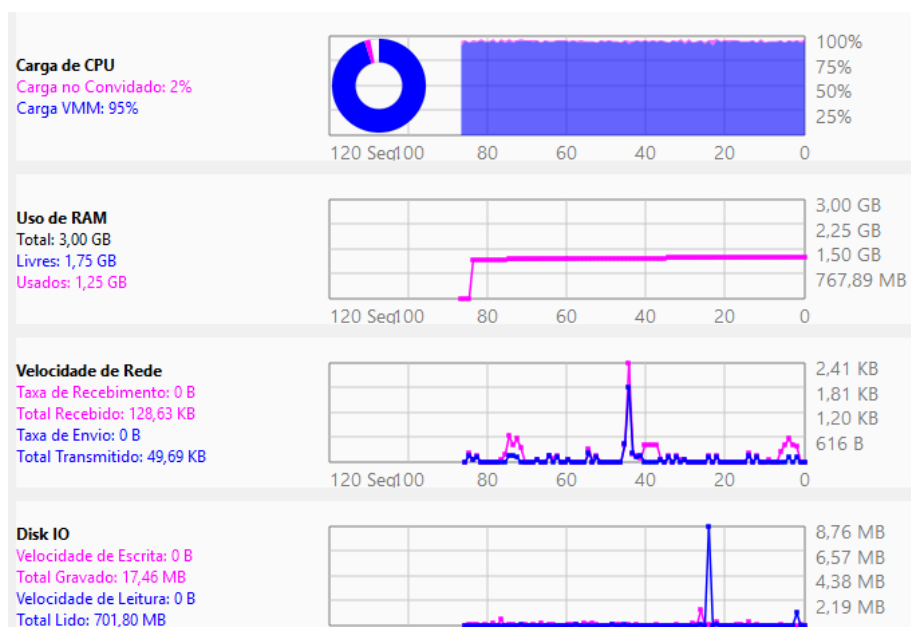


Fonte: Autor.

3. Cenário 3

O Cenário 3 aumentou os recursos para 3 núcleos virtuais de CPU e 3 GB de memória RAM, com 40 GB de armazenamento. Nessa configuração, o sistema apresentou comportamento estável durante os testes de 7 dias, completando o ciclo de simulação sem travamentos. No entanto, ao se estender o teste para períodos maiores (como 30 dias), começaram a surgir novamente problemas de lentidão e sobrecarga de CPU, indicando que, apesar de funcional para testes de curta duração, esta configuração ainda não garante robustez para aplicações contínuas ou em ambientes operacionais mais exigentes (Figura 6.16).

Figura 6.16- Cenário 3

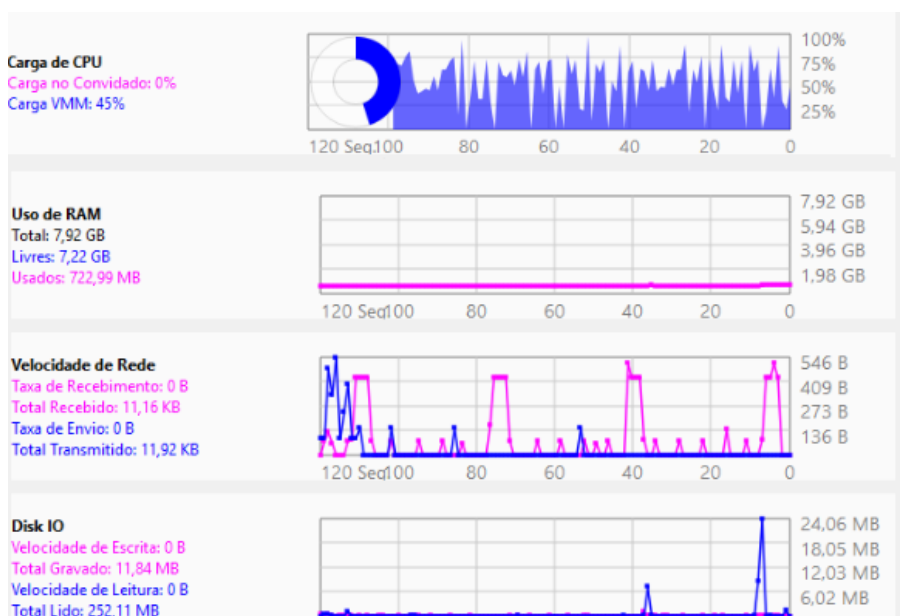


Fonte: Autor.

4. Cenário 4

Por fim, o Cenário 4 foi definido com 4 núcleos virtuais de CPU, 8 GB de memória RAM e 80 GB de armazenamento virtual, mantendo o sistema Debian 11 em modo não gráfico. Essa configuração demonstrou estabilidade plena durante todas as simulações realizadas — tanto nos testes de 7 dias quanto nos de 30 dias e até mesmo 6 meses. O uso de CPU manteve-se dentro de limites aceitáveis, a memória RAM não atingiu gargalos, e o desempenho geral do sistema foi fluido e consistente. Além disso, não foram observados travamentos, interrupções ou reinicializações forçadas, o que tornou esse cenário o modelo ideal de configuração mínima recomendada para o uso do software MIRAHV em campo, especialmente quando se deseja acesso contínuo via navegador e execução confiável de relatórios e gráficos analíticos (Figura 6.17).

Figura 6.17- Cenário 4



Fonte: Autor.

6.3- VALIDAÇÃO DA ESPECIFICAÇÃO DO HARDWARE

A partir da análise do cenário 4 de utilização de recursos na máquina virtual com o software MIRAHV embarcado, verificou-se que os requisitos de uso de CPU, memória RAM e armazenamento interno (Disk I/O) em rede foram plenamente atendidos. A carga do processador manteve-se estável, o consumo de memória foi mínimo frente à capacidade total, e os acessos ao disco e à rede demonstraram baixo impacto no desempenho geral. Esses resultados comprovam a viabilidade da execução do Software MIRAHV em ambientes embarcados com configurações modestas, assegurando sua aplicação eficiente em cenários remotos.

CAPITULO 7- CONCLUSÕES

7.1- CONSIDERAÇÕES FINAIS

A dissertação apresentou a concepção, desenvolvimento e validação de uma plataforma de hardware e software para embarque do sistema de monitoramento e controle da microrrede fotovoltaica com armazenamento em hidrogênio verde (MIRAHV).

A especificação de hardware foi realizada com base em critérios técnicos rigorosos, considerando requisitos ambientais, capacidade de processamento, segurança cibernética e viabilidade de integração com os equipamentos da microrrede.

O desenvolvimento do software MIRAHV foi concebido em arquitetura modular e flexível, utilizando tecnologias livres e linguagem Python. O sistema implementado possibilita o monitoramento em tempo real das variáveis da microrredes, o armazenamento histórico dos dados operacionais e a execução de algoritmos de controle e proteção. O software incorpora também funcionalidades para simulações e testes de desempenho, contribuindo para a validação da plataforma embarcada e para a otimização do uso dos recursos computacionais disponíveis.

Os testes realizados em diferentes cenários de configuração de hardware, por meio de simulações em ambiente virtual, comprovaram a viabilidade técnica da solução proposta e identificaram a melhor configuração para o embarque da aplicação, equilibrando desempenho, consumo de recursos e estabilidade do sistema. Essa solução demonstra potencial de escalabilidade e replicabilidade para outras localidades isoladas que busquem alternativas sustentáveis e eficientes para o fornecimento de energia elétrica.

Por fim, os resultados obtidos reforçam a contribuição desta pesquisa no avanço de plataformas embarcadas para microrredes 100% renováveis e abrem caminho para novos aprimoramentos, como a incorporação de inteligência artificial, sistemas de comunicação avançados e funcionalidades adicionais que ampliem a robustez e a autonomia do sistema. O trabalho contribui, assim, para o fortalecimento das microrredes como solução estratégica para a transição energética em regiões remotas.

7.2- TRABALHOS FUTUROS

Como perspectivas para trabalhos futuros, destacam-se:

- A instalação física e o acompanhamento do desempenho do sistema desenvolvido na planta piloto da UHE Belo Monte, permitindo validar as condições reais de operação e ajustar parâmetros finos do hardware e do software;
- A evolução da arquitetura de controle, incorporando algoritmos de inteligência artificial para previsão de carga e geração, otimizando ainda mais o uso dos recursos energéticos e aumentando a autonomia do sistema;
- A aplicação da metodologia proposta para outros modelos de microrredes isoladas, adaptadas a diferentes perfis geográficos, climáticos e socioeconômicos, incluindo comunidades ribeirinhas, ilhas costeiras e áreas rurais remotas;
- O fortalecimento das estratégias de cibersegurança e comunicação em redes industriais, garantindo a resiliência do sistema frente a falhas ou ataques cibernéticos.

Conclui-se que o projeto MIRAHV, ao aliar inovação tecnológica e compromisso social, representa uma importante contribuição para o avanço da eletrificação sustentável, abrindo caminho para novas pesquisas e aplicações que beneficiem tanto a academia quanto a sociedade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Cao; Yu, I.K.; Xiong, X.; Tsang, D.C.; Zhang, S.; Clark, J.H.; Hu, C.; Ng, Y.H.; Shang, J.; Ok, Y.S. Biorenewable hydrogen production through biomass gasification: A review and future prospects. *Environ. Res.* 2020, 186, 109547.

Tanvir Hasan, K. Emami, Rakibuzzaman Shah, N. Hasan, et. al., “A Study on Green Hydrogen-based Isolated Microgrid,” in *Energy Reports*, vol. 8, pp. 259-267, 2022, (SJR Q1 0.89).

NEOENERGIA. Microrredes: energia para regiões mais afastadas dos centros urbanos. Disponível em: <https://www.neoenergia.com/w/microrredes-energia-para-regioes-mais-afastadas-dos-centros-urbanos>. Acesso em: 20 de fevereiro de 2025.

ANDRADE, T. A. Energia e desenvolvimento: alternativas energéticas para áreas isoladas da Amazônia. *Revista Presença Geográfica*, n. 4, p. 45-58, 2010.

SILVA, Jean Carlos Cardozo da. Sistema supervisorio para monitoramento térmico de motores elétricos. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Elétrica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2019. Disponível em: https://riut.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/8282/1/CT_COEAU_2019_1_03.pdf. Acesso em: 19 março de 2025.

LIMA, Luiz Alberto Oliveira. Automação de processos com linguagem Ladder e sistemas supervisorios. Rio de Janeiro: LTC, 2014.

NOERGAARD, Tammy. *Embedded Systems Architecture: A Comprehensive Guide for Engineers and Programmers*. Elsevier, 2012.

BRASIL. Câmara de Comercialização de Energia Elétrica – CCEE. Conta de consumo de combustíveis (CCC). Disponível em: *Boletim InfoCCC*. 2023. Acesso em: 15 de dezembro de 2024.

BORGES, Tiago Alves. Importância, aplicação e desenvolvimento de um sistema de controle, supervisão e aquisição de dados. 2018. 44 f. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) – Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas, Universidade Federal de Ouro Preto, João Monlevade, 2018. Disponível em: *Monografias UFOP*. Acesso: 10 de dezembro de 2024.

MENDES, João da Silva. Especificações da arquitetura SCADA para aquisição de dados. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.

SILVA, R.; OLIVEIRA, J. Aplicação do protocolo PROFINET na automação industrial. Revista Brasileira de Automação Industrial, São Paulo, v. 10, n. 2, p. 45-60, 2020.

MENDES, D. R.; SILVA, J. F. Ethernet industrial: protocolo Ethernet no ambiente industrial. Anais do Congresso de Engenharia Elétrica da UTFPR, Cornélio Procópio, v. 12, p. 1-10, 2019. Disponível em: Riut UTFPR. Acesso em: 15 de dezembro de 2024.

MODBUS ORGANIZATION. Modbus Organization. Disponível em: <https://www.modbus.org/>. Acesso em: 15 de dezembro de 2024.

DNP USERS GROUP. Overview of DNP3 Protocol. Disponível em: <https://www.dnp.org/About/Overview-of-DNP3-Protocol>. Acesso em: 15 de dezembro de 2024.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION (IEC). IEC 61850 – Communication networks and systems for power utility automation. Genebra: IEC, 2023.

NETTO, F. S. Aplicação do protocolo GOOSE da norma IEC 61850 em sistemas de automação de subestações. 2012.

OPC FOUNDATION. OPC Unified Architecture Specification. Disponível em: <https://opcfoundation.org/developer-tools/specifications-unified-architecture>. Acesso em: 15 de dezembro de 2024.

RNP – Rede Nacional de Ensino e Pesquisa. A arquitetura TCP/IP e sua aplicação em redes de computadores. 2024. Disponível em: <https://www.rnp.br>. Acesso em: 15 de dezembro de 2024.

FRADEN, Jacob. Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs, and Applications. 3. ed. New York: Springer, 2004.

BRANQS AUTOMAÇÃO. Introdução à Automação Industrial. Disponível em: https://www.portaldoeletrodomestico.com.br/cursos/eletricidade_eletronica/automacao/cursosIntroducaoAutomacaoIndustrial.pdf. Acesso em: 15 de dezembro de 2024.

SANTOS, J. A.; SOUZA, M. B. Automação e proteção de sistemas elétricos com IEDs. 2. ed. São Paulo: Editora Técnica, 2015.

BOYER, Stuart A. SCADA: Supervisory Control and Data Acquisition. 3. ed. Research Triangle Park, NC: International Society of Automation (ISA), 2009.

KRUTZ, Ronald L. Securing SCADA systems. Indianapolis: Wiley Publishing, 2006.

DANEELS, A.; SALTER, W. What is SCADA?. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ACCELERATOR AND LARGE EXPERIMENTAL PHYSICS CONTROL SYSTEMS, 1999, Disponível em: <https://accelconf.web.cern.ch/ica99/papers/wc1p01.pdf>. Acesso em: 15 de dezembro de 2024.

- LIRA, A. B. Integração de fontes renováveis ao Sistema Elétrico: desafios e perspectivas. São Paulo: Editora Técnica de Energia, 2010.
- FALCÃO, D. M. Redes elétricas inteligentes: conceitos e desafios. *Revista Brasileira de Energia*, v. 15, n. 2, p. 25-40, 2009.
- TANENBAUM, Andrew S.; AUSTIN, Todd. *Organização Estruturada de Computadores*. 6. ed. São Paulo: Pearson, 2013.
- STALLINGS, William. *Arquitetura e Organização de Computadores*. 10. ed. São Paulo: Pearson, 2016.
- PATTERSON, D. A. *Arquitetura de computadores: uma abordagem quantitativa*. 2. ed. São Paulo: Editora Pearson, 2000.
- SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES. SEL-3555: RTAC – Real-Time Automation Controller: Schweitzer Engineering Laboratories. Disponível em: <https://selinc.com/pt/products/3555/>. Acesso em: 15 de dezembro de 2024.
- ABB. SSC 600: Sistema de Supervisão e Controle. 1. ed. ABB, Disponível em: <https://new.abb.com/medium-voltage/digital-substations/campaigns/smart-substation-control-and-protection-ssc600>. Acesso em: 15 de dezembro de 2024.
- DECMANN, D. Sistemas de controle em microrredes. *Revista Brasileira de Energias Renováveis*, v. 4, n. 1, p. 25–36, 2015.
- DIAS, B. G. *Geração distribuída de energia elétrica*. Rio de Janeiro: Synergia, 2005.
- ALTIN, M.; SEFA, İ. Control strategy for a grid-connected hybrid renewable energy system. *Renewable Energy*, v. 44, p. 305–314, 2012.
- ALTIN, M.; EYIMAYA, S. S. Control strategies in microgrids: A review. *Journal of Renewable Energy Systems*, v. 9, n. 2, p. 115–128, 2021.
- OLIVARES, D. E. et al. Trends in microgrid control. *IEEE Transactions on Smart Grid*, v. 5, n. 4, p. 1905–1919, 2014.
- SETOR ELÉTRICO. Proteção e automação em redes de distribuição ativa. *Revista O Setor Elétrico*, São Paulo, n. 120, p. 25–32, 2025.
- VASQUEZ, J. C. Control strategies for microgrid integration. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 64, n. 9, p. 7038–7045, 2017.
- FALCÃO, D. M. Redes Elétricas Inteligentes (Smart Grids). *Revista Eletricidade Moderna*, v. 42, n. 8, p. 10–18, 2009.
- EPRI – ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE. *The integrated grid: Realizing the full value of central and distributed energy resources*. Palo Alto, 2008.

- FORTES, M. Redes inteligentes de energia: A evolução da distribuição elétrica. *Revista Infraestrutura e Logística*, São Paulo, n. 12, p. 44–49, 2017.
- Hatziargyriou, N. (2014). *Microgrids: Architectures and Control*. John Wiley & Sons.
- Lasseter, R. H., & Piagi, P. (2004). Microgrid: A Conceptual Solution. *Proceedings of the 35th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference (PESC)*, 4285–4290.
- Colson, C. M., & Nehrir, M. H. (2012). Design and Implementation of Microgrid SCADA Platform. *Advanced Materials Research*, 732–733, 1358–1363.
- PEÇAS, A.; GALDINO, A. M.; OLIVEIRA, R. Estratégias de controle em comunidades isoladas da Amazônia. *Revista de Energias Renováveis da Amazônia*, v. 7, n. 2, p. 88–96, 2020.
- LASSETER, R. H. Microgrids. In: *Proceedings of the IEEE Power Engineering Society Winter Meeting*, 2002.
- HATZIARGYRIOU, N. (Ed.). *Microgrids: Architectures and control*. Hoboken: Wiley-IEEE Press, 2014.
- ORACLE. Oracle VM VirtualBox. Disponível em: <https://www.virtualbox.org/>. Acesso em: 24 maio 2025.
- PYTHON SOFTWARE FOUNDATION. Python Programming Language. Disponível em: <https://www.python.org/>. Acesso em: 24 maio 2025.
- Schmidt, R. C. (2011). *Redes industriais de comunicação: Fundamentos, sistemas e aplicações*. São Paulo: Érica.
- BARATTA, A. J.; SANTOS, J. C.; SOUZA, L. P. O papel do hidrogênio verde no armazenamento de energia: estado da arte e desafios. *Energia na Transição*, v. 5, n. 2, p. 134-158, 2023.
- IRENA – AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA RENOVÁVEL. Implantação de minirredes: prevalência de geradores a diesel e sistemas baseados em combustíveis fósseis em 19.000 minirredes que atendem 47 milhões de pessoas. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, relatório do *ESMAP* do Banco Mundial, 2022.