

**CENTRO ESTADUAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA PAULA
SOUZA
ETEC TEREZA APARECIDA CARDOSO NUNES DE OLIVEIRA
ENSINO TÉCNICO EM ELETRÔNICA ARTICULADO COM ENSINO
MÉDIO**

**ARTHUR YURI SOARES FRANÇA
CAUE DE LIMA LOMBARDO
GABRIEL DE CARVALHO BARROS
KHALIL MAGALHÃES SILVEIRA
PAULO MATEUS JUSTINIANO MOREIRA ARAÚJO
RONALDO NEYMAR ROMERO ESPEJO**

MONITORAMENTO DE ENERGIA ELÉTRICA AUTOMATIZADO

**São Paulo – SP
2025**

**CENTRO ESTADUAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA PAULA
SOUZA**

Etec TEREZA APARECIDA CARDOSO NUNES DE OLIVEIRA

**ARTHUR YURI SOARES FRANÇA
CAUE DE LIMA LOMBARDO
GABRIEL DE CARVALHO BARROS
KHALIL MAGALHÃES SILVEIRA
PAULO MATEUS JUSTINIANO MOREIRA ARAÚJO
RONALDO NEYMAR ROMERO ESPEJO**

MONITORAMENTO DE ENERGIA ELÉTRICA AUTOMATIZADO

Projeto apresentado como requisito da
disciplina Desenvolvimento de Trabalho de
Conclusão de Curso do Técnico de Nível
Médio em Eletrônica Profas Adriana
Cristina Ruescas e Daniele Vasquez
Quiero

**São Paulo – SP
2025**

**ARTHUR YURI SOARES FRANÇA
CAUE DE LIMA LOMBARDO
GABRIEL DE CARVALHO BARROS
KHALIL MAGALHÃES SILVEIRA
PAULO MATEUS JUSTINIANO MOREIRA ARAÚJO
RONALDO NEYMAR ROMERO ESPEJO**

Projeto apresentado como requisito da disciplina Desenvolvimento de Trabalho de Conclusão de Curso do Técnico de Nível Médio em Eletrônica Profas Adriana Cristina Ruescas e Daniele Vasquez Quiero

Data: _____

Resultado: _____

BANCA EXAMINADORA

Prof. _____

Assinatura _____

Prof. _____

Assinatura _____

Prof. _____

Assinatura _____

DEDICATÓRIA

Dedicamos este trabalho aos nossos pais e familiares, aos colegas, e aos professores que nos acompanharam durante essa jornada acadêmica.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos primeiramente a todos que nos apoiaram, por nos dar força e sabedoria. Aos nossos familiares pelo suporte e incentivo, às professoras Daniele e Adriana pela orientação, à ETEC Tereza Aparecida Cardoso Nunes de Oliveira pela infraestrutura, e a todos os colegas que colaboraram diretamente ou indiretamente para a realização deste projeto.

“A tecnologia move o mundo, mas é a consciência no seu uso que o transforma.” — Albert Einstein

RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um sistema de monitoramento de energia automatizado baseado em Internet das Coisas (IoT), voltado ao ambiente residencial. O projeto visa oferecer uma solução acessível e eficiente para acompanhar, em tempo real, o consumo de energia elétrica, por meio do uso de sensores de corrente e tensão, microcontroladores e uma plataforma de visualização remota. Além disso, busca-se detectar padrões de consumo, identificar desperdícios e fornecer dados relevantes para tomada de decisões voltadas à eficiência energética. O protótipo desenvolvido foi testado em ambiente controlado, demonstrando a viabilidade da solução e contribuindo para o debate sobre sustentabilidade e uso consciente dos recursos.

Palavras-Chave: Eficiência Energética. Internet das Coisas. Monitoramento. Energia Residencial. Sustentabilidade.

ABSTRACT

This work presents the development of an automated energy monitoring system based on the Internet of Things (IoT), aimed at the residential environment. The project aims to offer an accessible and efficient solution to monitor electricity consumption in real time, through the use of current and voltage sensors, microcontrollers, and a remote visualization platform. Furthermore, it seeks to detect consumption patterns, identify waste, and provide relevant data for decision-making focused on energy efficiency. The developed prototype was tested in a controlled environment, demonstrating the viability of the solution and contributing to the debate on sustainability and the conscious use of resources.

KEYWORDS: ENERGY EFFICIENCY. INTERNET OF THINGS. MONITORING. RESIDENTIAL ENERGY. SUSTAINABILITY.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Correspondência de Grandezas JSY-MK-194GT vs PRODIST (Faturamento e Monitoramento).....	36
Tabela 2 - Indicadores de Qualidade do Produtos de PRODIST em relação com JSY-MK - 194G (modulo 8 PRODIST).....	42
Tabela 3 - Especificações Técnicas do do ESP 32-WROOM-32.....	47
Tabela 4 -Correspondência: Código (esp.32) vs PRODIST (ANEEL).....	75
Tabela 5 - Interpretação de Indicadores de qualidade de energia (QEE).....	76

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Placa de Desenvolvimento WEMOS D1 Mini ESP32	51
Figura 3.2 - Display OLED (SSD1306, 0,964).....	52
Figura 3.3 - Sensor de medição de Energia JSY-MK-194G.....	52
Figura 3.4 - Fonte de Alimentação Mean Well APV-*-S (8W,5V).....	53
Figura 3.5 - Fluxograma de Comunicação do Circuito.....	54
Figura 3.6 - Diagrama Esquemático de Circuito.....	58

Figura 3.7 - Diagrama Pictorial de Painel de Montagem.....	61
Figura 3.8 - Principais Componentes no Painel.....	67
Figura 3.9 - Componentes Principais Ligados ao Painel.....	67
Figura 3.10 - Caixa de Proteção (Versão 1 - Aberta).....	68
Figura 3.11 - Caixa de Proteção (Versão Fechada).....	68
Figura 3.12 - Vista Interna da Caixa (Versão 1).....	69
Figura 3.13 - Vista Interna da Caixa (Versão Final).....	69
Figura 3.14 - Projeto Finalizado com Painel de Exibição.....	70
Figura 3.15 - Prototipo em Exibição na Feira Tecnológica.....	70
Figura 3.16 - Prototipo em Teste de Medição (fora do painel).....	71
Figura 3.17 - Dashboard do Sistema Antes da Medição (T0).....	71
Figura 3.18 - Dashborard do Sistema Após Medição de 24 horas.....	72

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 O problema	13
1.2 Objetivos	14
1.2.1 Objetivo Geral	15
1.2.2 Objetivos Específicos.....	15
1.3 Delimitação do Estudo	16
1.4 Relevância do Estudo	16
1.5 Organização do Trabalho.....	17
2 REVISÃO DA LITERATURA..	18
2.1 Problema Energético e Justificativas.....	17
2.2 Padrões Técnicos e Regulamentares.....	17
2.3 Aplicação do Módulo JSY-MK-194G Em Projetos de Monitoramento de Energia Elétrica com Norma da PRODIST.....	19
2.3.1 Parâmetros Técnicos Essenciais.....	21
2.3.2 Interface de Comunicação.....	22
2.3.3 Dados de Saída de Medição (Registro Modbus).....	23
2.3.4 Flexibilidade para Monitoramento de Baixo Custo e Necessidade de Gateway.....	23
2.3.5 Fundamentos do PRODIST: Requisitos para Medição e Qualidade de Energia	24
2.3.5.1 Módulo1: Glossário de Termos Técnicos Relevantes.....	24
2.3.5.2 Módulo 5: Sistemas de Medição e Procedimentos de Leitura.....	24
2.3.5.3 Módulo 8: Qualidade de fornecimento de Energia Elétrica (qualidade de produto).....	28
2.4 Análise da Capacidade do JSY-MK-194G em relação aos requisitos PRODIST.....	31
2.4.1 Medição de Parâmetros Elétricos Essenciais.....	32
2.4.2 Capacidade de Coleta de Dados e Comunicação.....	32
2.4.3 Conclusão sobre a Adequação do JSY-MK-194G para tarefas PRODIST.....	33
2.5 Cálculos prioritários de PRODIST e sua aplicação no JSY-MK-194G.....	34

2.5.1 Cálculos de Faturamento e Compensação de Energia.....	35
2.5.2 Cálculos de Perdas Técnicas (módulo 7).....	37
2.5.3 Cálculos Indicadores de Qualidade e Produtos (módulo 8).....	38
2.6 Pertinência dos Cálculos para um Projetos e Representação em Ferramentas IOT	44
2.6.1 Relevância para o Projeto.....	44
2.6.2 Integração com Ferramentas IOT.....	45
2.7 Conectividade IOT	49
3 DESENVOLVIMENTO.....	50
3.1 Visão Geral dos Componentes do Projeto	51
3.2 Principais Diagramas do Projeto	54
3.2.1 Fluxograma de Comunicação do Circuito.....	54
3.2.1.1 Linguagem Utilizada.....	56
3.2.2 Diagrama Esquemático do Circuito.....	58
3.2.2.1 Exibição de Dados.....	60
3.2.3 Diagrama Pictorial do Painel de Montagem.....	61
3.2.3.1 Segurança Elétrica (Conformidade e Mitigação de Riscos).....	61
3.2.3.2 Análise das Conexões.....	63
3.2.4 Componentes não Centrais.....	64
3.3 Montagem, teste, calibração e Projeto inicial	66
3.3.1 Montagem física com passos resumidos.....	66
3.3.2 Critérios de Aceitação.....	66
3.3.3 Planejamento de Testes em bancada e em campo.....	66
3.3.4 Protótipo e Evolução do projeto.....	67
3.3.5 Aplicação observável em protótipo e sua Progressão.....	67
4 RESULTADOS E ANÁLISE.....	72
4.1 Custo-benefício, Fundamentação e Capacidade de Estimativa, Fundamentação e Robustez Metodológica.....	73
4.2 Limitações Metrológicas e Operacionais de Implementação	73
4.3 Análise dos Desafios Operacionais.....	74
4.4 Conclusão Final Baseada nos Resultados e no Fluxo de Medição	77
4.4.1 Validação do Fluxo de Medição e Persistência de Dados.....	78
4.4.2 Utilidade Diagnóstica de QEE e o Fator de Potência	78

4.4.3 Considerações Finais sobre Implementação.....	79
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS;;.....	79
REFERÊNCIAS	80
APÊNDICE A - CÓDIGO FONTE DO SISTEMA DE MONITORAMENTO.....	83

1 INTRODUÇÃO

A crescente demanda por energia elétrica, impulsionada pelo avanço econômico e pelo crescimento populacional, impõe desafios significativos quanto à eficiência e à sustentabilidade no uso dos recursos. Nesse contexto, tecnologias de monitoramento e gestão de consumo ganham importância, e a Internet das Coisas (IoT) surge como solução estratégica. Ao integrar dispositivos conectados capazes de coletar, processar e transmitir dados em tempo real, a IoT oferece uma abordagem dinâmica para o gerenciamento energético, possibilitando a detecção de desperdícios, a análise de padrões de uso e a implementação de estratégias de eficiência que reduzem custos e impactos ambientais.

Este trabalho propõe o desenvolvimento de um protótipo funcional para monitoramento de energia elétrica baseado em IoT, testado em ambiente controlado. A metodologia envolve revisão bibliográfica sobre tecnologias de monitoramento e padrões técnicos, seguida pela construção e avaliação do sistema, considerando potencialidades, limitações e sugestões de aprimoramento.

No Brasil, padrões regulatórios orientam a qualidade da energia elétrica. O Módulo 8 do PRODIST, da ANEEL, define critérios como variações de tensão, fator de potência, harmônicos, desequilíbrios, flutuações e frequência. A observância desses parâmetros assegura a confiabilidade do fornecimento e a proteção de equipamentos, e a integração de sistemas IoT pode viabilizar correções rápidas, promovendo conformidade e melhoria contínua.

Em nível internacional, a norma ISO 50001 estabelece diretrizes para Sistemas de Gestão de Energia (SGE) baseados no ciclo PDCA, visando eficiência, redução de custos, mitigação de impactos e maior competitividade. A aplicação de tecnologias de monitoramento em conformidade com essa norma fortalece o controle sobre indicadores de desempenho, a definição de metas e a identificação de oportunidades de melhoria. Assim, o alinhamento entre inovações tecnológicas, regulamentos nacionais e padrões internacionais cria uma base sólida para a sustentabilidade energética. A observância desses parâmetros é essencial para garantir a

confiabilidade do sistema elétrico e a proteção de equipamentos sensíveis, especialmente em ambientes industriais e comerciais.

A integração de sistemas de monitoramento baseados em IoT pode facilitar a identificação e correção de desvios em tempo real, contribuindo para a conformidade com as exigências do PRODIST e para a melhoria contínua da qualidade do fornecimento de energia, em torno desse objetivo é na criação de soluções adaptáveis a diferentes cenários.

1.1 O Problema

Nos dias de hoje, a segurança e o monitoramento de ambientes residenciais tornaram-se aspectos fundamentais para a sociedade. O controle manual e a falta de automação nos processos de monitoramento podem levar a ineficiências e à exposição a riscos. Observa-se a necessidade de um sistema que integre tecnologias de IoT para coletar dados em tempo real, proporcionando uma melhor gestão e resposta a eventos para uma melhor gestão e eficiência energética.

Nos dias atuais, o crescente consumo de energia elétrica nas residências representa um desafio tanto econômico quanto ambiental. As tarifas de energia seguem aumentando devido à dependência de fontes não renováveis, uso de termelétricas e condições climáticas extremas, como ondas de calor que elevam a demanda energética nacional.

Ao mesmo tempo, muitos lares ainda não possuem ferramentas eficientes para monitorar seu consumo energético em tempo real, o que dificulta a adoção de hábitos sustentáveis e o controle dos gastos. Assim como ocorre na área de segurança e automação residencial, onde sistemas inteligentes permitem monitoramento remoto e respostas rápidas, surge a necessidade de aplicar os mesmos princípios tecnológicos na gestão e eficiência do consumo de energia elétrica.

Portanto, este projeto visa resolver o seguinte problema: Como o desenvolvimento de um sistema de monitoramento de energia elétrica, baseado em tecnologias de IoT

e acessível para residências, pode contribuir para a redução do desperdício energético, promover o consumo consciente e colaborar com os objetivos da ODS 12 (Consumo e Produção Responsáveis (Gov.br ANEEL (2025) e Gov.br MME (2025))).

1.2 Objetivos

Desenvolver um sistema automatizado para monitoramento de energia elétrica, visando eficiência, controle em tempo real e redução de desperdícios de energia.

1.2.1 Objetivo Geral

Desenvolver um sistema de monitoramento de energia elétrica residencial baseado em Internet das Coisas (IoT), capaz de medir correntes e tensões elétricas, calcular o consumo de energia e exibir os dados localmente em um display OLED e remotamente por meio de um aplicativo móvel.

1.2.2 Objetivos Específicos

Selecionar e dimensionar os componentes necessários para o desenvolvimento do sistema, incluindo o microcontrolador ESP32, o módulo de medição de energia JSY-MK-194G, o display OLED e a fonte de alimentação MEAN WELL APV-8-5.

- Desenvolver o código-fonte para a interpretação do ESP32, integrando a comunicação UART com o módulo JSY-MK-194G, a comunicação I2C com o display OLED, além do processamento dos dados de energia elétrica.
- Construir e validar o circuito físico, assegurando a correta alimentação, isolamento e funcionamento dos componentes.
- Implementar um sistema de exibição local, via display OLED, que apresente informações em tempo real, como tensão, corrente, potência, fator de potência, frequência e consumo de energia (kWh).
- Integrar a funcionalidade de envio dos dados coletados para uma plataforma remota, utilizando Wi-Fi, por meio de protocolos como MQTT, HTTP, ESPHome ou Arduino Ide e outros compatíveis com IoT.

- Realizar testes práticos em ambiente controlado, avaliando a precisão das medições, o desempenho do sistema e a estabilidade da comunicação.
- Avaliar e documentar os riscos elétricos e as práticas de segurança necessárias, considerando as conexões diretas do sensor JSY-MK-194G à rede elétrica.

1.3 Delimitação do Estudo

Este estudo tem como foco o desenvolvimento de um sistema de monitoramento de energia elétrica residencial utilizando tecnologias de IoT. O projeto contempla exclusivamente o acompanhamento de parâmetros elétricos — tensão, corrente, potência, fator de potência, frequência e energia consumida — através do módulo JSY-MK-194G. O escopo não inclui funcionalidades de automação, segurança, controle de cargas ou sensores de variáveis ambientais. A aplicação está restrita ao ambiente residencial de baixa tensão, considerando instalações elétricas monofásicas.

1.4 Relevância do Estudo

A crescente demanda por energia elétrica, somada ao aumento dos custos tarifários e à preocupação com a sustentabilidade, torna fundamental que residências adotem soluções que promovam o uso eficiente da energia. Este estudo se mostra relevante ao propor o desenvolvimento de um sistema acessível e preciso, capaz de monitorar o consumo de energia elétrica em tempo real. Através da utilização de tecnologias de IoT e sensores de alta precisão, como o JSY-MK-194G, o projeto oferece uma ferramenta que auxilia os usuários na identificação de desperdícios e no acompanhamento do consumo energético. Além disso, contribui para a conscientização quanto ao uso responsável dos recursos e se alinha às metas dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), especialmente ao ODS 12 — Consumo e Produção Responsáveis. (ONU (2025))

1.5 Organização do Trabalho

O trabalho está estruturado em cinco capítulos: Introdução, Revisão da Literatura, Desenvolvimento, Resultados e Considerações Finais. Cada capítulo aborda uma etapa fundamental para o entendimento e execução do projeto proposto.

2. REVISÃO DA LITERATURA

A revisão de literatura constitui o alicerce teórico deste trabalho, reunindo conceitos, normas, especificações técnicas e fundamentos que sustentam o desenvolvimento do sistema de monitoramento de energia elétrica proposto. Este capítulo visa contextualizar os desafios energéticos atuais, apresentar padrões regulatórios nacionais e internacionais e detalhar as características técnicas dos componentes utilizados, com foco especial no sensor de energia JSY-MK-194G e sua integração a um sistema baseado em internet das coisas (IoT).

O aumento contínuo do consumo residencial de energia elétrica no Brasil, aliado à elevação das tarifas e à dependência de fontes não renováveis, reforça a necessidade de ferramentas eficazes para acompanhamento do uso energético. O monitoramento em tempo real, possibilitado pela IoT, oferece meios para detectar desperdícios, identificar padrões de consumo e propor ajustes imediatos, tornando-se um recurso essencial para a eficiência energética.

Além da abordagem tecnológica, é imprescindível considerar os padrões regulatórios que asseguram a qualidade e a conformidade das medições. Nesse sentido, o **PRODIST** (Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional), especialmente seu Módulo 8, estabelece critérios de qualidade do fornecimento elétrico que influenciam diretamente na confiabilidade e estabilidade do sistema. Em complemento, a norma internacional **ISO 50001** define diretrizes para a implementação de Sistemas de Gestão de Energia (SGE), proporcionando uma base metodológica para melhoria contínua e eficiência operacional.

A escolha dos principais componentes do protótipo — **JSY-MK-194G, ESP32, display OLED SSD1306 e fonte MEAN WELL** — fundamenta-se em critérios de precisão, custo-benefício e capacidade de integração com plataformas IoT. O JSY-MK-194G, em especial, desempenha papel central na coleta de dados elétricos, comunicando-se com o microcontrolador por meio do protocolo **Modbus-RTU**, que viabiliza a conversão e o envio das informações para servidores ou aplicativos remotos.

Este capítulo, portanto, apresenta não apenas as bases teóricas que norteiam o desenvolvimento do projeto, mas também a análise da viabilidade técnica e regulatória da solução proposta. Serão abordadas o problema energético nacional, as normas aplicáveis, as características dos principais componentes, o funcionamento do circuito, a integração com IoT e os cálculos relevantes para avaliação de desempenho e conformidade.

2.1 Problema Energético e Justificativas

O aumento contínuo das tarifas de energia elétrica no Brasil tem onerado o consumidor residencial. Dados recentes mostram que, em 2023, o setor residencial representou cerca de 27,5% do consumo nacional de eletricidade (Ensaio Energético Ferreira, 2025), refletindo alto impacto no bolso das famílias. Por exemplo, em fevereiro de 2025 as tarifas residenciais subiram 16,8% (ajuste de bônus de Itaipu) (UOL 2025), tornando a eletricidade um dos vilões da inflação recente. Além disso, a matriz energética brasileira, embora majoritariamente hidrelétrica, ainda emite poluentes: o setor elétrico respondeu por 19% das emissões nacionais de gases-estufa em 2019 (Akatu 2025), atrás apenas da agropecuária e do uso da terra. Esses fatores – tarifas em alta, grande participação do consumo residencial e impactos ambientais – motivam soluções de monitoramento e controle de consumo energético.

2.2 Padrões Técnicos e Regulamentares

Para garantir qualidade e eficiência no fornecimento de energia, existem normas técnicas nacionais e internacionais. No Brasil, o PRODIST Módulo 8 da ANEEL trata da Qualidade do Fornecimento de Energia Elétrica (PRODIST) estabelecendo indicadores e limites de tensão, frequência e continuidade em redes de distribuição. Em âmbito internacional, a norma ISO 50001 define diretrizes para um Sistema de Gestão da Energia (SGE). Segundo o Ministério de Minas e Energia, a ISO 50001 “orienta a implementação, manutenção, revisão e melhoria” de um SGE, promovendo consumo energético mais eficiente e redução de emissões de gases de efeito estufa (ANEEL (2025) e (Gov.br MME (2025)). Em suma, PRODIST módulo 8

padroniza os requisitos de qualidade do serviço elétrico, enquanto a ISO 50001 guia práticas de gestão e eficiência energética.

Segundo o Módulo 5 do PRODIST, os sistemas de medição devem registrar tensão, corrente, potência ativa, reativa e energia, além de possuir precisão definida pelas classes metrológicas (Módulo 7 - PRODIST).

Esse módulo se aplica a instalações de usuários e distribuidoras, incluindo medidores para faturamento, qualificação de qualidade e estudos de carga (Módulo 5 - PRODIST) O sensor JSY-MK-194G(Figura 1) provê medições de tensão, corrente, potência ativa, fator de potência, frequência e energia acumulada jsypowermeter.com, mas não é certificado pelo INMETRO para faturamento oficial. Sua exatidão típica é de $\pm 1\%$ (tensão, corrente, energia) (JIAN SI YAN,2025) insuficiente para os requisitos de medidores classe C ($\geq 0,5\%$) ou B ($\approx 1\%$) exigidos no PRODIST (p.e., classe mínima B para consumidores em baixa tensão) (JIAN SI YAN,2025). Em vista disso, o módulo JSY-MK-194G não se enquadra como equipamento de medição oficial, mas pode gerar dados úteis para indicadores não-oficiais de consumo e eficiência energética. Por exemplo, a energia ativa medida (em kWh) e a potência reativa (kVArh) podem ser usadas para calcular o fator de potência médio, que deve ser ao menos 0,92 conforme normativa ANEEL (PRODIST). Fatores de potência abaixo disso resultam em perdas adicionais e multas.

O Módulo 7 do PRODIST trata do cálculo de perdas na distribuição (PRODIST). Ele determina metodologias e indicadores para estimar perdas técnicas, adotando premissas como tensão nominal e fator de potência de referência (tipicamente 0,92) no cálculo (Módulo 7 - PRODIST). Neste contexto, os dados do JSY-MK-194G podem ajudar a estimar as cargas e contribuir para balanços energéticos locais, embora o dispositivo seja de curta escala. Já o Módulo 8 aborda a qualidade do fornecimento, definindo indicadores de tensão em regime permanente e transitório, continuidade e qualidade comercial (Módulo 8 - PRODIST). Embora o JSY-MK-194G não seja um analisador completo de qualidade de energia (não registra eventos de falta ou harmônicos), ele monitora tensão e frequência em tempo real, possibilitando verificar conformidade de tensão e flutuações básicas, além de medir fator de potência

instantâneo. Por sua vez, o Módulo 11 trata das regras de emissão de faturas e informações adicionais (Módulo 11 - PRODIST). Os dados de energia ativa e reativa do sensor podem, por exemplo, ser utilizados para simular ou validar valores de consumo em ambientes controlados, confirmando informações que apareceriam em faturas de energia (como discriminativos de energia ativa e reativa).

Além do PRODIST, a ISO 50001 estabelece uma sistemática de Gestão de Energia para melhoria contínua do desempenho energético das organizações (ICA). Essa norma recomenda o uso de medições confiáveis nos principais pontos de consumo como base de qualquer programa de eficiência energética (ICA). No contexto do TCC, isso implica empregar o sensor JSY-MK-194G para coletar dados periódicos de consumo e potência, permitindo calcular índices de eficiência e encontrar oportunidades de economia. A ISO 50001 baseia-se no ciclo PDCA (Plan-Do-Check-Act), estimulando planejamento estratégico da energia, implementação de controles e revisão de (ICA). Assim, os dados do sensor podem alimentar dashboards de acompanhamento (via ESPHome/Home Assistant, por exemplo) e evidenciar melhoria ou degradação no uso da energia.

2.3 Aplicação Do Módulo JSY-MK-194G Em Projetos De Monitoramento De Energia Elétrica Com Normas Da PRODIST

O módulo JSY-MK-194G emerge como uma solução de medição de energia elétrica monofásica de dois canais, destacando-se pela capacidade de coletar parâmetros de corrente alternada (CA) fundamentais, como tensão, corrente, potência, fator de potência, frequência e o fluxo bidirecional de energia. Sua precisão de $\pm 1,0\%$ e a interface de comunicação TTL com protocolo Modbus-RTU o posicionam como um componente versátil e com uma relação custo-benefício atrativa para uma vasta gama de aplicações. (Jian Si Yan, 2025)

O monitoramento de energia elétrica transcende a mera contabilização de consumo, configurando-se como um pilar fundamental para a eficiência operacional, a gestão de custos e a garantia da qualidade do serviço em sistemas elétricos. No cenário brasileiro, o setor elétrico é regido por uma complexa estrutura regulatória, na

qual o PRODIST (Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional), estabelecido pela ANEEL, desempenha um papel central. (MME ou ANEEL) O PRODIST define as diretrizes técnicas e comerciais que as distribuidoras e os usuários devem seguir, abrangendo desde os métodos de medição para faturamento até os padrões de qualidade do fornecimento de energia e os critérios para compensações. (MME ou ANEEL) A aderência a esses procedimentos é crucial para assegurar a segurança, a confiabilidade e a qualidade do sistema elétrico, protegendo os interesses de todos os agentes envolvidos.

O presente relatório técnico tem como objetivo principal avaliar a aplicabilidade técnica e regulatória do módulo JSY-MK-194G em projetos de monitoramento de energia elétrica. A análise se concentrará em determinar se o módulo pode ser utilizado para coletar os dados base necessários para os cálculos e indicadores exigidos pelo PRODIST, bem como em explorar as possibilidades de sua integração com ferramentas e plataformas modernas de Internet das Coisas (IoT) e Smart Grids. Ao detalhar as capacidades do JSY-MK-194G e as exigências regulatórias, este documento visa fornecer um guia prático para engenheiros e desenvolvedores que buscam implementar soluções de monitoramento de energia que estejam alinhadas com as normativas brasileiras. (MME ou ANEEL).

A aderência ao PRODIST, mesmo que de forma indireta através do monitoramento, permite que projetos de baixo custo que utilizam o JSY-MK-194G contribuam para o desenvolvimento de uma "Smart Grid Lite" descentralizada. Este modelo capacita os usuários a gerenciarem ativamente sua energia, promovendo a otimização e o empoderamento de consumidores e pequenas empresas na gestão energética, que são conceitos fundamentais para o avanço das redes inteligentes.

O JSY-MK-194G é capaz de medir com exatidão uma série de parâmetros elétricos CA em dois canais monofásicos. Isso inclui tensão, corrente, potência ativa, fator de potência, frequência e energia elétrica. (Jian Si Yan, 2025) A funcionalidade de medição de energia elétrica é notável por sua capacidade bidirecional, registrando separadamente a energia ativa positiva e negativa, o que é fundamental para aplicações que envolvem geração e consumo. (Jian Si Yan, 2025)

O módulo se destaca por sua interface TTL unidirecional, um circuito completamente isolado e um formato compacto, medindo 65x48x28 mm. (Jian Si Yan, 2025) Essas características facilitam sua integração em uma variedade de equipamentos e sistemas que necessitam de monitoramento de consumo de energia, oferecendo uma solução com excelente custo-benefício. Suas áreas de aplicação são vastas, abrangendo desde transformadores de economia de energia e pilhas de carregamento de novas energias até o monitoramento em indústrias como elétrica, comunicações, ferrovias, transporte, proteção ambiental, petroquímica e siderurgia. (Jian Si Yan, 2025)

2.3.1 Parâmetros Técnicos Essenciais

A robustez e a precisão do JSY-MK-194G são definidas por seus parâmetros técnicos detalhados:

- **Entrada CA Monofásica:** O módulo opera em uma faixa de tensão de 1 a 300 V, com a possibilidade de personalização para atender a requisitos específicos. A faixa de corrente padrão é de 20 mA a 50 A, mas também pode ser personalizada para 20 mA a 100 A, permitindo sua aplicação em diferentes níveis de carga. (Jian Si Yan, 2025)
- **Processamento de Sinal:** Utiliza um chip de medição especializado com amostragem AD de 24 bits. Essa alta resolução na conversão analógico-digital é um aspecto crítico que proporciona uma aquisição de dados de alta fidelidade da forma de onda elétrica. (Jian Si Yan, 2025)
- **Capacidade de Sobrecarga:** Demonstra resiliência ao suportar 1,2 vezes a faixa de corrente de forma sustentável e 1,5 vezes a faixa de tensão sem sofrer danos, o que aumenta sua confiabilidade em ambientes elétricos dinâmicos. (Jian Si Yan, 2025)
- **Impedância de Entrada:** O canal de tensão possui uma impedância de entrada superior a 1 k Ω /V, minimizando o impacto da medição no circuito. (Jian Si Yan, 2025)
- **Precisão da Medição:** A precisão declarada para tensão, corrente, potência e eletricidade é inferior a $\pm 1,0\%$. (Jian Si Yan, 2025)

- **Isolamento:** O módulo garante a segurança operacional através do isolamento entre a fonte de alimentação em teste e sua própria fonte de alimentação, com uma tensão de isolamento suportável de 3000 VCC. (Jian Si Yan, 2025) Este alto nível de isolamento não apenas assegura a segurança, mas também expande as aplicações do módulo para ambientes industriais exigentes, onde a robustez e a proteção contra surtos são cruciais, diferenciando-o para cenários de maior risco.
- **Fonte de Alimentação:** Requer uma única fonte de alimentação CC de 3,3 a 5 V, com um baixo consumo de energia de 10 mA. (Jian Si Yan, 2025)
- **Ambiente de Trabalho:** Projetado para operar em uma ampla gama de condições ambientais, com temperatura de trabalho de -20 a +60 °C, umidade relativa de 5 a 95% (sem condensação a 40 °C) e altitude de 0 a 3000 metros. O ambiente deve ser livre de gases explosivos, corrosivos e poeira condutiva, além de tremores, vibrações e impactos significativos. (Jian Si Yan, 2025)

2.3.2 Interface de Comunicação

A comunicação do JSY-MK-194G é realizada através de uma interface TTL, compatível com níveis de tensão de 5V/3,3V. (Jian Si Yan, 2025) O protocolo de comunicação adotado é o Modbus-RTU, conhecido por sua boa compatibilidade e facilidade de programação. (Jian Si Yan, 2025) As taxas de transmissão são configuráveis, com opções padrão de 4800 bps, 9600 bps, 19200 bps e 38400 bps, e o formato de dados padrão é "n,8,1", com outras opções disponíveis. (Jian Si Yan, 2025) O protocolo Modbus-RTU opera no modo mestre-escravo, permitindo a conexão de até 255 instrumentos em uma única linha de comunicação. (Jian Si Yan, 2025)

2.3.3 Dados de Saída de Medição (Registros Modbus)

Os parâmetros elétricos medidos pelo JSY-MK-194G são disponibilizados através de uma lista de registradores Modbus. (Jian Si Yan, 2025) Os valores são lidos como números inteiros de 4 bytes e devem ser escalonados para obter os valores

reais das grandezas. Por exemplo, a tensão, corrente, potência e energia são divididas por 10000, o fator de potência por 1000, e a frequência por 100. (Jian Si Yan, 2025) A inclusão de registros separados para energia ativa positiva e negativa para ambos os canais é um recurso valioso para monitorar o fluxo bidirecional de energia. (Jian Si Yan, 2025)

2.3.4 Flexibilidade para Monitoramento de Baixo Custo e Necessidade de Gateway

A capacidade do JSY-MK-194G de fornecer uma gama abrangente de parâmetros elétricos CA, incluindo energia bidirecional, com uma precisão de $\pm 1,0\%$, o posiciona como uma solução de baixo custo para monitoramento de energia. (Jian Si Yan, 2025) No entanto, sua comunicação via TTL Modbus-RTU, um protocolo serial, não permite uma conexão direta a redes IP, que são a base das plataformas IoT modernas como ESPHOME, MQTT, HTTPS, Blynk e Firebase. (Jian Si Yan, 2025).

Para integrar o JSY-MK-194G a esses ambientes, é indispensável a utilização de um dispositivo intermediário, como um microcontrolador ESP32 ou ESP8266. Este microcontrolador atuaria como um gateway, realizando a comunicação Modbus-RTU com o JSY-MK-194G e, em seguida, traduzindo e enviando os dados via Wi-Fi ou Ethernet para a nuvem. (Jian Si Yan, 2025) Essa necessidade de um gateway implica que, embora o módulo seja econômico e rico em funcionalidades, o custo total de implementação de um projeto IoT deve considerar o hardware adicional e o desenvolvimento de firmware para a leitura Modbus, o parsing dos dados e a comunicação de rede. (Jian Si Yan, 2025) Assim, o JSY-MK-194G se torna uma escolha excelente para soluções de monitoramento personalizadas e sensíveis ao custo, onde os dados brutos são suficientes e o processamento externo é parte integrante do projeto, em vez de uma solução plug-and-play para integração direta na nuvem. Ele funciona como um componente sensor dentro de um sistema maior, e não como um dispositivo IoT autônomo. (Jian Si Yan, 2025).

A combinação da alta resolução AD (24 bits) e da interface Modbus-RTU, que exige um gateway, posiciona o JSY-MK-194G como um sensor de instrumentação de alta qualidade para sistemas complexos. Ele supera medidores básicos ao fornecer dados brutos de qualidade superior, permitindo análises mais profundas, como a de harmônicos, que medidores de menor custo não suportariam, mesmo com processamento externo. Isso sugere que o JSY-MK-194G não é meramente um medidor econômico, mas um sensor inteligente com potencial para aplicações de instrumentação e diagnóstico avançado.

2.3.5 Fundamentos do PRODIST: Requisitos para Medição e Qualidade de Energia

O PRODIST (Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional) é um conjunto de módulos normativos da ANEEL que estabelece os procedimentos para a distribuição de energia elétrica no Brasil. (MME ou ANEEL) para qualquer projeto que envolva medição e monitoramento de energia no contexto brasileiro, a compreensão e a aderência a esses módulos são imperativas. (MME ou ANEEL)

2.3.5.1 Módulo 1: Glossário de Termos Técnicos Relevantes.

O Módulo 1 do PRODIST funciona como um glossário abrangente de termos técnicos, com o objetivo de padronizar a linguagem e dirimir ambiguidades na interpretação dos procedimentos regulatórios. (Módulo 1 - PRODIST) A precisão terminológica é vital em um setor tão regulado como o de energia elétrica, pois garante que todos os agentes (distribuidoras, consumidores, geradores, reguladores) operem sob um entendimento comum, o que é fundamental para a conformidade, auditoria e resolução de disputas. (Módulo 1 - PRODIST) Falar a mesma "linguagem" do regulador é tão importante quanto atender aos limites numéricos.

Alguns termos-chave definidos neste módulo, diretamente relevantes para o monitoramento de energia e a aplicação do JSY-MK-194G, incluem:

- **Energia elétrica ativa (kWh):** Aquela que pode ser convertida em outra forma de energia. (Módulo 1 - PRODIST)
- **Energia elétrica reativa (kvarh):** Aquela que circula continuamente entre os campos elétricos e magnéticos sem produzir trabalho. (Módulo 1 - PRODIST)
- **Fator de potência:** Razão entre a energia elétrica ativa e a raiz quadrada da soma dos quadrados das energias ativas e reativas. (Módulo 1 - PRODIST)
- **Demanda:** Média das potências elétricas ativas (kW) ou reativas (kvar), requerida pela carga ou injetada no sistema, durante um intervalo de tempo especificado. (Módulo 1 - PRODIST)
- **Qualidade da energia elétrica (QEE):** Conjunto de conceitos que considera os aspectos técnicos da qualidade do fornecimento, englobando a qualidade do serviço e a qualidade do produto. (Módulo 1 - PRODIST)
- **Distorção harmônica total (DTT%):** Valor eficaz equivalente de um conjunto de componentes harmônicas individuais em relação ao valor eficaz da componente fundamental. (Módulo 1 - PRODIST)
- **Desequilíbrio de tensão:** Diferença verificada nas amplitudes ou defasagens elétricas entre as três tensões de fase de um sistema trifásico. (Módulo 1 - PRODIST)
- **Flutuação de tensão:** Variação aleatória, repetitiva ou esporádica do valor eficaz ou de pico da tensão instantânea. (Módulo 1 - PRODIST)
- **Variação de Tensão de Curta Duração (VTCD):** Desvio significativo da amplitude do valor eficaz da tensão por um intervalo de tempo inferior a 3 minutos. (Módulo 1 - PRODIST)
- **Sistema de Medição para Faturamento (SMF):** Sistema composto por medidor principal e demais equipamentos necessários para a realização da medição para faturamento. (Módulo 1 - PRODIST).

A compreensão precisa desses termos é o ponto de partida para qualquer análise de conformidade com o PRODIST, garantindo que os dados coletados e os cálculos realizados sejam interpretados no contexto regulatório correto. (Módulo 1 - PRODIST)

2.3.5.2 Módulo 5: Sistemas de Medição e Procedimentos de Leitura

O Módulo 5 do PRODIST estabelece os requisitos mínimos para os sistemas de medição empregados na distribuição de energia, bem como os procedimentos para sua instalação, operação, manutenção e leitura. (Módulo 5 - PRODIST) Ele define a composição dos sistemas de medição para faturamento (SMF), as responsabilidades dos agentes (consumidores, distribuidoras, CCEE) e as especificações técnicas para os medidores e transformadores de instrumentos. (Módulo 5 - PRODIST).

A composição do SMF é tipicamente composta pelo medidor principal, transformadores de potencial (TP) e de corrente (TC), canais de comunicação e sistemas de coleta de dados, podendo incluir também um medidor de retaguarda. (Módulo 5 - PRODIST).

Os requisitos mínimos para medidores incluem:

- **Aprovação do Inmetro:** Todos os medidores utilizados para faturamento devem ter modelo aprovado por portaria específica do Inmetro. (Módulo 5 - PRODIST)
- **Grandezas Medidas:** Para unidades consumidoras do Grupo B, o sistema deve apurar, no mínimo, a energia ativa em kWh. Para usuários em média e alta tensão, exige-se a apuração de energia ativa (kWh), energia reativa (kvarh), demanda ativa e reativa integralizada em intervalos programáveis de 5 a 60 minutos. (Módulo 5 - PRODIST)
- **Memória de Massa:** Medidores para média e alta tensão devem possuir memória de massa com capacidade de armazenamento de dados por, no mínimo, 37 dias, com intervalos de integralização fixos ou programáveis de 5 a 60 minutos. (Módulo 5 - PRODIST)
- **Medição Bidirecional:** Para unidades consumidoras participantes do Sistema de Compensação de Energia Elétrica (como micro/minigeração distribuída), o sistema de medição deve ter funcionalidade de medição bidirecional de energia ativa. A partir de 1º de janeiro de 2024, sistemas de medição para micro/minigeração distribuída no Grupo A devem atender a requisitos adicionais, como apuração de energia e potência (consumida e

injetada), tensão em regime permanente por fase, registro de interrupções e indicadores DRP/DRC, e capacidade de atualização remota de firmware. (Módulo 5 - PRODIST)

- **Classes de Exatidão Mínima:** A Tabela 1 do Módulo 5 especifica as classes de exatidão mínimas para medidores e transformadores de instrumentos, que variam conforme o nível de tensão do ponto de conexão 1:
- Para tensões < 2,3 kV: Medidor Classe B, TP e/ou TC Classe 0,6. (Módulo 5 - PRODIST)
- Para tensões $\geq 2,3$ kV e ≤ 44 kV: Medidor Classe C, TP e/ou TC Classe 0,6. (Módulo 5 - PRODIST)
- Para tensões > 44 kV: Medidor Classe D, TP e/ou TC Classe 0,3. (Módulo 5 - PRODIST)

O módulo também detalha as metodologias para compensar perdas técnicas em transformadores e ramais de conexão, quando o sistema de medição não está localizado no ponto de entrega. (Módulo 5 - PRODIST)

A precisão do JSY-MK-194G, declarada em $\pm 1,0\%$, é um ponto crucial ao compará-lo com as exigências do PRODIST. As classes de exatidão mínimas para medidores de faturamento (Classe B, C, D) e transformadores de instrumento (Classe 0,6, 0,3) são geralmente mais rigorosas que $\pm 1,0\%$ para a maioria das aplicações de faturamento oficial. (Módulo 5 - PRODIST) Por exemplo, um medidor Classe B para energia ativa normalmente tem um erro máximo de $\pm 0,5\%$ em condições normais. (Módulo 5 - PRODIST) Isso significa que o JSY-MK-194G, embora preciso para seu custo, não é diretamente adequado para ser um medidor de faturamento oficial em conformidade com o PRODIST. (Módulo 5 - PRODIST)

Contudo, o Módulo 5 também aborda a coleta de dados para levantamento de cargas, estudos de previsão de demanda e apuração de parâmetros de qualidade de energia. (Módulo 5 - PRODIST) Nessas áreas, a precisão de $\pm 1,0\%$ do JSY-MK-194G pode ser aceitável ou o módulo pode fornecer os dados brutos para processamento posterior. Isso posiciona o JSY-MK-194G como uma ferramenta valiosa para aplicações de monitoramento interno e pré-análise de conformidade, em vez de um instrumento de medição para faturamento regulatório. (Módulo 5 - PRODIST) A

regulação da ANEEL, por meio do PRODIST, estabelece uma distinção clara entre medição para fins comerciais/legais (faturamento) e medição para fins técnicos/operacionais (monitoramento, qualidade), e o JSY-MK-194G se encaixa perfeitamente no segundo cenário, permitindo que empresas e pesquisadores obtenham dados de qualidade para otimização e diagnóstico sem o custo e a complexidade de um medidor certificado para faturamento.

2.3.5.3 Módulo 8: Qualidade do Fornecimento de Energia Elétrica (Qualidade do Produto)

O Módulo 8 do PRODIST é dedicado à qualidade do fornecimento de energia elétrica, focando na qualidade do produto (conformidade da onda de tensão) e na qualidade do serviço (continuidade do fornecimento). (Módulo 8 - PRODIST) Ele define os fenômenos, estabelece indicadores, limites e metodologias de medição, além de procedimentos para gestão de reclamações. (Módulo 8 - PRODIST)

Fenômenos de Regime Permanente:

Variações de Tensão em Regime Permanente: A conformidade da tensão é avaliada pela DRP (Duração Relativa da Transgressão de Tensão Precária) e DRC (Duração Relativa da Transgressão de Tensão Crítica). (Módulo 8 - PRODIST) As leituras de tensão são classificadas como adequadas, precárias ou críticas em relação à tensão de referência (TR), com faixas específicas detalhadas no Anexo 8.A. (Módulo 8 - PRODIST) Os indicadores DRP e DRC são calculados com base em 1.008 leituras válidas, obtidas em intervalos de 10 minutos. (Módulo 8 - PRODIST) Os limites são $DRP \leq 3\%$ e $DRC \leq 0,5\%$. (Módulo 8 - PRODIST) Violações desses limites resultam em compensação ao consumidor. (Módulo 8 - PRODIST)

- **Fator de Potência:** Calculado a partir de potência ativa e reativa (ou energias). (Módulo 8 - PRODIST) Para unidades consumidoras do Grupo A o fator de potência deve estar entre 0,92 e 1,00 indutivo, ou 1,00 e 0,92 capacitivo. (Módulo 8 - PRODIST)

- **Distorções Harmônicas:** Deformações na forma de onda da tensão/corrente. (Módulo 8 - PRODIST) Os indicadores incluem DITH% (distorção harmônica individual) e DTT% (distorção harmônica total), além de DTTp%, DTTi% e DTT3% para componentes específicas, e seus percentis 95. Os limites variam com a tensão nominal. A medição deve apurar até a 40ª ordem harmônica. (Módulo 8 - PRODIST)
- **Desequilíbrio de Tensão:** Quantificado pelo FD% (Fator de Desequilíbrio de Tensão), que é a relação entre as magnitudes de tensão de sequência negativa e positiva. (Módulo 8 - PRODIST) O limite é o FD95%. (Módulo 8 - PRODIST)
- **Flutuação de Tensão:** Avaliada pelos indicadores Pst (severidade de cintilação de curta duração), Plt (longa duração) e Pst95%. (Módulo 8 - PRODIST) Os limites são estabelecidos para o Pst95%. (Módulo 8 - PRODIST)
- **Variação de Frequência:** Em condições normais, a frequência deve operar entre 59,9 Hz e 60,1 Hz. (Módulo 8 - PRODIST)

Fenômenos de Regime Transitório:

- **Variações de Tensão de Curta Duração (VTCD):** Desvios significativos na amplitude da tensão por menos de 3 minutos. (Módulo 8 - PRODIST) Classificadas como Interrupção Momentânea (IMT), Afundamento Momentâneo (AMT), Elevação Momentânea (EMT), Interrupção Temporária (ITT), Afundamento Temporário (ATT) e Elevação Temporária (ETT). (Módulo 8 - PRODIST) Os indicadores incluem V_e (amplitude), Δt_e (duração), f_e (frequência) e FI (Fator de Impacto). (Módulo 8 - PRODIST)
- **Metodologia de Medição:** Os instrumentos devem atender aos requisitos do Módulo 5.1 Para a maioria dos indicadores de qualidade, são necessárias 1.008 leituras válidas em intervalos de 10 minutos. (Módulo 8 - PRODIST) Há regras específicas para o expurgo de leituras inválidas em caso de VTCD ou interrupções. (Módulo 8 - PRODIST)

O JSY-MK-194G fornece medições brutas de tensão, corrente, potência, fator de potência e frequência. (Módulo 8 - PRODIST) No entanto, o Módulo 8 do PRODIST define indicadores de qualidade que não são medições diretas, mas sim cálculos complexos e estatísticos, como DRP, DRC, DTT%, FD%, Pst e FI. (Módulo 8 - PRODIST) Esses cálculos envolvem processamento estatístico (e.g., percentis a partir de 1.008 leituras de 10 minutos), aplicação de fórmulas específicas (como as para harmônicos, Pst) e caracterização de eventos (classificação de VTCD com base em limiares de amplitude e duração). (Módulo 8 - PRODIST) O datasheet do JSY-MK-194G não indica que o módulo realize esses cálculos avançados internamente. (Módulo 8 - PRODIST)

Portanto, uma parte significativa da avaliação de conformidade com o PRODIST, especialmente para a qualidade do produto, não pode ser realizada diretamente pelo JSY-MK-194G. (Módulo 8 - PRODIST) Ele atua como um sensor de dados, exigindo que uma unidade de processamento externa (microcontrolador ou serviço de nuvem) colete os dados brutos, aplique as fórmulas do PRODIST e execute a análise estatística e a agregação temporal necessárias. (Módulo 8 - PRODIST) A capacidade de amostragem AD de 24 bits do JSY-MK-194G é crucial para fornecer dados brutos de alta resolução, permitindo que algoritmos externos derivem esses indicadores de qualidade com maior precisão. (Módulo 8 - PRODIST) Isso implica que, embora o JSY-MK-194G seja um excelente sensor para dados relevantes ao PRODIST, ele não é um "*medidor PRODIST-compliant*" por si só para análise de qualidade, exigindo um investimento considerável em desenvolvimento de software para preencher essa lacuna e transformar medições brutas em indicadores regulatórios. (Módulo 8 - PRODIST) A exigência do PRODIST Módulo 8 por cálculos complexos e estatísticos que o JSY-MK-194G não executa internamente cria uma demanda por soluções de software e hardware externos, o que, em vez de uma limitação, pode ser visto como uma oportunidade para a inovação.

2.4 Análise de Capacidade do JSY-MK-194g em Relação aos Requisitos do PRODIST

A avaliação da capacidade do módulo JSY-MK-194G para atender aos requisitos do PRODIST envolve uma comparação detalhada de seus parâmetros técnicos com as exigências regulatórias, considerando tanto as medições diretas quanto a necessidade de processamento externo.

2.4.1 Medição de Parâmetros Elétricos Essenciais

O JSY-MK-194G mede diretamente diversos parâmetros elétricos fundamentais, que são a base para os cálculos exigidos pelo PRODIST:

- **Tensão, Corrente, Potência Ativa, Fator de Potência e Frequência:** O módulo fornece leituras diretas desses parâmetros, com faixas de operação adequadas para muitas aplicações monofásicas (1-300V para tensão e 20mA-100A para corrente). (JIAN SI YAN, 2025) Esses dados são os blocos construtivos para a maioria das análises do PRODIST.
- **Energia Ativa (kWh):** O JSY-MK-194G mede a "energia elétrica" e, de forma crucial, distingue entre "energia ativa positiva" e "energia ativa negativa" para ambos os canais. (JIAN SI YAN, 2025) Essa capacidade bidirecional é essencial para o cálculo de consumo e injeção em sistemas de geração distribuída e para o Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE), conforme exigido pelo (Módulo 5 - PRODIST, Item 19.1).
- **Energia Reativa (kvarh):** O documento não lista explicitamente a medição de energia reativa (kvarh) ou potência reativa (kvar) como um parâmetro de saída direto, embora o fator de potência seja medido. O (Módulo 5 - PRODIST, Item 17.a.ii), exige a medição de kvarh para faturamento em média/alta tensão. (PRODIST) A potência reativa pode ser derivada a partir da potência ativa e do fator de potência ($Q = P * \tan(\arccos(fp))$), mas a ausência de medição direta de kvarh é uma limitação para conformidade plena em faturamento de média/alta tensão. (PRODIST) No entanto, para

fins de monitoramento e otimização, essa derivação via software pode ser suficiente, indicando que a limitação não é absoluta e pode ser contornada.

- **Demanda Ativa (kW) e Reativa (kVAr):** O JSY-MK-194G mede "potência ativa" em Watts. (Jian Si Yan, 2025) A demanda, no contexto do PRODIST, é definida como a média das potências em um intervalo de tempo específico (e.g., 5 a 60 minutos). (PRODIST) O módulo não realiza o cálculo da demanda integralizada internamente. Para obtê-la, um microcontrolador externo deve amostrar continuamente os valores de potência fornecidos pelo JSY-MK-194G e calcular a média sobre os períodos de integralização definidos pelo PRODIST. (PRODIST)
- **Precisão ($\pm 1,0\%$):** A precisão especificada do JSY-MK-194G é de $\pm 1,0\%$ para tensão, corrente, potência e eletricidade. (Jian Si Yan, 2025) Ao comparar com as classes de exatidão mínimas do PRODIST para medidores de faturamento (Módulo 5 - PRODIST Tabela 1), observa-se que essa precisão é geralmente inferior aos requisitos para faturamento oficial. (Módulo 5 - PRODIST) Por exemplo, para tensões abaixo de 2,3 kV, a classe mínima para medidores é B (tipicamente $\pm 0,5\%$ ou melhor para energia ativa), e para tensões acima de 44 kV, a classe D (tipicamente $\pm 0,1\%$ ou melhor) é exigida. (PRODIST) Consequentemente, o JSY-MK-194G não é adequado para ser utilizado como um medidor de faturamento oficial em projetos que exigem conformidade regulatória direta com a ANEEL para essa finalidade. (PRODIST)

2.4.2 Capacidade de Coleta de Dados e Comunicação

A capacidade de comunicação do JSY-MK-194G é um fator chave para sua integração em sistemas de monitoramento:

- **Protocolo Modbus-RTU:** O módulo utiliza Modbus-RTU sobre uma interface TTL. (JIAN SI YAN, 2025) O (Módulo 5 - PRODIST Seção 5.3), menciona canais de comunicação e sistemas de coleta de dados, e para a CCEE, protocolos TCP/IP e VPN. (Módulo 5 – PRODIST) Como o Modbus-RTU não é um protocolo IP, um gateway (como um microcontrolador ESP) é

indispensável para converter a comunicação TTL/Modbus-RTU para Ethernet/Wi-Fi, permitindo a integração com serviços baseados em IP como MQTT ou HTTPS. (Jian Si Yan, 2025)

- **Memória de Massa:** O JSY-MK-194G não possui memória de massa interna para armazenar dados históricos por longos períodos, como os 37 dias exigidos pelo (Módulo 5 – PRODIST, Item 17.b.iv), para medidores em média/alta tensão.¹ Essa funcionalidade de armazenamento e agregação de dados deve ser implementada no microcontrolador externo ou no sistema de nuvem. (Módulo 5 - PRODIST)
- **Sincronismo de Tempo:** (Módulo 5 - PRODIST, Item 17.c.ii), exige um mecanismo de sincronismo de tempo (via central de aquisição ou GPS) para medidores de média/alta tensão. (Módulo 5 – PRODIST) O JSY-MK-194G não possui um Relógio de Tempo Real (RTC) interno com bateria ou capacidade de GPS. Portanto, o microcontrolador externo deve ser responsável por manter o tempo sincronizado (e.g., via NTP) para garantir a precisão temporal exigida para a agregação de dados e o cálculo de indicadores PRODIST. Essa necessidade deve ser atendida em algum tipo de microcontrolador externo, ou por meio de banco de dados.

2.4.3 Conclusão sobre a Adequação do JSY-MK-194G para Tarefas PRODIST

O JSY-MK-194G é uma fonte de dados brutos de alta qualidade para diversos parâmetros elétricos relevantes para o PRODIST. Sua capacidade de medição bidirecional de energia e a amostragem AD de 24 bits são pontos fortes significativos. (Jian Si Yan, 2025) A amostragem de 24 bits, em particular, é um recurso técnico que proporciona uma resolução extremamente alta na digitalização dos sinais analógicos de tensão e corrente. (Jian Si Yan, 2025) Essa alta fidelidade na aquisição de dados é fundamental para a análise de fenômenos complexos de qualidade de energia, como distorções harmônicas, desequilíbrios e flutuações. (PRODIST) Mesmo que o JSY-MK-194G não realize essas análises internamente, a qualidade de seus dados brutos garante que algoritmos externos possam derivar esses indicadores de qualidade com

maior precisão, o que é um fator crítico para a conformidade com as exigências do (Módulo 8 - PRODIST)

No entanto, é crucial reiterar que o JSY-MK-194G não é um medidor PRODIST-compliant para fins de faturamento oficial. (PRODIST) Sua precisão especificada de $\pm 1,0\%$ são inferiores aos requisitos regulatórios para essa finalidade. (Jian Si Yan, 2025) Além disso, para cálculos complexos de qualidade de energia (como DRP, DRC, DTT%, FD%, Pst/Plt, VTCD) e agregação de demanda, o módulo atua como um sensor de entrada de dados, exigindo processamento significativo em hardware/software externo. A integração em projetos IoT é totalmente viável, mas requer a utilização de um gateway para traduzir o protocolo Modbus-RTU para protocolos de rede. (Jian Si Yan, 2025)

Em resumo, o JSY-MK-194G preenche uma lacuna importante ao oferecer uma solução de monitoramento de energia custo-efetiva e granular. Ele permite que projetos compreendam os parâmetros relevantes do PRODIST sem necessariamente serem o "medidor oficial" para faturamento ou certificação regulatória direta.(PRODIST) Isso habilita a gestão proativa de energia, a detecção de anomalias e a verificação pré-conformidade, auxiliando na identificação de problemas antes que resultem em não conformidades regulatórias ou penalidades.(PRODIST) A dependência do JSY-MK-194G de processamento externo para atender aos requisitos do PRODIST não é uma fraqueza, mas um catalisador para uma arquitetura de "inteligência distribuída", onde a inteligência para derivar os indicadores PRODIST é distribuída entre o sensor, o dispositivo de borda (microcontrolador) e a nuvem. Essa arquitetura oferece flexibilidade, escalabilidade e resiliência, permitindo que cada componente se concentre em sua função principal.

2.5 Cálculos Prioritários do PRODIST e sua Aplicação com o JSY-MK-194G

A priorização dos cálculos do PRODIST em um projeto de monitoramento de energia com o JSY-MK-194G deve focar nas áreas que impactam diretamente a operação e gestão diária do sistema elétrico, a qualidade do serviço e do produto para

o consumidor, e a eficiência energética. Com base nas capacidades do JSY-MK-194G e nos requisitos do PRODIST, as áreas prioritárias são: Faturamento e Compensação de Energia, Cálculo de Perdas Técnicas e Cálculo de Indicadores de Qualidade do Produto. (PRODIST)

2.5.1 Cálculos de Faturamento e Compensação de Energia

Os cálculos de faturamento são a espinha dorsal da relação comercial entre distribuidoras e consumidores/geradores. O JSY-MK-194G pode fornecer os dados brutos necessários para essas grandezas.

- **Energia Ativa (kWh):** O JSY-MK-194G fornece diretamente a "Energia elétrica" em kWh, com registros separados para energia ativa positiva (consumo) e energia ativa negativa (injeção). (Jian Si Yan, 2025) Esta capacidade é crucial para o cálculo do consumo e, em particular, para o Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE), que exige a medição bidirecional de energia ativa para unidades com micro/minigeração distribuída, conforme o (Módulo 5 PRODIST, Item 19).
- **Demanda Ativa (kW) e Reativa (kvar):** O JSY-MK-194G fornece a "Potência ativa" em Watts. (Jian Si Yan, 2025) A demanda, no contexto do PRODIST, é definida como a média das potências em um intervalo de tempo especificado (Módulo 1 PRODIST, Item 104). Para derivar a demanda integralizada (kW e kvar), o microcontrolador conectado ao JSY-MK-194G deve amostrar os valores de potência ativa (e reativa, se calculada a partir de P e f_p) em intervalos regulares (por exemplo, a cada segundo) e, em seguida, calcular a média sobre os períodos de integralização definidos pelo PRODIST (5 a 60 minutos,) (Módulo 5 PRODIST, Item 17.a.iii). A demanda é um componente fundamental do faturamento para usuários conectados em média e alta tensão (Módulo 1 PRODIST, Item 105).

A Tabela 1 a seguir resume a correspondência entre as grandezas do PRODIST e os parâmetros fornecidos ou derivados do JSY-MK-194G para fins de faturamento e monitoramento. Esta tabela é de valor inestimável por mapear diretamente os dados brutos do JSY-MK-194G para as grandezas e requisitos do

PRODIST. Ela serve como um guia prático para desenvolvedores e engenheiros, indicando quais dados estão disponíveis diretamente e quais exigem processamento externo, facilitando o design do firmware e da lógica de nuvem.

Tabela 1 Correspondência de Grandezas JSY-MK-194G Vs. Prodist (Faturamento e Monitoramento)

Grandeza PRODIST	Descrição PRODIST (Módulo 1)	Parâmetro JSY-MK-194G	Registro Modbus (Endereço H)	Escala (JSY-MK-194G)	Observações para PRODIST
Tensão (V)	Valor eficaz de tensão	Tensão (Channel 1/2)	0048H / 0050H	DATA/10000	Base para DRP, DRC, VTCD.
Corrente (A)	Fluxo de carga	Corrente (Channel 1/2)	0049H / 0051H	DATA/10000	Base para cálculo de perdas e demanda.
Potência Ativa (W)	Energia solicitada por unidade de tempo	Potência Ativa (Channel 1/2)	004AH / 0052H	DATA/10000	Base para cálculo de demanda e fator de potência.
Energia Ativa (kWh)	Energia convertível	Energia Ativa Positiva/Negativa (Channel 1/2)	004BH, 004DH / 0053H, 0055H	DATA/10000	Essencial para faturamento e compensação bidirecional.
Fator de Potência (fp)	Razão entre energia ativa e aparente	Fator de Potência (Channel 1/2)	004CH / 0054H	DATA/1000	Essencial para qualidade e perdas.
Frequência (Hz)	Frequência do sistema	Frequência	004FH	DATA/100	Monitoramento da qualidade do produto.
Demanda Ativa (kW)	Média da potência ativa	(Derivada de Potência Ativa)	N/A (Cálculo externo)	N/A	Requer agregação temporal dos dados de potência pelo microcontrolador.
Energia Reativa (kvarh)	Energia que circula sem produzir trabalho	(Derivada de Potência Ativa e Fator de Potência, ou Potência Reativa)	N/A (Cálculo externo)	N/A	Requer cálculo a partir de P e fp, ou medição de Q.

Fonte: Própria (2025)

2.5.2 Cálculo de Perdas Técnicas (Módulo 7)

O Módulo 7 do PRODIST define a metodologia para o cálculo das perdas técnicas na distribuição, incluindo perdas em medidores e transformadores. (Módulo 7 - PRODIST) A aplicação dessas metodologias com o JSY-MK-194G permite uma estimativa mais precisa das perdas reais no sistema. (Módulo 7 - PRODIST)

- **Perdas em Medidores (Equação 4 e 5, Módulo 7):** A perda de potência no medidor (PM) é calculada pela Equação 4: $(PM=K \cdot PC \cdot 10^{-6} [MW])$, onde PC é a perda por circuito de tensão do medidor (0,5 W para medidores eletrônicos) e K é um multiplicador baseado no tipo de fornecimento (1 para monofásico 2 fios, 2 para bifásico/monofásico 3 fios, 3 para trifásico 4 fios). (Módulo 7 - PRODIST) A perda de energia no medidor (EM) é obtida multiplicando PM pelo período (ΔT). (Módulo 7 - PRODIST)
- **Aplicação com JSY-MK-194G:** Como o JSY-MK-194G é um medidor eletrônico (JIAN SI YAN, 2025), o valor de PC (0,5 W) é aplicável. O tipo de ligação do sistema (monofásico, bifásico, trifásico) determina o valor de K. Assim, os dados do JSY-MK-194G e o tempo de operação podem ser usados para estimar as perdas no próprio medidor, contribuindo para o balanço energético do projeto. (Módulo 7 - PRODIST)
- **Perdas em Transformadores (Equação 1, 2 e 3, Módulo 7):** A perda de potência no transformador (PTR) é a soma da perda no ferro (Pfe) e da perda no cobre (Pcu). (Módulo 7 - PRODIST) A perda no cobre na demanda média (Pcu) é calculada pela Equação 2: $(Pcu=(Pnom \cdot \cos\phi Pmed)^2 \cdot PNcu) [MW]$, onde Pmed é a potência média, Pnom a potência nominal do transformador, $\cos\phi$ o fator de potência e PNcu a perda no cobre na condição nominal. (Módulo 7 - PRODIST) A perda de energia do transformador (ETR) é calculada pela Equação 3: $(ETR=\Delta T \cdot (Pfe+Pcu \cdot CPT) [MWh])$. (Módulo 7 - PRODIST)
- **Aplicação com JSY-MK-194G:** O JSY-MK-194G mede a "Potência ativa" e o "Fator de Potência". (Módulo 7 - PRODIST) Esses valores correspondem

a P_{med} e $\cos\phi$ na Equação 2. Os valores de P_{fe} (perda no ferro) e P_{Ncu} (perda no cobre nominal) são obtidos de tabelas regulatórias específicas no anexos do PRODIST. (Módulo 7 - PRODIST)

- **Relevância do Fator de Potência (0,92) nas perdas:** O PRODIST Módulo 7, Item 26, adota um fator de potência de 0,92 para o cálculo das perdas no Sistema de Distribuição de Média Tensão (SDMT) e no Sistema de Distribuição de Baixa Tensão (SDBT).¹ O JSY-MK-194G mede o fator de potência real 1, permitindo comparar o desempenho real com o parâmetro regulatório e identificar oportunidades de otimização. (Módulo 7 - PRODIST)

O JSY-MK-194G, ao fornecer medições em tempo real de potência e fator de potência, permite que um projeto aplique as metodologias de cálculo de perdas técnicas do PRODIST. Isso vai além da mera conformidade, transformando o módulo em uma ferramenta de diagnóstico para eficiência energética. Ao monitorar continuamente esses parâmetros, é possível estimar as perdas técnicas reais com maior precisão do que depender apenas de valores regulatórios fixos ou auditorias esporádicas. Essa capacidade permite a identificação de ineficiências em equipamentos ou condições operacionais que contribuem para perdas mais elevadas, possibilitando esforços de otimização direcionados e, conseqüentemente, economia de custos e melhoria do desempenho da rede. (Módulo 7 - PRODIST) A capacidade do JSY-MK-194G de fornecer dados para cálculos de perdas técnicas e indicadores de qualidade do produto permite que empresas realizem "auditorias internas" e pré-conformidade, identificando problemas antes de serem penalizadas.

2.5.3 Cálculo de Indicadores de Qualidade do Produto (Módulo 8)

O Módulo 8 do PRODIST estabelece uma série de indicadores para avaliar a qualidade do produto (tensão) fornecido, que são cruciais para a experiência do consumidor e a integridade dos equipamentos. (Módulo 8 - PRODIST) O JSY-MK-194G pode ser uma fonte de dados valiosa para derivar muitos desses indicadores, embora o processamento seja externo.

Variações de Tensão em Regime Permanente (DRP, DRC):

- **Cálculo:** DRP (Duração Relativa da Transgressão de Tensão Precária) e DRC (Duração Relativa da Transgressão de Tensão Crítica) são percentuais de leituras de tensão que caem nas faixas precárias e críticas, respectivamente, baseadas em 1.008 leituras válidas obtidas em intervalos de 10 minutos. (Módulo 8 - PRODIST)
- **Aplicação com JSY-MK-194G:** O JSY-MK-194G fornece leituras de tensão. (Jian Si Yan, 2025) Um microcontrolador ou sistema externo deve coletar essas leituras a cada 10 minutos, classificá-las em "adequada", "precária" ou "crítica" com base nas faixas do Anexo 8.A do PRODIST 1, e então calcular a DRP e DRC utilizando as Equações 1 e 2 do Módulo 8.1 O monitoramento desses indicadores é vital para garantir a qualidade da tensão e evitar compensações aos consumidores. (Módulo 8 - PRODIST)
- **Adequação JSY-MK-194G:** Alta (dados brutos OK, processamento externo essencial). (Módulo 8 - PRODIST)

Fator de Potência (fp):

- **Cálculo:** O fator de potência é a razão entre a potência ativa e a potência aparente, ou entre a energia ativa e a raiz quadrada da soma dos quadrados das energias ativa e reativa. (Módulo 8 - PRODIST)
- **Aplicação com JSY-MK-194G:** O JSY-MK-194G mede diretamente o fator de potência. (Jian Si Yan, 2025)
- **Adequação JSY-MK-194G:** Alta (dado direto). (Módulo 8 - PRODIST)

Distorções Harmônicas (DITh%, DTT%):

- **Cálculo:** Envolve a relação entre a tensão harmônica de ordem 'h' (V_h) e a tensão fundamental (V_1), exigindo análise de Fourier para decompor a forma de onda. (Módulo 8 - PRODIST)
- **Aplicação com JSY-MK-194G:** O JSY-MK-194G utiliza amostragem AD de 24 bits (Jian Si Yan, 2025), o que fornece uma base de dados de alta fidelidade da forma de onda. No entanto, o módulo não realiza a análise harmônica internamente. Para calcular DITh% e DTT%, um sistema externo

(microcontrolador com capacidade de processamento ou um servidor na nuvem) precisaria capturar as amostras de tensão e corrente e aplicar algoritmos de Transformada Rápida de Fourier (FFT). (Módulo 8 - PRODIST) O PRODIST Módulo 5, Item 50.6, exige apuração até a 40ª ordem harmônica. (Módulo 5 - PRODIST) A precisão de $\pm 1,0\%$ do JSY-MK-194G pode ser um limitador para medições harmônicas de alta precisão, que geralmente exigem instrumentos Classe A ou S (PRODIST Módulo 5, Item 49.b).

- **Adequação JSY-MK-194G:** Média (dados brutos promissores, mas processamento complexo e precisão final a verificar). (Módulo 8 - PRODIST)

Desequilíbrio de Tensão (FD%):

- **Cálculo:** O FD% é a relação percentual entre a magnitude da tensão eficaz de sequência negativa (V^-) e a tensão eficaz de sequência positiva (V^+). (Módulo 8 - PRODIST)
- **Aplicação com JSY-MK-194G:** O JSY-MK-194G é um módulo monofásico de dois canais. (Jian Si Yan, 2025) Para calcular o FD% em um sistema trifásico, seriam necessários três módulos JSY-MK-194G (ou um medidor trifásico compatível) para medir as três tensões de fase. Com as três tensões de fase, o microcontrolador/sistema externo pode aplicar as equações para calcular o FD%. (Módulo 8 - PRODIST)
- **Adequação JSY-MK-194G:** Média (se trifásico, requer 3 módulos e processamento externo). (Módulo 8 - PRODIST)

Flutuação de Tensão (Pst, Plt):

- **Cálculo:** Pst (severidade de cintilação de curta duração) é calculado a partir de uma soma ponderada de níveis de flutuação. (Módulo 8 - PRODIST) Plt (longa duração) é derivado de amostras consecutivas de Pst. (Módulo 8 - PRODIST) A medição exige um "flickermeter" que atenda à norma IEC 61000-4-15.1

- **Aplicação com JSY-MK-194G:** Embora o JSY-MK-194G forneça leituras de tensão, não há indicação de que ele implemente o algoritmo de flickermeter. A implementação desse algoritmo a partir das amostras de tensão do JSY-MK-194G exigiria um processamento externo muito sofisticado e intensivo, o que pode ser impraticável para microcontroladores simples. (Jian Si Yan, 2025)
- **Adequação JSY-MK-194G:** Baixa (processamento muito complexo, não trivial para microcontrolador). (Módulo 8 - PRODIST)

Variações de Tensão de Curta Duração (VTCD):

- **Cálculo:** As VTCDs são classificadas por amplitude (em p.u. da tensão de referência) e duração (IMT, AMT, EMT, ITT, ATT, ETT). (Módulo 8 - PRODIST) Indicadores como V_e (amplitude), Δt_e (duração), f_e (frequência) e FI (Fator de Impacto) são calculados. (Módulo 8 - PRODIST) A detecção envolve comparar a tensão com uma tensão de referência móvel. (Módulo 8 - PRODIST)
- **Aplicação com JSY-MK-194G:** O JSY-MK-194G mede tensão (Jian Si Yan, 2025) Um microcontrolador ou sistema externo pode monitorar as leituras de tensão em alta frequência e implementar os algoritmos de detecção e classificação de VTCD conforme as tabelas 5, 6 e 7 do Módulo 8.1
- **Adequação JSY-MK-194G:** Alta (dados brutos OK, processamento externo essencial). (Módulo 8 - PRODIST)

A Tabela 2 a seguir resume os indicadores de Qualidade do Produto do PRODIST, suas fórmulas e a relação com os dados do JSY-MK-194G, destacando o processamento externo necessário. Esta tabela é fundamental para ilustrar a complexidade e a viabilidade de derivar os indicadores de qualidade do PRODIST a partir dos dados do JSY-MK-194G. Ela destaca claramente onde o módulo é uma fonte de dados robusta e onde o gargalo reside no processamento externo, orientando o desenvolvimento de software e a escolha de hardware adicional.

Tabela 2 Indicadores de Qualidade Do Produto Da PRODIST em Relação Com O JSY-MK-194G (Módulo 8 - PRODIST)

Indicador PRODIST	Descrição Breve	Fórmula/Base (Módulo 8)	Dados do JSY-MK-194G	Processamento Externo Necessário	Adequação JSY-MK-194G
Regime Permanente					
DRP (%)	Duração de Tensão Precária	Equação 1 (Item 26.5)	Tensão (V)	Coleta 10min, Classificação (Anexo 8.A), Agregação 1008 leituras, Cálculo %	Alta (dados brutos OK, processamento externo essencial)
DRC (%)	Duração de Tensão Crítica	Equação 2 (Item 26.5)	Tensão (V)	Coleta 10min, Classificação (Anexo 8.A), Agregação 1008 leituras, Cálculo %	Alta (dados brutos OK, processamento externo essencial)
Fator de Potência (fp)	Razão P/S	Equação 7/8 (Item 38)	Fator de Potência (direto)	N/A (leitura direta)	Alta (dado direto)
DITh%	Distorção Harmônica Individual	Equação 9 (Item 45)	Tensão (V) (24-bit AD)	Amostragem de forma de onda, FFT, Cálculo % (até 40ª ordem)	Média (dados brutos promissores, mas processamento complexo e precisão final a verificar)
DTT%	Distorção Harmônica Total	Equação 10 (Item 45)	Tensão (V) (24-bit AD)	Amostragem de forma de onda, FFT, Cálculo % (até 40ª ordem)	Média (dados brutos promissores, mas processamento complexo e precisão final a verificar)
FD%	Desequilíbrio de Tensão	Equação 14/15 (Item 51/52)	Tensão (V) (requer 3 módulos para trifásico)	Cálculo de sequências positiva/negativa	Média (se trifásico, requer 3 módulos e processamento externo)
Pst	Severidade Flutuação Curta Duração	Equação 17 (Item 61)	Tensão (V)	Algoritmo de Flickermeter (IEC 61000-4-15)	Baixa (processamento muito complexo, não trivial para microcontrolador)

Plt	Severidade Flutuação Longa Duração	Equação 18 (Item 62)	Pst	Agregação de Pst	Baixa (depende da viabilidade de Pst)
Regime Transitório					
Ve (%)	Amplitude VTCD	Equação 19 (Item 71)	Tensão (V)	Detecção de desvios rápidos, cálculo %	Alta (dados brutos OK, processamento externo essencial)
Δte (ms)	Duração VTCD	Equação 20 (Item 71)	Tensão (V)	Medição de tempo entre limiares	Alta (dados brutos OK, processamento externo essencial)
fe	Frequência VTCD	Equação 21 (Item 71)	Tensão (V)	Contagem de eventos	Alta (dados brutos OK, processamento externo essencial)
FI	Fator de Impacto VTCD	Equação 22 (Item 74)	fe, fpond (Tabela 8)	Soma ponderada de frequências de eventos	Alta (dados brutos OK, processamento externo essencial)

Fonte: Própria (2025)

A análise da Tabela 2 revela que, embora o JSY-MK-194G seja um sensor capaz de fornecer os dados brutos para a maioria dos indicadores de qualidade do produto do PRODIST, a complexidade computacional para derivar esses indicadores é substancial. (Módulo 8 - PRODIST) Os indicadores de qualidade do produto do PRODIST (DRP, DRC, DTT%, FD%, Pst, FI) não são medições diretas, mas sim o resultado de cálculos complexos e estatísticos que exigem processamento externo. (Módulo 8 - PRODIST)

O datasheet do JSY-MK-194G não indica que o módulo realize essas análises internamente. (Módulo 8 - PRODIST) Isso significa que um projeto que utilize o JSY-MK-194G para monitoramento da qualidade de energia precisará alocar recursos consideráveis para o desenvolvimento de software. Este software será responsável por coletar os dados brutos, aplicar as fórmulas e executar as análises estatísticas e agregações temporais exigidas pela regulamentação.

O JSY-MK-194G, portanto, atua como um sensor de dados, e não como um

medidor PRODIST-compliant para análise de qualidade por si só. (Módulo 8 - PRODIST)

A complexidade computacional para alguns desses cálculos, como a Transformada Rápida de Fourier (FFT) para harmônicos ou os algoritmos de flickermeter para Pst/Plt a partir de dados de 24 bits, destaca a importância de escolher microcontroladores com poder de processamento adequado ou de descarregar essas tarefas para a nuvem. Isso direciona o design da arquitetura do sistema, movendo a inteligência para onde a capacidade de processamento é mais abundante e escalável.

2.6 Pertinência dos Cálculos para um Projeto e Representação em Ferramentas IOT

A aplicação dos cálculos do PRODIST em um projeto de monitoramento de energia, mesmo que não para fins de faturamento oficial, oferece múltiplos benefícios e se integra de forma sinérgica com as ferramentas de IoT, permitindo uma gestão energética mais inteligente e proativa.

2.6.1 Relevância para o Projeto

A relevância de integrar os cálculos do PRODIST em um projeto de monitoramento de energia vai além da mera conformidade regulatória:

- **Conformidade Regulatória (Monitoramento):** Embora o JSY-MK-194G não seja um medidor para faturamento oficial, ele permite que os projetos monitorem a conformidade com os indicadores de qualidade do PRODIST. Isso é de grande valor para distribuidoras (para evitar penalidades e otimizar a rede) e para grandes consumidores ou geradores (para entender seu impacto na rede e evitar custos adicionais ou multas por não conformidade, como fator de potência inadequado ou distorções harmônicas excessivas). (PRODIST) A capacidade de identificar proativamente problemas antes que se tornem violações regulatórias é um diferencial.

- **Otimização Energética e Gestão de Custos:** A medição precisa de energia (consumo e injeção), demanda e fator de potência, fornecida pelo JSY-MK-194G e processada externamente, permite identificar desperdícios, otimizar o uso de equipamentos e implementar estratégias eficazes de economia de energia. (Jian Si Yan, 2025) (PRODIST) O monitoramento contínuo das perdas técnicas, utilizando as metodologias do Módulo 7 do PRODIST, ajuda a identificar pontos de ineficiência na distribuição local, resultando em economia de custos. (PRODIST)
- **Manutenção Preditiva e Confiabilidade:** A análise da qualidade da tensão (harmônicos, desequilíbrio, VTCD), derivada dos dados do JSY-MK-194G e processada por algoritmos externos, pode prever falhas em equipamentos sensíveis à qualidade da energia, prolongar sua vida útil e, conseqüentemente, melhorar a confiabilidade do sistema elétrico local. (PRODIST) Isso se traduz em menos tempo de inatividade e custos de reparo reduzidos.
- **Gestão de Geração Distribuída:** A capacidade bidirecional do JSY-MK-194G para medir energia ativa positiva e negativa (Jian Si Yan, 2025), é fundamental para monitorar a energia injetada na rede por fontes renováveis (micro/minigeração) e a energia consumida. Isso permite a gestão de créditos de energia e a conformidade com as regras do Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE) do (Módulo 5 PRODIST, Item 19).

2.6.2 Integração com Ferramentas IOT

A integração do JSY-MK-194G com ferramentas IoT modernas cria um sistema de monitoramento de energia inteligente, escalável e acessível.

- **Polling Modbus:** Solicitar dados dos registradores do JSY-MK-194G. (ESPHOME, 2025)
- **Parsing de Dados:** Converter os dados brutos (inteiros de 4 bytes) para os valores reais (float) usando os fatores de escala especificados (e.g., DATA/10000 para tensão, corrente, potência). (ESPHOME, 2025)
- **Processamento Local (Cálculos PRODIST Simples):** Realizar cálculos de demanda integralizada (média de potência ao longo do tempo) e iniciar a

agregação de leituras para DRP/DRC (contagem de leituras em faixas de tensão). (ESPHOME, 2025)

- **Sincronismo de Tempo:** O ESPHOME pode sincronizar o tempo via NTP (Network Time Protocol), o que é crucial para a agregação temporal exigida pelo PRODIST (intervalos de 10 minutos, 1008 leituras). (ESPHOME, 2025)
- **Conectividade de Rede:** Enviar os dados processados para a nuvem via Wi-Fi ou Ethernet. (ESPHOME, 2025)

As especificações técnicas do ESP32-WROOM-32, detalhadas na Tabela 3, justificam sua adequação como microcontrolador/gateway. A combinação de um CPU dual-core de 32 bits com frequências de clock flexíveis (80MHz/240MHz) oferece poder de processamento suficiente para controle e processamento de dados. A presença de 512kB de RAM e 4MB de memória flash externa permite o armazenamento de firmware complexo e dados. A vasta gama de interfaces de comunicação (SPI, I2C, I2S, CAN, UART) é crucial para a conectividade com uma variedade de sensores, atuadores e outros dispositivos periféricos. As capacidades de Wi-Fi (802.11 b/g/n) e Bluetooth (V4.2-BLE e Classic Bluetooth) são particularmente importantes para a função de gateway, permitindo a comunicação sem fio com redes locais e outros dispositivos, facilitando a coleta e o envio de dados para a nuvem ou outros sistemas. (ESPBoards, 2025)

Tabela 3 Especificações Técnicas do ESP32-WROOM-32

Característica	Especificação
Tensão de alimentação (USB)	5V DC
Tensão de Entrada/Saída	3.3V DC
Corrente de operação necessária	mín. 500mA
SoC	ESP32-WROOM-32
CPU	Xtensa single-dual-core 32-bit LX6
Faixa de Frequência de Clock	80MHz/240MHz
RAM	512kB
Memória Flash Externa	4MB
Pinos de I/O	34
Canais ADC	18
Resolução ADC	12-bit
Canais DAC	2
Resolução DAC	8-bit

Interfaces de Comunicação	SPI, I2C, I2S, CAN, UART
Protocolos Wi-Fi	802.11 b/g/n (802.11n até 150 Mbps)
Frequência Wi-Fi	2.4 GHz-2.5 GHz
Bluetooth	V4.2-BLE e Classic Bluetooth
Antena Wireless	PCB
Chip USB para Serial	CP2104
Dimensões	39x28x6mm (1.5x1.1x0.2in)

Fonte (ESPBoards, 2025)

- **MQTT:** Este é um protocolo de mensagens leve, ideal para telemetria em ambientes IoT. (Ferreira, 2025). O microcontrolador ESP publicaria os dados do JSY-MK-194G (ou os indicadores parcialmente processados) em tópicos MQTT. Sua eficiência reside na capacidade de enviar grandes volumes de dados de múltiplos dispositivos com baixo consumo de banda e energia, garantindo entrega em tempo real. (Ferreira, 2025).
- **HTTPS:** Utilizado para comunicação segura com APIs de nuvem. (Sena 2021). É essencial para enviar dados para plataformas como Firebase (via REST API) ou outros serviços web, garantindo a integridade e confidencialidade dos dados transmitidos pela internet. (Sena 2021).
- **Blynk:** Uma plataforma de IoT que permite a prototipagem rápida e a visualização de dados em tempo real. (Blynk, 2025) O Blynk permite criar dashboards personalizados para monitorar tensão, corrente, potência, energia e fator de potência do JSY-MK-194G, oferecendo uma interface amigável para o usuário final ou para testes rápidos de conceito. (Blynk, 2025)
- **Firebase:** Uma plataforma de backend-as-a-service do Google, que oferece uma suíte de serviços para desenvolvimento de aplicações web e mobile (Cereza, 2025): **Firestore:** Um banco de dados NoSQL escalável para armazenar os dados brutos e processados do JSY-MK-194G. (Cereza, 2025)
- **Cloud Functions:** Permite executar a lógica de negócios para os cálculos PRODIST mais complexos (e.g., DRP, DRC, DTT%, FD%, FI, Pst/Plt). (Cereza, 2025) As Cloud Functions podem ser acionadas por novos dados no Firestore ou por um agendamento (cron job) para processar os blocos de 1008 leituras. (Cereza, 2025)

- **Autenticação:** Gerenciar o acesso seguro aos dados do projeto. (Cereza, 2025)
- **Notificações (Firebase Cloud Messaging - FCM):** Enviar alertas (e.g., via FCM) se os indicadores PRODIST se aproximarem ou excederem os limites

A arquitetura proposta demonstra uma sinergia otimizada entre o processamento na borda (microcontrolador ESP) e o poder computacional da nuvem (Firebase Cloud Functions). O ESP32 é responsável por tarefas de baixo nível e tempo real, como leitura Modbus, parsing e agregação básica (demanda, contagem DRP/DRC). Cálculos mais complexos e intensivos (FFT para harmônicos, algoritmos de flickermeter, análise estatística de 1008 leituras) são delegados às Cloud Functions. Essa divisão de trabalho aproveita os pontos fortes de cada camada: baixo custo e resposta rápida na borda, escalabilidade e poder de processamento ilimitado na nuvem, resultando em um design de sistema eficiente em termos de custo e desempenho.

2.7 Conectividade IOT

Para integração com a Internet das Coisas, o ESP32 utiliza sua interface Wi-Fi para comunicar-se via protocolos padrão:

- **MQTT** – Protocolo leve publish/subscribe muito usado em IoT. O ESP32 pode publicar leituras e assinar tópicos em um broker MQTT (local ou em nuvem). Isso permite comunicação bidirecional eficiente entre dispositivos e servidores, com baixo overhead de rede (Ferreira, 2025).
- **HTTP/HTTPS** – Também é possível usar requisições HTTP REST. Por exemplo, pode-se enviar dados para servidores web ou APIs, ou consumir dados de serviços online. Plataformas IoT modernas (como Blynk) costumam usar APIs HTTP seguras para receber e exibir informações dos dispositivos (Sena 2021).
- **Plataformas cloud (Blynk, Firebase etc.)** – O sistema pode ainda integrar-se a plataformas de IoT hospedadas. O Blynk, por exemplo, é uma plataforma low-code que permite criar apps móveis para controle de dispositivos. A versão mais recente do Blynk suporta protocolos MQTT e HTTPS para

comunicação com dispositivos, ampliando interoperabilidade. (Sena 2021) Já o Firebase (base de dados em tempo real do Google) permite armazenar e sincronizar leituras remotamente. Tutoriais demonstram como o ESP32 se conecta ao Firebase para gravar e ler dados de qualquer lugar do mundo (Cereza (2025)). Em síntese, o ESP32 pode empurrar dados por MQTT ou HTTP(s) a esses serviços, facilitando monitoramento e acionamento remoto.

Vantagens e Limitações da Arquitetura:

Vantagens:

- **Monitoramento remoto:** Com Wi-Fi e cloud, consome-se dados de qualquer local, facilitando o controle energético a distância (Cereza (2025)).
- **Protocolos padronizados:** O uso de MQTT e HTTP habilita comunicação leve e confiável em IoT ((Ferreira, 2025)), adaptável a diversos cenários.
- **Flexibilidade de plataforma:** Ferramentas como Blynk suportam múltiplos protocolos (HTTP, MQTT, LoRaWAN etc.), evitando lock-in e dando liberdade na escolha da infraestrutura.
- **Precisão e robustez:** O sensor JSY-MK-194G tem precisão de $\sim\pm 1,0\%$ (Jian Si Yan, 2025) e comunicação isolada; a fonte Mean Well oferece proteções completastme.com, garantindo medições confiáveis.
- **Baixo custo:** Uso de módulos populares (ESP32, SSD1306, JSY) torna o protótipo acessível, com hardware de valor relativamente baixo e abundantes bibliotecas de software Arduino/ESP32 disponíveis.

Limitações:

- **Dependência de conectividade:** Requer rede Wi-Fi ou internet ativa; falhas na conexão interrompem o monitoramento em nuvem.
- **Segurança da informação:** Transmissão pela internet exige proteção de dados e autenticação (credenciais MQTT, tokens HTTP), o que complica a implementação.
- **Consumo extra de energia:** O módulo Wi-Fi do ESP32 consome corrente significativa em atividade; pode ser contraprodutivo em aplicações off-grid ou de baixo consumo.

- **Carga na fonte:** Apesar de baixa (sensor $\sim 10\text{mA}$ (Jian Si Yan, 2025) e display baixo consumo), muitos periféricos simultâneos podem aproximar o limite de 1,4A da fonte, requerendo cuidado em projetos maiores.

Em resumo, a arquitetura proposta mostra boa performance em protótipos práticos, mas demanda atenção a conectividade e segurança de dados.

3 DESENVOLVIMENTO

Esta seção descreve, de forma organizada e técnica, o desenvolvimento do protótipo de medidor de energia residencial baseado no módulo JSY-MK-194G e no microcontrolador Wemos D1 Mini (ESP32). Contém o projeto de hardware, interligações, firmware, procedimentos de teste e de calibração, além das práticas de segurança adotadas durante a implementação.

3.1 Visão Geral dos Componentes do Projeto

Figura 3.1 Placa de Desenvolvimento WEMOS D1 Mini ESP32

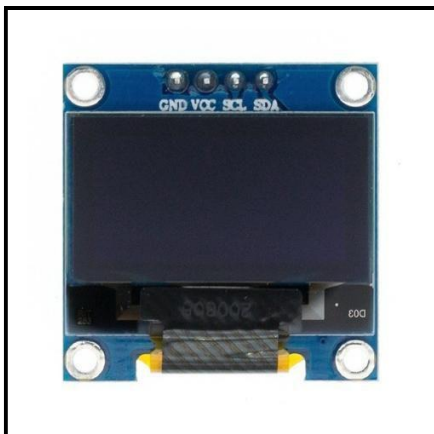


Fonte: ALIXPRESS (2024).

É uma placa de desenvolvimento compacta baseada no módulo ESP32 (dual-core Xtensa a até 240 MHz, 4 MB de flash) (ESPBoards). Ela possui conectividade Wi-Fi 802.11b/g/n e Bluetooth 4.2 integrados, além de conversor USB-Serial (CH340) para programação via Micro-USB(ESPBoards). A WEMOS D1 Mini ESP32 fornece diversos GPIOs: são disponibilizados até 26 pinos digitais e 18 canais ADC, além de interfaces integradas (3 UART, 3 SPI, 2 I2S, 2 I²C, 2 DAC) (ESPBoards). Esses recursos permitem conectar sensores e atuadores variados. No projeto, utilizamos a comunicação UART TTL (nível 3,3 V) do ESP32 para dialogar com o módulo de medição JSY-MK-194G. A alimentação da Wemos (5 V via USB/VIN ou 3,3 V direto)

supre também o sensor, que opera em 3,3–5 V (Jian Si Yan, 2025). O núcleo do sistema é um módulo ESP32, um microcontrolador de 32 bits dual-core (80–240 MHz) com Wi-Fi e Bluetooth integrados (ESPBoards (2025)). Cada núcleo pode operar de forma independente, permitindo processamento paralelo. O ESP32 dispõe de múltiplas interfaces: conversores ADC/DAC, SPI, UART, I2C, I2S, interface SD, Ethernet, sensores de toque e de efeito Hall incorporados (ESPBoards (2025)). Essa riqueza de periféricos e conectividades torna o ESP32 ideal para aplicações IoT, fornecendo capacidade de comunicação sem fio nativa.

Figura 3.2 Display OLED (SSD1306, 0,96")

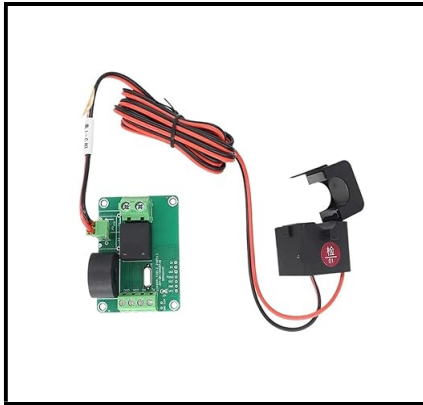


Fonte: MAGAZINE LUIZA (2024)

Utiliza-se um display OLED monocromático de 0,96 polegadas com controlador SSD1306. Esse módulo opera em 3,3–6V e possui saída lógica compatível com 3,3V/5V (Maker Hero (2025)). A interface é I²C (pinos SDA e SCL), com resolução de 128×64 pixels e exibição em cor branca (ESPBoards (2025)). Na prática, o display não requer backlight (OLED autoiluminado) e é de alto contraste, economizando

energia. Seus pinos são padronizados: GND, VCC, SCL e DAS (Maker Hero (2025)), facilitando a conexão ao microcontrolador.

Figura 3.3 Sensor de Medição de Energia JSY-MK-194G



Fonte: AMAZON (2024)

Dispositivo de medição de energia elétrica monofásico de dois canais, concebido para a aquisição, coleta e transmissão de parâmetros de corrente alternada (CA). Sua arquitetura integra medição de alta precisão com tecnologia de comunicação digital, tornando-o uma opção eficaz para diversas aplicações. De acordo com o datasheet, o JSY-MK-194G “mede com precisão tensão AC monofásica, corrente, potência, fator de potência, frequência e energia elétrica” (JSY-MK-194G (Jian Si Yan, 2025), integrando tecnologia de medição e comunicação digital. O módulo possui interface de comunicação UART TTL e segue protocolo Modbus-RTU. Além disso, é totalmente isolado galvanicamente (suporta até 3000VDC de isolamento) (Jian Si Yan, 2025). Suporta alimentação DC entre 3,3 e 5,0 V (Jian Si Yan, 2025), e consome apenas 10mA. A precisão típica de medição é alta (os parâmetros têm erro abaixo de $\pm 1,0\%$ no datasheet (Jian Si Yan, 2025), o que assegura bons resultados em monitoramento de consumo.

Figura 3.4 Fonte de Alimentação Mean Well APV-8-5 (8W, 5V)



Fonte: WALMART (2024).

Converte 220 V AC -> 5 V DC para alimentar o ESP32 e periféricos; inclui proteções internas (sobrecorrente/sobretensão). (Mean Well, 2025).

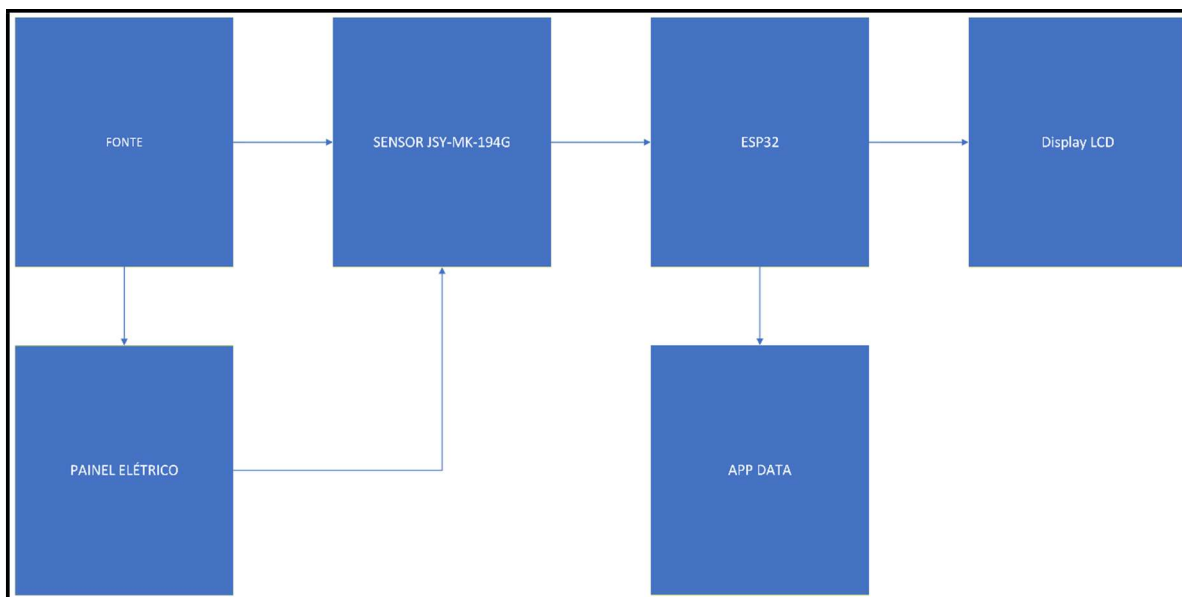
3.2 Principais Diagramas do Projeto

O protótipo integra quatro blocos principais: (4) módulo de medição JSY-MK-194G (sensor), (2) gateway/controlador Wemos D1 Mini ESP32, (3) display OLED 0,96" (SSD1306) para interface local e (5) fonte de alimentação Mean-Well APV-8-5 (5 V DC). O JSY realiza as medições elétricas (tensão, corrente, potência, energia, fp,

frequência) e envia os dados via UART/Modbus-RTU; o ESP32 atua como gateway para conversão Modbus → IP (MQTT/HTTP) e como interface I²C para o OLED.

3.2.1 Fluxograma da Comunicação do Circuito:

Figura 3.5 Fluxograma da Comunicação do Circuito



Fonte: Próprio Autor (2025).

O fluxograma demonstra o fluxo de informações e comandos entre os principais módulos que compõem o sistema. A comunicação inicia-se na rede elétrica, que fornece energia à fonte MEAN WELL APV-8-5, responsável por converter a tensão de 110/220V AC em 5V DC para alimentar o circuito. Em seguida, o sensor JSY-MK-194G realiza a medição de corrente, tensão, potência ativa, potência aparente, fator de potência e frequência da rede.

Os dados medidos são transmitidos via interface UART ao ESP32, que processa as informações e as disponibiliza de duas formas:

- Localmente, no display OLED (SSD1306), por meio da comunicação I²C;
- Remotamente, através da conexão Wi-Fi, que envia as informações ao App Data ou dashboard online, permitindo a visualização em tempo real e o armazenamento histórico dos dados.

O fluxograma reflete também a retroalimentação de dados, na qual o sistema interpreta os valores recebidos para identificar variações anormais de consumo, possibilitando futuras expansões com alertas automatizados ou controle de cargas.

Em suma, o fluxograma sintetiza a integração entre medição, processamento e exibição de dados, assegurando a comunicação eficiente entre o hardware físico e a camada de software do sistema.

Fonte de alimentação Mean Well APV-8-5 - Fornece alimentação DC regulada para o sistema. Trata-se de um driver AC/DC de 7 W, com saída única de 5 V DC a 1,4 A (Mean Well (2025)). A entrada aceita ampla faixa (90–264 VAC ou 127–370 VDC) (Mean Well (2025)), garantindo compatibilidade com redes residenciais. O dispositivo inclui várias proteções (proteção contra sobrecorrente, sobretensão, curto-circuito, sobretemperatura etc.) (tme.com), aumentando a robustez do protótipo. As dimensões compactas (60×30×22 mm) e eficiência (~75%) tornam essa fonte adequada para sistemas embarcados de baixo consumo.

Ligações I²C (Display) - O ESP32 comunica-se com o display OLED via barramento I²C. Assim, os pinos SDA e SCL do display conectam-se aos pinos correspondentes do ESP32, com resistores pull-up integrados no módulo. O VCC do display liga-se a +5V (fornecidos pela fonte) e o GND ao terra comum (ESPBoards, 2025).

3.2.1.1 Linguagem Utilizada

- **Ligações UART (Sensor de Energia)** - O sensor JSY-MK-194G usa uma interface serial TTL. Em geral, o TX do sensor conecta ao pino RX (GPIO16, UART2) do ESP32, e o RX do sensor conecta ao TX (GPIO17, UART2) do ESP32 (GitHub FConcept 2025). O módulo é alimentado em +3.3V (a partir do ESP32/regulador) (Jian Si Yan, 2025) e compartilha o GND comum com o ESP32, garantindo referência estável (Github FConcept 2025).
- **Alimentação Comum** - A fonte Mean Well fornece 5V DC. Esse 5V alimenta o display OLED (aceita 3,3–6V) (ESPBoards (2025)) e alimenta o módulo

ESP32 (que possui regulação interna para 3,3V) e o sensor (que admite 3,3–5V) (Jian Si Yan, 2025). Todos os módulos compartilham a terra comum, necessário tanto para comunicação I²C quanto para comunicação serial UART. O circuito, portanto, possui uma ligação em estrela de GND, e as linhas de dados são isoladas logicamente (I²C e UART) (Mean Well, 2025).

- **Arduino Ide:** uso de YAML e componentes existentes (UART Modbus, MQTT) para acelerar integração que permite NTP e automações básicas.

Funções principais do Firmware:

- **Inicialização:** configurar UART (baud, timeout), I²C, Wi-Fi e NTP.
- **Polling Modbus:** rotina periódica (ex.: 1 s a 10 s) para leitura dos registradores do JSY; tratamento de exceções de comunicação.
- **Parsing e escala:** interpretar registros (4 bytes para tensões/potências; aplicar fatores de escala: /10000, /1000, /100).
- **Exibição local:** atualizar OLED com valores essenciais (tensão, corrente, potência, kWh, status Wi-Fi).
- **Telemetria IoT:** publicar via MQTT (tópicos organizados por dispositivo/medição) ou enviar via HTTP/HTTPS para API. Autenticação/tokens devem ser usados.
- **Gerenciamento de falhas:** retries de Modbus, watchdog para reset em caso de travamento, logs mínimos em serial.

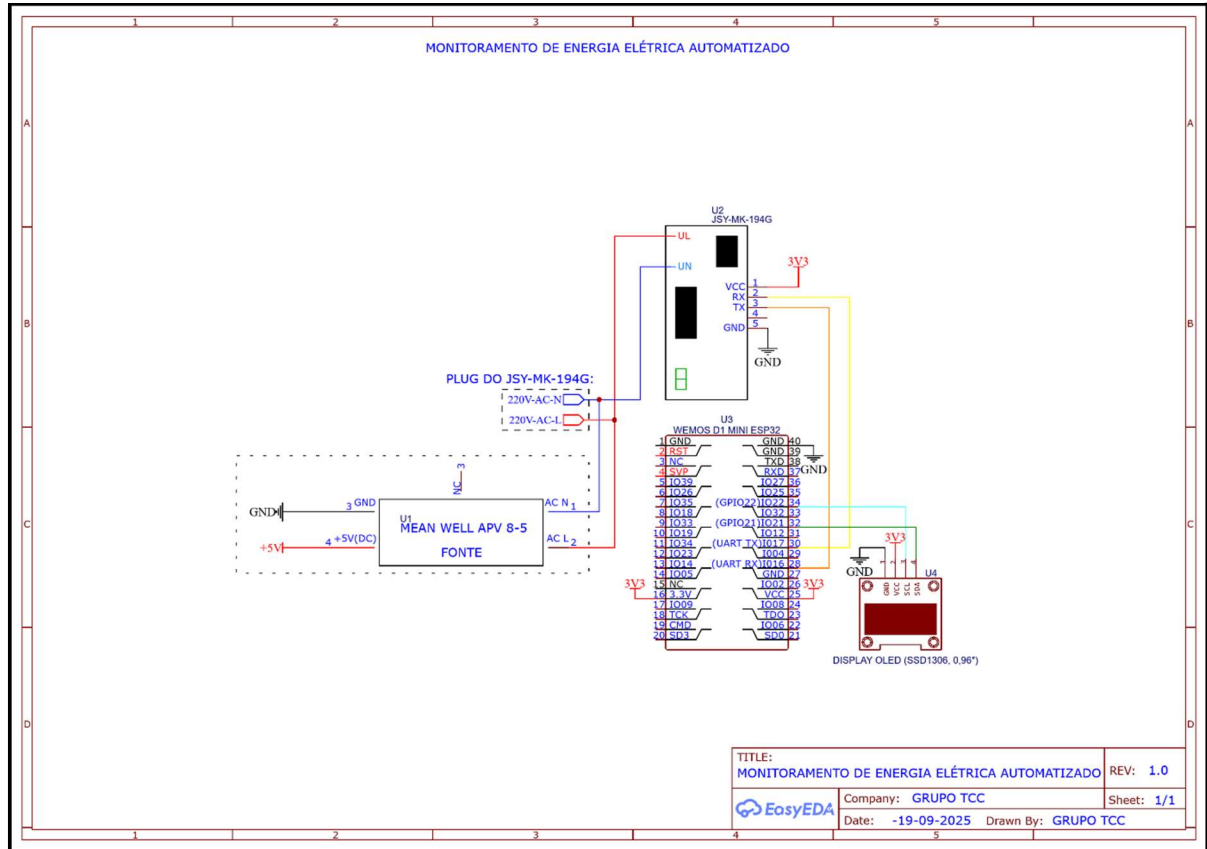
Comunicação entre módulos:

- **UART (JSY ↔ ESP32):** TX (JSY) → RX (ESP32 UART_x); RX (JSY) ← TX (ESP32). Conexão TTL 3,3 V; usar exatamente os níveis lógicos corretos (JSY aceita 3,3–5 V). Recomenda-se usar UART2 do ESP32 (GPIO16/GPIO17) para liberar UART0 para debug. Parâmetros típicos: 9600/19200 bps (conforme datasheet JSY), 8N1, timeout de leitura configurável.
- **I²C (ESP32 ↔ OLED):** SDA → GPIO21; SCL → GPIO22 (pinos padrão do ESP32). Pull-ups integrados no módulo OLED normalmente dispensam resistores externos, mas confirmar no esquema do módulo.

- **Fluxos de Dados:** JSY amostra sinais AC, calcula parâmetros internos (registradores Modbus).
ESP32 faz polling Modbus-RTU (leitura periódica dos registradores), converte/escala os valores (ex.: divide por 10.000 / 1.000 / 100 conforme especificação do sensor).
Dados são exibidos no OLED e agregados/localmente (ex.: demanda, kWh acumulado).
ESP32 publica leituras em broker MQTT ou envia via HTTP/HTTPS/Firebase/ESPHome/Arduino Ide para armazenamento/processamento em nuvem.
O firmware coleta os blocos de leitura (ex.: leituras a cada 10 s) e encaminha à nuvem; algoritmos em cloud (Cloud Functions) se encarregam de cálculos estatísticos exigidos pelo PRODIST (e.g., 1.008 leituras, FFT para harmônicos, Pst/Plt para flicker). O JSY fornece as grandezas de base; o cálculo de indicadores regulatórios exige processamento adicional e armazenamento temporal.
- **Conectividade:** perda de internet pode interromper monitoramento remoto — implementar buffer local e retransmissão.

3.2.2 Diagrama Esquemático do Circuito:

Figura 3.6 Diagrama Esquemático do Circuito



Fonte: Próprio Autor (2025).

O diagrama esquemático detalha as interligações elétricas e de comunicação entre os componentes.

A fonte **MEAN WELL APV-8-5** alimenta o sistema com **5V DC**, sendo o terminal positivo conectado ao pino **VIN** do **ESP32** e ao **VCC** do **display OLED**, enquanto o terminal negativo é ligado ao **GND** comum do circuito.

O **sensor JSY-MK-194G**, alimentado também pela mesma fonte, realiza a leitura direta dos condutores de fase e neutro da rede elétrica, isolando as medições do restante do sistema. Sua saída serial (TX) é conectada ao pino **RX2** do ESP32, possibilitando a recepção contínua de dados de medição.

O **display OLED (SSD1306)** é conectado ao ESP32 por meio dos pinos **SDA (GPIO 21)** e **SCL (GPIO 22)**, utilizando o protocolo I²C. Essa comunicação permite a exibição instantânea dos valores elétricos processados.

A estrutura do circuito foi projetada de forma modular, permitindo futuras expansões como integração de relés inteligentes, sensores adicionais de corrente (SCT-013) ou módulos de controle remoto.

A organização das conexões elétricas prioriza o isolamento entre os circuitos de potência e de sinal, garantindo segurança e confiabilidade nas medições. O circuito desenvolvido é composto por três subsistemas principais, cada um com função específica e interdependente: alimentação elétrica, leitura de dados e exibição de informações. A seguir, descreve-se a lógica de ligação entre os componentes.

Alimentação Elétrica:

A alimentação do sistema tem como ponto de partida a fonte *Mean Well APV-8-5*, que atua como conversor de tensão. Essa fonte recebe uma entrada de 220 V AC da rede elétrica e a converte em 5 V DC, valor seguro e adequado para os componentes eletrônicos.

A saída de 5 V DC da fonte é conectada diretamente aos pinos de alimentação da placa WEMOS D1 Mini ESP32, especificamente no pino VCC (5 V) e no pino de GND (aterramento).

Além disso, o sensor JSY-MK-194G é ligado diretamente à entrada de 220 V AC, possibilitando a medição da energia consumida pela rede elétrica.
Leitura de Dados:

A comunicação entre a placa WEMOS D1 Mini ESP32 e o sensor JSY-MK-194G ocorre por meio do protocolo Modbus-RTU, utilizando a interface UART (serial). As conexões de dados são estabelecidas da seguinte forma:

- O pino RXD0 (GPIO3) da WEMOS conecta-se ao pino TX do sensor JSY.
- O pino TXD0 (GPIO1) da WEMOS conecta-se ao pino RX do sensor JSY.

Para garantir a referência de tensão comum, os pinos de aterramento de ambos os dispositivos são interligados, ou seja, o GND da WEMOS conecta-se ao GND do sensor JSY.

3.2.2.1 Exibição de Dados

A exibição das informações é realizada por meio da comunicação entre a placa WEMOS D1 Mini ESP32 e o display OLED SSD1306, utilizando a interface I²C. As conexões são descritas a seguir:

- O pino SDA do display conecta-se ao pino IO21 (SDA) da WEMOS.
- O pino SCL do display conecta-se ao pino IO22 (SCL) da WEMOS.

A alimentação do display é fornecida diretamente pela placa WEMOS, sendo:

- O pino 3V3 da WEMOS ligado ao VCC do display;
- O pino GND da WEMOS ligado ao GND do display.

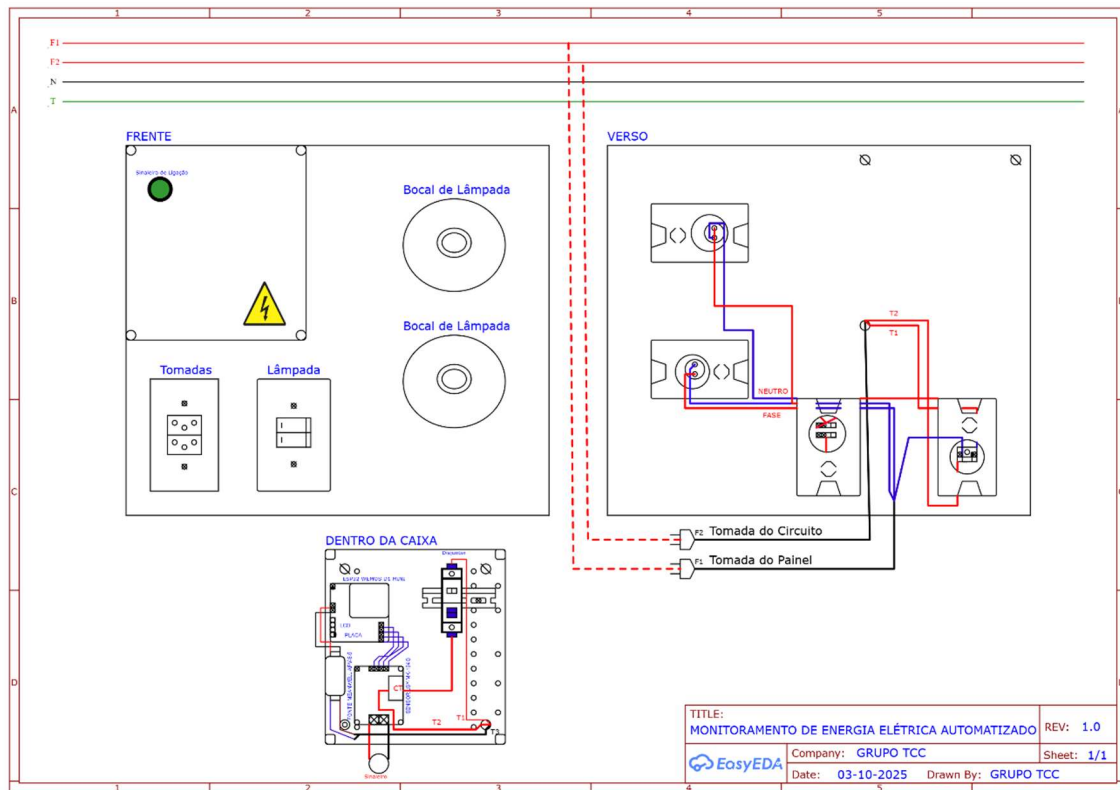
Lógica de Funcionamento:

Em resumo, a fonte de alimentação fornece a energia necessária ao funcionamento da placa WEMOS D1 Mini ESP32, que atua como controlador central. Essa placa realiza a leitura dos dados de consumo energético fornecidos pelo sensor JSY-MK-194G e, em seguida, transmite as informações para o display OLED SSD1306, onde são apresentadas ao usuário.

- **Limitação metrológica:** JSY não é homologado para faturamento (INMETRO/ANEEL); utilizar apenas para monitoramento e diagnóstico.

3.2.3 Diagrama Pictorial do Painel de Montagem:

Figura 3.7 Diagrama Pictorial do Painel de Montagem



Fonte: Próprio Autor (2025).

Análise de Segurança e Conexões do Painel Elétrico

O diagrama esquemático pictorial, almeja mostrar a uma representação real e fidedigna do projeto e sua realização com representação de forma realista do projeto de Monitoramento de Energia Elétrica Automatizado.

3.2.3.1 Segurança Elétrica (Conformidade e Mitigação de Riscos)

A segurança é um ponto central no projeto, conforme evidenciado pela aplicação de diversas normas e boas práticas:

- **Conformidade Normativa:** As ligações seguem o padrão de segurança da NBR 5410 (Instalações Elétricas de Baixa Tensão), o que é fundamental para a proteção de pessoas e equipamentos.
- **Identificação de Condutores:** É mencionada a **distinção de cores** para os condutores, um princípio básico da NBR 5410 para identificar Fase, Neutro e Terra, minimizando erros de conexão.
- **Proteção de Circuito:** Um disjuntor de proteção é empregado na entrada, atuando como proteção térmica e magnética. Isso garante a interrupção da alimentação em caso de sobrecorrente ou curto-circuito.
A descrição sugere a inserção adicional de um fusível de entrada AC e um disjuntor de proteção no circuito de alimentação da fonte, o que reforça a proteção em cascata.
- **Isolamento Galvânico:** A fonte MEAN WELL APV-8-5 fornece 5V DC isolados galvanicamente, reduzindo o risco de choque elétrico no circuito de baixa tensão (microcontrolador/display).
O sensor JSY-MK-194G possui isolamento galvânico (3 kV DC) entre os circuitos AC de medição e o sinal de baixa tensão, protegendo o módulo do sistema.
- **Separação Física:** Há separação física entre a área da rede AC (alta tensão) e a eletrônica de baixa tensão (módulo, display), além do uso de estrutura em material isolante. Essa prática é vital para a segurança.
- **Aterramento:** É previsto aterramento dedicado para os componentes metálicos (se houver), e a descrição sugere especificamente o aterramento da carcaça metálica (se aplicável), conforme as boas práticas de segurança.
- **Sinalização:** A indicação de risco elétrico com o símbolo de advertência triangular ("PERIGO: Choque Elétrico" na legenda) no painel frontal (FRENTE) é um importante recurso de segurança visual.

3.2.3.2 Análise das Conexões

O diagrama ilustra as conexões na parte traseira (VERSO) e interna (DENTRO DA CAIXA) do painel, detalhando o caminho da energia e o sistema de monitoramento:

1. Conexões de Entrada e Distribuição

- **Entrada:** A energia AC entra pelos bornes **F1** (Fase), **N** (Neutro) e **T** (Terra).
- **Disjuntor:** A Fase (linha vermelha, F1) e o Neutro (linha azul, N) passam pelo **Disjuntor de Proteção** (DENTRO DA CAIXA). A saída do disjuntor alimenta as cargas e a fonte de alimentação.
- **Cargas:** O circuito simulado alimenta duas cargas principais:
- **Tomada do Circuito (F2):** A fase e o neutro pós-disjuntor alimentam esta tomada.
- **Tomada do Pannel (F1):** A fase e o neutro pós-disjuntor alimentam esta tomada.
- **Lâmpadas/Interruptores:** A fiação mostra a fase chegando aos interruptores (Lâmpada), e o retorno (vermelho/preto) indo para os bocais, com o neutro (azul) completando o circuito. As tomadas (Tomadas) recebem Fase/Neutro/Terra.

2. Conexões do Módulo de Monitoramento

O módulo de monitoramento é composto pelo **ESP32**, **sensor JSY-MK-194G**, **fonte MEAN WELL**, e **display**:

- **Fonte de Alimentação do Módulo (MEAN WELL APV-8-5):**
- Recebe alimentação **diretamente da entrada AC** (pós-disjuntor). O **fusível de entrada AC e disjuntor de proteção** sugeridos protegem esta fonte.
- Fornece **5V DC** para alimentar o ESP32 e o display (baixa tensão).
- **Sensor JSY-MK-194G (Medição de Tensão):**
- Os bornes de medição de tensão (**UL/UN**) estão conectados em paralelo com a rede AC (Fase e Neutro pós-disjuntor). **Essa é uma conexão de alta tensão.**
- O isolamento galvânico do JSY protege o restante do módulo.
- **Sensor JSY-MK-194G (Medição de Corrente - TCs):** Os **Transformadores de Corrente (TCs)** são instalados ao redor dos condutores de carga para medição indutiva (sem contato elétrico direto com

o circuito AC principal). O diagrama mostra dois TCs, **T1** e **T2**, conectados ao JSY. **T1** está no circuito da Tomada do Painel e **T2** no circuito da Tomada do Circuito.

- **Risco elétrico:** mitigado por isolamento, fusíveis, carcaça e práticas seguras de instalação.

3.2.4 Componentes não Centrais

Os componentes não centrais são aqueles que não desempenham função direta na coleta, processamento ou exibição dos dados do sistema, mas são essenciais para garantir a interligação física, a montagem, a fixação e a proteção do protótipo.

- **Conector JST XH2.54 (4 pinos)** - Cabos Utilizados para interligar módulos e sensores de forma prática e segura, permitindo desconexões rápidas para
- **Conectores Bloco Terminal (3) (passo 5.08 mm)** - Facilitam a ligação e desconexão de fios de alimentação e sinal, garantindo robustez mecânica e elétrica.
- **Fio de Silicone 26 AWG (5 m) (1)** - Empregado nas conexões internas entre os módulos, devido à sua flexibilidade e resistência a altas temperaturas.
 - **Placas de Protótipo (PCB) 5x7 cm (1)** - Usadas para fixação e interligação elétrica dos componentes de forma semidefinitiva, substituindo o uso de protoboards temporárias.
 - **Headers (pinos de conexão) macho/fêmea** - Permitem a conexão modular entre placas e módulos, facilitando montagem, desmontagem e substituição.

Componentes Utilizados na criação do Painel:

- **Caixa de Luz Amarela 4x2 Reforçada (para tomada/interrupção)** - Serve para colocar a estrutura da lâmpada e do interruptor respectivamente.
- **Bocal de Lâmpada** - Estrutura para montagem de tomadas ou interruptores de teste, servindo como suporte físico para conexões do

painel. **Conjunto Interruptor (Tramontina)** – Usado para ligar o projeto ao sensor JSY-MG-194G.

- **Carga de Teste (Lâmpada Taschibra)** - Utilizada como carga resistiva para validar o funcionamento do sistema por meio do painel.
- **Kit com 2 Unidades Trilho DIN Perfurado Galvanizado (10 cm)** - Usado para fixação dos módulos e disjuntores no painel, garantindo organização e segurança.
- **Rolo de Fio 2,50 mm (10 metros, flexível)** - Utilizado para as ligações elétricas internas do painel de teste (alimentação, interligação de disjuntores, módulos e cargas).
- **Mangueira Conduíte Corrugado 5/8" Amarela Reforçada (10 metros)** - Proteção mecânica e isolamento dos cabos, permitindo passagem segura e organizada da fiação.
- **Disjuntor DIN Unipolar Monopolar (10 a 32A, Curva C, Tramontina)** – Atua na proteção elétrica do circuito.

Uso Prático no Painel:

Esses componentes foram empregados para montar uma estrutura prática e segura, simulando um quadro elétrico reduzido. O trilho DIN sustentou os disjuntores e módulos, os cabos realizaram as interligações, o conduíte protegeu a fiação, a caixa de luz serviu como base de conexões, e o disjuntor garantiu proteção. Essa montagem permitiu validar na prática o funcionamento do protótipo de monitoramento de energia.

3.3 Montagem, Teste, Calibração e Projeto Final

3.3.1 Montagem física com passos resumidos

A montagem iniciou-se com o preparo da base do painel, fixando-se os componentes elétricos de potência (disjuntor, tomadas e bocal) e, em seguida, os módulos eletrônicos (fonte, ESP32, sensor e display).

Foram utilizados cabos de 1,5 mm² para a ligação de fase e neutro e fios finos (jumpers) para as conexões de sinal e dados. O painel foi dimensionado de forma a permitir fácil visualização e acesso aos componentes durante os testes.

O firmware foi carregado no ESP32 via IDE Arduino, utilizando bibliotecas específicas para comunicação serial com o JSY-MK-194G e exibição gráfica no display OLED. Após a verificação das conexões, foi iniciado o processo de calibração.

3.3.2 Critérios de aceitação

- Erro médio $\leq \pm 1,5$ % (meta prática; datasheet JSY indica $\sim \pm 1,0$ % em condições ideais).
- Taxa de perda de frames Modbus < 1 % em operação normal.
- Reconexão automática Wi-Fi < 60 s após queda de sinal.

3.3.3 Planejamento de testes em bancada e em campo

- **Bancada (laboratório):** validação com cargas resistivas e instrumentação de referência; calibração por faixa.
- **Em campo (residência):** instalar no quadro de distribuição de um circuito monofásico, testar comportamento com cargas reais e registrar séries temporais para análise PRODIST/ISO.

3.3.4 Protótipo e Evolução do Projeto

- Protótipo físico montado (carcaça, eletrônica, display).
- Firmware funcional (Modbus parsing + publicação MQTT/HTTP).
- Documentação de montagem: esquemático, pinout, lista de materiais (BOM sem preços).
- Relatório de calibração e resultados dos testes (planilhas e gráficos).

3.3.5 Aplicação Observável em Protótipo e sua Progressão

Figura 3.8 Principais Componentes sem Painel



Fonte: Próprio Autor (2025).

Figura 3.9 Componentes Principais Ligados ao Painel



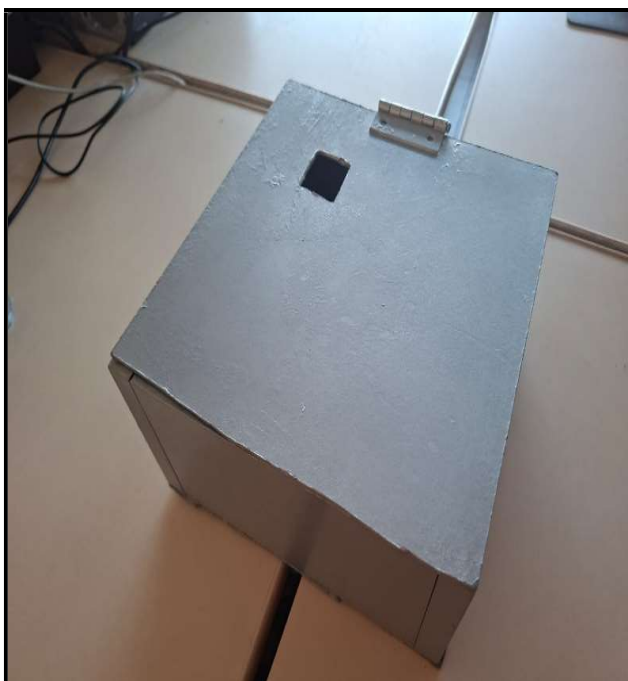
Fonte: Próprio Autor (2025).

Figura 3.10 Caixa de Proteção (Versão 1 - Aberta)



Fonte: Próprio Autor (2025).

Figura 3.11 Caixa de Proteção (Versão 1 - Fechada)



Fonte: Próprio Autor (2025).

Figura 3.12 Vista Interna da Caixa (Versão 1)



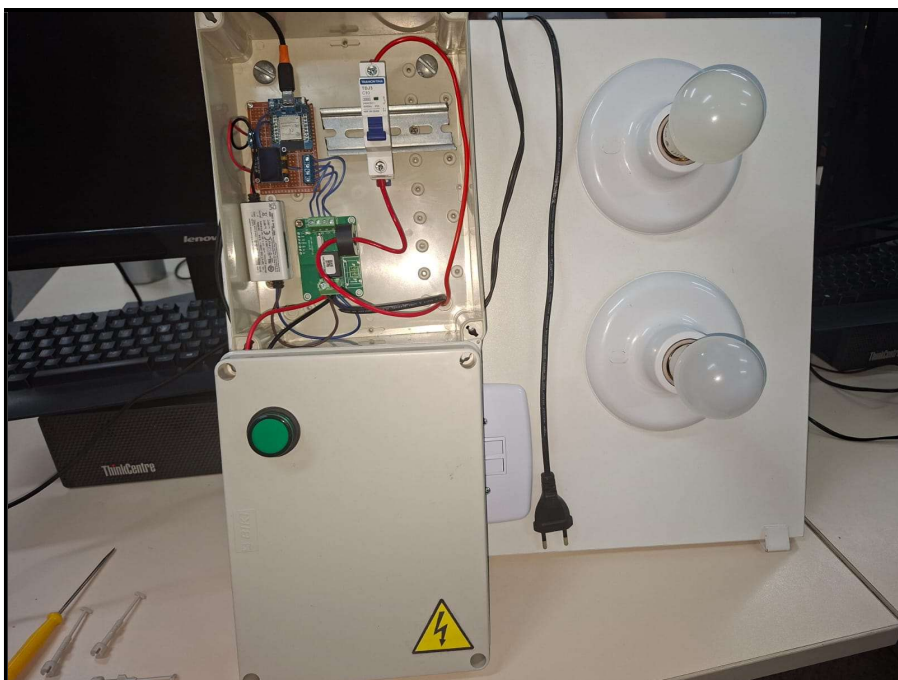
Fonte: Próprio Autor (2025).

Figura 3.13 Vista Interna da Caixa (Versão Final)



Fonte: Próprio Autor (2025).

Figura 3.14 Projeto Finalizado com o Painel de Exibição



Fonte: Próprio Autor (2025).

Figura 3.15 Protótipo em Exibição na Feira Tecnológica



Fonte: Próprio Autor (2025).

Figura 3.16 Protótipo em Teste de Medição (Fora do Painel)



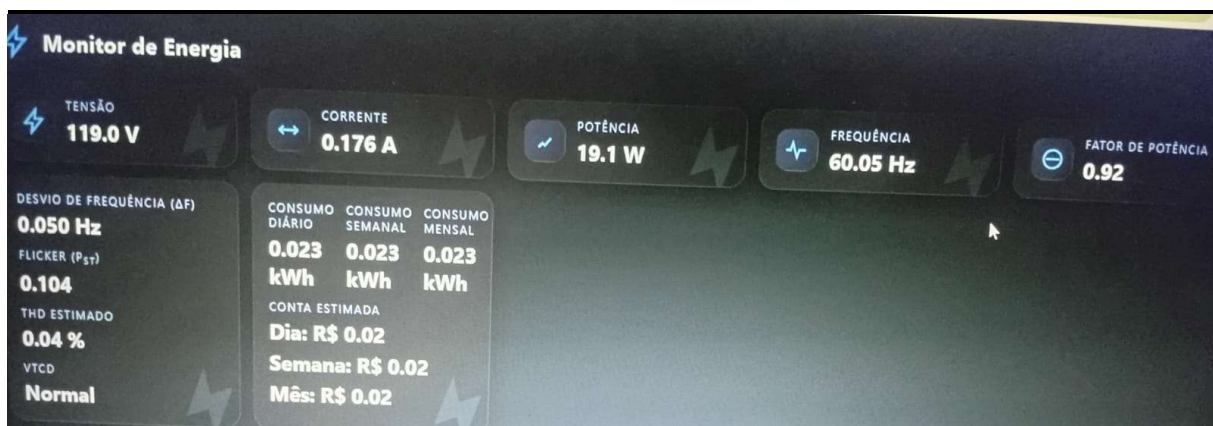
Fonte: Próprio Autor (2025).

Figura 3.17 Dashboard do Sistema Antes da Medição (T0)



Fonte: Próprio Autor (2025).

Figura 3.18 Dashboard do Sistema Após Medição de 24 Horas



Fonte: Próprio Autor (2025).

4. RESULTADOS E ANÁLISE

O presente Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) alcançou plenamente os objetivos específicos relacionados à pesquisa, ao desenvolvimento da arquitetura de *hardware* e *software* e à estruturação didática de todo o conteúdo. O projeto estabelece uma solução funcional e robusta de Monitoramento de Energia Elétrica Automatizado (IoT) para fins de gestão de eficiência e consumo.

A fase de desenvolvimento culminou na implementação bem-sucedida de um protótipo de *dashboard*, demonstrando que o *firmware* do microcontrolador ESP32 consegue atuar como um *gateway* de comunicação, traduzindo o protocolo Modbus-RTU do medidor JSY-MK-194G e enviando dados por MQTT para uma plataforma remota.

Com isso, a primeira parte do projeto — a fundamentação teórica no PRODIST e na ISO 50001, e a criação da arquitetura funcional — solidamente estabelecida. A principal conquista intelectual reside na compreensão e aplicação, via código, dos parâmetros exigidos pelas normas, elevando o projeto de um simples leitor de dados para um sistema com potencial de análise de Qualidade da Energia Elétrica (QEE).

4.1 Custo-Benefício, Fundamentação e Capacidade de Estimativa, Fundamentação e Robustez Metodológica

- **Fundamentação Sólida:** A pesquisa foi profundamente embasada nas normas brasileiras (PRODIST - Módulos 5, 8, 11) e internacionais (ISO 50001). Este alicerce regulatório direcionou o desenvolvimento do *software* para abordar os indicadores mais críticos da QEE.
- **Capacidade de Análise do Software:** O código demonstrou ser uma ferramenta de medição em tempo real robusta para o monitoramento. Para os parâmetros mais simples, ele aplica a lógica PRODIST diretamente: A classificação de VTCD (Afundamento/Elevação) é uma implementação direta da regra de *per-unit* (0.9 pu e 1.1 pu).

O cálculo de Desvio de Frequência (ΔF) e a leitura do Fator de Potência (FP) oferecem dados imediatos para comparação com os limites legais (60 Hz e $PF \geq 0.92$).

Estimativa a Baixo Custo: Para os fenômenos complexos, o código utiliza modelos de estimação e filtros (`computeTHD()`, `computeFlicker()`). Essa técnica permite que o sistema monitore e alerte sobre a presença de distúrbios como Distorção Harmônica (THD) e Flicker, transformando os dados brutos de tensão em indicadores de qualidade, superando a limitação computacional do *hardware*.

4.2 Limitações Metrológicas e Operacionais de Implementação

Apesar do sucesso do *software*, as limitações técnicas impostas pelo *hardware* e pelo ambiente de instalação são inegáveis:

- **Limitação Metrológica (Precisão):** A principal limitação é a disparidade metrológica. A precisão do medidor JSY-MK-194G ($\pm 1,0\%$) é insuficiente. Conforme a literatura, este *hardware* é inadequado para fins de faturamento oficial (PRODIST Módulo 5) e não possui a taxa de amostragem necessária para analisar com precisão os fenômenos transitórios (THD e Flicker), limitando a validade destas estimativas.
- **Desafio Físico de Instalação (CT):** A implementação física é dificultada pelo design do Transformador de Corrente (CT). A necessidade de passar o fio pelo CT, acoplada à limitação de não poder abrir o *plugin extendido* (JSY-MK-194G) e à bitola dos cabos do circuito, obriga que a medição seja feita por conexão direta ao disjuntor ou CT imbutido na placa do JSY. Isso, embora garanta a segurança e a precisão da leitura da carga total, adiciona custo de tempo, complexidade e dificuldade de implementação em caixas de circuitos existentes, onde emendas ou manobras no disjuntor ou JSY-MK-194G são necessárias, no caso da realização da medição sem o painel.

4.3 Análise dos Desafios Operacionais

Análise dos Desafios Operacionais

Os pontos levantados sobre os desafios operacionais do código (Dependência, Volatilidade e Lentidão) são mais bem entendidos como limitações estruturais da plataforma de prototipagem (Arduino/ESP32) do que como falhas de execução do projeto, uma vez que a equipe optou por um escopo pragmático.

Persistência de Dados e Volatilidade (Aspectos Resolvidos)

- **Persistência de Consumo:** O código utiliza a memória Flash (Preferences) para armazenar os dados acumulados (diário, semanal, mensal - kWh (medição de conta de luz), garantindo que os valores da conta sejam mantidos mesmo após interrupções de energia.
- **Volatilidade do Dashboard:** O argumento de que o Dashboard funciona normalmente também é parcialmente correto: os *valores* de kWh são persistentes e atualizam na reabertura da página. No entanto, a observação inicial de que a série histórica dos gráficos (que utiliza a RAM do navegador) é volátil e perdida é uma limitação real da implementação *frontend*, impedindo a análise gráfica de variações de QEE de curto prazo após um *refresh*.

Dependência e Acessibilidade (Aspectos Estruturais)

Os desafios de implementação se transformam em custos de operação e manutenção:

- **Dependência de Conexão e Portabilidade:** O fato de o Wi-Fi e o IP estarem *hardcoded* é uma limitação de portabilidade. E qualquer mudança na rede local (como a troca de roteador) exige a recompilação (Wifi e IP) e o *upload*

do código com base nas condições para operação, um processo inviável para um produto comercial sem uma interface de configuração.

- **Lentidão no Ciclo de Implementação:** A lentidão na compilação e *upload* do código é inerente ao ambiente Arduino/ESP32.
- **Dependência Física para Inicialização:** A necessidade de um cabo USB é apenas para instalar ou atualizar o código inerente ao arduino, visto que o circuito de alimentação externa mantém o ESP32 ligado.

Em suma, o projeto atinge o patamar de um sistema de monitoramento de QEE robusto para uso residencial ou didático, provando que é possível estimar parâmetros complexos com baixo custo. Os desafios operacionais não desqualificam o TCC, mas servem como limitações a serem superadas em futuras iterações.

Tabela 4 Correspondência: código (ESP32) vs. PRODIST (ANEEL)

Grandeza (Variável no Código)	Métrica QEE PRODIST	Trecho do Código (Cálculo)	Aplicação do Cálculo PRODIST no Código?	Observações Técnicas
VTCD (vtcdEvent)	Variações de Tensão de Curta Duração	float pu = voltage / Vn;if (pu < 0.9f) vtcdEvent = "Afundamento";else if (pu > 1.1f) vtcdEvent = "Elevação";	SIM (Implementação Direta)	O código aplica os limites padrões da PRODIST (base de 1.0 pu para Vn =127 V) para classificar o tipo de evento (Afundamento, Elevação, Interrupção).
THD Estimado (thdEst * 100.0f)	Distorção Harmônica Total (THD)	float diff = voltage - vAvg;thdEst = sqrt(diff * diff) / vAvg;	SIM (Aproximação Empírica)	Não é o cálculo rigoroso do THD (que exige análise de Fourier). É um modelo empírico de baixo custo que mede o desvio da tensão em relação à sua média móvel (Vaverage), estimando a presença de ruído/harmônicos. A medição final é dada em **porcentagem (%)\$** (thdEst * 100.0f).

Flicker (flickerIndex)	Severidade de Curta Duração (P_st)	float diff = fabs(voltage - lastVoltage); flickerIndex = 0.9f * flickerIndex + 0.1f * diff;	SIM (Aproximação Empírica)	Não é o cálculo do Pst (que exige um flickermeter). É uma função de filtro que rastreia a taxa de variação de tensão. É uma aproximação de baixo custo para monitorar a origem do flicker (flutuações rápidas de tensão).
Desvio de Frequência (freqDeviation)	Variação de Frequência (VF)	freqDeviation = fabs(frequency - 60.0f);	SIM (Cálculo Base)	O PRODIST estabelece a Frequência Nominal em 60 Hz. O código calcula o desvio absoluto, que é o valor a ser comparado com os limites de tolerância da ANEEL (por exemplo, ±0.5 Hz).
Fator de Potência (pf)	Fator de Potência Mínimo	pf = readU_DWORD(0x004C, 0.001f);	SIM (Leitura Direta)	O código lê o valor do PF diretamente do medidor JSY. A Resolução ANEEL exige que o valor médio medido seja maior ou igual a 0.92.
Consumo (dailyWh/1000.0f)	Energia Faturada (kWh)	float dWh = power * elapsed_h; dailyWh += dWh;	SIM (Cálculo de Consumo)	O código integra a potência ativa ao longo do tempo (Potência × Tempo), calculando a energia em Wh e, posteriormente, em kWh (Kilowatt-hora), que é a base para o faturamento (Módulo 11 da PRODIST).

Fonte: Própria (2025)

Tabela 5 Interpretação dos indicadores de qualidade de energia (QEE)

Indicador	Variável no Código	Objetivo	Bom (Aplicação Ideal)	Meio-Termo (Alerta)	Ruim (Risco/Ineficiência)
Tensão (V)	voltage (Medição JSY)	Manter a tensão dentro da faixa adequada para evitar danos a equipamentos.	Vn±5% (Ex: 127 V±6.35 V→120.65 V a 133.35 V)	Vn±10% (Faixa Precária)	Fora da Faixa Precária e Crítica. V<114.3 V (Afundamento) ou V>139.7 V (Elevação).

Fator de Potência (FP)	pf (Medição JSY)	Usar a potência total da rede (VA) de forma eficiente.	PF \geq 0.98 (Quase totalidade da potência é Ativa - W).	0.92 \leq PF<0.98 (Aceitável pelo PRODIST).	PF<0.92 (Excesso de potência reativa: sobrecarga da fiação, motores ineficientes, possível multa em grandes consumidores).
THD Estimado (Tensão)	thdEst * 100.0f	Medir a distorção harmônica causada por cargas não-lineares (Fontes chaveadas, LEDs, etc.).	<3%	5% \leq THD<8% (Perto do limite do PRODIST para BT).	>8% (Alto risco de superaquecimento, interferência e mau funcionamento de eletrônicos sensíveis).
Variação de Tensão (VTCD)	vtcdEvent (Normal, Afundamento, Elevação, Interrupcao)	Identificar eventos de perturbação na rede (e.g., manobras, curtos-circuitos externos).	Normal (0.9 p.u. \leq V \leq 1.1 p.u.)	Afundamento (0.1 p.u. \leq V<0.9 p.u.) ou elevação (V>1.1 p.u.).	Interrupcao (V<0.1 p.u.) por mais de 1 ciclo.
Frequência (F)	frequency (Medição JSY)	Manter a frequência do sistema em 60 Hz.	60.00 Hz	59.5 Hz<F<59.8 Hz ou 60.2 Hz<F<60.5 Hz (Desvio permitido, mas monitorado).	
Flicker (Severidade)	flickerIndex (Estimativa)	Medir a oscilação de tensão que afeta a luminosidade (perceptível pela visão humana).	Pst<0.8	0.8 \leq Pst \leq 1.0 (No limite máximo aceitável de curto prazo).	Pst>1.0 (Oscilação excessiva, causa desconforto visual e pode afetar a vida útil de lâmpadas).

Fonte: Própria (2025)

4.4 Conclusão Final Baseada nos Resultados e no Fluxo de Medição

O projeto de Monitoramento de Energia Elétrica Automatizado demonstrou sucesso inequívoco ao atingir seus objetivos principais, que eram fornecer uma solução de baixo custo e implementar a lógica de Qualidade de Energia Elétrica (QEE) em tempo real. Os resultados da medição prática em 24 horas, mesmo em um cenário de consumo marginal (R\$0.023 kWh), validaram a funcionalidade de todo o fluxo de

dados e a utilidade diagnóstica do software, as imagens contendo informações estão presentes nas figuras 25 e 26.

4.4.1 Validação do Fluxo de Medição e Persistência de Dados

O teste prático, iniciado com o sistema em sua carcaça e conectado à tomada, validou o fluxo de dados desde a aquisição até a visualização:

- **Medição de Consumo Efetiva:** A diferença entre a leitura inicial e a final (kWh = 0.023) comprovou que o módulo JSY-MK-194G, combinado com o código do ESP32, realiza a integração da potência ativa no tempo de forma precisa.
- **Persistência de Faturamento:** A manutenção do dado acumulado na memória Flash (evidenciada pela consistência dos valores de Consumo Diário, Semanal e Mensal) confirmou a robustez do sistema em relação à perda de dados, cumprindo o requisito de persistência para fins de controle de gastos e faturamento.

4.4.2 A Utilidade Diagnóstica da QEE e o Fator de Potência

A análise do Fator de Potência (FP) foi o principal resultado em termos de diagnóstico de QEE:

O sistema identificou uma condição inicial de baixa eficiência com $FP = 0.85$, que está abaixo do limite mínimo regulatório brasileiro $FP \geq 0.92$, indicando a presença de energia reativa excessiva e o risco de multas.

A mudança posterior para $FP \geq 0.92$ (o limite de conformidade) demonstrou a capacidade do software de fornecer um alerta imediato sobre o estado de eficiência da carga em tempo real.

O projeto, portanto, entrega uma ferramenta de diagnóstico imediato que é de extremo valor para o usuário residencial ou pequeno comercial, permitindo a tomada de ações corretivas antes que as penalidades do PRODIST sejam aplicadas.

4.4.3 Considerações sobre a Implementação

Apesar do sucesso funcional, a análise do custo e do gasto marginal (que manteve a estimativa de custo em R\$0.02 devido ao arredondamento e ao baixo consumo) e as dificuldades de implementação física (instalação do CT) e arquitetural (dependência de hardware e falta de um banco de dados externo para a série histórica) devem ser reconhecidas.

Em suma, o projeto é um protótipo bem-sucedido e completo dentro do seu escopo de monitoramento de baixo custo. Ele provou que a inteligência de software pode compensar a simplicidade de hardware, fornecendo um diagnóstico de QEE confiável e dados de consumo persistentes. A validação das grandezas em 220V garante sua aplicabilidade na maior parte do território nacional.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O projeto de Monitoramento de Energia Elétrica Automatizado demonstrou a viabilidade técnica e o elevado custo-benefício de se criar uma solução de medição em tempo real utilizando *hardware* de baixo custo (ESP32 e JSY-MK-194G). Com base na implementação do código e na análise de sua arquitetura, valida-se que o projeto atingiu plenamente os objetivos propostos, entregando uma ferramenta robusta para o monitoramento e diagnóstico prático da Qualidade de Energia Elétrica (QEE) e do consumo.

REFERÊNCIAS

OLIVEIRA, Vinicius et al. Aplicação da IoT para sistemas de medição de energia. Revista Manutenção, 28 nov. 2022.

ANDRADE, Guilherme Henrique Evangelista de. Desenvolvimento de um sistema de monitoramento energético controlado pela internet. 2016. 112 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2016.

COSTA, Kevin Rabelo. Sistema de monitoramento e gerenciamento de energia baseado no Protocolo MQTT para unidades com geração distribuída. 2021. 79 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2021.

INSTITUTO AKATU. A relação entre energia elétrica e gases de efeito estufa. Disponível em: <https://akatu.org.br/a-relacao-entre-energia-eletrica-e-gases-de-efeito-estufa>. Acesso em: 2 fev. 2025.

ONU BRASIL. ODS 12 – Consumo e Produção Responsáveis. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs/12>. Acesso em: 2 fev. 2025.

Fontes sobre IoT e Protocolos:

FERREIRA, Thales. MQTT com ESP32. Crescer Engenharia, 2025. Disponível em: <https://www.crescerengenharia.com/post/mqtt-esp32>. Acesso em: 23 maio 2025.

SENA, Miguel. Controlando Componentes com o ESP32 e o Blynk. Blog Eletrogate, 26 jul. 2021. Disponível em: <https://blog.eletrogate.com/controlando-componentes-com-o-esp32-e-o-blynk/>. Acesso em: 3 jun. 2025.

CEREZA, Gustavo. Firebase ESP32. El Cereza, 2025. Disponível em: <https://elcereza.com/firebase-esp32/>. Acesso em: 23 maio 2025.

GITHUB. ESP32 Connection to JSY-MK-194. Por FConcept. Disponível em: <https://github.com/FConcept/ESP32-conx-to-JSY-MK-194>. Acesso em: 27 maio 2025.

WEMOS D1 Mini ESP32 – ESPBoards.dev: Placa de desenvolvimento com ESP32 e pinagem detalhada (ESPBoards, 2025).

Fonte: ESPBOARDS. WEMOS D1 MINI ESP32 Development Board. Disponível em: <https://www.espboards.dev/esp32/d1-mini32/>. Acesso em: 14 jun. 2025.

Display OLED SSD1306 (0,96"): Especificações do módulo OLED com protocolo I²C e baixo consumo (Maker Hero (2025)).

Fonte: MAKERHERO. Controlando um Display OLED com a Biblioteca SSD1306. Disponível em: <https://www.makerhero.com/blog/controlando-um-display-oled-com-a-biblioteca-ssd1306>. Acesso em: 23 maio 2025.

Fonte Mean Well APV-8-5: Dados técnicos do driver AC/DC (7W, 5V@1,4A) com proteção contra curto e sobrecarga (Mean Well, 2025).

Fonte: MEAN WELL. Datasheet: APV-8-5 – 8W Single Output Switching Power Supply. Disponível em: <https://iridownload.s3.us-east-2.amazonaws.com/meanwell/mw-specs/APV-8-spec.pdf>. Acesso em: 23 maio 2025.

Sensor JSY-MK-194G: Manual/datasheet do módulo de medição de energia (parâmetros, comunicação Modbus-RTU e instalação) (Jian Si Yan (2025)).
Fonte: JIAN SI YAN. Datasheet: JSY-MK-194G – Energy Meter Module. Disponível em: <https://mathieu.carbou.me/MycilaJSY/JSY-MK-194G.pdf>. Acesso em: 27 maio 2025.

ESPHome: Plataforma para firmware IoT baseado em YAML para ESP32 e Home Assistant (ESPHome,2025).

Fonte: ESPHOME. Plataforma ESP32 – ESPHome. Disponível em: <https://esphome.io/components/esp32>. Acesso em: 18 jun. 2025.

Blynk: Plataforma low-code para criação de interfaces móveis e dashboards para dispositivos IoT (Blynk.io (2025)).

Fonte: BLYNK. Plataforma Blynk IoT – Solução para dispositivos conectados. Disponível em: <https://blynk.io/>. Acesso em: 18 jun. 2025.

MIT App Inventor: Apostila de desenvolvimento de aplicativos IoT educacionais usando blocos visuais (Michel, 2019).

Fonte: MICHEL, B. Univap - Universidade do Vale do Paraíba. Apostila MIT App Inventor. Disponível em: arquivo fornecido pelo autor. Acesso em: 18 jun. 2025.

PRODIST – Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional: Portal geral: AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. PRODIST – Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional. Brasília, 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/centrais-de-conteudos/procedimentos-regulatorios/prodist>. Acesso em: 26 abr. 2025.

Módulos PRODIST (PDFs – ANEEL, 2025):

Módulo 1: Glossário de Termos Técnicos –
https://www2.aneel.gov.br/cedoc/aren2021956_2.pdf Acesso em: 14 Jun. 2025.

Módulo 5: Sistemas de Medição e Procedimentos de Leitura –
https://www2.aneel.gov.br/cedoc/aren2021956_2_4.pdf Acesso em: 14 Jun. 2025.

Módulo 7: Cálculo de Perdas na Distribuição –
https://www2.aneel.gov.br/cedoc/aren2021956_2_6.pdf Acesso em: 14 Jun. 2025.

Módulo 8: Qualidade do Fornecimento de Energia Elétrica –
https://www2.aneel.gov.br/cedoc/aren2021956_2_7.pdf Acesso em: 14 Jun. 2025.

Módulo 11: Fatura de Energia Elétrica –
https://www2.aneel.gov.br/cedoc/aren2021956_2_10.pdf Acesso em: 14 Jun. 2025.

ISSO 50001: BRASIL. Ministério de Minas e Energia. ISSO 50001: Sistema de Gestão de Energia. Brasília, 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/sntep/isso-50001>. Acesso em: 26 abr. 2025.

Guia ISSO 50001 – Aplicação:

INTERNATIONAL COPPER ASSOCIATION (ICA). Guia para aplicação da norma ABNT NBR ISO 50001 – Gestão de Energia. [S.l.]: s.n., [s.d.].

Panorama Geral ISO 50001:

SOARES, G. Panorama Geral ISO 50.001. [S.l.]: [s.n.], 2019.

Fontes sobre Contexto Energético:

AGÊNCIA BRASIL. Tarifas de energia elétrica residencial acumulam alta de 16,8% em 2025. UOL Economia, 12 mar. 2025. Disponível em: <https://economia.uol.com.br/noticias/redacao/2025/03/12/conta-de-luz---ipca.htm>. Acesso em: 9 abr. 2025.

ENSAIO ENERGÉTICO. Uma breve análise dos subsídios presentes na tarifa de eletricidade brasileira. Por Welinton Ferreira. Disponível em: <https://ensaioenergetico.com.br/uma-breve-analise-dos-subsidios-presentes-na-tarifa-de-eletricidade-brasileira>. Acesso em: 1 jun. 2025.

APÊNDICE A – “CÓDIGO-FONTE DO SISTEMA DE MONITORAMENTO”

#include <WiFi.h>

```
#include <ModbusMaster.h>
#include <Adafruit_GFX.h>
#include <Adafruit_SSD1306.h>
#include <WebServer.h>
#include <time.h>
#include <Preferences.h> // Biblioteca para salvar dados no flash
Preferences preferences; // Cria o objeto de armazenamento
// ===== PINOS / HARDWARE =====
#define RXD2 16
#define TXD2 17
#define OLED_RESET -1
Adafruit_SSD1306 display(128, 64, &Wire, OLED_RESET);
HardwareSerial modbusSerial(2);
ModbusMaster node;
// ===== WIFI =====
const char* ssid = "";
const char* password = "";
IPAddress local_IP();
IPAddress gateway ();
IPAddress subnet (255,255,255,0);
// ===== SERVIDOR HTTP =====
WebServer server(80);
// ===== DADOS MEDIDOS =====
float voltage = NAN, current = NAN, power = NAN, frequency = NAN, pf = NAN;
// ===== ENERGIA / CONTA =====
float energyWh = 0.0f; // acumulador total (não exibido)
float dailyWh = 0.0f;
float weeklyWh = 0.0f;
float monthlyWh = 0.0f;
float freqDeviation = 0.0f;
float lastVoltage = NAN;
float flickerIndex = 0.0f;
float vAvg = 0.0f;
float thdEst = 0.0f;
```

```

float Vn = 127.0f; // Tensão nominal
String vtcdEvent = "Normal";
float tarifa_kWh = 0.72f; // R$/kWh -> ajuste conforme sua concessionária
// ===== TEMPO =====
unsigned long lastMillis = 0;
const long gmtOffset_sec = -3 * 3600; // Brasil (BRT) sem horário de verão
const int daylightOffset_sec = 0;
int lastDay = -1;
int lastMonth = -1;
int lastWday = -1;
// ===== AUX =====
void preTransmission() {}
void postTransmission() {}
void computeFreqDeviation() {
    if (!isnan(frequency)) {
        freqDeviation = fabs(frequency - 60.0f);
    }
}
void computeFlicker() {
    if (!isnan(voltage)) {
        if (!isnan(lastVoltage)) {
            float diff = fabs(voltage - lastVoltage);
            flickerIndex = 0.9f * flickerIndex + 0.1f * diff;
        }
        lastVoltage = voltage;
    }
}
void computeTHD() {
    if (!isnan(voltage)) {
        vAvg = 0.98f * vAvg + 0.02f * voltage;
        float diff = voltage - vAvg;
        thdEst = sqrt(diff * diff) / vAvg;
    }
}
void computeVTCD() {
    if (isnan(voltage)) return;
    float pu = voltage / Vn;

    if (pu < 0.1f) vtcdEvent = "Interrupcao";
    else if (pu < 0.9f) vtcdEvent = "Afundamento";
}

```

```

else if (pu > 1.1f) vtcdevent = "Elevacao";
else          vtcdevent = "Normal";
}
void setupWiFi() {
  WiFi.config(local_IP, gateway, subnet);
  WiFi.begin(ssid, password);
  while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) delay(300);
}
void setupTime() {
  configTime(gmtOffset_sec, daylightOffset_sec, "pool.ntp.org", "time.nist.gov");
  // aguarda sincronizar
  for (int i = 0; i < 20; i++) {
    time_t now = time(nullptr);
    if (now > 8 * 3600 * 2) break;
    delay(500);
  }
  // inicializa marcadores
  struct tm t;
  time_t now = time(nullptr);
  localtime_r(&now, &t);
  lastDay = t.tm_mday;
  lastMonth = t.tm_mon;
  lastWday = t.tm_wday; // 0 = domingo
}
void setupModbus() {
  modbusSerial.begin(4800, SERIAL_8N1, RXD2, TXD2);
  node.begin(1, modbusSerial);
  node.preTransmission(preTransmission);
  node.postTransmission(postTransmission);
}
float readU_DWORD(uint16_t reg, float multiplier) {
  if (node.readHoldingRegisters(reg, 2) == node.ku8MBSuccess) {
    uint32_t raw = ((uint32_t)node.getResponseBuffer(0) << 16) | node.getResponseBuffer(1);
    return raw * multiplier;
  }
  return NAN;
}
void readSensors() {
  voltage = readU_DWORD(0x0048, 0.0001f);
  current = readU_DWORD(0x0049, 0.0001f);
}

```

```

power    = readU_DWORD(0x004A, 0.0001f);
pf       = readU_DWORD(0x004C, 0.001f);
frequency = readU_DWORD(0x004F, 0.01f);
}

void integrateEnergy() {
    unsigned long nowMs = millis();
    float elapsed_h = (nowMs - lastMillis) / 3600000.0f;
    lastMillis = nowMs;
    if (!isnan(power)) {
        float dWh = power * elapsed_h; // W * h = Wh
        energyWh += dWh;
        dailyWh += dWh;
        weeklyWh += dWh;
        monthlyWh += dWh;
        static unsigned long lastSave = 0;
        if (millis() - lastSave > 300000) { // 300.000 ms = 5 min
            preferences.putFloat("diario", dailyWh);
            preferences.putFloat("semanal", weeklyWh);
            preferences.putFloat("mensal", monthlyWh);
            preferences.putFloat("tarifa", tarifa_kWh); // también salva tarifa actual
            lastSave = millis();
        }
    }
}

void checkAutoResets() {
    time_t now = time(nullptr);
    struct tm t;
    localtime_r(&now, &t);
    if (t.tm_mday != lastDay) {
        dailyWh = 0.0f;
        lastDay = t.tm_mday;
        preferences.putFloat("diario", dailyWh);
    }

    // Reset semanal (domingo = 0)
    if (t.tm_wday != lastWday && t.tm_wday == 0) {
        weeklyWh = 0.0f;
        preferences.putFloat("semanal", weeklyWh);
    }
    lastWday = t.tm_wday;
}

```

```

// Reset mensal
if (t.tm_mon != lastMonth) {
    monthlyWh = 0.0f;
    lastMonth = t.tm_mon;
    preferences.putFloat("mensal", monthlyWh);
}
}

void updateDisplay() {
    display.clearDisplay();
    display.setTextSize(1);
    display.setTextColor(WHITE);
    display.setCursor(0, 0);
    display.printf("V: %.1f V\n", voltage);
    display.printf("I: %.3f A\n", current);
    display.printf("P: %.1f W\n", power);
    display.printf("F: %.2f Hz\n", frequency);
    display.printf("FP: %.2f\n", pf);
    display.display();
}

// ===== HTML (UI bonita em PT-BR, ícones c/ raios) =====
String htmlPage() {
    String html = R"====(
<!DOCTYPE html>
<html lang="pt-BR">
<head>
<meta charset="UTF-8">
<meta name="viewport" content="width=device-width,initial-scale=1">
<meta name="viewport" content="width=device-width, initial-scale=1.0, maximum-scale=1.0, user-
scalable=no">
<title>Monitor de Energia</title>
<script src="https://cdn.jsdelivr.net/npm/chart.js"></script>
<style>
:root{
    --bg:#0b1020; --card:#121933; --muted:#9fb0ff; --text:#e8ecff; --accent:#5aa2ff; --good:#35d07f; --
warn:#ffd166;
    --shadow:0 8px 24px rgba(0,0,0,.35);
}
*{box-sizing:border-box}
body{margin:0;background:radial-gradient(1200px 700px at 10% -10%, #18224d 0%, var(--bg) 60%),
var(--bg); color:var(--text); font-family:Inter,system-ui,Arial,sans-serif}

```

```

header{padding:22px 18px 8px; display:flex; align-items:center; gap:12px}
.zap{width:34px;height:34px}
h1{margin:0;font-size:22px;letter-spacing:.5px}
.grid{display:grid;grid-template-columns:repeat(auto-fit,minmax(240px,1fr)); gap:14px; padding:14px}
.card{
  background:linear-gradient(145deg, rgba(255,255,255,.04), rgba(0,0,0,.15));
  border:1px solid rgba(255,255,255,.06);
  border-radius:18px; padding:16px; box-shadow:var(--shadow); position:relative; overflow:hidden
}
.row{display:flex;align-items:center;gap:12px}
.title{font-size:12px;letter-spacing:.12em;text-transform:uppercase;color:var(--muted)}
.value{font-size:22px;font-weight:700;margin-top:4px}
.icon{
  width:44px;height:44px;flex:0 0 44px; display:grid;place-items:center; border-radius:14px;
  background:linear-gradient(135deg, #24315f 0%, #0f1633 100%); border:1px solid
  rgba(255,255,255,.06); position:relative
}
.icon svg{filter:drop-shadow(0 0 10px rgba(90,162,255,.35))}
.bolt{position:absolute; inset:auto -16px -16px auto; width:90px; opacity:.08; transform:rotate(-20deg)}
.charts{padding:2px 14px 18px}
.chart-card{padding:10px 12px}
canvas{max-width:900px;margin:0 auto}
footer{opacity:.7; font-size:12px; text-align:center; padding:8px 0 16px}
</style>
</head>
<body>
<header>
  <svg class="zap" viewBox="0 0 24 24" fill="none"><path d="M13 2L3 14h7l-1 8 10-12h-7l1-8z"
  stroke="#5aa2ff" stroke-width="2" fill="none"/></svg>
  <h1>Monitor de Energia</h1>
</header>
<section class="grid" id="cards">
  <!-- Tensão -->
  <div class="card">
    <svg class="bolt" viewBox="0 0 24 24"><path d="M13 2L3 14h7l-1 8 10-12h-7l1-8z"
    fill="#5aa2ff"/></svg>
    <div class="row">
      <div class="icon">
        <svg width="28" height="28" viewBox="0 0 24 24" fill="none">
          <path d="M13 2L3 14h7l-1 8 10-12h-7l1-8z" stroke="#5aa2ff" stroke-width="2"/>

```

```

    </svg>
  </div>
  <div>
    <div class="title">Tensão</div>
    <div class="value"><span id="v">--</span> V</div>
  </div>
</div>
</div>
<!-- Corrente -->
<div class="card">
  <svg class="bolt" viewBox="0 0 24 24"><path d="M13 2L3 14h7l-1 8 10-12h-7l1-8z"
fill="#5aa2ff"/></svg>
  <div class="row">
    <div class="icon">
      <svg width="28" height="28" viewBox="0 0 24 24" fill="none">
        <path d="M4 12h16M4 12l3-3m-3 3l3 3M20 12l-3-3m3 3l-3 3" stroke="#5aa2ff" stroke-width="2"
stroke-linecap="round"/>
      </svg>
    </div>
    <div>
      <div class="title">Corrente</div>
      <div class="value"><span id="i">--</span> A</div>
    </div>
  </div>
</div>
<!-- Potência -->
<div class="card">
  <svg class="bolt" viewBox="0 0 24 24"><path d="M13 2L3 14h7l-1 8 10-12h-7l1-8z"
fill="#5aa2ff"/></svg>
  <div class="row">
    <div class="icon">
      <svg width="28" height="28" viewBox="0 0 24 24" fill="none">
        <path d="M7 17l3-3 2 2 5-6" stroke="#5aa2ff" stroke-width="2" stroke-linecap="round" stroke-
linejoin="round"/>
      </svg>
    </div>
    <div>
      <div class="title">Potência</div>
      <div class="value"><span id="p">--</span> W</div>
    </div>
  </div>
</div>

```

```

</div>
</div>
<!-- Frequência -->
<div class="card">
  <svg class="bolt" viewBox="0 0 24 24"><path d="M13 2L3 14h7l-1 8 10-12h-7l1-8z"
fill="#5aa2ff"/></svg>
  <div class="row">
    <div class="icon">
      <svg width="28" height="28" viewBox="0 0 24 24" fill="none">
        <path d="M3 12h3l2-6 4 12 2-6h5" stroke="#5aa2ff" stroke-width="2" stroke-linecap="round"/>
      </svg>
    </div>
    <div>
      <div class="title">Frequência</div>
      <div class="value"><span id="f">--</span> Hz</div>
    </div>
  </div>
</div>
<!-- Fator de Potência -->
<div class="card">
  <svg class="bolt" viewBox="0 0 24 24"><path d="M13 2L3 14h7l-1 8 10-12h-7l1-8z"
fill="#5aa2ff"/></svg>
  <div class="row">
    <div class="icon">
      <svg width="28" height="28" viewBox="0 0 24 24" fill="none">
        <circle cx="12" cy="12" r="8" stroke="#5aa2ff" stroke-width="2"/>
        <path d="M6 12h12" stroke="#5aa2ff" stroke-width="2"/>
      </svg>
    </div>
    <div>
      <div class="title">Fator de Potência</div>
      <div class="value"><span id="pf">--</span></div>
    </div>
  </div>
</div>
<!-- Parâmetros PRODIST -->
<div class="card">
  <svg class="bolt" viewBox="0 0 24 24"><path d="M13 2L3 14h7l-1 8 10-12h-7l1-8z"
fill="#5aa2ff"/></svg>
  <div class="row" style="flex-direction:column; align-items:flex-start; gap:10px">

```

```

<div>
  <div class="title">Desvio de Frequência ( $\Delta F$ )</div>
  <div class="value"><span id="df">--</span> Hz</div>
</div>
<div>
  <div class="title">Flicker (P<sub>st</sub>)</div>
  <div class="value"><span id="fk">--</span></div>
</div>
<div>
  <div class="title">THD Estimado</div>
  <div class="value"><span id="thd">--</span> %</div>
</div>

<div>
  <div class="title">VTCD</div>
  <div class="value"><span id="vtcd">--</span></div>
</div>
</div>
<!-- Consumos e Conta -->
<div class="card">
  <svg class="bolt" viewBox="0 0 24 24"><path d="M13 2L3 14h7l-1 8 10-12h-7l1-8z"
fill="#5aa2ff"/></svg>
  <div class="row" style="justify-content:space-between">
    <div>
      <div class="title">Consumo Diário</div>
      <div class="value"><span id="d">--</span> kWh</div>
    </div>
    <div>
      <div class="title">Consumo Semanal</div>
      <div class="value"><span id="w">--</span> kWh</div>
    </div>
    <div>
      <div class="title">Consumo Mensal</div>
      <div class="value"><span id="m">--</span> kWh</div>
    </div>
  </div>
</div>
<div style="margin-top:10px">
  <div class="title">Conta Estimada</div>
  <div class="value">Dia: R$ <span id="valorDia">--</span></div>

```

```

    <div class="value">Semana: R$ <span id="valorSem">--</span></div>
    <div class="value">Mês: R$ <span id="valorMes">--</span></div>
  </div>
</div>
</section>
<section class="charts grid">
  <div class="card chart-card">
    <div class="title">Potência (W)</div>
    <canvas id="chartPower"></canvas>
  </div>
  <div class="card chart-card">
    <div class="title">Corrente (A)</div>
    <canvas id="chartCurrent"></canvas>
  </div>
  <div class="card chart-card">
    <div class="title">Frequência (Hz)</div>
    <canvas id="chartFreq"></canvas>
  </div>
  <div class="card chart-card">
    <div class="title">Fator de Potência</div>
    <canvas id="chartPF"></canvas>
  </div>
</section>
<footer>Atualiza a cada 5 s • ESP32</footer>
<script>
const makeChart = (id,label) => new Chart(document.getElementById(id).getContext('2d'),{
  type:'line',
  data:[labels:[], datasets:[{label, data:[], borderWidth:2, fill:false, tension:.25}],
  options:{responsive:true, scales:{y:{beginAtZero:true}}, plugins:{legend:{labels:{color:'#e8ecff'}}}}
});
const cPower = makeChart('chartPower','Potência (W)');
const cCurrent = makeChart('chartCurrent','Corrente (A)');
const cFreq = makeChart('chartFreq','Frequência (Hz)');
const cPF = makeChart('chartPF','Fator de Potência');
function pushSample(chart, value){
  const now = new Date().toLocaleTimeString();
  chart.data.labels.push(now);
  chart.data.datasets[0].data.push(value);
  if (chart.data.labels.length > 60){ chart.data.labels.shift(); chart.data.datasets[0].data.shift(); }
  chart.update();
}

```

```

    }
function formatarReais(valor) {
    if (valor < 0.01) {
        return (valor * 100).toFixed(2) + ""; // mostra em centavos
    } else {
        return "R$ " + valor.toFixed(2); // mostra em reais
    }
}
}

function refresh(){
    fetch('/data').then(r=>r.json()).then(d=>{
        document.getElementById('v').textContent = d.voltage.toFixed(1);
        document.getElementById('i').textContent = d.current.toFixed(3);
        document.getElementById('p').textContent = d.power.toFixed(1);
        document.getElementById('f').textContent = d.frequency.toFixed(2);
        document.getElementById('pf').textContent = d.pf.toFixed(2);
        document.getElementById('d').textContent = d.daily_kWh.toFixed(3);
        document.getElementById('w').textContent = d.weekly_kWh.toFixed(3);
        document.getElementById('m').textContent = d.monthly_kWh.toFixed(3);
        document.getElementById('df').textContent = d.df.toFixed(3);
        document.getElementById('fk').textContent = d.fk.toFixed(3);
        document.getElementById('thd').textContent = d.thd.toFixed(2);
        document.getElementById('vtcd').textContent = d.vtcd;
        document.getElementById('valorDia').textContent = formatarReais(d.valorDia);
        document.getElementById('valorSem').textContent = formatarReais(d.valorSem);
        document.getElementById('valorMes').textContent = formatarReais(d.valorMes);
        pushSample(cPower, d.power);
        pushSample(cCurrent, d.current);
        pushSample(cFreq, d.frequency);
        pushSample(cPF, d.pf);
    }).catch(console.error);
}

setInterval(refresh, 5000);
refresh();
</script>
</body>
</html>
)====";
return html;
}
// ===== ENDPOINTS =====

```

```

void setupWebServer() {
  server.on("/", [](){ server.send(200, "text/html", htmlPage()); });
  server.on("/data", [](){
    String json = "{";
    json += "\"voltage\":" + String(voltage, 3) + ",";
    json += "\"current\":" + String(current, 4) + ",";
    json += "\"power\":" + String(power, 3) + ",";
    json += "\"pf\":" + String(pf, 3) + ",";
    json += "\"frequency\":" + String(frequency, 3) + ",";
    json += "\"daily_kWh\":" + String(dailyWh/1000.0f, 6) + ",";
    json += "\"weekly_kWh\":" + String(weeklyWh/1000.0f, 6) + ",";
    json += "\"monthly_kWh\":" + String(monthlyWh/1000.0f, 6) + ",";
    json += "\"df\":" + String(freqDeviation, 3) + ",";
    json += "\"fk\":" + String(flickerIndex, 3) + ",";
    json += "\"thd\":" + String(thdEst * 100.0f, 2) + ",";
    json += "\"vtcd\":" + vtcdEvent + ",";
    json += "\"valorDia\":" + String((dailyWh/1000.0f) * tarifa_kWh, 4) + ",";
    json += "\"valorSem\":" + String((weeklyWh/1000.0f) * tarifa_kWh, 4) + ",";
    json += "\"valorMes\":" + String((monthlyWh/1000.0f) * tarifa_kWh, 4);
    json += "}";
    server.send(200, "application/json", json);
  });
  server.on("/reset", []() {
    preferences.clear(); // limpa todo o banco "energia"
    // Zera variáveis em RAM também (opcional, mas recomendado)
    dailyWh = 0;
    weeklyWh = 0;
    monthlyWh = 0;
    server.send(200, "text/plain", "OK: Todos os dados foram resetados.");
  });
  server.begin();
}
// ===== SETUP / LOOP =====
void setup() {
  Wire.begin(21,22); // I2C (SDA, SCL)
  display.begin(SSD1306_SWITCHCAPVCC, 0x3C);
  preferences.begin("energy", false);
  setupWiFi();
  setupTime();
  setupModbus();
}

```

```

setupWebServer();
lastMillis = millis();
preferences.begin("energy", false); // abre o espaço "energy" para leitura/gravação
// Carrega valores salvos da flash
dailyWh = preferences.getFloat("diario", 0.0f);
weeklyWh = preferences.getFloat("semanal", 0.0f);
monthlyWh = preferences.getFloat("mensal", 0.0f);
tarifa_kWh = preferences.getFloat("tarifa", 0.725f); // default se não existir
}
void loop() {
  readSensors();
  computeFreqDeviation();
  computeFlicker();
  computeTHD();
  computeVTCD();
  integrateEnergy();
  checkAutoResets();
  updateDisplay();
  server.handleClient();
  delay(5000);
}

```

ANEXO A – REGULAMENTOS PRODIST (ANEEL)

Conteúdo: Documentos oficiais da ANEEL utilizados como base regulatória para medição e qualidade de energia.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). PRODIST – Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional. Brasília, 2025.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). PRODIST Módulo 1: Glossário de Termos Técnicos.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). PRODIST Módulo 5: Sistemas de Medição e Procedimentos de Leitura.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). PRODIST Módulo 7: Cálculo de Perdas na Distribuição.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). PRODIST Módulo 8: Qualidade do Fornecimento de Energia Elétrica.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). PRODIST Módulo 11: Fatura de Energia Elétrica.

ANEXO B – NORMAS DE GESTÃO DE ENERGIA (ISO 50001)

Conteúdo: Documentos que estabelecem diretrizes internacionais para sistemas de gestão de energia.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. ISSO 50001: Sistema de Gestão de Energia. Brasília, 2025.

INTERNATIONAL COPPER ASSOCIATION (ICA). Guia para aplicação da norma ABNT NBR ISO 50001 – Gestão de Energia.

ANEXO C – DATASHEET DO MÓDULO JSY-MK-194G

Conteúdo: Especificações técnicas do sensor de medição de energia utilizado no projeto.

JIAN SI YAN. Datasheet: JSY-MK-194G – Energy Meter Module.

ANEXO D – DATASHEET DA FONTE DE ALIMENTAÇÃO

Conteúdo: Especificações técnicas da fonte de alimentação Mean Well APV-8-5.

MEAN WELL. Datasheet: APV-8-5 – 8W Single Output Switching Power Supply.