



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

CENTRO TECNOLÓGICO

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E ELETRÔNICA

CURSO DE ENGENHARIA ELETRÔNICA

DESENVOLVIMENTO DE RELÉ DE PROTEÇÃO INTELIGENTE PARA SISTEMAS DE POTÊNCIA

Thiago Oliveira Rodrigues Almeida

Orientador: Prof. Dr. Fernando Rangel de Sousa

Florianópolis

2026

Thiago Oliveira Rodrigues Almeida

DESENVOLVIMENTO DE RELÉ DE PROTEÇÃO INTELIGENTE PARA SISTEMAS DE POTÊNCIA

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação em Engenharia Eletrônica do Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Eletrônica.

Orientador: Prof. Dr. Fernando Rangel de Sousa

Florianópolis
2026

Ficha catalográfica gerada por meio de sistema automatizado gerenciado pela BU/UFSC.
Dados inseridos pelo próprio autor.

Almeida, Thiago Oliveira Rodrigues de
Desenvolvimento de relé de proteção inteligente para
sistemas de potência / Thiago Oliveira Rodrigues de
Almeida ; orientador, Fernando Rangel de Souza, 2026.
77 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico,
Graduação em Engenharia Eletrônica, Florianópolis, 2026.

Inclui referências.

1. Engenharia Eletrônica. 2. Relé. 3. Controle. 4.
Proteção. 5. Comunicação. I. Souza, Fernando Rangel de . II.
Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em
Engenharia Eletrônica. III. Título.

DESENVOLVIMENTO DE RELÉ DE PROTEÇÃO INTELIGENTE PARA SISTEMAS DE POTÊNCIA

Florianópolis, 09 de Julho de 2026.



Documento assinado digitalmente
Fernando Rangel de Sousa
Data: 13/07/2026 17:57:03-0300
CPF: ***.649.114-**
Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Prof. Dr. Fernando Rangel de Sousa
Coordenador do Curso de Graduação em Engenharia Eletrônica
Universidade Federal de Santa Catarina



Documento assinado digitalmente
Fernando Rangel de Sousa
Data: 13/07/2026 17:56:33-0300
CPF: ***.649.114-**
Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Prof. Dr. Fernando Rangel de Sousa
Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina



Documento assinado digitalmente
Miguel Moreto
Data: 12/07/2026 11:15:08-0300
CPF: ***.850.100-**
Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Prof. Dr. Miguel Moreto
Membro da banca
Universidade Federal de Santa Catarina



Documento assinado digitalmente
Diego Issicaba
Data: 12/07/2026 09:20:53-0300
CPF: ***.633.719-**
Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Prof. Dr. Diego Issicaba
Membro da banca
Universidade Federal de Santa Catarina

“A engenharia é a aplicação da ciência à solução de problemas reais.”

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Universidade Federal de Santa Catarina e ao curso de Engenharia Eletrônica pela formação acadêmica e pelas oportunidades de desenvolvimento técnico ao longo da graduação.

Agradeço ao meu orientador, Fernando Rangel de Sousa, pelo acompanhamento, pelas contribuições técnicas e pela disponibilidade durante o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço de forma especial ao meu pai, por ser minha maior referência profissional, técnica e pessoal. Seus conselhos ao longo da vida sempre tiveram grande influência sobre mim; muitos deles me motivaram a buscar conhecimento, entender melhor determinados caminhos e desenvolver interesse por áreas que hoje fazem parte da minha formação. Seu exemplo de dedicação, responsabilidade, conhecimento prático e compromisso com aquilo que faz foi essencial para a construção da minha trajetória pessoal, acadêmica e profissional.

Agradeço também aos colegas, familiares e profissionais que contribuíram para minha formação e para a realização deste projeto. Em especial, agradeço pelas discussões técnicas e experiências práticas que auxiliaram na definição do tema, na construção do protótipo e no amadurecimento da proposta de desenvolvimento de um relé de proteção inteligente.

RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um protótipo de relé de proteção inteligente aplicado ao monitoramento e à proteção de transformadores em sistemas de potência. A arquitetura desenvolvida utiliza microcontroladores ESP32, sensores de tensão ZMPT101B, sensores de corrente ACS712, medição de temperatura por RTD PT100, condicionamento analógico, processamento digital de sinais e comunicação digital por Modbus TCP/IP. O protótipo realiza a aquisição de tensões, correntes e temperatura, permitindo o cálculo de grandezas utilizadas pelas funções de proteção, com destaque para valores eficazes e frequência. Foram implementadas e validadas logicamente as funções ANSI 50, 51, 59, 27, 26, 81U, 81O e 24, correspondentes às proteções de sobrecorrente instantânea, sobrecorrente temporizada, sobretensão, subtensão, proteção térmica por RTD, subfrequência, sobrefrequência e sobreexcitação. A validação das funções de proteção foi realizada por meio da simulação de valores de entrada via console serial, verificando os estados de *pickup*, *trip* e a atuação da saída geral de desligamento. Também foram realizados ensaios de bancada para validação das medições de tensão, corrente e temperatura, além da verificação da comunicação Modbus TCP/IP para disponibilização das grandezas medidas a um software externo. Os resultados obtidos indicam a viabilidade do protótipo como plataforma experimental e didática para estudo de aquisição de sinais, proteção digital e integração de IEDs.

Palavras-chave: Relé de proteção. IED. Sistemas de potência. Transformadores. ESP32. Modbus. Processamento digital de sinais.

ABSTRACT

This work presents the development of an intelligent protection relay prototype applied to transformer monitoring and protection in power systems. The developed architecture uses ESP32 microcontrollers, ZMPT101B voltage sensors, ACS712 current sensors, temperature measurement with a PT100 RTD, analog signal conditioning, digital signal processing and Modbus TCP/IP digital communication. The prototype acquires voltage, current and temperature signals, allowing the calculation of quantities used by the protection functions, especially RMS values and frequency. The ANSI 50, 51, 59, 27, 26, 81U, 81O and 24 functions were implemented and logically validated, corresponding to instantaneous overcurrent, time overcurrent, overvoltage, undervoltage, RTD-based thermal protection, underfrequency, overfrequency and overexcitation protection. The validation of the protection functions was performed by simulating input values through the serial console, verifying the *pickup* and *trip* states and the operation of the general trip output. Bench tests were also performed to validate voltage, current and temperature measurements, as well as to verify Modbus TCP/IP communication for making the measured quantities available to external software. The results indicate the feasibility of the prototype as an experimental and educational platform for studying signal acquisition, digital protection and IED integration.

Keywords: Protection relay. IED. Power systems. Transformers. ESP32. Modbus. Digital signal processing.

LISTA DE FIGURAS

1	Arquitetura geral proposta para o relé de proteção inteligente.	27
2	Protótipo físico do relé de proteção desenvolvido.	27
3	Cartão de aquisição de tensões, RTD e corrente de neutro.	29
4	Esquemático do cartão de tensões, RTD e corrente de neutro.	29
5	Cartão de aquisição de correntes trifásicas I/O.	30
6	Esquemático do cartão de corrente.	30
7	Cartão de processamento de sinais.	31
8	Esquemático do cartão de processamento de sinais.	31
9	Cartão de proteção, comunicação, fonte e relé.	34
10	Esquemático do cartão de proteção e comunicação.	34
11	Circuito para aquisição de temperatura com PT100.	36
12	Distribuição das medições de tensão e curva gaussiana ajustada.	53
13	Distribuição das medições de corrente e curva gaussiana ajustada.	55
14	Distribuição das medições de temperatura e curva gaussiana ajustada.	57
15	Leitura dos registradores do protótipo por meio do software Modbus Poll.	61

LISTA DE TABELAS

1	Funções ANSI implementadas no relé desenvolvido neste trabalho.	20
2	Resultado estatístico da medição de tensão realizada pelo protótipo.	54
3	Resultado estatístico da medição de corrente realizada pelo protótipo.	56
4	Resultado estatístico da medição de temperatura realizada pelo protótipo. . . .	58
5	Resumo dos resultados experimentais das medições.	58
6	Resultado do ensaio de comunicação Modbus TCP/IP.	61
7	Grandezas disponibilizadas via Modbus TCP/IP.	62

SUMÁRIO

1	Introdução	10
1.1	Objetivo Geral	11
1.2	Objetivos Específicos	11
1.3	Justificativa	12
1.4	Organização do Trabalho	13
2	Fundamentação Teórica	14
2.1	Transformadores de Potência	14
2.2	Transformadores de Instrumentação	15
2.3	Relés de Proteção	16
2.4	IEDs em Subestações Digitais	17
2.5	Funções ANSI Aplicadas a Transformadores	20
2.6	Aquisição de Sinais Elétricos	21
2.7	Processamento Digital de Sinais	21
2.8	Comunicação em Sistemas de Proteção	23
3	Metodologia	25
3.1	Módulo 1 – Aquisição de Sinais	25
3.2	Módulo 2 - Proteção e Comunicação Digital	25
3.3	Módulo 3 – Protótipo Físico e Validações	26
3.4	Fluxo Geral de Desenvolvimento	26
4	Arquitetura do Relé Proposto	27
4.1	Módulo de Aquisição e Processamento	28
4.2	Módulo de Proteção e Comunicação	32
5	Sistema de Aquisição e Processamento	35
5.1	Sensoriamento de Tensão	35
5.2	Sensoriamento de Corrente	35
5.3	Medição de Temperatura	35
5.4	Remoção de Offset	36
5.5	Cálculo das Grandezas Elétricas	37
5.6	Arquitetura de Aquisição dos Sinais	38
5.7	Multiplexação Analógica e Leitura Sequencial	38
5.8	Gerenciamento de Buffers e Processamento em Janela	39
5.9	Taxa de Amostragem e Limitações Práticas	39
5.10	Controle de Carga Computacional	42
6	Funções de Proteção Implementadas	43

6.1	Proteção de Sobrecorrente Instantânea (ANSI 50)	43
6.2	Proteção de Sobrecorrente Temporizada (ANSI 51)	43
6.3	Proteção de Sobrecorrente de Neutro (ANSI 50N/51N)	44
6.4	Proteção de Sobretensão (ANSI 59)	44
6.5	Proteção de Subtensão (ANSI 27)	45
6.6	Proteção Térmica por RTD (ANSI 26)	45
6.7	Proteção de Frequência (ANSI 81U/81O)	45
6.8	Proteção de Sobreexcitação (ANSI 24)	46
6.9	Lógica Geral de Trip	46
7	Comunicação Digital e Integração	47
7.1	Importância da Comunicação em Relés Inteligentes	47
7.2	Comunicação entre Microcontroladores	47
7.3	Modbus	48
8	Protótipo Físico e Procedimentos de Validação	49
8.1	Montagem do Protótipo	49
8.2	Calibração das Medições	50
8.3	Ensaio Funcionais	51
8.4	Crerios de Avaliação	51
9	Resultados Obtidos	52
9.1	Validação das Medições Elétricas e Térmicas	52
9.1.1	Medição de Tensão	52
9.1.2	Medição de Corrente	55
9.1.3	Medição de Temperatura	56
9.2	Análise da Variabilidade das Medições	58
9.3	Validação da Comunicação Modbus TCP/IP	60
9.4	Validação das Funções de Proteção	62
10	Recursos Utilizados	64
10.1	Hardware e Componentes Eletrônicos	64
10.2	Ferramentas de Montagem e Prototipagem	64
10.3	Equipamentos de Medição e Ensaio	65
10.4	Softwares	65
10.5	Conhecimentos Técnicos Envolvidos	66
11	Considerações Finais	68
12	Trabalhos Futuros	68

1 Introdução

Transformadores de potência são equipamentos essenciais para a operação dos sistemas elétricos, pois permitem a interligação entre diferentes níveis de tensão e possibilitam a transmissão e distribuição de energia de forma eficiente. Por estarem presentes em pontos estratégicos da rede elétrica, falhas nesses equipamentos podem ocasionar desligamentos de grande impacto, prejuízos financeiros, riscos à segurança operacional e indisponibilidade de cargas importantes. Dessa forma, a proteção adequada de transformadores é uma etapa fundamental para a confiabilidade dos sistemas de potência.

Os relés de proteção têm a função de monitorar grandezas elétricas e identificar condições anormais de operação, como curtos-circuitos, sobrecorrentes, sobretensões, subtensões, desequilíbrios, faltas à terra e aquecimento excessivo. Quando uma condição de falha é detectada, o relé deve atuar de forma seletiva e rápida, emitindo um comando de abertura para o disjuntor associado ao equipamento protegido. Essa ação, conhecida como sinal de *trip*, tem como objetivo isolar a região afetada e reduzir danos ao transformador e aos demais elementos do sistema elétrico.

Com a evolução tecnológica, os relés eletromecânicos e estáticos foram gradualmente substituídos por relés digitais e dispositivos eletrônicos inteligentes, conhecidos como IEDs (*Intelligent Electronic Devices*). Esses dispositivos integram funções de medição, proteção, automação, registro de eventos e comunicação digital. Em subestações modernas, os IEDs se comunicam com sistemas supervisórios e com outros equipamentos de proteção, permitindo maior integração, diagnóstico e capacidade de automação. Essa integração é fortemente associada à norma IEC 61850 [12], referência internacional para comunicação e automação de subestações digitais, que serve como base conceitual para a arquitetura de comunicação discutida neste trabalho, ainda que o protocolo efetivamente adotado no protótipo seja distinto, conforme justificado adiante.

Nesse contexto, o presente trabalho propõe o desenvolvimento de um relé de proteção inteligente para sistemas de potência, com foco inicial na aplicação em transformadores. O projeto é baseado em uma plataforma embarcada de baixo custo, utilizando microcontroladores ESP32, sensores de tensão e corrente, medição de temperatura, condicionamento analógico e algoritmos de processamento digital de sinais. A proposta contempla a aquisição de três tensões de fase, sete correntes relacionadas ao transformador e uma grandeza térmica obtida por sensor RTD.

Em razão do número reduzido de funções de proteção implementadas, o protótipo desenvolvido se destina, em princípio, a transformadores de potência de menor porte e menor criticidade de proteção, tipicamente encontrados em subestações de distribuição, indústrias e instalações comerciais, para os quais funções básicas de sobrecorrente, sobretensão, subtensão e proteção térmica já representam um nível de proteção compatível com a aplicação [2]. Transformadores

de maior porte, potência ou relevância estratégica para o sistema elétrico normalmente exigem esquemas de proteção mais completos, com destaque para a proteção diferencial (ANSI 87T), não contemplada nesta versão do protótipo por não ter sido objeto de implementação neste trabalho, mas discutida na Seção 12 como uma das direções mais relevantes para a continuidade do projeto, dada sua importância na proteção de transformadores de maior criticidade.

Além das funções de proteção, o trabalho também aborda a integração do relé com sistemas de comunicação digital por meio do protocolo Modbus TCP/IP. A escolha desse protocolo se deve, principalmente, à sua arquitetura de rede simples, baseada no modelo cliente-servidor, e à facilidade de implementação em sistemas embarcados de recursos limitados, características que o tornam adequado a um protótipo inicial de comunicação, cujo principal desafio de projeto está concentrado nas etapas de aquisição, processamento digital e lógica de proteção. Protocolos mais elaborados, como o IEC 61850, embora tecnicamente mais completos e mais aderentes à automação de subestações digitais, demandariam maior complexidade de implementação, sendo considerados como uma evolução natural do protótipo em trabalhos futuros. Nesta versão do protótipo, a comunicação Modbus TCP/IP foi utilizada para disponibilizar valores instantâneos das medições a um software externo, permitindo que o sistema se aproxime conceitualmente de uma plataforma didática de aquisição, proteção e supervisão em escala reduzida.

A relevância deste trabalho está associada tanto ao aspecto técnico quanto ao aspecto acadêmico. Do ponto de vista técnico, o projeto permite estudar a implementação prática de um sistema de proteção digital, envolvendo aquisição de sinais, processamento em tempo real, lógica de atuação e comunicação. Do ponto de vista acadêmico, o protótipo pode servir como plataforma experimental para ensaios, validações e futuras pesquisas relacionadas à proteção de sistemas elétricos e automação de subestações.

1.1 Objetivo Geral

Desenvolver um protótipo didático e experimental de relé de proteção inteligente para transformadores, em escala reduzida, capaz de monitorar grandezas elétricas e ambientais, processar medições em tempo real, identificar condições anormais de operação e atuar por meio de sinal de *trip*, incorporando também comunicação Modbus TCP/IP para leitura externa das grandezas medidas.

1.2 Objetivos Específicos

Para atingir o objetivo geral, definem-se os seguintes objetivos específicos:

- desenvolver uma plataforma de aquisição para tensões trifásicas, correntes de entrada e saída, corrente de neutro ou aterramento e temperatura;
- projetar e implementar circuitos de condicionamento de sinais adequados à leitura segura

pelo conversor A/D do microcontrolador;

- implementar algoritmos de processamento digital para cálculo de valores RMS, frequência e temperatura;
- estudar e implementar as funções de proteção ANSI 50, 51, 59, 27, 26, 81U/81O e 24, incluindo a aplicação das lógicas 50 e 51 ao canal de neutro;
- desenvolver uma lógica de atuação com comando de *trip*;
- estudar e implementar comunicação industrial com foco no protocolo Modbus TCP/IP para leitura externa das grandezas medidas;
- integrar a plataforma de medição e proteção com um módulo de comunicação digital;
- validar o funcionamento do protótipo por meio de ensaios de bancada, calibração, comparação com instrumentos de referência e simulações lógicas via console serial.

1.3 Justificativa

Relés comerciais de proteção para transformadores oferecem elevada confiabilidade, múltiplas funções de proteção e integração com sistemas supervisórios. Entretanto, esses equipamentos possuem custo elevado e, em muitos casos, apresentam arquiteturas fechadas, o que dificulta sua utilização em ambientes acadêmicos para estudo detalhado dos algoritmos internos de proteção e comunicação. Exemplos representativos dessa categoria incluem o SEL-787 [14], o Multilin 345 [15], o Multilin 845 [16] e o Multilin T60 [17], equipamentos que ilustram o nível de integração funcional típico de relés digitais comerciais aplicados à proteção de transformadores.

Por outro lado, plataformas embarcadas de baixo custo, como o ESP32, permitem a construção de protótipos flexíveis para fins didáticos e experimentais. Embora não substituam relés industriais certificados, essas plataformas possibilitam o estudo prático dos principais blocos funcionais de um IED: aquisição de sinais, condicionamento, processamento digital, tomada de decisão, atuação e comunicação.

Assim, o desenvolvimento de um relé de proteção inteligente em plataforma aberta representa uma oportunidade de aprofundamento técnico em áreas relevantes da engenharia eletrônica e elétrica, incluindo instrumentação, sistemas embarcados, eletrônica de potência, proteção de sistemas elétricos, comunicação industrial e automação de subestações. Neste trabalho, o caráter “inteligente” do relé está associado à sua capacidade de monitorar continuamente as grandezas elétricas e térmicas do sistema, decidir de forma autônoma sobre a atuação das funções de proteção implementadas a partir dessas medições e comunicar as variáveis monitoradas e os estados de operação a um sistema externo, aproximando o protótipo, ainda que em escala reduzida, do comportamento funcional característico de um IED comercial.

1.4 Organização do Trabalho

Este trabalho está organizado da seguinte forma. O Capítulo 2 apresenta a fundamentação teórica relacionada a transformadores, relés de proteção, IEDs, funções ANSI, aquisição de sinais e protocolos de comunicação. O Capítulo 3 descreve a metodologia de desenvolvimento adotada. O Capítulo 4 apresenta a arquitetura proposta para o relé de proteção inteligente. O Capítulo 5 descreve o sistema de aquisição e processamento digital. O Capítulo 6 apresenta as funções de proteção implementadas. O Capítulo 7 aborda a comunicação digital e a integração do sistema. O Capítulo 8 apresenta o protótipo físico e os procedimentos de validação. O Capítulo 9 apresenta os resultados obtidos nos ensaios de medição, comunicação e validação lógica das proteções. O Capítulo 10 reúne os recursos utilizados para a execução do projeto. O Capítulo 11 apresenta as considerações finais. Por fim, o Capítulo 12 apresenta possibilidades de trabalhos futuros. O Apêndice A apresenta o repositório público do projeto, utilizado para disponibilização dos códigos-fonte, documentos auxiliares e materiais complementares.

Durante a elaboração deste trabalho, foram utilizadas ferramentas de inteligência artificial como apoio à revisão textual, correção gramatical e ortográfica, melhoria da clareza da redação e auxílio no desenvolvimento de trechos de código computacional. As sugestões fornecidas foram analisadas, adaptadas e validadas por mim. Todo o conteúdo técnico, metodologia, resultados, interpretações, códigos implementados e conclusões apresentados neste trabalho são de minha responsabilidade.

2 Fundamentação Teórica

2.1 Transformadores de Potência

Os transformadores de potência são equipamentos eletromagnéticos utilizados para transferir energia elétrica entre circuitos de corrente alternada por meio do princípio da indução eletromagnética. Sua principal função é elevar ou reduzir os níveis de tensão, possibilitando a transmissão e distribuição de energia elétrica com maior eficiência e menores perdas. O funcionamento desses equipamentos baseia-se no acoplamento magnético entre dois ou mais enrolamentos dispostos sobre um núcleo ferromagnético comum: a variação do fluxo magnético produzido pelo enrolamento primário, alimentado por uma fonte de corrente alternada, induz uma tensão proporcional no enrolamento secundário, segundo a relação de transformação definida pelo número de espiras de cada bobina [2].

Esses equipamentos estão presentes em todas as etapas do sistema elétrico de potência, desde as usinas geradoras até os sistemas de distribuição e os consumidores finais. Nas usinas, os transformadores elevadores adequam a tensão gerada aos níveis necessários para a transmissão em longas distâncias, reduzindo as perdas associadas à corrente elétrica. Já nas subestações de distribuição e nos consumidores finais, os transformadores abaixadores realizam o processo inverso, adequando a tensão a níveis seguros e compatíveis com as instalações industriais, comerciais e residenciais.

Devido ao seu elevado custo de aquisição, à sua importância operacional e ao impacto que uma falha pode causar na continuidade do fornecimento de energia, os transformadores são considerados ativos críticos e demandam sistemas de monitoramento e proteção altamente confiáveis. A indisponibilidade não programada de um transformador de potência pode acarretar prejuízos financeiros significativos, comprometer a confiabilidade do sistema elétrico e, em casos mais severos, resultar em danos irreversíveis ao equipamento, exigindo longos períodos de reparo ou substituição.

Durante sua operação, os transformadores estão sujeitos a diversas condições anormais, como sobrecorrentes, curtos-circuitos internos e externos, sobrecargas, sobretensões, subtenções, faltas à terra, desequilíbrios entre fases e falhas de isolamento. Tais condições podem ser originadas por descargas atmosféricas, manobras inadequadas no sistema, sobrecargas operacionais, deterioração do sistema de isolamento ou falhas em equipamentos adjacentes. Além disso, o envelhecimento térmico dos materiais isolantes pode comprometer gradualmente sua vida útil e sua confiabilidade operacional, uma vez que o aumento sustentado da temperatura acelera processos físico-químicos de degradação do papel isolante e do óleo mineral, reduzindo a rigidez dielétrica do conjunto.

A identificação precoce dessas condições é fundamental para evitar danos permanentes ao equipamento. Para isso, são realizadas medições contínuas de grandezas elétricas, como

tensões e correntes, além do acompanhamento de variáveis térmicas associadas ao aquecimento dos enrolamentos e do sistema de isolamento. Essas informações servem como base para a atuação dos sistemas de proteção e monitoramento empregados em subestações e instalações industriais, permitindo que ações corretivas, como o desligamento seletivo do equipamento, sejam tomadas antes que uma falha evolua para um quadro de maior gravidade.

2.2 Transformadores de Instrumentação

Os transformadores de instrumentação são dispositivos utilizados para adaptar os elevados níveis de tensão e corrente presentes nos sistemas elétricos para valores seguros e compatíveis com equipamentos de medição, monitoramento e proteção. Esses dispositivos permitem que instrumentos eletrônicos e relés de proteção operem de forma isolada e segura em relação ao sistema de potência, sem que seja necessário submeter os circuitos eletrônicos de processamento aos elevados níveis de energia presentes no sistema primário.

Os principais tipos de transformadores de instrumentação são os Transformadores de Corrente (TCs) e os Transformadores de Potencial (TPs) [3]. Os TCs têm a função de reproduzir, em escala reduzida, as correntes presentes no sistema elétrico, enquanto os TPs realizam a redução proporcional das tensões do sistema. Dessa forma, correntes de centenas ou milhares de ampères e tensões de dezenas ou centenas de quilovolts podem ser convertidas para níveis adequados aos circuitos eletrônicos de aquisição.

Em sistemas elétricos de potência, os TCs convencionais normalmente possuem correntes secundárias nominais padronizadas em 5 A ou 1 A, independentemente da corrente primária medida, que pode chegar a valores muito superiores. Da mesma forma, os TPs convencionais costumam apresentar tensão secundária nominal padronizada, comumente em torno de 115 V ou $115/\sqrt{3}$ V, para tensões primárias que variam de acordo com a classe de tensão da instalação. Essa padronização permite que instrumentos de medição, relés e demais dispositivos sejam projetados para operar em faixas de entrada bem definidas, independentemente do nível de tensão ou corrente do sistema primário ao qual estão conectados.

No protótipo desenvolvido neste trabalho, a função dos transformadores de instrumentação convencionais é desempenhada por sensores de corrente e módulos de medição de tensão de baixo custo, adequados a uma aplicação em escala reduzida. Para a aquisição de corrente, foi utilizado o sensor ACS712 [20], baseado no efeito Hall, em sua versão de 5 A, capaz de medir correntes alternadas dentro dessa faixa e fornecer, em sua saída, um sinal analógico proporcional e compatível com a entrada do conversor analógico-digital do microcontrolador. Já para a aquisição de tensão, foi utilizado o módulo baseado no transformador ZMPT101B [21], projetado para medir tensões alternadas de até 250 V, valor que abrange a tensão de rede de 220 V utilizada como referência neste trabalho.

Além da adaptação dos níveis elétricos, os transformadores de instrumentação fornecem

isolamento galvânico entre o sistema de potência e os equipamentos secundários. Essa característica aumenta a segurança e protege os circuitos eletrônicos contra sobretensões e distúrbios provenientes da rede elétrica. No caso dos sensores e módulos empregados no protótipo, esse isolamento também está presente, de forma equivalente, garantindo que o circuito de processamento digital não seja exposto diretamente à tensão de rede.

Em sistemas modernos de proteção, os sinais provenientes dos TCs e TPs constituem as principais entradas dos relés de proteção. A partir dessas medições, os relés executam cálculos de tensão, corrente, potência, frequência e outras grandezas necessárias para a detecção de faltas e tomada de decisões. Dessa forma, os transformadores de instrumentação, e os sensores que desempenham função equivalente em escala reduzida, são responsáveis por fornecer as informações confiáveis sobre as quais todo o sistema de proteção digital se fundamenta.

Do ponto de vista normativo, a especificação, o dimensionamento e os ensaios de transformadores de instrumentação são atualmente regidos, em âmbito internacional, pela família de normas IEC 61869 [3], que substituiu a antiga série IEC 60044 [6], anteriormente utilizada para esse fim, e que hoje representa a principal referência internacional sobre o tema. A norma IEC 61869-1 [3] estabelece os requisitos gerais aplicáveis a todos os tipos de transformadores de instrumentação, servindo de base comum às demais partes da série. A IEC 61869-2 [4] é dedicada especificamente aos Transformadores de Corrente, definindo requisitos adicionais de classe de exatidão, comportamento sob condições de curto-circuito e ensaios de tipo e de rotina, enquanto a IEC 61869-3 [5] trata dos Transformadores de Potencial indutivos, especificando requisitos equivalentes para essa categoria de equipamento. Nas Américas, a norma IEEE C57.13 [7] constitui a referência predominante para a metodologia de dimensionamento, classificação de exatidão e ensaios de transformadores de instrumentação, sendo amplamente adotada por fabricantes e concessionárias como alternativa ou complemento à normalização IEC, conforme a região de aplicação. No cenário nacional, a Associação Brasileira de Normas Técnicas estabelece as normas NBR 6856 [8] e NBR 6855 [9], que definem, respectivamente, os requisitos de especificação e os procedimentos de ensaio para Transformadores de Corrente e Transformadores de Potencial no contexto brasileiro. Embora o protótipo desenvolvido neste trabalho, por seu caráter experimental e didático em escala reduzida, não tenha sido submetido aos ensaios de tipo e de rotina previstos nesse conjunto normativo, transformadores de instrumentação e sensores equivalentes empregados em instalações reais de sistemas de potência devem atender integralmente a essas normas, que orientam tanto o projeto quanto a validação desses equipamentos.

2.3 Relés de Proteção

Relés de proteção são dispositivos responsáveis por monitorar variáveis do sistema elétrico e comandar a abertura de disjuntores quando uma condição de falta é detectada. A atuação de

um relé deve ser rápida, seletiva, sensível e confiável. A rapidez reduz a energia associada à falta, minimizando danos térmicos e mecânicos ao equipamento protegido; a seletividade evita desligamentos desnecessários, isolando apenas a parte do sistema efetivamente afetada pela falta; a sensibilidade permite detectar falhas mesmo em condições menos intensas, garantindo a atuação mesmo em faltas de baixa magnitude; e a confiabilidade garante que o dispositivo atue corretamente quando necessário, sem falhas de operação nem atuações indevidas.

Historicamente, os relés evoluíram de dispositivos eletromecânicos, baseados em princípios como bobinas de indução, discos rotativos e armaduras móveis, para soluções estáticas baseadas em componentes analógicos e, posteriormente, para sistemas digitais microprocessados. Os relés eletromecânicos, embora robustos e amplamente utilizados ao longo de décadas, apresentavam limitações relacionadas à precisão, ao tempo de resposta, à flexibilidade de ajuste e à dificuldade de integração com sistemas de supervisão e registro de eventos. A transição para relés digitais, viabilizada pelo avanço dos microcontroladores e processadores de sinais, permitiu superar essas limitações, possibilitando maior precisão de medição, ajustes paramétricos via software e maior versatilidade funcional.

Os relés digitais permitem a implementação de diversas funções de proteção em um único equipamento, eliminando a necessidade de múltiplos relés eletromecânicos dedicados a funções específicas. Além disso, possibilitam parametrização remota, registro de eventos e oscilografia de faltas, comunicação digital com sistemas supervisórios e capacidade de autodiagnóstico, características que tornam esses equipamentos centrais não apenas para a proteção propriamente dita, mas também para a operação, manutenção e análise de desempenho do sistema elétrico como um todo. Essa evolução tecnológica abriu caminho para a integração dos relés digitais a arquiteturas de automação mais amplas, dando origem ao conceito de Dispositivos Eletrônicos Inteligentes, tratados a seguir.

2.4 IEDs em Subestações Digitais

Os IEDs (*Intelligent Electronic Devices*, ou Dispositivos Eletrônicos Inteligentes) são equipamentos microprocessados utilizados em sistemas de automação, proteção, controle e supervisão de subestações elétricas. Diferentemente dos relés convencionais, concebidos originalmente para executar uma função de proteção específica, os IEDs integram diversas funcionalidades em uma única plataforma, incluindo medição de grandezas elétricas, múltiplas funções de proteção, oscilografia de distúrbios, supervisão de estados de equipamentos de manobra, comunicação digital e lógica programável para automação de processos da subestação.

Essa convergência de funções é um dos principais fatores que impulsionaram a transformação das subestações convencionais em subestações digitais. Em uma subestação tradicional, cada função, como medição, proteção e controle, costuma ser realizada por equipamentos distintos, interligados por extensa fiação de cobre que conecta os transformadores de instrumentação,

os disjuntores e os painéis de proteção e controle. Em uma subestação digital, por outro lado, os IEDs assumem o papel de elementos centrais de processamento, capazes de adquirir sinais analógicos ou digitais, processá-los localmente e disponibilizar os resultados, comandos e alarmes por meio de redes de comunicação baseadas em protocolos padronizados, como o IEC 61850 [12], principal norma internacional voltada à automação de subestações digitais.

Essa integração proporciona uma série de benefícios em relação à arquitetura convencional. A comunicação digital entre IEDs e com o sistema supervisório permite maior velocidade de resposta em determinadas funções de automação e proteção, uma vez que informações podem ser trocadas quase instantaneamente entre dispositivos distribuídos pela subestação. A substituição de grande parte da fiação de cobre por redes de comunicação digital resulta em redução significativa de cabeamento, o que diminui custos de instalação, riscos de falhas por conexões físicas e a complexidade de manutenção. Além disso, o uso de protocolos padronizados aumenta a interoperabilidade entre equipamentos de diferentes fabricantes, possibilitando a integração de sistemas heterogêneos em uma mesma arquitetura de automação. Por fim, a disponibilidade de dados digitais detalhados, incluindo medições em tempo real, registros de eventos e oscilografias, melhora significativamente a capacidade de monitoramento do sistema elétrico, permitindo diagnósticos mais precisos e ações de manutenção preditiva.

Cabe destacar que diferentes protocolos de comunicação podem ser empregados para viabilizar essa integração entre os IEDs e os sistemas supervisórios de uma subestação digital, cada um com características específicas de desempenho, complexidade de implementação e finalidade. O detalhamento desses protocolos é apresentado na seção dedicada à comunicação em sistemas de proteção. No contexto deste trabalho, o protótipo desenvolvido busca reproduzir, em escala reduzida, alguns dos princípios fundamentais que caracterizam um IED: a integração de múltiplas funções de proteção em uma única plataforma microprocessada e a disponibilização de suas medições e estados por meio de comunicação digital com um sistema supervisório externo.

Do ponto de vista normativo, os requisitos técnicos e funcionais aplicáveis a relés de proteção e a IEDs são estabelecidos, em âmbito internacional, pela série de normas IEC 60255 [1], que abrange aspectos como requisitos gerais de medição e proteção, imunidade eletromagnética, comportamento sob influências externas e critérios de ensaio dos dispositivos de proteção. De forma complementar, a norma IEEE C37.90 [10] estabelece requisitos para relés e sistemas de relés associados a equipamentos de potência, sendo amplamente utilizada para especificar os ensaios funcionais de isolamento e os ensaios ambientais aos quais esses equipamentos devem ser submetidos, incluindo ensaios dielétricos, de vibração, de variação de temperatura e de compatibilidade eletromagnética. Esse conjunto normativo é mandatório para a certificação de relés e IEDs comerciais, mesmo quando o equipamento já atende a normas de comunicação específicas, como a IEC 61850 [12], uma vez que trata de requisitos de desempenho, segurança e robustez independentes do protocolo de comunicação adotado. Embora o protótipo desenvolvido neste

trabalho, por seu caráter experimental e didático, não tenha sido submetido formalmente aos ensaios de tipo previstos pela IEC 60255 [1] e pela IEEE C37.90 [10], esse conjunto normativo representa a referência técnica que orienta o desenvolvimento de relés e IEDs comerciais, servindo de base conceitual para a compreensão dos requisitos que um equipamento de proteção certificado deve atender.

2.5 Funções ANSI Aplicadas a Transformadores

As funções de proteção são frequentemente identificadas por números padronizados pela norma ANSI/IEEE C37.2 [11], que estabelece uma codificação numérica para as diferentes funções de proteção, controle e automação utilizadas em sistemas elétricos. Essa padronização facilita a comunicação técnica entre fabricantes, projetistas e operadores, uma vez que um mesmo código numérico representa sempre a mesma função, independentemente do equipamento ou fabricante específico. No contexto deste trabalho, a Tabela 1 apresenta apenas as funções ANSI efetivamente implementadas e validadas logicamente no protótipo desenvolvido.

Tabela 1: Funções ANSI implementadas no relé desenvolvido neste trabalho.

Código ANSI	Descrição da função de proteção
50	Sobrecorrente instantânea, aplicada às correntes de fase e ao canal de neutro (50N)
51	Sobrecorrente temporizada, aplicada às correntes de fase e ao canal de neutro (51N)
59	Sobretensão
27	Subtensão
26	Proteção térmica por medição direta de temperatura por RTD
81U e 81O	Subfrequência e sobrefrequência
24	Sobreexcitação

Fonte: Elaborado pelo autor.

As funções de proteção apresentadas na Tabela 1 constituem o conjunto de funcionalidades efetivamente consideradas no firmware final do relé desenvolvido neste trabalho. Abrangendo sobrecorrente instantânea e temporizada, sobretensão, subtensão, proteção térmica por medição direta de temperatura, subfrequência, sobrefrequência e sobreexcitação. As lógicas de sobrecorrente 50 e 51 também foram aplicadas ao canal de corrente de neutro I_N , caracterizando as proteções 50N e 51N no contexto do protótipo.

As funções ANSI 46, associada à proteção contra desequilíbrio de corrente por componente de sequência negativa; ANSI 47, relacionada à verificação de sequência e falta de fase; ANSI 49, correspondente à proteção térmica por modelo de sobrecarga; e ANSI 87T, referente à proteção diferencial de transformador, não fazem parte do escopo de proteções implementadas neste projeto, pois dependem de recursos adicionais de processamento, como análise fasorial, modelos térmicos dinâmicos e lógica diferencial, não contemplados na versão desenvolvida. Dessa forma, essas funções são tratadas como possibilidades de expansão para trabalhos futuros.

2.6 Aquisição de Sinais Elétricos

A aquisição de sinais é uma das etapas mais críticas no desenvolvimento de um relé digital, pois a qualidade das medições obtidas nessa etapa determina diretamente a confiabilidade de todas as funções de proteção implementadas posteriormente. As tensões e correntes presentes em sistemas de potência possuem amplitudes muito superiores às admitidas pelas entradas de um microcontrolador, sendo necessário, portanto, utilizar uma cadeia de sensores, transformadores de instrumentação, circuitos de isolamento e condicionamento de sinais antes que a grandeza elétrica possa ser efetivamente digitalizada.

De forma geral, esse processo de aquisição pode ser entendido em etapas sequenciais. Primeiramente, sensores ou transformadores de instrumentação reduzem a grandeza elétrica de entrada (tensão ou corrente do sistema monitorado) a um nível compatível com circuitos eletrônicos de baixa potência. Em seguida, circuitos de condicionamento de sinal adequam essa grandeza reduzida à faixa de tensão aceita pela entrada analógica do microcontrolador, tipicamente entre 0 e a tensão de referência do conversor analógico-digital (ADC), realizando ainda funções como deslocamento de nível (*offset*) e, quando necessário, filtragem analógica para atenuação de ruídos de alta frequência. Por fim, o sinal condicionado é amostrado e convertido em valores digitais pelo ADC do microcontrolador, ficando disponível para o processamento digital subsequente.

No protótipo proposto, a aquisição de corrente é realizada por sensores baseados no efeito Hall, como o ACS712 [20], na versão de 5 A, enquanto a aquisição de tensão utiliza módulos com transformador ZMPT101B [21], capazes de medir tensões alternadas de até 250 V. A escolha desses dispositivos foi motivada por seu baixo custo, sua facilidade de integração com microcontroladores e pela isolamento galvânica que proporcionam entre o circuito de potência monitorado e o circuito de processamento digital, característica essencial para a segurança da plataforma experimental.

Entretanto, é necessário considerar limitações inerentes a sensores de baixo custo dessa natureza, como ruído eletromagnético captado durante a medição, desvio de *offset* (*offset drift*) na saída do sensor, não linearidades em determinadas faixas de operação, atraso de fase introduzido pelos circuitos de condicionamento e filtragem, e faixa útil de medição limitada pelas especificações do componente. Essas limitações reforçam a importância da etapa de processamento digital de sinais, apresentada a seguir, responsável por compensar parte dessas imperfeições e extrair, a partir dos dados brutos do ADC, grandezas elétricas confiáveis para a tomada de decisão do relé.

2.7 Processamento Digital de Sinais

Após a aquisição dos sinais pelo conversor analógico-digital do microcontrolador, é necessário realizar o processamento digital das amostras obtidas. De forma geral, o processamento

de sinais em um relé de proteção digital consiste em transformar o valor numérico bruto fornecido pelo ADC, que representa apenas um nível de tensão na entrada do microcontrolador, em uma grandeza elétrica fisicamente significativa e correspondente à variável real do sistema monitorado, como a tensão V ou a corrente I efetivamente presentes no circuito de potência.

Essa transformação é necessária porque, ao longo da cadeia de aquisição descrita anteriormente, o sinal original sofre sucessivas atenuações, impostas pelos sensores e pelos circuitos de condicionamento, até atingir uma faixa compatível com a entrada do ADC. No protótipo desenvolvido, por exemplo, uma tensão de rede de 220 V chega à entrada do conversor analógico-digital atenuada por um fator da ordem de 500 vezes, de modo que o valor lido diretamente pelo microcontrolador não corresponde, em magnitude, à grandeza real do sistema. Para que essa informação seja utilizável pelas funções de proteção, é necessário aplicar ao valor lido um fator de correção, determinado experimentalmente por meio de calibração, que compensa a atenuação introduzida pelo sensor e pelo circuito de condicionamento e recompõe o valor real da grandeza monitorada.

Uma vez obtidas as amostras corrigidas, calcula-se o valor eficaz da grandeza periódica, conforme a Equação 1:

$$G_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N g^2[n]} \quad (1)$$

em que G_{RMS} representa o valor eficaz da grandeza analisada, podendo corresponder à tensão V_{RMS} ou à corrente I_{RMS} ; $g[n]$ representa cada amostra do sinal, já corrigida pelo fator de escala determinado na calibração; e N é o número de amostras da janela de cálculo.

É importante destacar que o valor RMS não corresponde a uma amostra isolada do sinal, tampouco ao valor de pico instantâneo eventualmente lido em um único instante pelo ADC. Trata-se, na verdade, de um valor calculado a partir da somatória dos quadrados de todas as amostras coletadas ao longo de uma janela de tempo, seguida da extração da raiz quadrada do resultado, também chamado como TrueRMS, conforme expresso na Equação 1. Essa somatória discreta corresponde, na prática, a uma aproximação numérica da integral do quadrado da grandeza instantânea ao longo do período de análise, dividida pelo próprio intervalo considerado, e não à leitura direta de um único ponto da forma de onda. Dessa forma, enquanto o valor de pico representa apenas a amplitude máxima instantânea observada em um dado instante, o valor RMS incorpora, por definição, a totalidade da informação amostrada dentro da janela de cálculo, sendo obtido por processamento numérico e não por leitura direta de uma amostra isolada. Essa distinção é relevante para o presente trabalho, pois é justamente esse caráter cumulativo do cálculo que confere ao valor RMS maior estabilidade e representatividade em relação às variações instantâneas do sinal, sendo esse o motivo pelo qual as funções de proteção

implementadas utilizam o valor eficaz calculado, e não amostras de pico, como grandeza de comparação com os limites de atuação.

A utilização do valor eficaz, ou valor RMS, é adequada para este trabalho porque as principais grandezas analisadas em sistemas de potência, como tensão e corrente, são normalmente especificadas e interpretadas em termos de seus valores eficazes. O valor RMS fornece uma medida representativa da magnitude do sinal ao longo de uma janela de amostragem, estando diretamente relacionado ao efeito energético e térmico produzido pela grandeza elétrica.

No contexto deste protótipo de relé de proteção, as funções implementadas, como sobrecorrente, sobretensão e subtensão, utilizam os valores eficazes das tensões e correntes medidas, já devidamente corrigidos pelo fator de escala da calibração, para comparação com limites previamente definidos. Essa abordagem permite uma avaliação mais estável da condição elétrica do sistema quando comparada ao uso direto de valores instantâneos, que variam continuamente ao longo do ciclo da senoide e podem ser mais sensíveis a ruídos e oscilações momentâneas. Dessa forma, o processamento digital de sinais neste trabalho não se limita ao cálculo do valor RMS propriamente dito, mas engloba todo o tratamento necessário para transformar a leitura bruta do ADC em uma grandeza elétrica confiável, compreendendo a correção de escala decorrente da atenuação do sensor e, a partir dela, o cálculo do valor eficaz utilizado pelas funções de proteção.

O uso do valor RMS não exclui outras formas de análise de sinais em relés de proteção digitais. Há equipamentos comerciais mais avançados que permitem analisar, além dos valores eficazes, informações de fase, frequência, componentes harmônicas e outros parâmetros extraídos da forma de onda. Entretanto, para o escopo deste trabalho, o tratamento do valor lido pelo ADC, seguido da correção do fator de escala e do cálculo do valor RMS, foi adotado como base principal para a supervisão das grandezas elétricas e para a implementação das funções de proteção propostas.

2.8 Comunicação em Sistemas de Proteção

A comunicação digital é um elemento essencial em sistemas modernos de proteção e automação. Ela permite que medições, estados, alarmes e comandos sejam transmitidos entre IEDs, sistemas supervisórios e centros de operação, viabilizando a integração característica das subestações digitais discutida anteriormente.

Existem diversos protocolos de comunicação utilizados em sistemas elétricos de potência, cada um voltado a aplicações e contextos específicos. Entre os mais difundidos, destaca-se o protocolo IEC 61850 [12], voltado especificamente à automação de subestações, que padroniza não apenas a comunicação entre dispositivos, mas também a modelagem de dados dos equipamentos, permitindo elevada interoperabilidade entre IEDs de diferentes fabricantes. Outro protocolo amplamente utilizado, especialmente em sistemas de distribuição de energia e

em aplicações de telecontrole, é o DNP3 (*Distributed Network Protocol*) [13], reconhecido por sua robustez em aplicações de supervisão e aquisição de dados em larga escala. Há ainda outros protocolos e variantes empregados conforme a aplicação, o porte da instalação e os requisitos específicos de cada sistema de automação.

Diante dessas alternativas, este trabalho adota o protocolo Modbus [18], mais especificamente em sua variante Modbus TCP/IP [24], como solução de comunicação para o protótipo desenvolvido. Essa escolha foi motivada pela simplicidade do protocolo, por sua ampla utilização industrial em aplicações de automação e supervisão, e pela facilidade de implementação em sistemas embarcados de recursos limitados, como o microcontrolador utilizado neste projeto. O Modbus TCP/IP, por operar sobre redes Ethernet utilizando o conjunto de protocolos TCP/IP, permite ainda a integração do protótipo a redes de comunicação convencionais. Na versão implementada, o protocolo foi utilizado para disponibilizar valores instantâneos das grandezas medidas, sem incluir registradores de estados de proteção, alarmes ou comandos de *trip*.

3 Metodologia

O desenvolvimento do relé de proteção inteligente foi organizado de forma modular, contemplando etapas de projeto, implementação e validação. A divisão modular permite que cada parte do sistema seja desenvolvida e testada separadamente antes da integração completa.

A metodologia está organizada em três módulos principais: aquisição e proteção, comunicação digital e desenvolvimento físico com validações.

3.1 Módulo 1 – Aquisição de Sinais

O primeiro módulo envolve a construção da plataforma de medição e processamento das grandezas elétricas e térmicas. Inicialmente, são realizados testes individuais com sensores de tensão e corrente, a fim de verificar faixa de operação, ruído, resposta em frequência, offset e atraso de fase.

Em seguida, são desenvolvidos os circuitos de condicionamento responsáveis por adaptar os sinais à faixa de entrada do conversor A/D do ESP32. Essa etapa inclui divisores resistivos, filtros analógicos, adequação de offset e proteção das entradas analógicas.

Após a validação dos sinais condicionados, são implementados os algoritmos de processamento digital, incluindo cálculo de RMS e essas informações são passadas via comunicação serial ao segundo módulo.

3.2 Módulo 2 - Proteção e Comunicação Digital

O segundo módulo contempla a execução das funções de proteção, a lógica de atuação do relé e a comunicação digital com sistemas externos. A proposta considera uma arquitetura com dois microcontroladores ESP32: um dedicado à aquisição e ao pré-processamento dos sinais medidos, e outro dedicado ao processamento das proteções, tomada de decisão, comando de trip e comunicação. Essa separação permite reduzir a carga de processamento no módulo de aquisição, melhorar a organização do sistema e concentrar no segundo módulo as funções associadas à supervisão e atuação do relé.

Nesta etapa, foram implementadas as lógicas das funções de proteção previstas no escopo do projeto, incluindo sobrecorrente, sobretensão, subtensão, proteção térmica, subfrequência, sobrefrequência e sobreexcitação. A partir dos valores recebidos do módulo de aquisição, o segundo ESP32 avalia as condições de operação, identifica situações de pickup e trip, aciona a saída correspondente e atualiza os estados internos das proteções.

Também foi estudado e implementado o protocolo Modbus TCP/IP para leitura externa das variáveis medidas. No firmware final, a comunicação foi utilizada para disponibilizar valores instantâneos de tensão, corrente, temperatura e frequência. A disponibilização completa

dos estados de proteção, alarmes, eventos registrados e comandos remotos permanece como possibilidade de expansão futura.

3.3 Módulo 3 – Protótipo Físico e Validações

O terceiro módulo envolve a integração física do sistema, montagem dos circuitos, desenvolvimento do gabinete e realização de testes experimentais. A estrutura física deve permitir conexão segura dos sensores, alimentação dos microcontroladores, saída de trip, indicação de alarmes e acesso às interfaces de comunicação.

As validações são realizadas por meio de ensaios de bancada, comparando as medições do protótipo com instrumentos de referência, como multímetro True-RMS, osciloscópio e analisador de energia. Também são simuladas condições de falha para verificar a atuação das proteções implementadas.

3.4 Fluxo Geral de Desenvolvimento

O fluxo geral de desenvolvimento pode ser resumido nas seguintes etapas:

1. levantamento dos requisitos do relé de proteção;
2. definição das grandezas medidas e das funções de proteção;
3. escolha dos sensores e da plataforma embarcada;
4. projeto do condicionamento de sinais;
5. implementação da aquisição de dados;
6. desenvolvimento dos algoritmos de processamento;
7. implementação das lógicas de proteção;
8. implementação da comunicação digital;
9. montagem física do protótipo;
10. calibração e validação experimental.

Além das etapas descritas, os arquivos complementares do desenvolvimento foram organizados em um repositório público no GitHub. Esse repositório reúne os códigos-fonte, documentos auxiliares, imagens, esquemáticos, resumo de custos e demais materiais associados ao protótipo, servindo como apoio à rastreabilidade e à reprodutibilidade do projeto [25].

4 Arquitetura do Relé Proposto

O relé de proteção inteligente proposto é composto por módulos funcionais integrados, responsáveis pela aquisição de sinais, processamento digital, tomada de decisão, atuação e comunicação. A Figura 1 apresenta a arquitetura do relé através do diagrama de blocos do sistema.

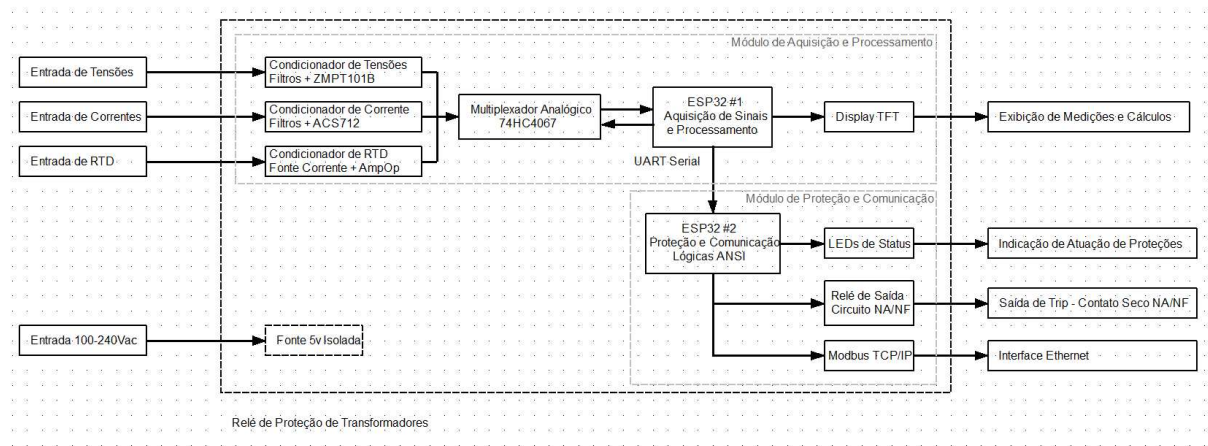


Figura 1: Arquitetura geral proposta para o relé de proteção inteligente.

A Figura 2 apresenta o protótipo físico desenvolvido, destacando a organização frontal do gabinete e o acesso interno aos módulos.



(a) Painel frontal fechado.



(b) Painel frontal aberto.

Figura 2: Protótipo físico do relé de proteção desenvolvido.

4.1 Módulo de Aquisição e Processamento

O módulo de aquisição e processamento é responsável por realizar a interface entre os sinais provenientes do transformador (transformadores de instrumentação) e o sistema digital de proteção. Esse módulo executa o condicionamento analógico dos sinais, aquisição das amostras, processamento digital e exibição das medições calculadas.

A arquitetura proposta contempla a medição de três tensões de fase, seis correntes associadas aos lados de entrada e saída do transformador e uma corrente adicional de neutro ou aterramento, totalizando dez canais analógicos principais. Além disso, o sistema possui um canal dedicado para medição de temperatura por RTD.

Os sinais de tensão são adquiridos por meio de módulos ZMPT101B associados a circuitos de filtragem e condicionamento analógico. As correntes são medidas utilizando sensores ACS712 também acompanhados de filtros analógicos. Para a medição de temperatura, é utilizado um circuito condicionador para RTD composto por fonte de corrente e amplificador operacional.

Devido à elevada quantidade de canais analógicos e à limitação de entradas A/D disponíveis no microcontrolador, o sistema utiliza um multiplexador analógico 74HC4067. Esse dispositivo permite selecionar sequencialmente cada canal para aquisição pelo conversor A/D do ESP32. Essa abordagem reduz a complexidade do hardware, porém exige atenção quanto ao tempo de estabilização do multiplexador, sincronização das leituras e taxa total de amostragem do sistema.

O ESP32 [19] principal é responsável pela aquisição contínua das amostras e pelo processamento digital dos sinais. Entre as funções executadas estão a remoção de offset, filtragem digital, cálculo de valores RMS e demais grandezas elétricas necessárias para as funções de proteção.

Além do processamento das medições, esse módulo também realiza a interface com um display TFT utilizado para exibição local das grandezas calculadas, estados do sistema e informações operacionais do relé.

As Figuras 3 e 4 apresentam o cartão de aquisição de tensões, RTD e corrente de neutro e seu respectivo esquemático.

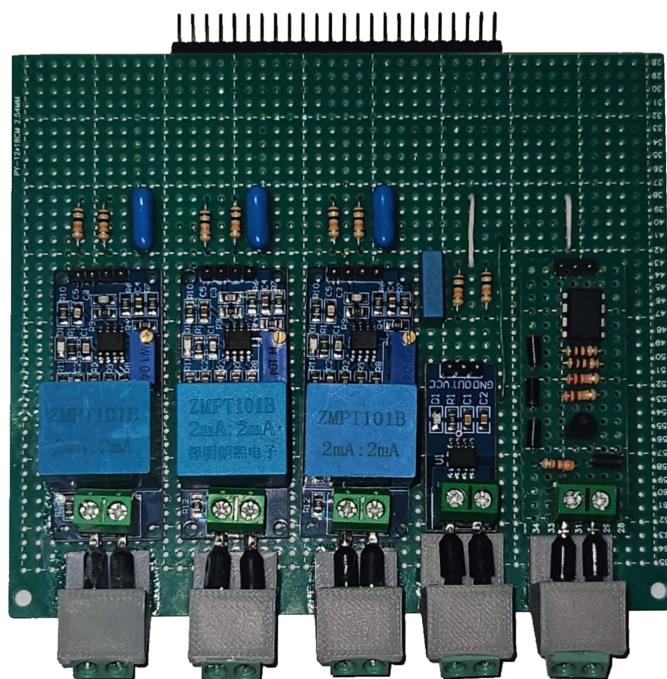


Figura 3: Cartão de aquisição de tensões, RTD e corrente de neutro.

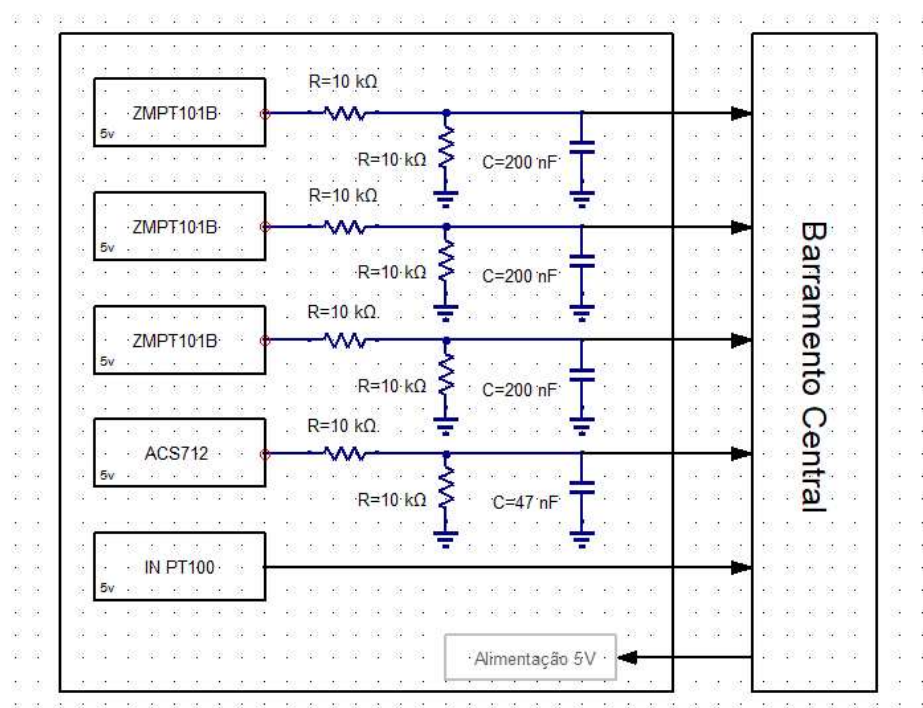


Figura 4: Esquemático do cartão de tensões, RTD e corrente de neutro.

As Figuras 5 e 6 apresentam o cartão de aquisição de correntes trifásicas e o esquemático correspondente.

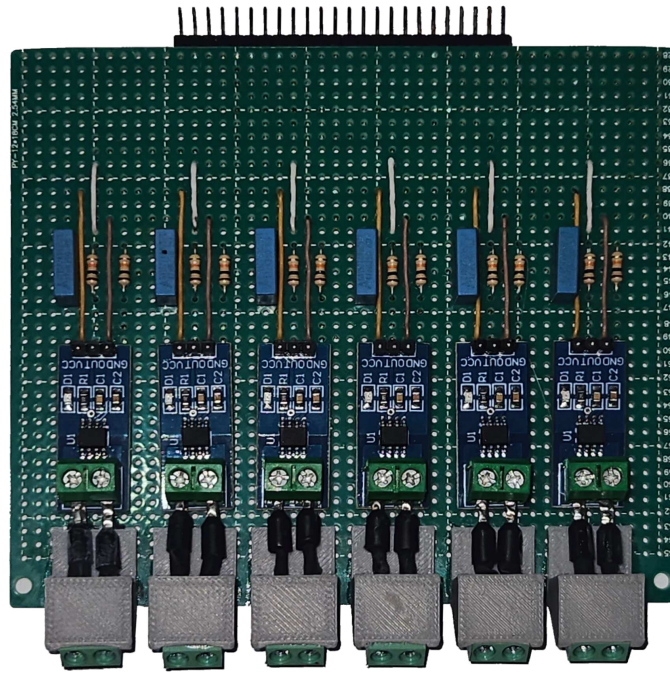


Figura 5: Cartão de aquisição de correntes trifásicas I/O.

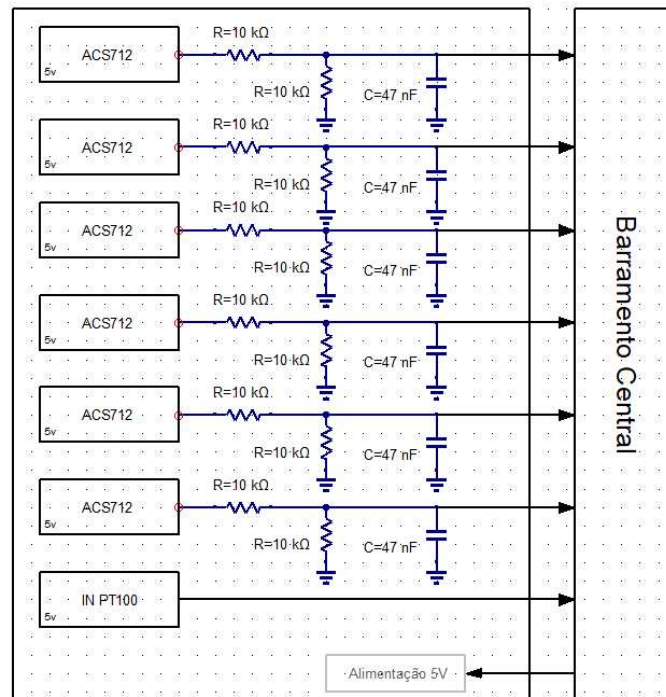


Figura 6: Esquemático do cartão de corrente.

As Figuras 7 e 8 apresentam o cartão de processamento de sinais e o esquemático do módulo associado ao ESP32 principal.

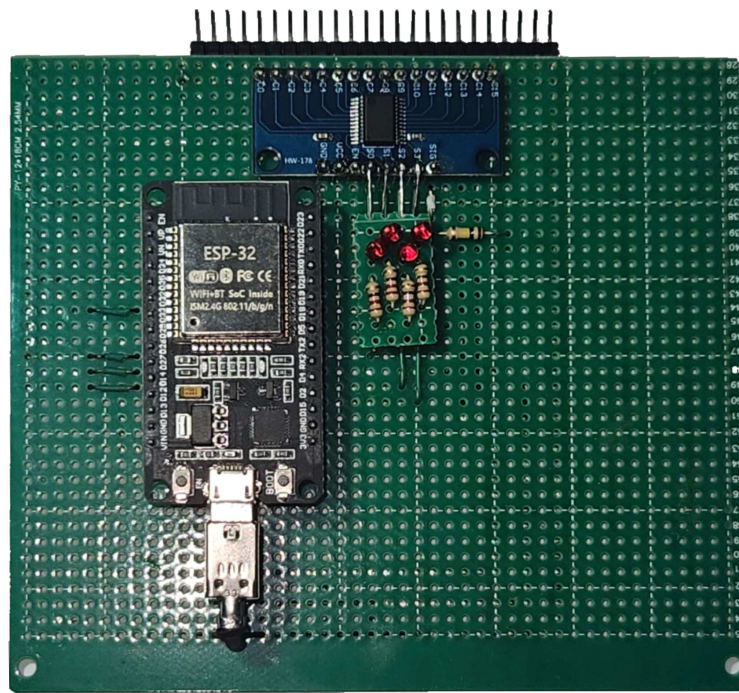


Figura 7: Cartão de processamento de sinais.

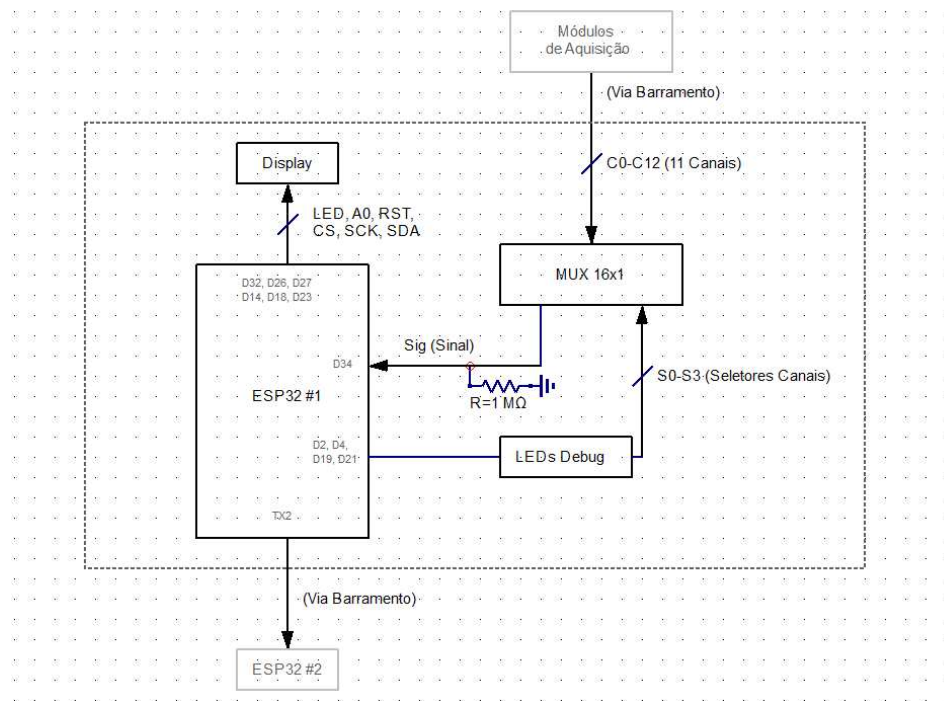


Figura 8: Esquemático do cartão de processamento de sinais.

4.2 Módulo de Proteção e Comunicação

O módulo de proteção e comunicação é responsável pela execução das lógicas de proteção implementadas, pela sinalização local de estados e pela atuação da saída física de *trip*. Para aumentar a organização da arquitetura e reduzir o impacto das tarefas de comunicação sobre o processamento em tempo real, foi utilizada uma estrutura com dois microcontroladores ESP32: um dedicado à aquisição e processamento das medições e outro dedicado às lógicas de proteção, sinalização, saída de atuação e comunicação.

A comunicação entre os dois microcontroladores é realizada por interface UART serial, permitindo que o módulo de aquisição envie continuamente ao módulo de proteção os valores processados de tensão, corrente, frequência e temperatura. Com base nesses valores, o segundo ESP32 executa as funções ANSI implementadas no protótipo: 50, 51, 59, 27, 26, 81U, 81O e 24. As lógicas de sobrecorrente 50 e 51 também são aplicadas ao canal de neutro I_N , caracterizando a atuação 50N/51N no contexto do firmware final.

A escolha da UART para essa comunicação interna se justifica por características que a tornam adequada ao contexto específico da arquitetura proposta. Trata-se de uma interface ponto a ponto, empregada exclusivamente na troca de informações entre dois dispositivos fixos, sem necessidade de endereçamento, arbitragem de barramento ou suporte a múltiplos dispositivos, requisitos que justificariam a adoção de protocolos mais complexos, como I2C, SPI ou barramentos multiponto do tipo RS-485. Ambos os módulos ESP32 dispõem de periféricos de UART em *hardware*, o que permite a transmissão e a recepção dos dados de forma assíncrona e com baixo uso de processamento, sem interferir de forma significativa na execução das tarefas de aquisição e de proteção em tempo real. Além disso, a UART dispensa componentes adicionais de interface física, como transceptores diferenciais, exigidos por protocolos de maior alcance, o que simplifica o projeto do circuito e reduz o custo da solução, características coerentes com a proposta de baixo custo do protótipo. Do ponto de vista do volume de dados, o enlace transporta apenas um pequeno conjunto de grandezas já processadas, tensão, corrente, frequência e temperatura, e não as amostras brutas do sinal, de modo que a taxa de transmissão exigida é reduzida e plenamente compatível com as taxas típicas de comunicação serial assíncrona. Por fim, a disponibilidade de bibliotecas maduras, ferramentas de depuração via monitor serial e ampla documentação para a UART no ecossistema ESP32 contribuiu para reduzir o tempo de desenvolvimento e facilitar a validação da comunicação entre os módulos durante a fase experimental do projeto. Em versões futuras do protótipo, caso seja necessária a comunicação com múltiplos dispositivos ou maior distância entre os módulos, interfaces como RS-485 ou CAN poderiam ser avaliadas como alternativas.

As decisões de proteção são tomadas a partir da comparação entre as grandezas recebidas e os limites configurados. Quando uma condição ultrapassa o limiar definido, o sistema entra em estado de *pickup*; quando a condição atende aos critérios de atuação da respectiva função,

o sistema entra em estado de *trip*. A saída física de *trip* é realizada por meio de um circuito de relé com contato seco NA/NF, permitindo representar o comando de desligamento em uma bancada didática.

O módulo também incorpora interface Ethernet utilizando o módulo W5500 [23]. Na versão implementada, a comunicação Modbus TCP/IP é utilizada apenas para disponibilizar valores instantâneos das medições a um cliente externo. A transmissão de estados de proteção, alarmes, eventos, comandos remotos ou registradores de *trip* via Modbus TCP/IP não faz parte do firmware final e é tratada como possibilidade de expansão futura.

A Figura 9 apresenta o cartão responsável pela proteção, comunicação, alimentação e saída de relé.

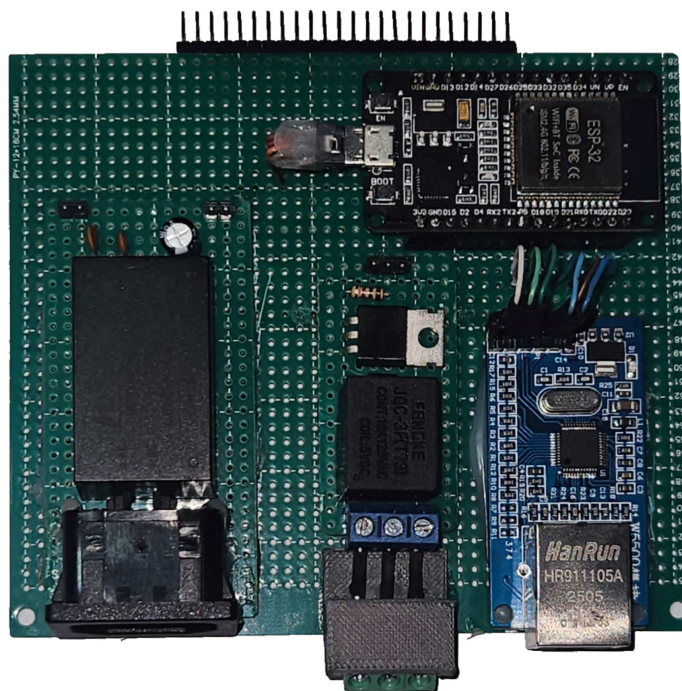


Figura 9: Cartão de proteção, comunicação, fonte e relé.

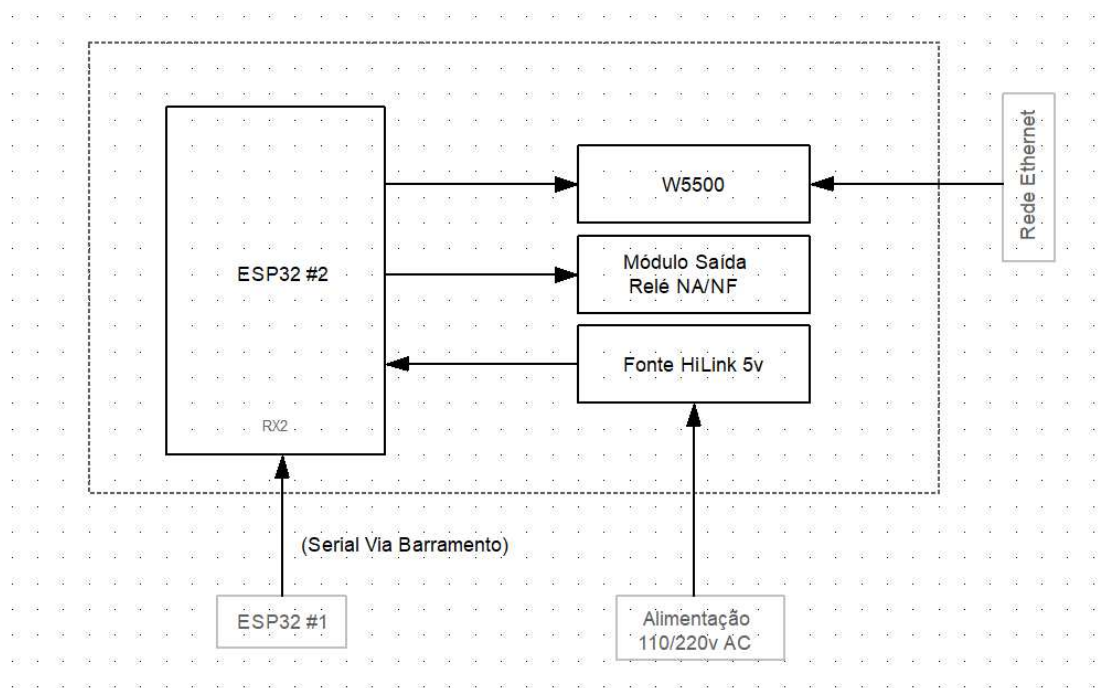


Figura 10: Esquemático do cartão de proteção e comunicação.

5 Sistema de Aquisição e Processamento

5.1 Sensoriamento de Tensão

A medição de tensão é realizada por módulos baseados no transformador ZMPT101B [21], adequado para medições de sinais alternados com isolamento galvânico. O sinal de saída do sensor deve ser ajustado para permanecer dentro da faixa de leitura do conversor A/D do ESP32, respeitando seus limites de tensão.

O condicionamento do sinal de tensão envolve ajuste de ganho, deslocamento de nível e filtragem. Como o sinal alternado possui componentes positivas e negativas em relação ao seu ponto médio, é necessário aplicar um offset para que toda a forma de onda fique dentro da faixa positiva do ADC.

5.2 Sensoriamento de Corrente

A medição de corrente é realizada por sensores ACS712 [20], que utilizam efeito Hall e fornecem uma tensão proporcional à corrente medida. Esses sensores possuem offset em torno da metade da tensão de alimentação, permitindo medir correntes alternadas em torno desse ponto de referência.

Para aplicação no ESP32, o sinal deve ser condicionado de forma que sua amplitude máxima não ultrapasse o limite admissível do ADC. Também é necessário calibrar o ganho e remover digitalmente o offset para que o cálculo RMS represente corretamente a corrente eficaz.

5.3 Medição de Temperatura

A proteção térmica do transformador é realizada por meio da medição de temperatura utilizando sensores RTD. Neste projeto, o módulo de aquisição de temperatura foi desenvolvido especificamente para operação com sensores PT100 [22], devido à sua ampla utilização em aplicações industriais, boa estabilidade térmica e elevada repetibilidade de medição.

O PT100 é um sensor resistivo cuja resistência varia conforme a temperatura, apresentando aproximadamente $100\ \Omega$ a $0\ ^\circ C$. Dessa forma, o circuito de condicionamento foi projetado para converter essa variação de resistência em um sinal de tensão compatível com a faixa de leitura do conversor A/D do ESP32. A Figura 11 apresenta o circuito desenvolvido para essa aquisição.

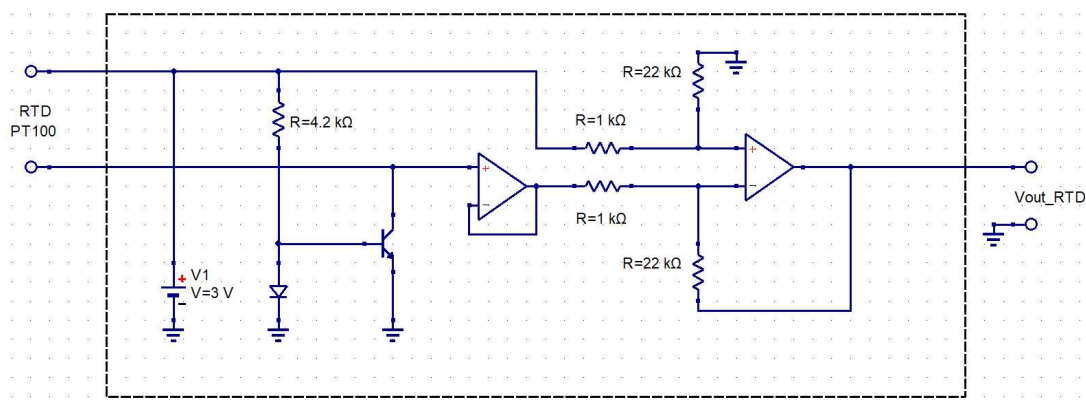


Figura 11: Circuito para aquisição de temperatura com PT100.

No circuito apresentado, O sensor é excitado por uma fonte de corrente de baixa intensidade implementada com transistor bipolar e rede de polarização. A utilização de corrente reduzida minimiza o efeito de autoaquecimento do RTD, evitando erros de medição causados pela dissipação de potência no sensor.

Com a corrente praticamente constante circulando pelo PT100, a variação de resistência do sensor produz uma variação proporcional de tensão em seus terminais, conforme a Lei de Ohm. Esse sinal é inicialmente aplicado a um amplificador operacional configurado como buffer, responsável por realizar o desacoplamento do estágio sensor e evitar carregamento do circuito de medição.

Na sequência, o sinal é enviado para um segundo estágio com amplificador operacional responsável pelo ganho diferencial e amplificação do sinal. Esse estágio ajusta a faixa de tensão para níveis adequados à entrada analógica do ESP32, resultando em uma saída aproximadamente compreendida entre 0 e 2 V, faixa considerada ideal para aquisição pelo microcontrolador.

Assim, o módulo realiza a conversão da variação de resistência do PT100 em uma tensão analógica proporcional à temperatura medida, permitindo sua utilização nas funções de monitoramento térmico, alarme e proteção do relé inteligente.

5.4 Remoção de Offset

Devido ao condicionamento analógico utilizado nos circuitos de aquisição, os sinais de tensão e corrente aplicados às entradas do ESP32 possuem uma componente contínua de offset. Esse deslocamento de nível é necessário porque o conversor analógico-digital do microcontrolador não é capaz de medir tensões negativas diretamente. Dessa forma, os sinais alternados provenientes dos sensores são deslocados para uma faixa positiva de tensão compatível com o ADC.

Embora esse offset seja indispensável para a aquisição, ele não representa a informação

elétrica real de interesse. As grandezas utilizadas pelo sistema de proteção estão associadas à componente alternada dos sinais, sendo necessário remover a parcela contínua antes da realização dos cálculos elétricos.

No protótipo desenvolvido, a remoção do offset é realizada digitalmente por meio do cálculo da média das amostras armazenadas em uma janela de aquisição. Para cada canal, o sistema calcula dinamicamente o valor médio do sinal, conforme a Equação 2:

$$V_{DC} = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} v[i] \quad (2)$$

em que V_{DC} representa o valor médio da janela, $v[i]$ corresponde às amostras adquiridas e N representa o número total de amostras armazenadas.

Após o cálculo da média, a componente alternada do sinal é obtida pela subtração do valor médio de cada amostra, conforme a Equação 3:

$$v_{AC}[i] = v[i] - V_{DC} \quad (3)$$

em que $v_{AC}[i]$ representa a amostra alternada resultante após a remoção do offset. Com isso, o sinal passa a oscilar em torno de zero, removendo o deslocamento introduzido pelo circuito de condicionamento analógico.

Essa abordagem apresenta vantagens importantes para o sistema proposto. Como o offset é calculado continuamente a partir das próprias amostras, o método se adapta automaticamente a pequenas variações causadas por tolerâncias de componentes, ruídos, variações da alimentação e diferenças entre canais analógicos.

Além disso, essa estratégia apresenta baixo custo computacional, simplicidade de implementação e boa estabilidade para aplicações em tempo real utilizando o ESP32.

5.5 Cálculo das Grandezas Elétricas

Após a remoção da componente contínua, os sinais passam a representar apenas a parcela alternada das grandezas elétricas monitoradas. A partir dessas amostras, já sem offset, o sistema realiza o cálculo dos valores eficazes (RMS) utilizados pelas funções de proteção, conforme apresentado na seção de Fundamentação Teórica.

No sistema desenvolvido, esses cálculos são realizados continuamente sobre buffers de aquisição, permitindo atualização periódica das grandezas monitoradas sem interrupção da aquisição dos dados.

5.6 Arquitetura de Aquisição dos Sinais

O sistema de aquisição foi desenvolvido com foco em previsibilidade temporal e operação contínua em tempo real. Para isso, a aquisição dos sinais é baseada em interrupções periódicas geradas por temporizadores de hardware do ESP32.

Entretanto, a leitura do ADC não é executada diretamente dentro da rotina de interrupção. A interrupção possui apenas a função de sinalizar ao sistema que uma nova amostra deve ser adquirida. A leitura efetiva é realizada posteriormente no laço principal do programa.

Essa abordagem foi adotada para evitar problemas associados ao excesso de processamento dentro das interrupções, como:

- aumento da latência do sistema;
- bloqueio de tarefas concorrentes;
- perda de interrupções em altas frequências;
- instabilidade geral da aplicação.

Dessa forma, o temporizador atua como referência temporal da aquisição, enquanto o processamento é distribuído de maneira mais segura ao longo da execução principal do firmware.

5.7 Multiplexação Analógica e Leitura Sequencial

O sistema proposto necessita monitorar múltiplos sinais analógicos simultaneamente, incluindo tensões, correntes e sensores auxiliares. Como o número de entradas analógicas disponíveis no ESP32 é limitado, foi adotada uma estratégia de multiplexação analógica.

A multiplexação permite compartilhar um único canal do ADC entre diversas entradas analógicas, reduzindo a quantidade de pinos necessários no microcontrolador.

No protótipo, a leitura dos canais ocorre de forma sequencial utilizando uma estratégia do tipo *round-robin*. A cada nova aquisição, o sistema:

1. seleciona o canal desejado no multiplexador;
2. aguarda o tempo mínimo de estabilização do sinal;
3. realiza a leitura do ADC;
4. armazena a amostra no buffer correspondente;
5. avança para o próximo canal.

Essa técnica garante distribuição uniforme das amostras entre todos os canais monitorados.

Entretanto, a utilização do multiplexador introduz limitações práticas importantes. Após a troca de canal, o sinal necessita de um pequeno intervalo para estabilização devido aos efeitos de capacitâncias parasitas, impedância de entrada e tempo de resposta do circuito analógico. Caso a leitura seja realizada imediatamente após a comutação, podem ocorrer erros significativos na conversão.

Assim, além do próprio tempo de conversão do ADC, o sistema também deve considerar o tempo de assentamento do multiplexador.

5.8 Gerenciamento de Buffers e Processamento em Janela

Cada canal monitorado possui um buffer circular responsável pelo armazenamento das amostras mais recentes. O uso de buffers circulares permite aquisição contínua dos sinais sem necessidade de interrupção do sistema para processamento.

Essa estrutura apresenta diversas vantagens:

- reutilização eficiente da memória;
- processamento contínuo em tempo real;
- implementação de janelas deslizantes;
- separação entre aquisição e processamento.

Os buffers armazenam as amostras utilizadas nos cálculos RMS e nas demais análises realizadas pelo relé.

Como o processamento é baseado em janelas de amostras, o sistema consegue atualizar continuamente os valores calculados sem interromper a aquisição dos sinais.

5.9 Taxa de Amostragem e Limitações Práticas

A definição da taxa de amostragem do sistema foi realizada com base nas limitações práticas observadas durante o desenvolvimento do firmware e dos testes experimentais realizados com aquisição multiplexada utilizando o ESP32.

Embora teoricamente o microcontrolador permita frequências elevadas de aquisição, na prática diversos fatores limitam a taxa efetiva de amostragem. Como o sistema realiza a leitura sequencial de dez canais analógicos utilizando multiplexação, o tempo disponível para aquisição de cada amostra depende diretamente do tempo necessário para executar todas as etapas envolvidas no processo.

Entre as principais etapas estão:

- escrita dos sinais de seleção do multiplexador;

- tempo de estabilização após a troca de canal;
- conversão analógica realizada pelo ADC;
- processamento matemático das amostras;
- armazenamento dos dados em buffer;
- execução das rotinas de controle do firmware.

Dessa forma, o tempo total necessário para processar cada aquisição pode ser representado pela Equação 4:

$$T_{\text{Proc}} = T_{\text{Mux}} + T_{\text{Est}} + T_{\text{ADC}} + T_{\text{Conv}} + T_{\text{Buffer}} + T_{\text{Ctrl}} \quad (4)$$

em que:

- T_{Mux} corresponde ao tempo de comutação do multiplexador;
- T_{Est} representa o tempo de estabilização do sinal;
- T_{ADC} representa o tempo de conversão do ADC;
- T_{Conv} corresponde ao processamento matemático da amostra;
- T_{Buffer} representa o tempo de armazenamento em memória;
- T_{Ctrl} representa o tempo associado às rotinas de controle do firmware.

Durante os testes do sistema, observou-se que taxas elevadas de aquisição faziam com que o tempo de processamento excedesse o intervalo disponível entre interrupções periódicas. Como consequência, surgiam problemas como:

- perda de amostras;
- distorção da senoide reconstruída;
- crescimento excessivo da fila de processamento;
- aumento de latência do firmware;
- instabilidade geral do sistema.

Para análise desse comportamento, foram implementadas variáveis internas de monitoramento de carga e controle de overflow, permitindo avaliar experimentalmente o comportamento do sistema em diferentes frequências de aquisição.

Também foram implementadas filas de tarefas para deslocar determinadas operações para fora da interrupção principal. Entretanto, verificou-se que, acima de determinado limite de

aquisição, ocorria overflow da fila de processamento, indicando que o microcontrolador não conseguia concluir todas as operações dentro do tempo disponível.

A partir dos testes experimentais, observou-se que o limite prático do sistema estava próximo de 17 amostras por período para sinais de 60 Hz. Acima desse valor, começavam a surgir inconsistências na aquisição e aumento significativo das pendências de processamento.

Por esse motivo, foi definida a utilização de 15 amostras por período como margem de segurança operacional.

Considerando sinais com frequência fundamental de 60 Hz, a taxa de aquisição por canal utilizada no protótipo foi calculada pela Equação 5:

$$f_s = 15 \cdot 60 = 900 \text{ Hz} \quad (5)$$

Como o sistema realiza aquisição multiplexada de dez canais elétricos, a taxa global aproximada de aquisição torna-se a indicada na Equação 6:

$$f_{s,\text{total}} = 10 \cdot 900 = 9000 \text{ Hz} \quad (6)$$

Assim, o período disponível para cada aquisição multiplexada é aproximadamente o indicado na Equação 7:

$$T_s = \frac{1}{9000} \approx 111,1 \text{ } \mu\text{s} \quad (7)$$

Esse intervalo mostrou-se suficiente para permitir a troca do multiplexador, estabilização do sinal, leitura do ADC e armazenamento das amostras sem perda significativa de dados, garantindo funcionamento estável do sistema de aquisição.

Embora a redução do número de amostras por ciclo diminua a resolução temporal da forma de onda reconstruída, os impactos permanecem aceitáveis para a aplicação proposta, uma vez que:

- o sinal monitorado possui frequência fundamental baixa (60 Hz);
- as funções de proteção utilizam principalmente grandezas RMS;
- o sistema não possui foco em análise harmônica avançada;
- a prioridade do projeto está na estabilidade e operação em tempo real.

Dessa forma, a definição da taxa de amostragem representa um compromisso entre precisão, estabilidade operacional e capacidade computacional do hardware utilizado.

5.10 Controle de Carga Computacional

Além das tarefas de aquisição, o sistema também executa funções de interface e gerenciamento interno. Para evitar sobrecarga do microcontrolador, foi implementado um mecanismo de controle de carga computacional.

O firmware limita a quantidade máxima de amostras processadas por ciclo do laço principal, evitando crescimento excessivo da fila de processamento e preservando a estabilidade temporal do sistema.

Além disso, tarefas secundárias são executadas em frequências menores, reduzindo o impacto sobre a aquisição principal dos sinais.

Essa estratégia permite que o sistema mantenha operação contínua e previsível mesmo sob condições de elevada carga computacional, característica essencial para aplicações de proteção em tempo real.

6 Funções de Proteção Implementadas

6.1 Proteção de Sobrecorrente Instantânea (ANSI 50)

A proteção de sobrecorrente instantânea tem como objetivo detectar correntes elevadas associadas a curtos-circuitos e outras faltas severas no sistema elétrico. Sua principal característica é a atuação sem temporização intencional, permitindo a rápida remoção da falha e reduzindo os esforços térmicos e eletromagnéticos impostos ao transformador e aos demais equipamentos da instalação.

O princípio de funcionamento consiste no monitoramento contínuo da corrente eficaz medida pelo sistema. Quando a corrente I_{RMS} ultrapassa o valor previamente ajustado, a proteção gera o comando de *trip*.

A lógica de atuação pode ser representada pela Equação 8:

$$I_{\text{RMS}} > I_{\text{ajuste}} \Rightarrow \text{trip} \quad (8)$$

em que I_{RMS} representa a corrente eficaz medida e I_{ajuste} corresponde ao valor de corrente configurado para atuação da proteção.

6.2 Proteção de Sobrecorrente Temporizada (ANSI 51)

A proteção de sobrecorrente temporizada tem como objetivo identificar correntes acima dos limites admissíveis do transformador, porém considerando um intervalo de tempo antes da atuação. Essa função é utilizada principalmente para detectar sobrecargas e faltas de menor intensidade, permitindo maior seletividade e coordenação com outros dispositivos de proteção do sistema elétrico.

Diferentemente da proteção de sobrecorrente instantânea (ANSI 50), a proteção ANSI 51 não emite o comando de *trip* imediatamente após a corrente ultrapassar o valor de ajuste. Nesse caso, a atuação ocorre apenas se a corrente permanecer acima do limite configurado durante um tempo previamente definido.

A lógica básica de sobrecorrente temporizada pode ser descrita pela Equação 9:

$$I_{\text{RMS}} > I_{\text{ajuste}} \quad \text{por} \quad t \geq t_{\text{ajuste}} \Rightarrow \text{trip} \quad (9)$$

em que I_{RMS} representa a corrente eficaz medida, I_{ajuste} é o valor de corrente configurado para a proteção e t_{ajuste} é o tempo mínimo necessário para atuação.

6.3 Proteção de Sobrecorrente de Neutro (ANSI 50N/51N)

As proteções de sobrecorrente de neutro foram implementadas no protótipo por meio da aplicação das mesmas lógicas das funções ANSI 50 e 51 ao canal de corrente de neutro I_N . Dessa forma, embora o conjunto principal de funções implementadas seja apresentado como 50 e 51, o firmware final também avalia o canal I_N , caracterizando as funções 50N e 51N em escala reduzida.

A proteção 50N atua de forma instantânea quando a corrente de neutro medida ultrapassa o limite configurado. Já a proteção 51N atua de forma temporizada, exigindo que a corrente I_N permaneça acima do valor de ajuste durante o tempo definido no firmware.

A lógica básica de atuação pode ser representada pela Equação 10:

$$I_N > I_{\text{ajuste},N} \Rightarrow \text{trip} \quad (10)$$

em que I_N representa a corrente de neutro medida pelo canal dedicado do protótipo e $I_{\text{ajuste},N}$ corresponde ao valor configurado para atuação da proteção de neutro.

Essa implementação permite que faltas ou desequilíbrios que resultem em elevação da corrente de neutro sejam identificados logicamente pelo sistema, respeitando as limitações da bancada experimental e do circuito de aquisição utilizado.

6.4 Proteção de Sobretensão (ANSI 59)

A proteção de sobretensão tem como objetivo identificar condições em que a tensão elétrica ultrapassa os limites admissíveis de operação do transformador e dos demais equipamentos conectados ao sistema. Níveis elevados de tensão podem comprometer a integridade do isolamento, acelerar o envelhecimento dos componentes e aumentar o risco de falhas elétricas.

A detecção da sobretensão é realizada por meio do monitoramento contínuo dos valores eficazes das tensões de fase. Quando a tensão medida ultrapassa um valor máximo previamente configurado, a proteção gera uma condição de *trip*.

A lógica básica de atuação pode ser representada pela Equação 11:

$$V_{\text{RMS}} > V_{\text{max}} \Rightarrow \text{trip} \quad (11)$$

em que V_{RMS} representa a tensão eficaz medida e V_{max} corresponde ao limite máximo de tensão configurado para a proteção.

A ocorrência de sobretensão pode estar associada a rejeição de carga, falhas nos sistemas de regulação de tensão, manobras na rede elétrica ou condições anormais de operação.

6.5 Proteção de Subtensão (ANSI 27)

A proteção de subtensão tem como objetivo identificar condições em que a tensão elétrica se encontra abaixo dos limites mínimos admissíveis de operação. Essa condição pode estar associada a sobrecargas, falhas na rede de alimentação ou problemas nos sistemas de regulação de tensão.

A lógica básica de atuação pode ser representada pela Equação 12:

$$V_{\text{RMS}} < V_{\text{min}} \Rightarrow \text{trip} \quad (12)$$

em que V_{RMS} representa a tensão eficaz medida e V_{min} corresponde ao limite mínimo de tensão configurado para a proteção.

6.6 Proteção Térmica por RTD (ANSI 26)

A proteção térmica por RTD (*Resistance Temperature Detector*) tem como objetivo monitorar diretamente a temperatura do transformador, permitindo identificar condições de aquecimento excessivo que possam comprometer a integridade do equipamento. O aumento da temperatura acelera o envelhecimento do sistema isolante, reduz a vida útil do transformador e pode levar à ocorrência de falhas permanentes.

O princípio de funcionamento consiste na medição contínua da temperatura T através de sensores RTD instalados em pontos estratégicos do equipamento, como enrolamentos, óleo ou núcleo magnético. A temperatura medida é comparada com limites previamente configurados para geração de comando de desligamento.

A lógica de atuação pode ser representada pela Equação 13:

$$T > T_{\text{trip}} \Rightarrow \text{trip térmico} \quad (13)$$

em que T representa a temperatura medida pelo sensor RTD e T_{trip} corresponde ao limite máximo permitido para operação segura do equipamento.

6.7 Proteção de Frequência (ANSI 81U/81O)

A proteção de frequência tem como objetivo monitorar desvios da frequência nominal do sistema elétrico, identificando condições de subfrequência e sobrefrequência. Essas condições geralmente estão associadas a desequilíbrios entre geração e carga, podendo comprometer a estabilidade da rede elétrica e a operação adequada dos equipamentos conectados.

O princípio de funcionamento consiste no monitoramento contínuo da frequência f da

tensão medida pelo sistema. Quando a frequência ultrapassa os limites máximos ou mínimos previamente configurados, a proteção gera uma condição de *trip*.

A lógica de atuação para subfrequência pode ser representada pela Equação 14:

$$f < f_{\min} \Rightarrow \text{trip} \quad (14)$$

enquanto a condição de sobrefrequência é dada pela Equação 15:

$$f > f_{\max} \Rightarrow \text{trip} \quad (15)$$

em que f representa a frequência medida, $f_{\min}$ o limite mínimo permitido e $f_{\max}$ o limite máximo admissível para operação.

6.8 Proteção de Sobreexcitação (ANSI 24)

A proteção de sobreexcitação tem como objetivo evitar a saturação excessiva do núcleo magnético do transformador. Essa condição ocorre quando a relação entre tensão e frequência ultrapassa os limites de projeto do equipamento, resultando em aumento das perdas, aquecimento excessivo e possível degradação do isolamento.

O princípio de funcionamento baseia-se no monitoramento da relação tensão por frequência (V/Hz). Quando essa relação excede um valor previamente definido, a proteção gera uma condição de *trip*.

A lógica de atuação pode ser representada pela Equação 16:

$$\frac{V_{\text{RMS}}}{f} > \left(\frac{V}{f} \right)_{\text{ajuste}} \Rightarrow \text{trip} \quad (16)$$

em que V_{RMS} representa a tensão eficaz medida, f a frequência da rede e $\left(\frac{V}{f} \right)_{\text{ajuste}}$ o limite máximo permitido para operação segura do transformador.

6.9 Lógica Geral de Trip

O sistema de proteção desenvolvido integra apenas as funções implementadas no firmware final: sobrecorrente instantânea (ANSI 50), sobrecorrente temporizada (ANSI 51), sobrecorrente de neutro instantânea e temporizada (ANSI 50N/51N), sobretensão (ANSI 59), subtensão (ANSI 27), proteção térmica por RTD (ANSI 26), proteção de frequência (ANSI 81U/81O) e proteção de sobreexcitação (ANSI 24). As funções ANSI 46, 47, 49 e 87T não fazem parte da lógica de atuação desta versão e são tratadas como possibilidades de trabalhos futuros.

Na lógica implementada, o estado de *pickup* indica que uma grandeza ultrapassou o limite configurado para uma função de proteção. O estado de *trip*, por sua vez, indica que a condição de atuação foi confirmada e que a saída geral de desligamento deve ser acionada. Em funções instantâneas, o *trip* ocorre diretamente após a ultrapassagem do limiar; em funções temporizadas, a grandeza deve permanecer fora da faixa permitida durante o tempo ajustado.

A saída de *trip* do relé é comandada quando uma ou mais funções implementadas identificam uma condição considerada crítica para a operação segura do sistema didático. A lógica geral pode ser representada pela Equação 17, por meio de uma operação lógica OR entre as proteções implementadas:

$$\text{TRIP} = P_{50} + P_{51} + P_{50N} + P_{51N} + P_{59} + P_{27} + P_{26} + P_{81U} + P_{81O} + P_{24} \quad (17)$$

em que P_{50} , P_{51} , P_{50N} , P_{51N} , P_{59} , P_{27} , P_{26} , P_{81U} , P_{81O} e P_{24} representam, respectivamente, os estados lógicos das funções de sobrecorrente instantânea, sobrecorrente temporizada, sobrecorrente instantânea de neutro, sobrecorrente temporizada de neutro, sobretensão, subtensão, proteção térmica, subfrequência, sobrefrequência e sobreexcitação.

Quando qualquer uma dessas proteções entra em condição de *trip*, o sistema aciona a saída geral de desligamento. Como se trata de uma plataforma didática, experimental e em escala reduzida, essa saída representa o comando de desligamento por meio de um relé auxiliar, não caracterizando a substituição de um relé comercial certificado.

7 Comunicação Digital e Integração

7.1 Importância da Comunicação em Relés Inteligentes

Em sistemas modernos de proteção, a comunicação digital permite que o relé deixe de ser apenas um dispositivo local de atuação e passe a integrar uma rede de supervisão e controle. Por meio da comunicação, é possível transmitir medições em tempo real, estados de proteção, registros de eventos, alarmes e comandos.

No contexto deste projeto, a comunicação tem papel duplo: permitir a visualização das variáveis calculadas e aproximar o protótipo da estrutura funcional de um IED utilizado em subestações.

7.2 Comunicação entre Microcontroladores

A arquitetura proposta considera a utilização de dois microcontroladores ESP32. O primeiro é responsável pela aquisição, processamento e proteção. O segundo é responsável pela

comunicação com sistemas externos. A troca de informações entre eles pode ser realizada por UART, protocolo serial simplificado ou outra interface digital disponível.

A separação entre os módulos reduz a interferência das tarefas de rede sobre o tempo de aquisição e permite que o sistema seja expandido de forma mais organizada.

7.3 Modbus

O Modbus [18] é um protocolo de comunicação amplamente utilizado em sistemas de automação industrial, devido à sua simplicidade, robustez e facilidade de integração com controladores, sistemas supervisórios e dispositivos de campo. No contexto deste projeto, foi utilizada a variante Modbus TCP/IP [24], operando sobre rede Ethernet por meio do módulo W5500 [23], já mencionado anteriormente na arquitetura do relé.

O W5500 é um circuito integrado dedicado à comunicação Ethernet que incorpora, em hardware, um controlador físico de rede (camadas MAC e PHY) e uma pilha completa de protocolos TCP/IP, incluindo as camadas de rede (IP) e de transporte (TCP/UDP). Dessa forma, todo o processamento da pilha TCP/IP é realizado internamente pelo próprio módulo, cabendo ao microcontrolador ESP32 apenas a comunicação com o W5500 por meio da interface SPI e a implementação da camada de aplicação do protocolo Modbus sobre os sockets TCP disponibilizados por ele. Essa característica reduz significativamente a complexidade da comunicação Ethernet em microcontroladores de recursos limitados, uma vez que dispensa a necessidade de uma pilha TCP/IP em software executada pelo próprio ESP32.

A versão implementada utiliza o protótipo como servidor Modbus TCP/IP. Nesse modelo, um software externo atua como cliente, envia requisições de leitura e recebe os valores armazenados nos registradores disponibilizados pelo ESP32. A implementação final foi limitada à leitura de valores instantâneos das medições, abrangendo correntes, tensões e temperatura.

De forma simplificada, a estrutura de comunicação implementada pode ser descrita como:

- ESP32: responsável pelo processamento das grandezas medidas e pela atualização dos registradores;
- W5500: responsável pela interface Ethernet física com a rede;
- Modbus TCP/IP: protocolo utilizado para leitura externa dos valores medidos pelo protótipo.

Nesta versão do firmware, não foram implementados registradores Modbus para estados de proteção, alarmes, eventos, comandos remotos ou sinal de *trip*. Esses recursos podem ser adicionados em uma etapa futura, caso o protótipo seja expandido para uma integração supervisória mais completa.

Assim, o resultado implementado comprova que o protótipo consegue responder a um

cliente Modbus TCP/IP externo e disponibilizar as medições por Ethernet, atuando como uma plataforma experimental de leitura remota das grandezas monitoradas.

8 Protótipo Físico e Procedimentos de Validação

8.1 Montagem do Protótipo

O desenvolvimento físico do protótipo foi conduzido de forma incremental, envolvendo múltiplas versões mecânicas e elétricas com o objetivo de validar não apenas o funcionamento eletrônico do sistema, mas também aspectos relacionados à integração física, organização interna, robustez estrutural e experiência de utilização do equipamento.

As primeiras versões do gabinete foram construídas de forma simplificada utilizando materiais de prototipagem rápida, como o papelão, permitindo validar dimensões, distribuição interna dos módulos, posição dos conectores e acessibilidade frontal. Essa etapa inicial foi importante para identificar limitações mecânicas antes da fabricação definitiva do gabinete.

Durante a evolução do projeto, adotou-se uma arquitetura baseada em modularização, seguindo tendências observadas em equipamentos comerciais de proteção e automação elétrica. A estrutura interna foi dividida em módulos independentes conectados por barramentos e conectores dedicados, permitindo que diferentes placas possam ser removidas, substituídas ou atualizadas individualmente sem necessidade de desmontagem completa do equipamento.

A estrutura interna foi organizada em múltiplos níveis (“gavetas” ou prateleiras), permitindo separar funcionalmente:

- módulo de aquisição analógica;
- módulo de processamento;
- módulos de saída e relés;
- alimentação;
- interfaces de comunicação.

Essa divisão facilita manutenção, expansão futura e organização do cabeamento interno, além de reduzir interferências entre circuitos sensíveis e circuitos de potência.

O painel frontal foi desenvolvido com foco em acessibilidade operacional e facilidade de conexão. Foram incorporados conectores frontais, bornes angulados, acesso USB para programação e barramentos de debug dedicados aos microcontroladores ESP32. Essa abordagem reduz a necessidade de desmontagem do equipamento durante testes, calibração e atualização de firmware.

Além do aspecto funcional, houve preocupação com robustez mecânica e confiabilidade das conexões elétricas. O posicionamento dos módulos, suportes estruturais, encaixes e pontos de fixação foi projetado para aumentar a estabilidade física do sistema e melhorar a experiência de utilização do protótipo durante bancada e operação experimental.

Após as validações iniciais, o gabinete passou a ser desenvolvido por modelagem CAD e fabricação por impressão 3D. A divisão das peças permitiu rápida iteração entre versões, possibilitando correções mecânicas, melhorias de encaixe e refinamento da estrutura interna ao longo do desenvolvimento.

Dessa forma, o projeto do protótipo não se limitou apenas à implementação eletrônica do relé, mas também contemplou aspectos de engenharia de produto, integração mecânica e arquitetura modular, aproximando o sistema desenvolvido de equipamentos reais utilizados em aplicações industriais de proteção e automação.

8.2 Calibração das Medições

A calibração do sistema foi realizada por meio da comparação entre as medições obtidas pelo protótipo e instrumentos de referência disponíveis em laboratório. Para os testes de tensão, foi utilizado um variador de tensão trifásico, VariVolt, permitindo aplicar diferentes níveis de tensão nas fases do sistema e avaliar o comportamento da aquisição analógica em diferentes condições de operação.

As leituras de tensão obtidas pelo protótipo foram comparadas com medições realizadas por multímetros True-RMS, utilizados como referência para validação dos valores eficazes calculados pelo sistema. Em etapas específicas de análise, também foram utilizados osciloscópio e instrumentos de bancada para observação das formas de onda e verificação do comportamento dos sinais condicionados.

Para a calibração dos canais de corrente, foram utilizadas cargas resistivas conectadas ao sistema, permitindo variar a corrente circulante de forma controlada. A variação da carga foi realizada por meio da associação de resistores, possibilitando a obtenção de diferentes níveis de corrente durante os ensaios. As correntes medidas pelo protótipo foram comparadas com os valores obtidos por meio de um alicate amperímetro, utilizado como instrumento de referência para validação das leituras dos sensores de corrente.

Durante o processo de calibração, foram ajustados no firmware os fatores de ganho e offset associados aos sensores e circuitos de condicionamento analógico. Esses ajustes permitiram reduzir erros de medição e melhorar a linearidade da aquisição dentro da faixa de operação desejada, tanto para os canais de tensão quanto para os canais de corrente.

8.3 Ensaios Funcionais

Os ensaios funcionais têm como objetivo verificar se as proteções atuam corretamente diante de condições simuladas. Entre os testes previstos estão:

- variação gradual de corrente para validação da proteção de sobrecorrente;
- redução e elevação da tensão para validação das proteções de subtensão e sobretensão;
- aumento controlado da temperatura medida pelo sensor térmico;
- verificação da saída de trip e dos alarmes;
- validação da comunicação e visualização das variáveis.

8.4 Critérios de Avaliação

O desempenho do protótipo é avaliado com base nos seguintes critérios:

- erro percentual das medições de tensão e corrente;
- estabilidade dos valores RMS calculados;
- confiabilidade da saída de trip;
- estabilidade da comunicação digital;
- robustez do sistema durante operação contínua.

9 Resultados Obtidos

Esta seção apresenta os resultados obtidos a partir dos ensaios experimentais realizados com o protótipo desenvolvido, abrangendo a validação das medições elétricas e térmicas, a comprovação da comunicação digital via protocolo Modbus e a verificação funcional das proteções implementadas.

9.1 Validação das Medições Elétricas e Térmicas

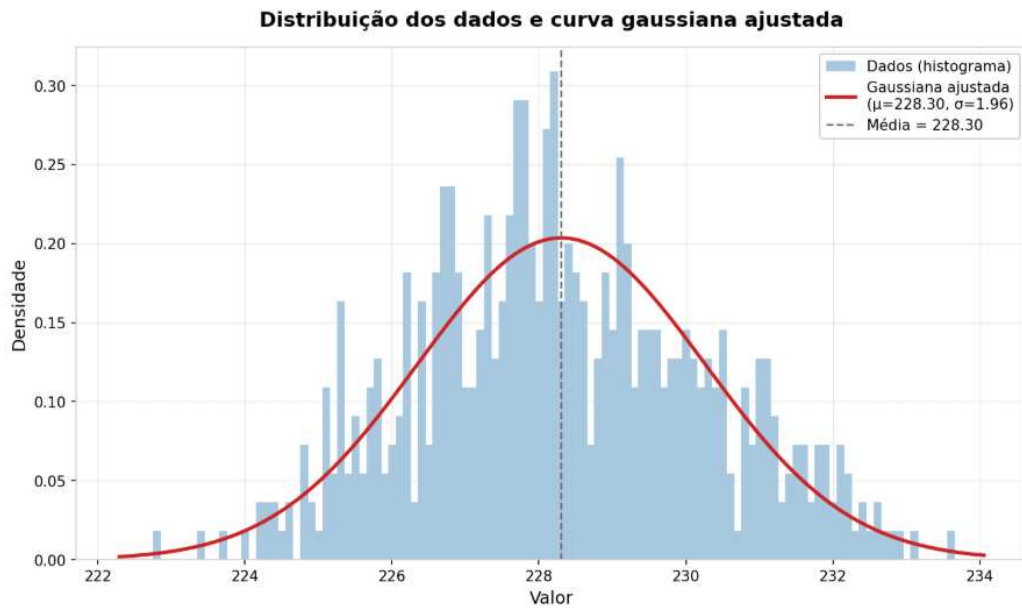
Para avaliar a confiabilidade da plataforma de aquisição, foram realizados ensaios comparativos entre os valores medidos pelo protótipo e os valores obtidos por instrumentos de referência, conforme a metodologia de calibração descrita na Seção 8.2. Os ensaios contemplaram as três grandezas físicas monitoradas pelo sistema (tensão, corrente e temperatura) com avaliação estatística baseada em um conjunto de 600 amostras adquiridas em regime permanente para cada grandeza.

9.1.1 Medição de Tensão

No ensaio de medição de tensão, foi adotado como valor de referência 227,00 V, obtido por meio de um multímetro True-RMS. O protótipo realizou um conjunto de 600 medições, a partir das quais foi calculada uma média de 228,30 V e um desvio padrão amostral de 1,96 V. Com base nesses valores, o erro absoluto da média em relação ao instrumento de referência foi de 1,30 V, correspondente a aproximadamente 0,57%.

Além da avaliação do erro médio, também foi analisada a dispersão das amostras obtidas pelo protótipo. Essa análise permite verificar a repetibilidade das medições, ou seja, a capacidade do sistema de apresentar leituras próximas entre si quando submetido a uma mesma condição de operação. Para isso, foi construído um histograma das medições e ajustada uma curva gaussiana aos dados obtidos, conforme apresentado na Figura 12.

Figura 12: Distribuição das medições de tensão e curva gaussiana ajustada.



Fonte:

Elaborado pelo autor.

A distribuição dos dados apresentou concentração em torno da média de 228,30 V, com desvio padrão de 1,96 V. Dessa forma, a repetibilidade relativa do sistema, considerando um desvio padrão (1σ), foi de aproximadamente $\pm 0,86\%$ em relação à média medida. Considerando uma análise aproximada baseada em dois desvios padrão (2σ), cerca de 95% das medições tendem a se concentrar dentro da faixa de $\pm 3,92$ V em torno da média, equivalente a aproximadamente $\pm 1,72\%$.

A Tabela 2 apresenta os principais resultados estatísticos obtidos para a medição de tensão realizada pelo protótipo.

Tabela 2: Resultado estatístico da medição de tensão realizada pelo protótipo.

Parâmetro avaliado	Resultado obtido
Grandeza avaliada	Tensão RMS
Instrumento de referência	Multímetro True-RMS
Número de medições	600
Valor de referência	227,00 V
Média medida pelo protótipo	228,30 V
Erro absoluto da média	1,30 V
Erro percentual da média	0,57%
Desvio padrão das medições	1,96 V
Repetibilidade relativa, 1σ	$\pm 0,86\%$
Faixa aproximada para 95% das medições, 2σ	$\pm 3,92$ V
Faixa relativa aproximada, 2σ	$\pm 1,72\%$

Fonte: Elaborado pelo autor.

O erro percentual da média foi calculado conforme a Equação 18:

$$\text{Erro da média (\%)} = \frac{|V_{ref} - \bar{V}_{medido}|}{V_{ref}} \cdot 100 \quad (18)$$

em que V_{ref} corresponde ao valor obtido pelo instrumento de referência e $\bar{V}_{medido}$ corresponde à média das medições realizadas pelo protótipo.

A repetibilidade foi avaliada por meio do desvio padrão amostral das medições, conforme a Equação 19:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (V_{medido,i} - \bar{V}_{medido})^2} \quad (19)$$

em que N é o número total de medições, $V_{medido,i}$ representa cada valor medido individualmente e $\bar{V}_{medido}$ é a média das medições. A mesma metodologia estatística, baseada nas Equações 18 e 19, foi aplicada às demais grandezas avaliadas nesta seção, substituindo-se a variável V pela grandeza correspondente em cada caso.

Os resultados obtidos indicam que o protótipo apresentou boa repetibilidade nas leituras de tensão, com dispersão relativa de aproximadamente $\pm 0,86\%$ em torno da média medida. Observou-se uma pequena tendência de superestimação da tensão, uma vez que a média obtida pelo protótipo foi 1,30 V superior ao valor de referência. Ainda assim, o erro percentual

da média permaneceu abaixo de 1%, indicando desempenho satisfatório para uma plataforma experimental de baixo custo baseada em sensor ZMPT101B, condicionamento analógico e processamento digital para cálculo do valor eficaz.

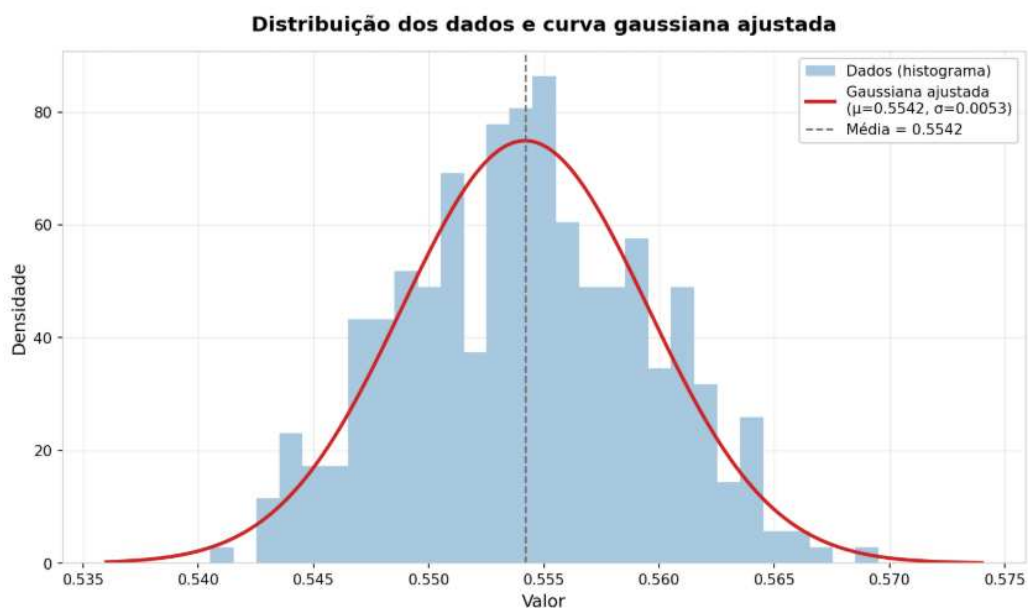
9.1.2 Medição de Corrente

Para a medição de corrente, o protótipo utiliza sensores de efeito Hall ACS712, na versão com fundo de escala de 5 A. O ensaio foi realizado com carga resistiva, permitindo a circulação de uma corrente de referência de 547,0 mA, aferida por meio de um alicate amperímetro True-RMS.

Aplicando a mesma metodologia estatística utilizada na medição de tensão, foram realizadas 600 medições pelo protótipo. A partir dessas amostras, obteve-se uma média de 554,2 mA e um desvio padrão amostral de 5,3 mA. Dessa forma, o erro absoluto da média em relação ao valor de referência foi de 7,2 mA, correspondente a aproximadamente 1,32%.

A Figura 13 apresenta a distribuição das medições de corrente e a curva gaussiana ajustada aos dados obtidos.

Figura 13: Distribuição das medições de corrente e curva gaussiana ajustada.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A distribuição dos dados apresentou concentração em torno da média de 554,2 mA, com desvio padrão de 5,3 mA. Assim, a repetibilidade relativa do sistema, considerando um desvio padrão (1σ), foi de aproximadamente $\pm 0,96\%$ em relação à média medida. Considerando uma análise aproximada baseada em dois desvios padrão (2σ), cerca de 95% das medições tendem a permanecer dentro da faixa de $\pm 10,6$ mA em torno da média, equivalente a aproximadamente $\pm 1,91\%$.

A Tabela 3 apresenta os principais resultados estatísticos obtidos para a medição de corrente realizada pelo protótipo.

Tabela 3: Resultado estatístico da medição de corrente realizada pelo protótipo.

Parâmetro avaliado	Resultado obtido
Grandeza avaliada	Corrente RMS
Sensor utilizado	ACS712 (5 A)
Instrumento de referência	Alicate amperímetro True-RMS
Número de medições	600
Valor de referência	547,0 mA
Média medida pelo protótipo	554,2 mA
Erro absoluto da média	7,2 mA
Erro percentual da média	1,32%
Desvio padrão das medições	5,3 mA
Repetibilidade relativa, 1σ	$\pm 0,96\%$
Faixa aproximada para 95% das medições, 2σ	$\pm 10,6$ mA
Faixa relativa aproximada, 2σ	$\pm 1,91\%$

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados obtidos indicam que o protótipo apresentou boa repetibilidade na medição de corrente, com dispersão relativa de aproximadamente $\pm 0,96\%$ em torno da média. Observou-se uma pequena tendência de superestimação da corrente, uma vez que a média medida pelo protótipo foi 7,2 mA superior ao valor de referência. Ainda assim, o erro percentual da média permaneceu próximo de 1%, valor considerado satisfatório para uma plataforma experimental baseada em sensores ACS712, condicionamento analógico e processamento digital para cálculo do valor eficaz.

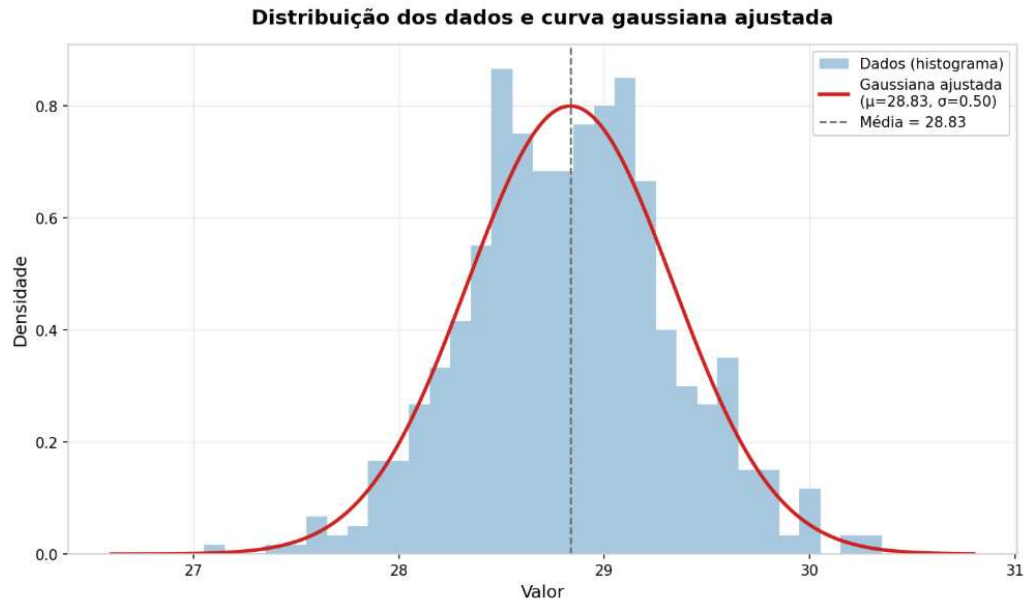
9.1.3 Medição de Temperatura

A medição de temperatura é realizada por meio de um sensor RTD do tipo PT100, conforme descrito na função de proteção térmica (26) apresentada na Seção 6. Como instrumento de referência, foi utilizado um termômetro infravermelho, direcionado para o mesmo ponto de medição em que o sensor PT100 foi fixado ao protótipo.

Aplicando a mesma metodologia estatística utilizada nas medições de tensão e corrente, foram realizadas 600 medições pelo protótipo. A partir dessas amostras, obteve-se uma média de $28,83^{\circ}\text{C}$ e um desvio padrão amostral de $0,50^{\circ}\text{C}$. O valor de referência obtido pelo termômetro infravermelho foi de $27,50^{\circ}\text{C}$, resultando em um erro absoluto da média de $1,33^{\circ}\text{C}$, correspondente a aproximadamente 4,84%.

A Figura 14 apresenta a distribuição das medições de temperatura e a curva gaussiana ajustada aos dados obtidos.

Figura 14: Distribuição das medições de temperatura e curva gaussiana ajustada.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A distribuição dos dados apresentou concentração em torno da média de $28,83^{\circ}\text{C}$, com desvio padrão de $0,50^{\circ}\text{C}$. Assim, a repetibilidade relativa do sistema, considerando um desvio padrão (1σ), foi de aproximadamente $\pm 1,73\%$ em relação à média medida. Considerando uma análise aproximada baseada em dois desvios padrão (2σ), cerca de 95% das medições tendem a permanecer dentro da faixa de $\pm 1,00^{\circ}\text{C}$ em torno da média, equivalente a aproximadamente $\pm 3,47\%$.

A Tabela 4 apresenta os principais resultados estatísticos obtidos para a medição de temperatura realizada pelo protótipo.

Tabela 4: Resultado estatístico da medição de temperatura realizada pelo protótipo.

Parâmetro avaliado	Resultado obtido
Grandeza avaliada	Temperatura
Sensor utilizado	RTD PT100
Instrumento de referência	Termômetro infravermelho
Número de medições	600
Valor de referência	27,50 °C
Média medida pelo protótipo	28,83 °C
Erro absoluto da média	1,33 °C
Erro percentual da média	4,84%
Desvio padrão das medições	0,50 °C
Repetibilidade relativa, 1σ	$\pm 1,73\%$
Faixa aproximada para 95% das medições, 2σ	$\pm 1,00$ °C
Faixa relativa aproximada, 2σ	$\pm 3,47\%$

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados obtidos indicam que o protótipo apresentou boa repetibilidade na medição de temperatura, com dispersão relativa de aproximadamente $\pm 1,73\%$ em torno da média medida. Observou-se uma tendência de superestimação da temperatura, uma vez que a média medida pelo protótipo foi 1,33 °C superior ao valor de referência. Ainda assim, o erro percentual da média permaneceu abaixo de 5%, valor considerado satisfatório para a finalidade experimental do sistema.

A Tabela 5 resume os principais resultados numéricos obtidos para as três grandezas avaliadas.

Tabela 5: Resumo dos resultados experimentais das medições.

Grandeza	Referência	Média	Erro absoluto	Erro percentual	Desvio padrão
Tensão	227,00 V	228,30 V	1,30 V	0,57%	1,96 V
Corrente	547,0 mA	554,2 mA	7,2 mA	1,32%	5,3 mA
Temperatura	27,50 °C	28,83 °C	1,33 °C	4,84%	0,50 °C

Fonte: Elaborado pelo autor.

9.2 Análise da Variabilidade das Medições

Durante os ensaios, observou-se que os valores medidos pelo protótipo não permanecem perfeitamente constantes ao longo do tempo, mesmo quando a grandeza de entrada é mantida em uma condição aproximadamente fixa. Essa variação foi observada principalmente nas

medições de tensão e corrente, nas quais o valor eficaz é calculado a partir de janelas de amostragem sucessivas. Dessa forma, pequenas variações entre uma janela e outra podem provocar oscilações no valor RMS calculado.

Essa variabilidade não representa necessariamente uma falha do sistema, mas sim uma característica esperada do processo de aquisição e processamento adotado. Conforme apresentado nas Tabelas 2, 3, 4 e 5, as medições permaneceram concentradas em torno de seus respectivos valores médios, com dispersões estatísticas compatíveis com a finalidade experimental do protótipo.

No caso das medições de tensão e corrente, a variação está associada principalmente ao cálculo do valor RMS por janela de período. Como o sistema opera com quantidade limitada de amostras por ciclo da forma de onda, pequenas interferências, ruídos de aquisição, variações no condicionamento analógico e diferenças entre janelas consecutivas acabam influenciando o resultado final. Além disso, o processamento realiza a remoção dinâmica do offset do sinal, etapa necessária para corrigir o deslocamento DC presente nas leituras analógicas. Entretanto, como esse offset pode variar ligeiramente entre janelas, sua correção também contribui para pequenas oscilações no valor eficaz calculado.

A influência da remoção dinâmica de offset torna-se mais relevante quando a grandeza AC medida possui baixa amplitude. Nessa condição, pequenas variações residuais de offset, ruído do ADC e interferências do condicionamento passam a representar uma parcela maior do valor eficaz calculado, aumentando o erro relativo da medição. Por esse motivo, observou-se que as variáveis AC apresentam melhores condições práticas de aquisição para valores acima de aproximadamente 0,3 A nas correntes e 50 V nas tensões. Abaixo dessas faixas, o sistema ainda pode indicar tendência de medição, porém o erro relativo tende a ser mais significativo.

Como o protótipo desenvolvido tem como objetivo atuar como um relé de proteção didático, a velocidade de resposta é um aspecto relevante. Uma filtragem excessiva poderia atrasar a identificação de condições anormais, como sobrecorrente, subtensão ou sobretensão. Por esse motivo, optou-se por aceitar uma pequena variação nas leituras, desde que os erros médios e a dispersão permanecessem dentro de faixas aceitáveis para a finalidade de supervisão e proteção proposta.

Na medição de temperatura, a variabilidade tende a ser menor do ponto de vista dinâmico, uma vez que se trata de uma grandeza de variação mais lenta. Nesse caso, a dispersão observada está relacionada principalmente às características do circuito analógico de condicionamento utilizado para o sensor PT100. Para converter a variação resistiva do sensor em um sinal de tensão compatível com a entrada analógica do ESP32, foi empregado um circuito com fonte de corrente constante e estágio de amplificação com amplificador operacional. Como esse condicionamento depende de componentes analógicos, tolerâncias dos resistores, estabilidade da fonte de corrente, offset do amplificador operacional e ruídos de aquisição podem influenciar

diretamente a precisão final da leitura.

Além disso, optou-se pela utilização de uma corrente de excitação reduzida no PT100, com o objetivo de minimizar o efeito de autoaquecimento do sensor. Essa escolha reduz a potência dissipada no elemento resistivo e evita que o próprio circuito de medição altere significativamente a temperatura medida. Por outro lado, uma corrente menor também produz uma variação de tensão mais baixa na saída do sensor, exigindo maior ganho no circuito de amplificação e tornando a medição mais sensível a pequenas variações e ruídos do condicionamento analógico.

Ainda assim, o desempenho obtido é considerado adequado para a finalidade do projeto. A função térmica implementada no protótipo tem como objetivo identificar elevações relevantes de temperatura em um transformador, especialmente em aplicações associadas ao monitoramento térmico do óleo isolante ou da região supervisionada. Nessa aplicação, a proteção não depende de elevada precisão absoluta em pequenas variações próximas à temperatura ambiente, mas sim da capacidade de acompanhar a tendência de aquecimento e atuar em faixas de temperatura mais elevadas, típicas de alarme e desligamento térmico.

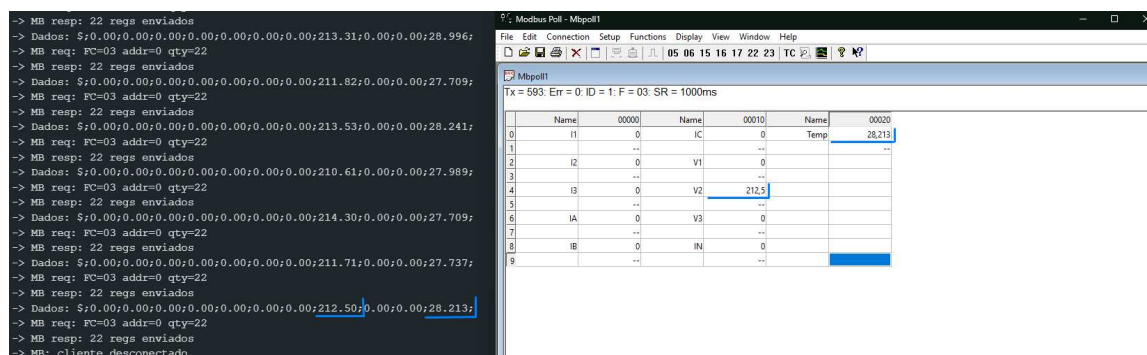
Assim, a variabilidade observada nas medições pode ser entendida como consequência direta da estratégia de aquisição adotada, baseada em janelas curtas de cálculo e atualização rápida das grandezas. Essa escolha preserva a capacidade de resposta do sistema, ainda que resulte em valores instantâneos ligeiramente oscilantes. Como possibilidade de aprimoramento futuro, pode-se avaliar outras estratégias de aquisição, como processamento em hardware, filtros digitais adaptativos ou conversores A/D externos de maior resolução.

9.3 Validação da Comunicação Modbus TCP/IP

A comunicação digital do protótipo foi validada por meio do software *Modbus Poll*, utilizado como cliente Modbus TCP/IP. O objetivo deste ensaio foi verificar se o protótipo desenvolvido era capaz de disponibilizar, via rede Ethernet, os valores instantâneos das grandezas medidas, permitindo sua leitura por um software externo compatível com o protocolo Modbus.

O protótipo foi configurado como servidor Modbus TCP/IP, enquanto o computador, executando o *Modbus Poll*, atuou como cliente. A comunicação foi realizada por meio da interface Ethernet do módulo W5500, utilizando a função Modbus 03, correspondente à leitura de *holding registers*. A Figura 15 apresenta o registro da comunicação estabelecida entre o protótipo e o software de teste.

Figura 15: Leitura dos registradores do protótipo por meio do software Modbus Poll.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na captura apresentada, observa-se que o *Modbus Poll* realizou leituras cíclicas dos registradores disponibilizados pelo protótipo, com período de atualização configurado em 1000 ms. Os valores recebidos pelo software correspondem às grandezas medidas pelo sistema, como tensão e temperatura, confirmando que os dados processados pelo firmware foram corretamente disponibilizados via Modbus TCP/IP.

A Tabela 6 resume as principais condições observadas no ensaio de comunicação.

Tabela 6: Resultado do ensaio de comunicação Modbus TCP/IP.

Parâmetro avaliado	Resultado obtido
Protocolo testado	Modbus TCP/IP
Interface de comunicação	Ethernet com módulo W5500
Software cliente utilizado	Modbus Poll
Modo de operação do protótipo	Servidor Modbus
Função Modbus utilizada	03 – Read Holding Registers
ID do dispositivo	1
Tempo de ciclo de leitura	1000 ms
Tipo de dado transmitido	Valores instantâneos das grandezas medidas
Grandezas disponibilizadas	Corrente, tensão e temperatura
Leitura por software externo	Realizada com sucesso

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Tabela 7 apresenta, de forma simplificada, as grandezas disponibilizadas pelo protótipo via registradores Modbus durante o ensaio.

Tabela 7: Grandezas disponibilizadas via Modbus TCP/IP.

Identificação	Grandeza disponibilizada	Unidade
$I1$	Corrente da fase 1 no lado de entrada	A
$I2$	Corrente da fase 2 no lado de entrada	A
$I3$	Corrente da fase 3 no lado de entrada	A
IA	Corrente da fase A no lado de saída	A
IB	Corrente da fase B no lado de saída	A
IC	Corrente da fase C no lado de saída	A
$V1$	Tensão da fase 1	V
$V2$	Tensão da fase 2	V
$V3$	Tensão da fase 3	V
IN	Corrente de neutro	A
T	Temperatura medida pelo sensor RTD	°C

Fonte: Elaborado pelo autor.

Neste ensaio, a comunicação Modbus foi utilizada para disponibilizar apenas os valores das grandezas medidas pelo protótipo, funcionando de maneira semelhante a um analisador de rede com comunicação Ethernet. Os registradores de estado das funções de proteção e de atuação de *trip* não foram incluídos nesta etapa de validação.

Dessa forma, os resultados obtidos confirmam que o protótipo é capaz de se comunicar por meio do protocolo Modbus TCP/IP e de ser lido por um software externo compatível. Essa validação demonstra a viabilidade da leitura externa das grandezas elétricas e térmicas monitoradas, servindo como base para uma futura integração com interfaces supervisórias ou ferramentas de diagnóstico.

9.4 Validação das Funções de Proteção

As funções de proteção implementadas no firmware do IED correspondem às funções ANSI 50, 51, 59, 27, 26, 81U, 81O e 24, associadas, respectivamente, à sobrecorrente instantânea, sobrecorrente temporizada, sobretensão, subtensão, proteção térmica por medição direta de temperatura, subfrequência, sobrefrequência e sobreexcitação. A validação dessas funções teve como objetivo verificar o correto comportamento lógico do sistema diante de condições simuladas de operação normal e de falta.

A validação foi realizada por meio da simulação de valores de entrada via console serial, permitindo inserir grandezas elétricas e térmicas equivalentes às medidas pelo sistema de aquisição. Dessa forma, foi possível verificar se o firmware identificava corretamente as condições de *pickup* e *trip* para cada função de proteção, conforme os limiares previamente configurados.

Para as funções 50 e 51, foram simulados valores de corrente acima dos respectivos limites de atuação, verificando-se o disparo da lógica de sobrecorrente instantânea e temporizada. Para as funções 59 e 27, foram simuladas condições de tensão acima e abaixo da faixa permitida, confirmando a atuação das proteções de sobretensão e subtensão. A função 26 foi validada por meio da simulação de temperatura acima do limite ajustado, enquanto as funções 81U e 81O foram verificadas a partir da inserção de valores de frequência inferiores e superiores aos limites estabelecidos. Por fim, a função 24 foi validada por meio da simulação de uma condição de sobreexcitação, associada à relação entre tensão e frequência acima do valor admissível.

Em todos os casos avaliados, as funções de proteção apresentaram comportamento compatível com a lógica implementada no firmware. Quando a condição simulada ultrapassava o respectivo limiar de atuação, o sistema indicava o estado de *pickup* e, quando aplicável, evoluía para o estado de *trip*, acionando a saída geral de desligamento responsável pelo fechamento da bobina de trip. Quando os valores simulados retornavam à faixa normal de operação, os estados de proteção eram restabelecidos conforme a lógica definida no programa.

Ressalta-se que os testes realizados não tiveram como objetivo caracterizar tempos de atuação, curvas de operação ou margens de precisão das proteções. Esses parâmetros dependem diretamente do desempenho do circuito de aquisição de sinais e processamento. Assim, a atuação observada durante os testes pode ser considerada sem atraso perceptível.

Dessa forma, a validação realizada comprova o funcionamento lógico das funções de proteção implementadas, demonstrando que o firmware é capaz de interpretar corretamente as grandezas monitoradas, comparar os valores com os limiares configurados e acionar a lógica de trip quando necessário. Para uma validação completa em termos de desempenho, recomenda-se como continuidade do trabalho a realização de ensaios em bancada trifásica ou com equipamento de teste secundário de relés, permitindo a imposição controlada de faltas e a medição dos tempos de atuação.

10 Recursos Utilizados

A execução do projeto envolveu recursos de diferentes áreas da engenharia, abrangendo aquisição de sinais, eletrônica analógica, sistemas embarcados, comunicação digital, proteção de sistemas elétricos e prototipagem mecânica. Dessa forma, além dos componentes eletrônicos utilizados no circuito, foram necessários equipamentos de bancada, ferramentas de montagem, softwares de desenvolvimento e recursos para fabricação do gabinete do protótipo.

10.1 Hardware e Componentes Eletrônicos

A implementação do protótipo exigiu componentes destinados à aquisição, condicionamento, processamento e comunicação dos sinais elétricos e térmicos monitorados. Os principais recursos de hardware utilizados foram:

- microcontroladores ESP32 para aquisição, processamento e execução das lógicas de proteção;
- sensores de corrente ACS712 para medição das correntes do sistema;
- sensores de tensão ZMPT101B para aquisição dos sinais de tensão alternada;
- sensor RTD do tipo PT100 para medição de temperatura;
- circuitos de condicionamento analógico para adequação dos sinais aos níveis de entrada do conversor A/D do ESP32;
- amplificadores operacionais para o condicionamento do sinal do sensor de temperatura;
- multiplexador analógico para expansão dos canais de medição;
- módulo Ethernet W5500 para comunicação via rede cabeada;
- display e indicadores luminosos para interface local do protótipo;
- relé auxiliar ou circuito de saída para representação da atuação de *trip*;
- resistores, capacitores, conectores, bornes e demais componentes passivos;
- placas universais e módulos de prototipagem para montagem dos circuitos;
- fonte de alimentação isolada para alimentação dos circuitos eletrônicos.

10.2 Ferramentas de Montagem e Prototipagem

Além dos componentes eletrônicos, foram utilizadas ferramentas de bancada para montagem, ajustes e integração física do protótipo. Esses recursos foram importantes para permitir a construção experimental do sistema e a realização de modificações ao longo do desenvolvimento.

- ferro de solda e estanho para montagem dos circuitos em placa;
- alicates, pinças, chaves e ferramentas manuais para montagem elétrica;
- multímetro para verificações de continuidade, tensão e ajustes preliminares;
- protoboard, placas universais e jumpers para testes iniciais dos circuitos;
- conectores e bornes para organização das entradas e saídas do protótipo;
- impressora 3D para fabricação do gabinete e suportes mecânicos;
- filamento para impressão das peças do protótipo;
- ferramentas de desenho técnico e modelagem tridimensional para desenvolvimento da estrutura mecânica.

10.3 Equipamentos de Medição e Ensaio

Para a calibração e validação experimental do sistema, foram necessários instrumentos de medição e equipamentos capazes de aplicar diferentes condições de operação ao protótipo. Esses recursos permitiram comparar as leituras obtidas pelo sistema desenvolvido com instrumentos de referência disponíveis em laboratório.

- multímetro True-RMS para validação das medições de tensão;
- alicate amperímetro True-RMS para validação das medições de corrente;
- termômetro infravermelho para comparação das medições de temperatura;
- osciloscópio para observação das formas de onda e análise dos sinais condicionados;
- fonte de bancada para alimentação e testes dos circuitos eletrônicos;
- variador de tensão trifásico, VariVolt, para aplicação de diferentes níveis de tensão;
- cargas resistivas para variação controlada da corrente nos ensaios;
- resistores de potência para montagem das cargas utilizadas nos testes;
- computador para programação, aquisição de dados e validação da comunicação Modbus TCP/IP.

10.4 Softwares

Os softwares utilizados auxiliaram nas etapas de programação, documentação, modelagem mecânica, análise dos dados experimentais e validação da comunicação digital do protótipo. Os principais softwares empregados foram:

- Visual Studio Code com a extensão PlatformIO para programação, compilação e depuração do firmware do ESP32;
- Arduino IDE para testes iniciais, validação de bibliotecas e depuração de códigos auxiliares;
- Monitor Serial para acompanhamento dos dados processados pelo firmware durante os ensaios;
- Modbus Poll para validação da comunicação Modbus TCP/IP e leitura dos registradores disponibilizados pelo protótipo;
- Overleaf, utilizando LaTeX, para elaboração, organização e formatação do texto do trabalho;
- FreeCAD para modelagem tridimensional do gabinete e das estruturas mecânicas do protótipo;
- Creality Slicer para fatiamento dos modelos 3D e geração dos arquivos utilizados na impressão das peças;
- Google Sheets para organização, tratamento e análise dos dados experimentais obtidos durante os testes;
- Ferramentas Python para geração de gráficos para análise estatística das medições, incluindo histogramas e curvas gaussianas ajustadas.

10.5 Conhecimentos Técnicos Envolvidos

Por se tratar de um sistema didático inspirado em relés digitais de proteção, o desenvolvimento do projeto exigiu a integração de conhecimentos de diferentes áreas. Entre os principais conhecimentos necessários, destacam-se:

- eletrônica analógica, para o condicionamento dos sinais de tensão, corrente e temperatura;
- aquisição de sinais, incluindo amostragem, remoção de offset, cálculo de valor RMS e filtragem digital;
- sistemas embarcados, para programação do ESP32 e integração dos periféricos utilizados;
- comunicação digital, com implementação de leitura de dados via Ethernet e protocolo Modbus TCP/IP;
- proteção de sistemas elétricos, especialmente no estudo das funções ANSI implementadas no protótipo;
- instrumentação e calibração, para comparação das medições do sistema com instrumentos de referência;

- prototipagem mecânica, incluindo modelagem 3D, impressão do gabinete e organização física dos módulos;
- análise de dados experimentais, para avaliação de erro, média, desvio padrão e repetibilidade das medições.

Dessa forma, os recursos utilizados para o projeto não se limitaram apenas aos componentes eletrônicos empregados na montagem do protótipo. O desenvolvimento exigiu uma abordagem multidisciplinar, envolvendo eletrônica analógica, sistemas embarcados, comunicação industrial, proteção elétrica e prototipagem mecânica, desde a construção física dos circuitos e do gabinete até a programação embarcada, a validação experimental das medições e o estudo das funções de proteção aplicáveis a transformadores.

11 Considerações Finais

Este trabalho apresentou o desenvolvimento de um protótipo didático e experimental de relé de proteção inteligente para sistemas de potência, com foco na aplicação em transformadores em escala reduzida. A proposta integrou conceitos de aquisição de sinais, condicionamento analógico, processamento digital, proteção elétrica, comunicação industrial e sistemas embarcados, permitindo a construção de uma plataforma experimental de baixo custo para estudo de funções de proteção e comunicação Modbus TCP/IP.

O objetivo principal foi atingido dentro das limitações experimentais do protótipo. O sistema desenvolvido foi capaz de adquirir grandezas de tensão, corrente e temperatura, processar os valores medidos, executar as lógicas de proteção ANSI 50, 51, 59, 27, 26, 81U, 81O e 24, aplicar as lógicas 50 e 51 ao canal de neutro e acionar uma saída geral de *trip* em condições simuladas de falta. A validação das proteções foi realizada por simulação via console serial e testes lógicos de firmware, não incluindo ensaios físicos completos com fonte trifásica programável ou equipamento secundário de teste de relés.

Nos ensaios de medição, foram obtidos resultados compatíveis com a finalidade didática da plataforma. Para tensão, a média medida foi de 228,30 V diante de uma referência de 227,00 V, resultando em erro absoluto de 1,30 V, erro percentual de 0,57% e desvio padrão de 1,96 V. Para corrente, a média foi de 554,2 mA diante de uma referência de 547,0 mA, com erro absoluto de 7,2 mA, erro percentual de 1,32% e desvio padrão de 5,3 mA. Para temperatura, a média foi de 28,83 °C diante de uma referência de 27,50 °C, com erro absoluto de 1,33 °C, erro percentual de 4,84% e desvio padrão de 0,50 °C.

A comunicação Modbus TCP/IP também foi validada experimentalmente por meio do software *Modbus Poll*, que conseguiu realizar a leitura dos registradores disponibilizados pelo protótipo via Ethernet. Nesta versão, a comunicação foi limitada aos valores instantâneos das grandezas medidas, sem transmissão de estados de proteção, alarmes, eventos ou comandos de *trip*.

Ressalta-se que o sistema desenvolvido não substitui um relé comercial certificado. O protótipo deve ser entendido como uma plataforma didática, experimental e em escala reduzida, voltada ao estudo dos blocos funcionais de um IED, incluindo aquisição de sinais, processamento embarcado, lógicas de proteção, saída de atuação e comunicação industrial. Ainda assim, os resultados obtidos demonstram a viabilidade da proposta como ferramenta acadêmica para ensino, experimentação e evolução futura em proteção de sistemas elétricos.

12 Trabalhos Futuros

Como continuidade deste trabalho, podem ser desenvolvidas as seguintes melhorias:

- Implementação da função ANSI 46, associada à proteção por componente de sequência negativa e desequilíbrio de corrente;
- Implementação da função ANSI 47, relacionada à verificação de sequência de fase e falta de fase;
- Implementação da função ANSI 49, referente à proteção térmica baseada em modelo térmico e sobrecarga térmica;
- Implementação da função ANSI 87T, correspondente à proteção diferencial de transformadores, incluindo compensação de relação de transformação e análise vetorial das correntes;
- Utilização de conversores analógico-digitais externos de maior resolução e melhor estabilidade, visando reduzir a variabilidade das medições;
- Expansão da comunicação Modbus TCP/IP para incluir estados de proteção, alarmes, eventos e indicação de *trip*, mantendo a separação entre os recursos já implementados e os recursos futuros;
- Integração futura com o protocolo IEC 61850, aproximando o protótipo de arquiteturas de comunicação utilizadas em subestações digitais;
- Implementação de oscilografia e registro de eventos, permitindo armazenar formas de onda, estados de proteção e informações de atuação para análise posterior;
- Desenvolvimento de uma placa de circuito impresso dedicada, reduzindo interferências e aumentando a robustez do sistema;
- Realização de ensaios utilizando fontes trifásicas programáveis para validação das funções de proteção em condições mais próximas das encontradas em campo;
- Avaliação dos tempos de atuação das funções de proteção em conformidade com requisitos e recomendações de normas aplicáveis;
- Desenvolvimento de um módulo externo conectado ao conector de expansão disponível no painel frontal do protótipo. Esse conector fornece acesso aos sinais de baixa tensão já condicionados pelo sistema de aquisição, permitindo a comunicação direta com equipamentos externos;
- Desenvolvimento de um conversor conectado a um computador, capaz de injetar sinais analógicos em baixa tensão (0 a 5 V) representativos de grandezas elétricas do sistema de potência. Associado a um software de simulação, esse recurso permitiria reproduzir faltas, distúrbios e condições operativas de forma segura, possibilitando a utilização do relé como plataforma didática para ensino e treinamento em proteção e controle de sistemas elétricos;

- Desenvolvimento de uma versão educacional do protótipo na forma de kit de montagem, composta por placas, sensores, gabinete e material didático. Essa abordagem permitiria a utilização do sistema em disciplinas de proteção, instrumentação e sistemas elétricos de potência, proporcionando aos estudantes uma experiência prática de montagem, configuração e parametrização de relés digitais a um custo reduzido quando comparado a equipamentos comerciais.

Referências

- 1 INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 60255: Measuring relays and protection equipment**. Geneva: IEC, 2009.
- 2 INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 60076-1: Power transformers – Part 1: General**. Geneva: IEC, 2011.
- 3 INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 61869-1: Instrument transformers – Part 1: General requirements**. Geneva: IEC, 2007.
- 4 INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 61869-2: Instrument transformers – Part 2: Additional requirements for current transformers**. Geneva: IEC, 2012.
- 5 INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 61869-3: Instrument transformers – Part 3: Additional requirements for inductive voltage transformers**. Geneva: IEC, 2011.
- 6 INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 60044: Instrument transformers**. Geneva: IEC, 1996–2003.
- 7 INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **IEEE C57.13: Standard Requirements for Instrument Transformers**. New York: IEEE, 2016.
- 8 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6856: Transformador de corrente – Especificação e ensaios**. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.
- 9 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6855: Transformador de potencial indutivo – Especificação e ensaios**. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.
- 10 INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **IEEE C37.90: Standard for Relays and Relay Systems Associated with Electric Power Apparatus**. New York: IEEE, 2005.
- 11 INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **IEEE C37.2: Standard for Electrical Power System Device Function Numbers, Acronyms, and Contact Designations**. New York: IEEE, 2008.
- 12 INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 61850: Communication networks and systems for power utility automation**. Geneva: IEC, 2013.
- 13 INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **IEEE 1815: Standard for Electric Power Systems Communications – Distributed Network Protocol (DNP3)**. New York: IEEE, 2012.

- 14 SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES. **SEL-787 Transformer Protection Relay**. Disponível em: <<https://selinc.com/pt/products/787/>>. Acesso em: 7 jun. 2026.
- 15 GE VERNOVA. **Multilin 345: Protection, Control and Metering System**. Disponível em: <<https://www.gevernova.com/grid-solutions/sites/default/files/2025-09/Multilin-345-Brochure-EN-12778N-Hybrid-202503-R003.pdf>>. Acesso em: 7 jun. 2026.
- 16 GE VERNOVA. **Multilin 845: Comprehensive Transformer Management Relay**. Disponível em: <<https://www.gevernova.com/grid-solutions/sites/default/files/2025-09/Multilin-845-Comprehensive-Management-Brochure-EN-12875E-Hybrid-202503-R002.pdf>>. Acesso em: 7 jun. 2026.
- 17 GE VERNOVA. **Multilin T60: Transformer Protection System**. Disponível em: <<https://www.gevernova.com/grid-solutions/sites/default/files/2025-09/Multilin-T60-brochure-EN-12650P-Hybrid-202503-R002.pdf>>. Acesso em: 7 jun. 2026.
- 18 MODBUS ORGANIZATION. **Modbus Application Protocol Specification**. Disponível em: <<https://www.modbus.org/faq>>. Acesso em: 7 jun. 2026.
- 19 ESPRESSIF SYSTEMS. **ESP32-WROOM-32 Datasheet**. Disponível em: <https://documentation.espressif.com/esp32-wroom-32_datasheet_en.pdf>. Acesso em: 07 jun. 2026.
- 20 ALLEGRO MICROSYSTEMS. **ACS712 Fully Integrated, Hall-Effect-Based Linear Current Sensor IC**. Datasheet. Disponível em: <<https://www.allegromicro.com/-/media/files/datasheets/acs712-datasheet.pdf>>. Acesso em: 07 jun. 2026.
- 21 MICRO TRANSFORMER. **ZMPT101B Current-Type Voltage Transformer**. Disponível em: <<https://www.micro-transformer.com/2ma-2ma-voltage-transformer-ZMPT101B.html>>. Acesso em: 07 jun. 2026.
- 22 OMEGA ENGINEERING. **RTD Sensors: PT100, PT500 and PT1000**. Disponível em: <<https://www.omega.com/en-us/resources/rtd-pt100>>. Acesso em: 07 jun. 2026.
- 23 WIZNET. **W5500 Datasheet**. Disponível em: <<https://docs.wiznet.io/Product/iEthernet/W5500/overview>>. Acesso em: 07 jun. 2026.
- 24 MODBUS ORGANIZATION. **MODBUS Messaging on TCP/IP Implementation Guide V1.0b**. Disponível em: <https://www.modbus.org/docs/Modbus_Messaging_Implementation_Guide_V1_0b.pdf>. Acesso em: 07 jun. 2026.
- 25 ALMEIDA, Thiago Oliveira Rodrigues. **Repositório do projeto: desenvolvimento de relé de proteção inteligente para sistemas de potência**. GitHub, 2026. Disponível em: <<https://github.com/ThiORAlmeida/TCC-IED-UFSC.git>>. Acesso em: 29 jun. 2026.

A Repositório do Projeto

Os arquivos complementares deste trabalho encontram-se disponíveis em repositório público no GitHub. O repositório reúne os códigos-fonte desenvolvidos para os microcontroladores ESP32, documentos auxiliares, imagens, esquemáticos, planilha resumo de custos e demais materiais utilizados no desenvolvimento do relé de proteção inteligente.

`<https://github.com/ThiORAlmeida/TCC-IED-UFSC.git>`