

DESENVOLVIMENTO DE FONTE DE CORRENTE PARA TESTES DE RELÊS DE PROTEÇÃO

DEVELOPMENT OF A CURRENT SOURCE FOR PROTECTION RELAY TESTING

Davi Castela Duarte Santos, Matheus Santana de Sousa, Luiz Guilherme Alves Baracho, Eduardo dos Santos, Wanderson Lacerda da Silva Rangel, Alexandre Shozo Onuki

Universidade Santa Cecília, Faculdade de Engenharia, Curso de Engenharia Elétrica
E-mail para contato: lb201141@alunos.unisanta.br

RESUMO – Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um Painel Didático para Testes em Relês de Proteção, concebido para injetar correntes elevadas destinadas à validação de dispositivos de proteção. A ferramenta foi projetada para fornecer correntes máxima de 20A com ajuste contínuo, garantindo estabilidade e segurança ao longo da operação. O sistema integra dispositivos elétricos e eletromecânicos que, em conjunto, permitem o controle preciso da corrente, sendo sua arquitetura de potência baseada na combinação de um Variac monofásico e de um autotransformador trifásico, encarregado de fornecer a corrente necessária. O ajuste fino da injeção de corrente é realizado por meio de um motor de passo NEMA 17 acionado pelo microcontrolador ESP32, possibilitando ajustes automatizados e de alta precisão. O painel final conta com uma interface completa para medição e visualização do tempo de atuação, contribuindo para o aprimoramento dos processos de teste e calibração de relês de proteção e fornecendo uma ferramenta eficiente e segura para aplicações didáticas em laboratórios de engenharia elétrica.

Palavras-chave: Fonte de corrente; Relé de proteção; Autotransformador; Variac; Microcontrolador.

ABSTRACT – This work presents the development of a Didactic Panel for Protection Relay Testing, designed to inject high currents for the validation of protection devices. The tool was engineered to supply currents of 20A with continuous adjustment, ensuring stability and safety throughout the operation. The system integrates electrical and electromechanical components that collectively enable precise control of the supplied current, with its power architecture based on a combination of a single-phase Variac and a three-phase autotransformer, which is responsible for providing the necessary current. Fine adjustment of the current injection is performed by a NEMA 17 stepper motor driven by the ESP32 microcontroller, allowing for automated, high-precision adjustments. The final panel features a complete interface for measuring and displaying the trip time, contributing to the improvement of protection relay testing and calibration processes and providing an efficient and safe tool for didactic applications in electrical engineering laboratories.

Keywords: Current source; Protection relay; Autotransformer; Variac; Microcontroller.

1 INTRODUÇÃO

O crescimento da automação industrial e o aumento da complexidade dos sistemas elétricos modernos têm elevado a necessidade de dispositivos de ensaio e medição cada vez mais precisos e confiáveis. A eficiência e a segurança dos equipamentos elétricos dependem diretamente da capacidade de se realizar testes controlados que simulem condições reais de operação, de forma a validar o desempenho de dispositivos de proteção e comando. Nesse cenário, o desenvolvimento de fontes de corrente controladas torna-se fundamental para assegurar a qualidade e a estabilidade das medições elétricas, especialmente em aplicações que envolvem ensaios de relés de proteção, disjuntores e transformadores de corrente (GONEN, 2016; BOLLEN; HASSAN, 2011).

Estudos recentes têm explorado soluções de automação aplicadas a sistemas de fornecimento de corrente controlada. Segundo Silva et al. (2020), a integração de circuitos eletrônicos de controle e sensores de medição em tempo real permite aprimorar significativamente o desempenho de bancadas de teste elétrico, proporcionando maior precisão, segurança e repetibilidade experimental.

O projeto tem como finalidade permitir a geração de correntes elevadas, da ordem de 20 A, com ajuste contínuo e operação segura, atendendo às demandas de testes e calibrações de relés de proteção, assim como aperfeiçoar os métodos tradicionais de teste, oferecendo uma solução de baixo custo, segura e tecnicamente robusta. Espera-se que a solução desenvolvida contribua não apenas para o avanço das práticas laboratoriais, mas também para a formação técnica e científica de profissionais da área de engenharia elétrica.

Diante do exposto, o presente estudo tem como objetivo geral o desenvolvimento de uma fonte de corrente controlada baseada em Variac, destinada à realização de testes em dispositivos elétricos com ajuste contínuo e monitoramento em tempo real. Para alcançar tal objetivo, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- Projetar e montar o circuito de potência capaz de fornecer correntes elevadas com estabilidade e segurança;
- Integrar o Variac a um sistema eletrônico de controle e supervisão;
- Implementar sensores para medição em tempo real das grandezas elétricas envolvidas;
- Avaliar o desempenho e a confiabilidade do sistema desenvolvido sob diferentes condições de operação.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho aborda o desenvolvimento e a validação de um sistema automatizado para o ensaio de relés de proteção térmica. A metodologia empregada concentrou-se na integração de uma fonte de corrente controlada com um painel didático e um sistema de aquisição de dados, permitindo a medição precisa da curva térmica dos relés. O objetivo é criar uma ferramenta robusta e automatizada para substituir métodos de ensaio manual, garantindo maior precisão, segurança e repetibilidade em ambientes acadêmicos e laboratoriais.

A seguir, a metodologia adotada para a elaboração e o desenvolvimento do Painel Didático para Teste Automatizado de Relés de Proteção Térmica.

2.1 DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA PARA TESTE AUTOMATIZADO

A estrutura do sistema é composta por três módulos principais: fonte de corrente, controle de acionamento e interface de monitoramento, todos centralizados em um painel físico de testes intuitivo e robusto.

a) Funcionamento Geral

O operador seleciona a corrente dois níveis máximos (10 A ou 20 A) e o número de divisões (5 ou 10). Ao selecionar a opções “Liga Geral”, o sistema realiza o mapeamento automático da corrente máxima. Quando o mapeamento termina, existe um sinalizador que indica que o usuário pode ajustar o nível de corrente desejado com os botões “Sobe e Desce”. O motor de passo movimenta o Variac para a posição correspondente.

Ao acionar o circuito de potência (C1), o sistema realiza a medição do tempo, assim o operador pode ler o tempo total de atuação diretamente no painel.

b) Descrição da Metodologia para Automação do Sistema

Para a geração da corrente de teste, foi desenvolvido um Gerador de Corrente composto por um Variac, cujo controle preciso é efetuado por um Motor de Passo NEMA 17. Este motor

de passo é responsável por movimentar o Variac, permitindo ajustes controlados na corrente injetada no sistema.

O comando de todo o sistema é gerenciado pelo microcontrolador ESP32, que interpreta os comandos definidos na interface do painel e controla a atuação do motor de passo NEMA 17. Para o monitoramento e visualização dos resultados, foram incorporados três módulos TM1637 Display, que possibilitam a medição e exibição do "Tempo de Desligamento" em milissegundos, da "Corrente Estimada" e da "Corrente Real" em Amperes. A interface de controle e sinalização é completada por 3 Relés 110/220V, 4 Sinalizadores 110V, 6 Botoeiras, 2 Chaves de 3 Posições, 4 Relés Térmicos e 2 Disjuntores. O painel foi projetado para teste de relés de proteção, como os Relés 50 e 51, que são conectados aos terminais de testes.

c) Fonte de Corrente e Acionamento

A fonte de corrente utiliza um autotransformador trifásico alimentado por um Variac monofásico, projetada para fornecer correntes crescentes de teste. O ajuste da corrente é realizado por um motor de passo NEMA 17, acoplado ao eixo do Variac. O controle do motor de passo é feito pela Ponte H L298N, que recebe os comandos digitais do microcontrolador. Este arranjo permite um ajuste suave e automatizado da corrente de saída, fundamental para mapear a curva térmica.

d) Controle Eletrônico e Sensores

O controle central do sistema é gerenciado pelo microcontrolador ESP32 DOIT DevKit. A medição da corrente injetada é realizada pelo sensor de corrente não invasivo SCT-013-000. O sistema utiliza um Multiplexador 16 canais CD74HC4067 para gerenciar a leitura de múltiplos sensores e comandos de entrada. O circuito de controle foi elaborado em protoboard e posteriormente transferido para uma placa definitiva, visando maior robustez e segurança operacional.

e) Componentes utilizados

Para a construção do Painel Didático e a implementação do sistema de controle, foram utilizados os seguintes componentes:

- Microcontrolador e Controle de Acionamento: 1 ESP32 DOIT DevKit (unidade central), 1 Multiplexador 16 canais CD74HC4067 (para gerenciamento de I/O), e 1 Ponte H L298N (para controle do motor de passo);
- Geração e Ajuste de Corrente: 1 Variac, 1 Transformador, e 1 Motor de passo padrão NEMA 17 (acoplado ao Variac);
- Medição e Visualização: 3 Displays TM1637 (para corrente e tempo), 1 Sensor de corrente não invasivo SCT-013-000, e sensores térmicos (acoplados ao relé para monitoramento de temperatura);
- Comutação e Proteção (Painel): 3 Relés 110/220V, 1 Conjunto de relés 5V 20A, 4 Relés térmicos, e 2 Disjuntores;
- Interface e Sinalização: 4 Sinalizadores 110V, 6 Botoeiras, 2 Chaves de 3 posições, e Relés de proteção 50 e 51 (em interface para teste);
- Alimentação e Auxiliares: 1 Fonte 12V, 1 Fonte 9V, 7 Resistores, e 1 Capacitor.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com a finalidade de validar os resultados funcionais dos subsistemas de controle e acionamento mecânico, demonstrando a correta implementação dos procedimentos descritos na metodologia. Em seguida, a seção de discussão interpreta esses achados, avaliando o desempenho do protótipo e a importância desses resultados preliminares para as etapas subsequentes de testes de campo e coleta de dados de geração de energia.

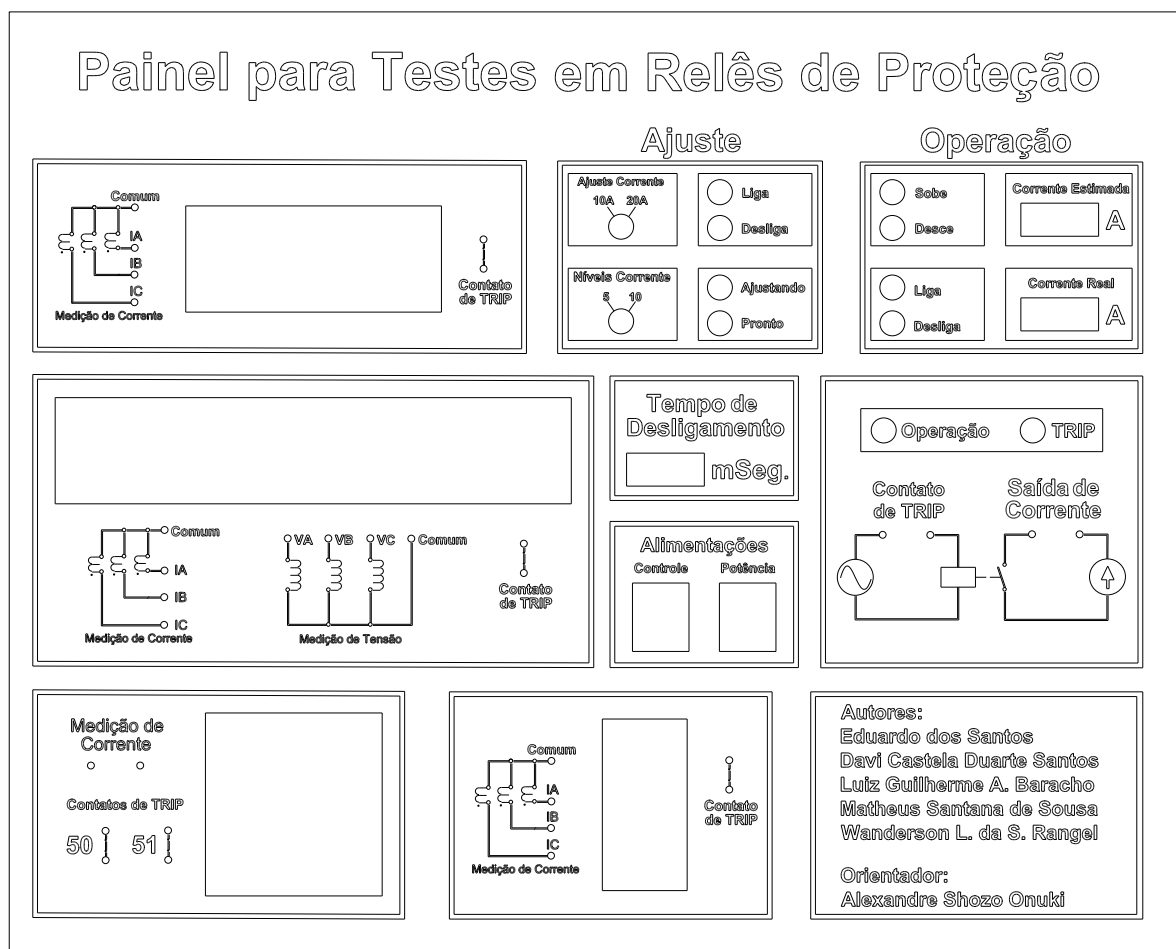
3.1 Processo para Construção do Painel

Esta seção detalha o processo de construção do painel, vale destacar que tal etapa abrange definição da estrutura física, desenvolvimento do sistema de controle e supervisão, montagem mecânica e a integração dos componentes eletrônicos.

a) Construção da Estrutura do Painel

A estrutura física do projeto consiste em um Painel para Testes em Relés de Proteção, concebido para abrigar de forma didática e funcional todos os componentes de comando, sinalização, medição e proteção necessários. O sistema é constituído por uma placa de MDF, que serve de alicerce e painel frontal para toda a montagem. Sobre este suporte robusto, foram fixados os dispositivos que permitem a simulação de faltas para acionamento dos relés, na figura 01 foi apresentado o desenho do painel que possui a largura de 100 cm e altura de 80 cm

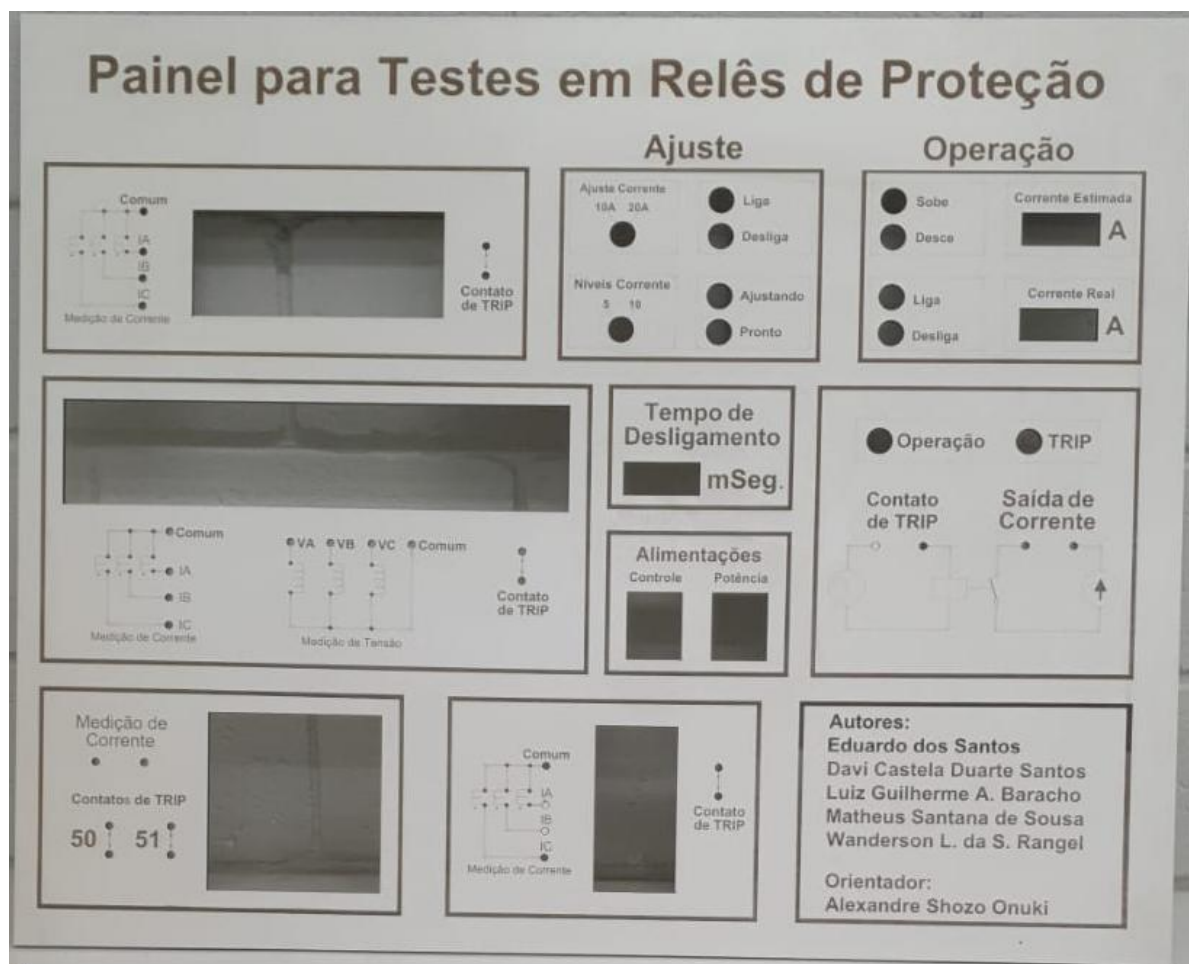
Figura 01 – Desenho da Estrutura do Painel



O painel é uma ferramenta didática, projetada para uso em aulas práticas de laboratório de engenharia elétrica que proporciona a confiabilidade dos testes e a longevidade do equipamento em um ambiente de uso frequente, é fundamental protegê-lo contra umidade, poeira e choques

mecânicos, assegurando a precisão do sistema de controle de corrente, na figura 02 é apresentada a estrutura finalizada.

Figura 02 – Estrutura do Painel Finalizada



b) Desenvolvimento do Sistema de Controle e Supervisão

Nos itens descritos a seguir, foi apresentado de forma resumida o desenvolvimento do sistema para o controle e supervisão do painel em questão.

• Circuito de Controle (ESP32)

O ESP32 DOIT DevKit atua como unidade central de automação. Ele utiliza as bibliotecas MobaTools, para controle suave e preciso do motor de passo NEMA 17 que ajusta a posição

do Variac; EmonLib, para leitura da corrente RMS através do sensor SCT-013-000; e TM1637Display, para exibição de valores nos três displays TM1637.

O controle é expandido pelo multiplexador CD74HC4067, que permite ao ESP32 ler vários botões e seletores com poucos pinos. As principais funções do sistema são: Liga Geral e Desliga Geral (iniciam ou encerram o teste), seleção de corrente máxima (10 A ou 20 A), seleção de divisões (5 ou 10 níveis), e botões Sobe/Desce para navegação entre os níveis de corrente alvo. Os LEDs de sinalização indicam os estados (mapeamento em andamento) e Pronto (sistema calibrado).

Os três displays TM1637 indicam, respectivamente: Corrente Estimada (valor ajustado), Corrente Real (medida pelo sensor) e Tempo de Desligamento (em milissegundos).

- **Circuito de Potência (C1, C2 e C3)**

O circuito de potência é responsável pela geração e supervisão da corrente de ensaio. Ele é composto por três blocos principais:

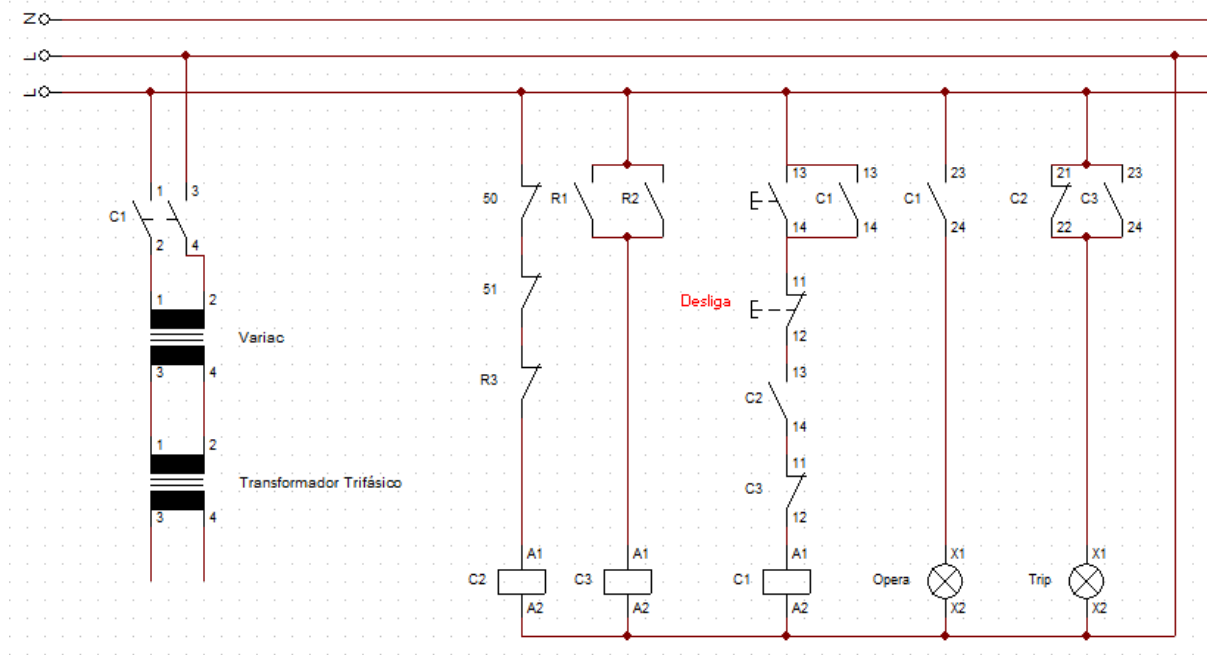
C1 – Controle de Alimentação do Variac: circuito responsável por ligar o Variac e permitir a circulação de corrente de teste. Quando o usuário aciona a chave de operação, o contator C1 energiza o Variac, e o ESP32 detecta esse evento por meio de uma porta de entrada. Esse sinal indica o início da operação, fazendo o microcontrolador iniciar o cronômetro de medição do tempo de atuação.

C2 – Detecção de TRIP para relés com contato NC: o contator C2 monitora o contato auxiliar normalmente fechado (NC) do relé sob teste. Quando o relé atua, o contato abre, e o circuito informa o ESP32 que o relé disparou, congelando o tempo exibido no display.

C3 – Detecção de TRIP para relés com contato NO: o contator C3 monitora o contato auxiliar normalmente aberto (NO) do relé sob teste. Quando o relé atua, o contato fecha, produzindo o mesmo efeito de detecção de TRIP no controle do ESP32.

Com isso, o sistema é compatível com qualquer tipo de relé térmico, bastando selecionar se ele possui contato de disparo NC ou NO. A seguir na figura 03 é mostrado o circuito.

Figura 03 – Circuito de potência



c) Teste do Sistema em Laboratório

A construção física do Painel para Testes em Relés de Proteção seguiu um procedimento planejado, visando a firme fixação de todos os elementos elétricos e eletrônicos no suporte de MDF. O processo foi concebido para estabelecer um layout prático, de fácil leitura para o operador e com total segurança funcional. A etapa inicial envolveu a preparação e a marcação da chapa de MDF. O painel frontal foi submetido a furações e recortes exatos, necessários para encaixar os dispositivos de visualização, os botões, os indicadores luminosos e os relés de proteção fundamentais, assegurando um arranjo visualmente agradável e operacionalmente lógico.

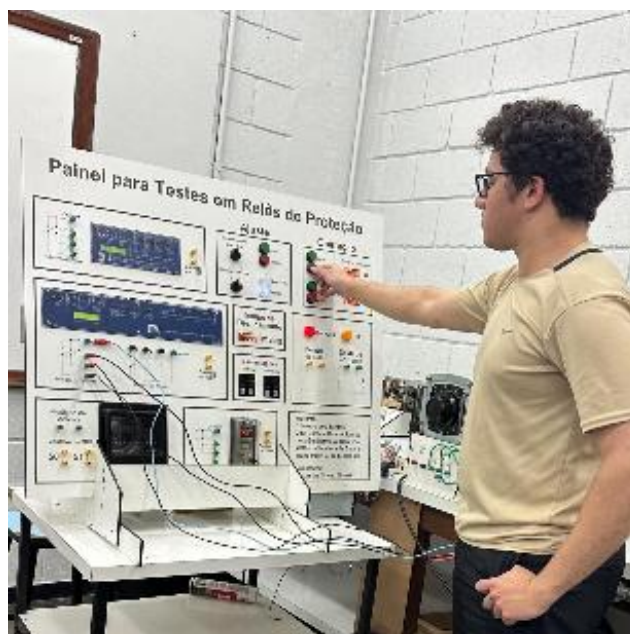
Em seguida, os componentes de interação, foram afixados na face do painel. Simultaneamente, os três displays TM1637 foram inseridos nas áreas reservadas para a leitura dos indicadores de tempo e corrente. Na parte posterior do painel, foram instalados os relés de comutação, os protetores térmicos e os disjuntores, organizados para facilitar a condução dos cabos de potência e controle. A etapa subsequente concentrou-se na integração do sistema de injeção de corrente, composto pelo Variac e pelo motor de passo NEMA 17. Este motor foi

ajustado e conectado ao Variac com precisão, garantindo que o acionamento fosse suave e que a corrente pudesse ser regulada de maneira exata, conforme a demanda do sistema de controle.

Por fim, o microcontrolador ESP32 foi fixado em uma posição protegida. A cablagem de controle foi organizada, estabelecendo a conexão entre o ESP32 e todos os periféricos. A escolha da placa de MDF conferiu solidez à montagem. Ao final da implementação, o conjunto demonstrou uma estrutura rígida, excelente organização visual e clareza no posicionamento dos elementos, validando a integração dos subsistemas de comando, potência e medição para o propósito didático, conforme mostrado na figura 2.

A validação do sistema foi realizada por meio de testes funcionais no laboratório, visando a correta operação de cada subsistema como ilustra a figura 04. O procedimento cobriu a validação de toda interface, checando displays e comandos. Em seguida, testou-se o Subsistema de Geração de Corrente, onde o ESP32 e o motor de passo NEMA 17 comprovaram o controle suave e exato da rampa de corrente do Variac. O Teste de Atuação dos Relés validou a capacidade do sistema de injetar corrente de trip e medir o tempo de desligamento com precisão. Por fim, verificou-se o funcionamento dos componentes de comutação. Todos os testes foram concluídos com sucesso, confirmando a viabilidade técnica e a confiabilidade do painel como uma ferramenta didática funcional.

Figura 04 – Teste feito em laboratório



d) Montagem final do Painel

Ao final do processo de montagem e testes em bancada o painel foi transportando fixando no laboratório de Proteção e integrado ao sistema já existente, vale ressaltar que o sistema desenvolvido operou conforme esperado, na figura 05 é apresentado o painel fixado e em operação.

Figura 05 – Painel em operação



4 CONCLUSÃO

O sistema apresentou desempenho satisfatório nos testes realizados, atendendo aos objetivos propostos e comprovando a viabilidade da automação desenvolvida. O controle da corrente de ensaio e a medição do tempo de atuação dos relés ocorreram de maneira precisa e estável, evidenciando a boa integração entre o ESP32, os sensores e os circuitos de potência.

O sistema tem potencial para se consolidar como uma ferramenta prática e confiável para ensaios automatizados de relés de proteção.

5 REFERÊNCIAS

AUTOMATIONDIRECT. Stepper Motors White Paper. AutomationDirect Technical Library, 2021. Disponível em: <https://library.automationdirect.com/wp-content/uploads/2021/02/Stepper-Motors-white-paper.pdf>. Acesso em: 14 jun. 2025.

TRIMMER, Trystan Lea. EmonLib - Electricity Monitoring Library. Disponível em: <https://github.com/openenergymonitor/EmonLib>. Acesso em: 26 jun. 2025.

JANTZEN, R. MobaTools - Stepper, Servo, Timing and More. Disponível em: <https://github.com/MicroBahner/MobaTools>. Acesso em: 26 jun. 2025.

AVISHAY, Tzafrir. TM1637Display Library. Disponível em: <https://github.com/avishorp/TM1637>. Acesso em: 26 jun. 2025.

TEXAS INSTRUMENTS. CD74HC4067 – 16-Channel Analog Multiplexer/Demultiplexer. Datasheet, 2015. Disponível em: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/cd74hc4067.pdf>. Acesso em: 14 jun. 2025.

YHDC. SCT-013-000 Non-invasive AC Current Sensor (100A:50mA). Datasheet. Disponível em: <https://learn.openenergymonitor.org/electricity-monitoring/ct-sensors/yhdc-sct-013-000-ct-sensor>. Acesso em: 14 jun. 2025.