

OTIMIZAÇÃO DE UM SIMULADOR DIDÁTICO DE SISTEMA SUPERVISÓRIO (SCADA) PARA DISJUNTORES DE ALTA TENSÃO

Optimization of an Educational Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA) System Simulator for High Voltage Circuit Breakers.

André Lucas Torres Bezerra

andrelucastorres8@gmail.com

Edson Ricardo Calado Sabino

edson.sabino@pesqueira.ifpe.edu.br

RESUMO

Este trabalho aborda a otimização de um simulador educacional de Sistema Supervisório (SCADA) voltado para o controle e monitoramento de disjuntores biestáveis em sistemas elétricos de potência. A pesquisa se baseia no protótipo Chronos, que foi previamente desenvolvido para realizar supervisão, controle e aquisição de dados, além do levantamento de curvas de atuação dos relés de sobrecorrente. A proposta de otimização abrangeu três aspectos principais: a criação de uma placa de circuito impresso (PCI), substituindo a montagem em protoboard; o redesenho da Interface Homem-Máquina (IHM), priorizando a usabilidade e a clareza das informações, e a implementação de uma lógica operacional que se baseia na leitura automática do estado do disjuntor e no envio contínuo de dados por meio da comunicação *bluetooth*. Os resultados obtidos mostram melhorias significativas na estabilidade de funcionamento, na confiabilidade das medições e na experiência do usuário. A implementação da PCI ajudou a diminuir os ruídos e a aumentar a robustez do sistema, enquanto a nova interface ofereceu uma interação mais intuitiva. A comunicação contínua possibilitou uma supervisão em tempo real mais eficaz, eliminando a necessidade de requisições manuais. Assim, o sistema otimizado preserva as características de baixo custo e flexibilidade do protótipo original, consolidando-se como uma ferramenta didática eficiente para o ensino de automação, controle e proteção de sistemas elétricos.

Palavras-chave: SCADA; Arduino; Disjuntor biestável; Automação elétrica; Sistemas embarcados.

ABSTRACT

This work addresses the optimization of an educational Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA) system simulator aimed at the control and monitoring of bistable circuit breakers in electrical power systems. The research is based on the Chronos prototype, previously developed to perform supervision, control, and data acquisition, as well as the analysis of overcurrent relay operating curves. The proposed optimization covered three main aspects: the development of a printed circuit board (PCB), replacing the breadboard assembly; the redesign of the Human-Machine Interface (HMI), prioritizing usability and clarity of information; and the implementation of an operational logic based on automatic circuit breaker state detection and continuous data transmission through *bluetooth* communication. The obtained results demonstrated significant improvements in operational stability, measurement reliability, and user experience. The implementation of the PCB contributed to noise reduction and increased system robustness, while the redesigned interface provided more intuitive interaction. Continuous communication enabled more efficient real-time supervision, eliminating the need for manual requests. Thus, the optimized system preserves the low-cost and flexible characteristics of the original prototype, consolidating itself as an effective educational tool for teaching automation, control, and protection of electrical power systems.

Keywords: SCADA; Arduino; Bistable circuit breaker; Electrical automation; Embedded systems.

1. INTRODUÇÃO

A energia elétrica se tornou um componente essencial para o funcionamento da sociedade moderna, estando presente em tudo, desde processos industriais complexos até atividades do dia a dia. Para que essa energia chegue de maneira contínua e confiável aos consumidores, é necessário um sistema bem estruturado e coordenado, conhecido como Sistema Elétrico de Potência (SEP), que integra as fases de geração, transmissão e distribuição.

Com o tempo, o aumento da demanda por energia e a expansão das redes elétricas tornaram o SEP cada vez mais intrincado. O que antes podia ser gerido localmente e com certa simplicidade passou a exigir níveis mais altos de coordenação, agilidade na tomada de decisões e confiabilidade operacional. Pequenas falhas, que antes tinham um impacto limitado, agora representam riscos significativos quando inseridas em um sistema interconectado de grande escala (PINTO, 2014).

Diante dessa nova realidade, tornou-se crucial desenvolver mecanismos que possam monitorar em tempo real o comportamento do sistema elétrico. A necessidade de identificar falhas rapidamente, agir de forma seletiva e garantir a continuidade do

fornecimento impulsionou o progresso dos sistemas de proteção e supervisão. Com a modernização dos sistemas elétricos de potência, dispositivos convencionais de proteção passaram a ser substituídos por Equipamentos Eletrônicos Inteligentes (IEDs – *Intelligent Electronic Devices*), capazes de executar funções de proteção, supervisão, medição e comunicação de forma integrada. Esses dispositivos atuam em conjunto com relés digitais e disjuntores, permitindo maior precisão na detecção e isolamento de faltas, além de aumentar a confiabilidade e a seletividade da operação do sistema elétrico (IEEE, 2019).

Ao mesmo tempo, surgiram tecnologias voltadas para monitoramento e controle remoto, permitindo que operadores acompanhassem o estado do sistema mesmo à distância. Nesse cenário, os sistemas SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition, Sistemas de Supervisão e Aquisição de Dados) se consolidaram como ferramentas indispensáveis na operação do SEP, possibilitando a coleta contínua de dados, visualização em tempo real e atuação sobre equipamentos no campo, conforme apresentado por Rosário (2005).

Apesar da importância dessas tecnologias, o acesso a sistemas supervisórios completos em ambientes acadêmicos ainda é restrito, principalmente devido ao alto custo das soluções comerciais. Essa limitação diminui a experiência prática dos estudantes em áreas fundamentais da Engenharia Elétrica, como proteção, automação e controle.

O desenvolvimento de sistemas supervisórios didáticos usando microcontroladores aparece como uma alternativa acessível. Um bom exemplo é o trabalho de Teles (2023), que propôs o sistema Chronos, um protótipo SCADA embarcado capaz de monitorar e controlar um disjuntor biestável, integrando sensores e um relé digital, via comunicação Bluetooth através de uma Interface Homem-Máquina.

Com base nisso, este trabalho busca aprimorar o protótipo Chronos, com foco em melhorar sua confiabilidade, desempenho e usabilidade através de mudanças tanto na estrutura quanto no funcionamento do sistema.

Como objetivos específicos, foram propostos o desenvolvimento de um novo design da Interface Homem-Máquina o projeto de uma placa de circuito impresso e a otimização do código embarcado no microprocessador Arduino.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Sistema SCADA

Com sistemas elétricos cada vez mais complexos, ficou indispensável usar ferramentas que acompanhem e controlem variáveis em tempo real. É aí que entram os sistemas supervisórios, os chamados SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*), que têm papel central na coleta, tratamento e visualização de dados operacionais (BOYER, 2009).

Esses sistemas captam informações de dispositivos de campo, como sensores e atuadores, permitindo monitorar continuamente o estado de equipamentos e grandezas elétricas. Também viabilizam ações remotas por meio do envio de comandos, o que ajuda a aumentar a confiabilidade e a eficiência. Como aponta Rosário (2005), é a integração entre hardware e software que garante o bom funcionamento desses sistemas.

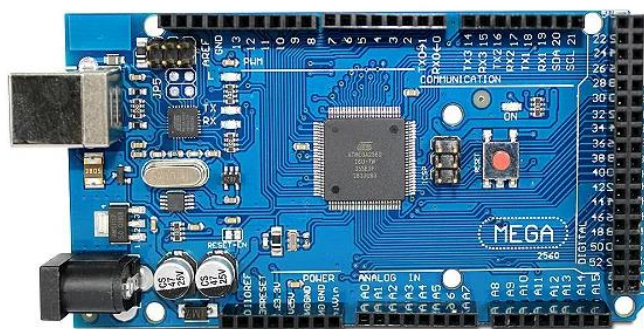
No ambiente acadêmico, sistemas supervisórios e outras ferramentas de automação industrial vêm sendo usados com foco didático, ajudando a simular e acompanhar processos industriais dentro do próprio ensino (SENAI, 2013).

2.2 Arduino Mega 2560

O Arduino Mega 2560 é uma plataforma bastante reconhecida para a criação de protótipos eletrônicos. Ele é compatível com o Arduino IDE e se baseia em um microcontrolador que se destaca por oferecer mais memória e um maior número de portas, possuindo 70 pinos de entrada e saída, superando significativamente modelos populares como o Arduino Uno e Arduino Nano.

O Arduino Mega 2560 conta com um microcontrolador ATmega2560 que possui 4 kb (4096 bytes) de EEPROM, além de uma memória que não se apaga quando o dispositivo é desligado, e várias interfaces de comunicação, como UART, SPI e I2C, possibilitando a integração com diversos dispositivos e sensores (ARDUINO, 2025). No projeto Cronos, essa plataforma desempenha um papel crucial no processamento das informações, no controle das operações e na comunicação com os outros módulos.

Figura 1 – Arduino Mega 2560.



Fonte: GTMAX3D (2026).

2.3 Sensor de corrente ACS712

O ACS712 é um sensor que serve para medir corrente elétrica, fundamentado no princípio do efeito Hall. Ele consegue medir tanto correntes contínuas quanto alternadas, oferecendo uma saída analógica que é proporcional ao valor da corrente detectada.

De acordo com a Allegro Microsystems (2024), o ACS712 possui amplitudes de medição de até 30A e apresenta erro típico de aproximadamente $\pm 1,5\%$ em temperatura ambiente quando devidamente calibrado. Entretanto, fatores como interferências eletromagnéticas, oscilações na alimentação e ruídos provenientes do sistema podem influenciar diretamente a qualidade das medições. No sistema que foi desenvolvido, o ACS712 é utilizado para monitorar a corrente elétrica, ajudando na supervisão e análise do funcionamento do circuito.

Figura 2 - ACS712.



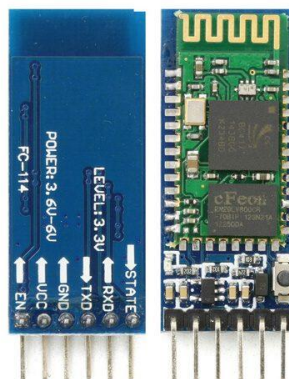
Fonte: RS Robótica (2026).

2.4 Módulo Bluetooth HC-05

O HC-05 é um dispositivo de comunicação sem fio que se baseia no padrão Bluetooth, sendo bastante utilizado em aplicações de automação e sistemas embarcados. Ele possibilita a comunicação serial entre microcontroladores e dispositivos externos, como smartphones.

Segundo a Bluetooth SIG (2022), a tecnologia Bluetooth permite a transmissão de dados em distâncias curtas com baixo consumo energético, o que a torna ideal para aplicações de controle remoto. No projeto Cronos, o módulo HC-05 tem a função de estabelecer a comunicação entre o sistema e o usuário.

Figura 3 - Módulo Bluetooth HC-05.



Fonte: Arduino e Eletrônica (2026).

Como ilustrado na imagem, o módulo Bluetooth HC-05 possui quatro pinos. Dois deles são destinados à alimentação elétrica, sendo o VCC (5V) e o GND (terra). Os outros dois estão relacionados à comunicação serial: o TX (transmissão), que é responsável por enviar dados, e o RX (recepção), que se encarrega de recebê-los.

O HC-05 possui alcance típico de aproximadamente 10 metros em ambientes internos, podendo variar conforme a presença de obstáculos, interferências eletromagnéticas e condições do ambiente de operação. Em espaços abertos e com linha de visada direta, o alcance pode atingir distâncias superiores, porém aplicações didáticas e sistemas supervisórios de pequeno porte normalmente operam dentro da faixa recomendada pelo fabricante.

Quanto à taxa de transmissão de dados, o módulo suporta comunicação serial com velocidades configuráveis entre 1.200 bps e 138.240 bps, sendo comum a utilização de taxas como 9.600 bps ou 38.400 bps em aplicações com Arduino (HC SERIAL BLUETOOTH PRODUCTS, 2010).

2.5 Módulo de relés

O módulo de relés é um dispositivo que serve para acionar cargas elétricas através de sinais de baixa potência provenientes de sistemas de controle, como microcontroladores. Seu funcionamento se baseia no princípio do eletromagnetismo, onde uma corrente elétrica que passa por uma bobina cria um campo magnético capaz de mover mecanicamente um conjunto de contatos.

Quando o módulo recebe um sinal para ativação, a bobina interna do relé é energizada, gerando um campo magnético que desloca um contato móvel, mudando o estado dos terminais elétricos. Assim, é possível abrir ou fechar circuitos de maior potência indiretamente, garantindo isolamento entre o circuito de controle e o circuito da carga.

Os relés geralmente têm três terminais principais: comum (COM), normalmente aberto (NO) e normalmente fechado (NC). No estado inativo, o terminal comum está ligado ao contato normalmente fechado. Quando o relé é ativado, ocorre a comutação, conectando o terminal comum ao contato normalmente aberto.

De acordo com João Mamede Filho (2017), os relés são amplamente empregados em sistemas elétricos para controle e automação, possibilitando a ativação segura de cargas elétricas e contribuindo para a proteção e eficiência dos sistemas.

No projeto Cronos, o módulo de relés é encarregado do controle do disjuntor biestável, sendo acionado pelo microcontrolador conforme a lógica programada, permitindo uma automação eficiente e segura do sistema.

Figura 4 - Módulo de relé.



Fonte: Fermarc (2026).

2.6 Relé Digital URP 5000

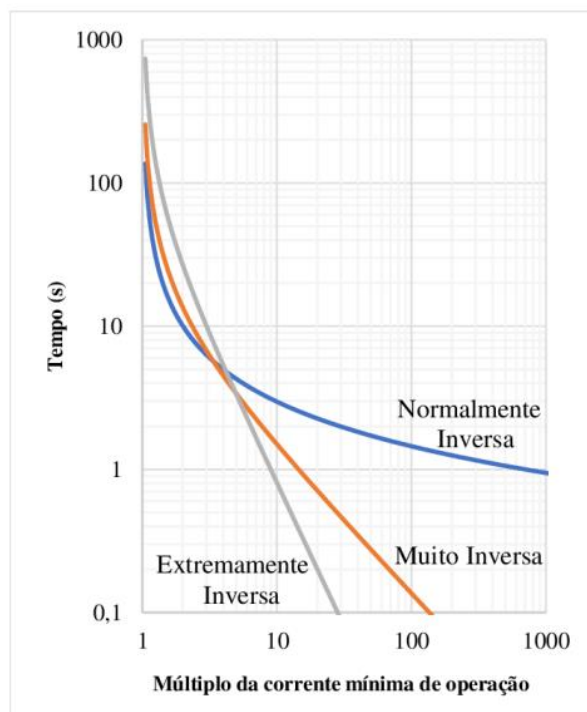
Os relés digitais de proteção são componentes essenciais no Sistema Elétrico de Potência (SEP), encarregados de identificar condições anormais de operação e agir rapidamente para isolar falhas. Ao contrário dos relés eletromecânicos convencionais, os relés digitais fazem uso de processamento eletrônico e algoritmos internos, o que proporciona maior precisão, flexibilidade na configuração e confiabilidade na proteção do sistema (MAMEDE, 2013).

O modelo URP 5000, criado pela Pextron, é um relé digital multifuncional amplamente empregado na proteção de sistemas elétricos, especialmente em alimentadores de distribuição de energia. Este dispositivo realiza um monitoramento contínuo da corrente elétrica do circuito e atua quando os valores medidos superam limites previamente estabelecidos.

Uma das principais características do relé URP 5000 é a proteção contra sobrecorrente temporizada (função 51), que permite a atuação do relé com base em curvas características que relacionam o tempo de resposta à magnitude da corrente.

Essas curvas podem ser do tipo normalmente inversa, muito inversa ou extremamente inversa, sendo selecionadas conforme a necessidade de coordenação da proteção no sistema elétrico (PEXTRON, 2008).

Figura 5 – Curvas características.



Fonte: Oliveira (2020).

O relé também possibilita o ajuste da corrente de pick-up, que representa o valor mínimo necessário para que o dispositivo inicie seu processo de atuação. Esse parâmetro é crucial para assegurar que o relé opere de maneira seletiva, evitando atuações indevidas durante condições normais (MAMEDE, 2011).

Além disso, o URP 5000 oferece contatos de saída, conhecidos como contatos de trip, que são ativados quando ocorre a atuação do relé. Esses contatos podem ser utilizados para acionar dispositivos externos, como disjuntores, permitindo a interrupção do circuito em caso de falha.

No contexto deste trabalho, o relé digital URP 5000 foi utilizado como equipamento de base para a realização dos testes de levantamento da curva de atuação. O sistema desenvolvido é capaz de medir o tempo de resposta do relé para diferentes valores de corrente, possibilitando a comparação entre os dados experimentais e os valores teóricos definidos pelas curvas características do dispositivo.

Durante os testes realizados no Chronos, utilizou-se a curva extremamente inversa, e para que fosse realizado o cálculo do tempo de atuação foi utilizada a equação 1.

$$T = \left(\frac{K}{\left(\frac{I}{I_p} \right)^\alpha - 1} \right) * Dt \quad (1)$$

em que T representa o tempo de atuação do relé, I representa a corrente no circuito, I_p corresponde à corrente de *pick-up*, enquanto K é a constante que caracteriza a curva, α são constantes associadas ao tipo de curva parametrizada e Dt seria o dial de tempo.

Para determinar o erro percentual entre o valor teórico e o valor medido, utilizou-se a equação 2.

$$E \% = \left| \frac{V_M - V_{Ref}}{V_{Ref}} \right| * 100\% \quad (2)$$

Onde: E % representa o erro percentual, V_{Ref} é o valor de referência e V_M é o valor medido.

A precisão do relé digital URP 5000 é especificada pelo fabricante por meio de diferentes faixas de tolerância, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 - Margem de erro na atuação do relé.

Amperímetro	Exatidão do amperímetro	$\pm 2,5 \%$ do ponto (verificar faixas no item 1.8)
Unidade instantânea	Exatidão de operação	$\pm 2,5 \%$ do valor ajustado
Unidade temporizada	Exatidão de pick-up	$\pm 2,5 \%$ do valor ajustado
Unidade temporizada tempo definido	Exatidão de tempo	$\pm 2,5 \%$ do valor ajustado ou $\pm 35ms$ (adotar como critério o que for maior)
Unidade temporizada tempo dependente	Exatidão de tempo	classe 5 (NBR 7099 / IEC 60255-3) ou $\pm 35ms$ (adotar como critério o que for maior)

Fonte: Teles (2023); Pextron (2008).

Assim sendo, o sistema proposto será utilizado para testar o relé URP 5000 e possibilitar uma análise prática do comportamento dos dispositivos de proteção amplamente utilizados em sistemas elétricos reais.

Figura 6 - URP 5000.



Fonte: Pextron (2008).

2.7 Importância da Placa de Circuito Impresso

A troca da placa de ensaio que antes era utilizada pela placa de circuito impresso (PCB) representa uma das melhorias mais significativas. Em sistemas de medição e controle, a estabilidade elétrica é crucial: a protoboard é bastante suscetível a mal contato e ruídos elétricos.

Com a adoção da PCB, ocorre uma diminuição considerável das interferências eletromagnéticas, além de garantir uma melhor fixação dos componentes, prevenindo desconexões acidentais. O layout também se torna mais eficiente, favorecendo a dissipação de calor e a organização dos módulos. Como consequência, há um aprimoramento estético e funcional do sistema, um aspecto fundamental para sua utilização em ambientes educacionais.

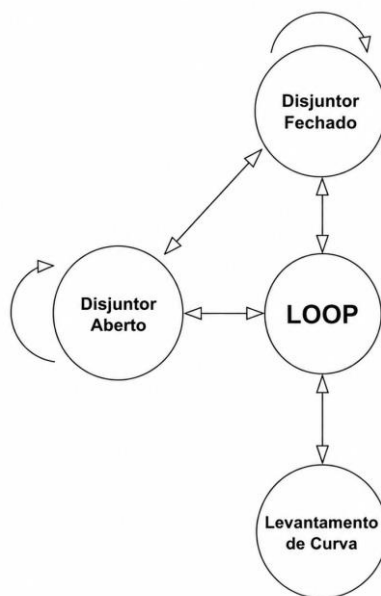
3. METODOLOGIA

Com o intuito de melhorar o simulador didático de sistema supervisório SCADA chamado Chronos, foi sugerida a otimização de sua estrutura física, lógica de operação e interface de interação com o usuário, visando aumentar a confiabilidade e usabilidade do sistema.

Primeiramente, é fundamental ressaltar que o funcionamento do Chronos se baseia em um sistema embarcado com características semelhantes a uma máquina de estados, onde cada estado representa uma condição operacional do sistema, conforme o diagrama de estados apresentado por Teles (2023), mostrado na Figura 6. Entre os principais estados, destacam-se o estado de Disjuntor Fechado, que permite a medição da corrente e o monitoramento contínuo do sistema, e o estado Disjuntor Aberto, no qual o sistema fica aguardando comandos para fechamento. Além disso, o sistema

também inclui um estado específico para Levantamento da Curva de atuação do relé, possibilitando a medição do tempo de resposta em função da corrente aplicada.

Figura 7 - Diagrama de estados do Chronos.



Fonte: Autoria própria.

O disjuntor em questão se trata de um disjuntor biestável que funciona como um interruptor que mantém sua posição (ligado ou desligado) mesmo após o fim do sinal de comando, alternando de estado a cada novo pulso elétrico recebido. Ao contrário de relés comuns, que precisam de energia constante na bobina para ficar ligados, o biestável opera por pulsos.

O controle e supervisão do disjuntor biestável através do Chronos acontece por meio dos contatos de abertura e fechamento e pode ser feito de três maneiras: operação manual, através de um computador (monitor serial), por meio de uma Interface Homem-Máquina (IHM) implementada em um aplicativo para dispositivos móveis. Durante seu funcionamento, o sistema coleta dados de corrente utilizando sensores, monitora a condição do disjuntor e executa comandos de abertura e fechamento por meio de relés auxiliares, assegurando a supervisão e o controle do sistema em tempo real.

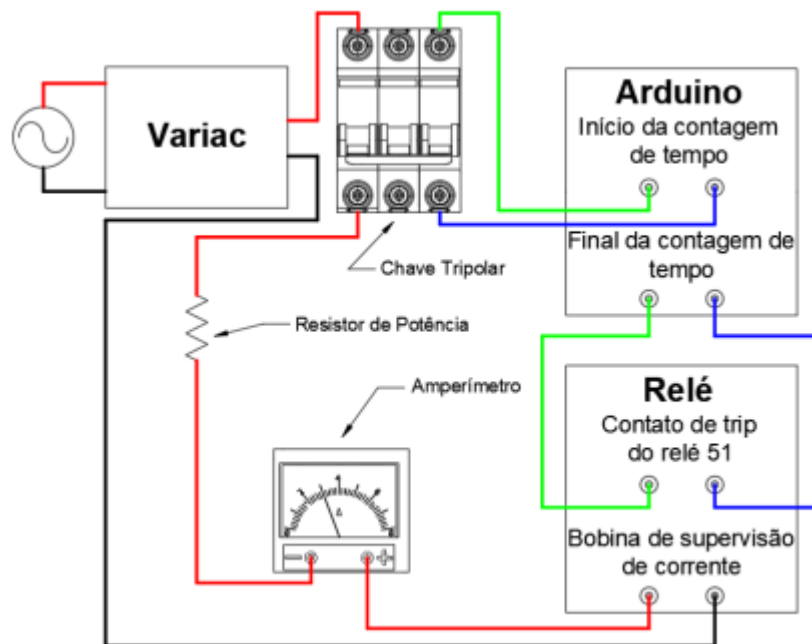
Figura 8 – Disjuntor Biestável



Fonte: Autoria própria.

Para avaliar a capacidade do sistema desenvolvido em realizar o levantamento de curvas de atuação de relés de sobrecorrente, são realizados ensaios onde o Chronos é interligado com uma chave tripolar e o relé, conforme a figura 9, onde o relé é parametrizado de acordo com os ajustes desejados, incluindo a corrente de pick-up, o dial de tempo e o tipo de curva de atuação. Em seguida, diferentes valores de corrente são aplicados ao circuito de teste. Durante cada ensaio, o Chronos monitorará os contatos de saída do relé, registrando automaticamente o tempo decorrido entre a aplicação da corrente e a atuação do dispositivo. Os valores obtidos serão armazenados e posteriormente comparados com os tempos teóricos calculados a partir da curva parametrizada no relé, possibilitando a análise do desempenho do sistema e a verificação da sua precisão na realização das medições.

Figura 9 – Ligação do Chronos com o relé.



Fonte: Teles (2023).

Após entender como o sistema original opera, foi realizada uma análise crítica do protótipo, identificando limitações principalmente relacionadas à montagem, à necessidade de requisições manuais para atualização dos dados e à interface gráfica que não era muito intuitiva. Com base nessa avaliação, foram definidas as etapas para melhorias.

A primeira fase envolveu o redesenho do hardware, substituindo a montagem original por uma placa de circuito impresso (PCI). O circuito foi projetado em um ambiente eletrônico, permitindo uma melhor organização dos componentes e otimização das conexões elétricas. O *layout* foi elaborado levando em conta a implementação de um plano de terra e o dimensionamento adequado das trilhas, com o objetivo de reduzir interferências eletromagnéticas e aumentar a estabilidade do sistema.

Em seguida, foi feita a confecção da placa de circuito impresso utilizando material tipo papel fenólico e um processo de fabricação por usinagem em máquina CNC. Depois disso, os componentes eletrônicos foram montados, integrando o sistema em uma estrutura física mais robusta e confiável.

Simultaneamente, foi desenvolvido um aprimoramento da Interface Homem-Máquina (IHM) na plataforma MIT App Inventor. A interface passou por reformulações focadas na usabilidade, incluindo melhorias visuais, padronização das cores, organização das informações e a visualização em tempo real da corrente do sistema.

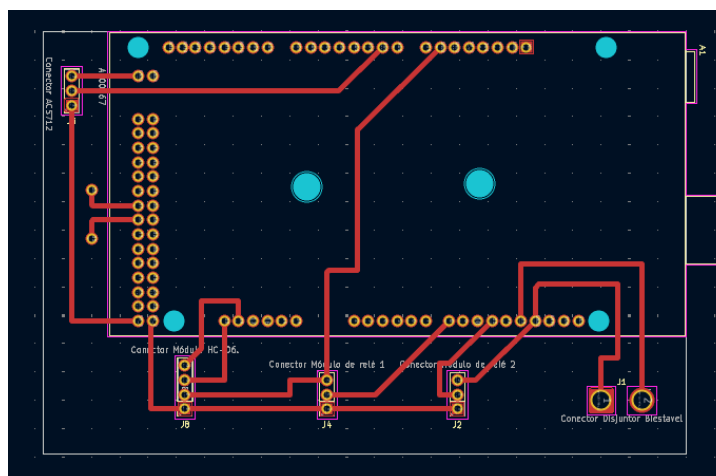
Na sequência, ocorreu a otimização do sistema embarcado ao modificar a lógica de comunicação entre o Arduino e o aplicativo. O sistema começou a operar ciclicamente, realizando automaticamente leituras da corrente elétrica e verificações sobre o estado do disjuntor, enviando continuamente essas informações via Bluetooth. Essa abordagem eliminou a necessidade de requisições manuais, onde o usuário tinha que solicitar cada atualização dos dados por comandos no aplicativo, proporcionando maior fluidez e confiabilidade na comunicação.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Desenvolvimento da Placa de Circuito Impresso

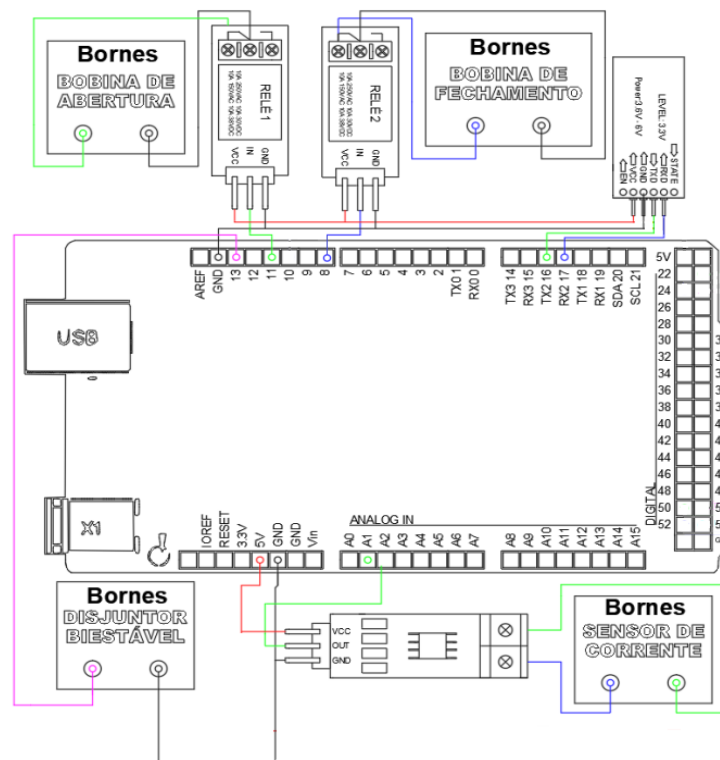
O desenvolvimento da placa de circuito impresso (PCI) foi realizado a partir do diagrama esquemático do sistema Chronos, sendo este redesenhado no software de projeto eletrônico KiCad.

Figura 10 – Diagrama da PCI.



Fonte: Autoria própria.

Figura 11 – Diagrama esquemático.

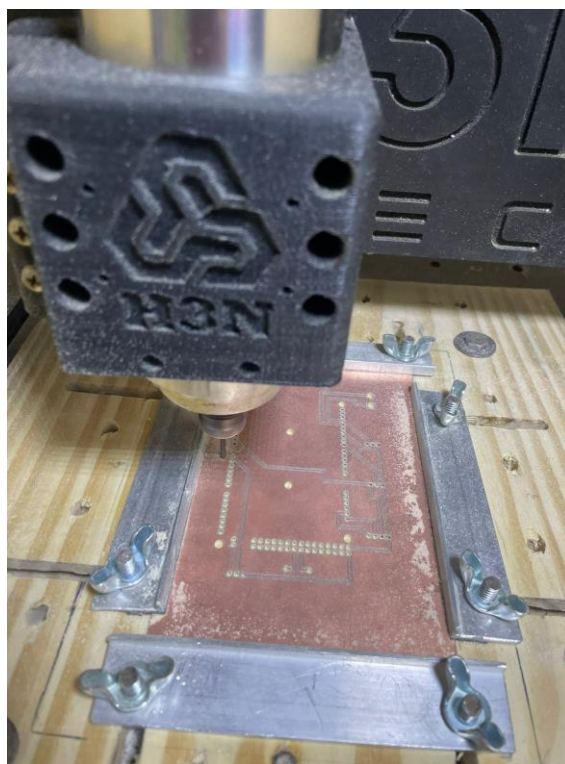


Fonte: Adaptado de Teles (2023).

O layout da placa foi planejado de forma a integrar todos os módulos do sistema em uma única estrutura física, incluindo o microcontrolador Arduino Mega 2560, módulo Bluetooth, relés e sensor de corrente. Durante o desenvolvimento, foram consideradas boas práticas de projeto, como a utilização de trilhas com largura adequada para condução de correntes e a implementação de um plano de terra contínuo, com o objetivo de reduzir interferências eletromagnéticas e melhorar a estabilidade do sistema.

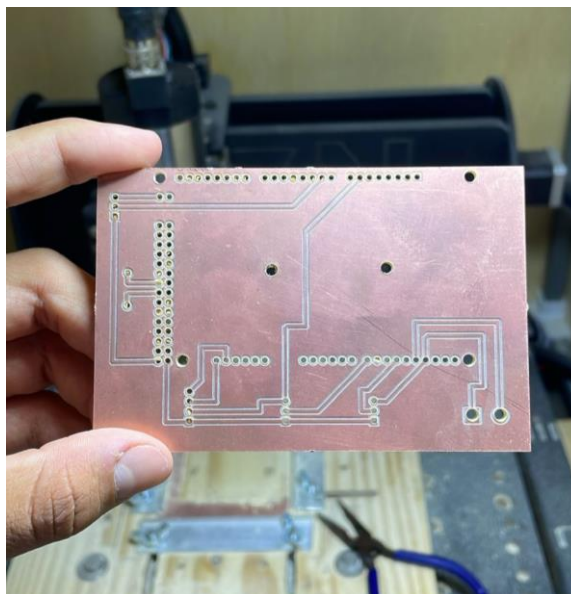
A placa foi confeccionada em material PF (Papel Fenólico), amplamente utilizado em circuitos impressos devido ao baixo custo e propriedades isolantes e foi utilizado uma máquina CNC para o processo de fabricação subtrativa (usinagem/fresagem) onde o processo consiste em usar uma broca fina para remover o cobre ao redor das trilhas, isolando-as.

Figura 12 - Confeccção da PCI.



Fonte: Autoria própria.

Figura 13 – Placa pronta para a montagem.



Fonte: Autoria própria.

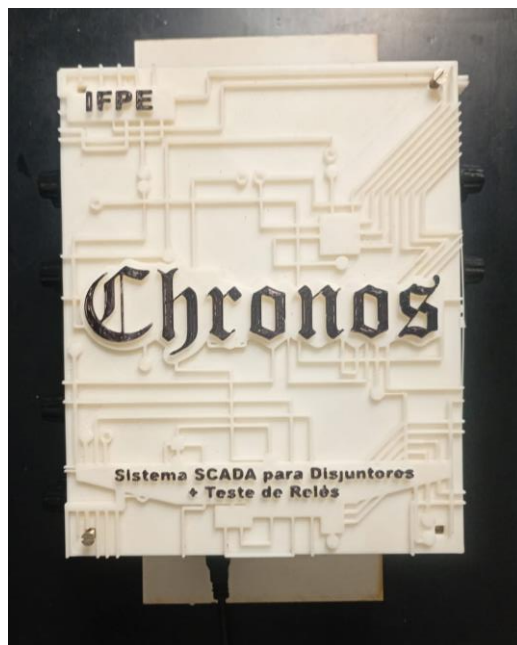
A utilização de uma PCI substituiu a montagem em placa de ensaio anteriormente empregada, eliminando problemas relacionados a mau contato e contribuindo para a redução de ruídos nas medições realizadas.

Figura 14 – Montagem na caixa do Chronos.



Fonte: Autoria própria.

Figura 14.1 – Caixa do Chronos (vista frontal).



Fonte: Autoria própria.

Figura 14.2 – Caixa do Chronos (vista esquerda).



Fonte: Autoria própria.

Figura 14.3 – Caixa do Chronos (vista direita).

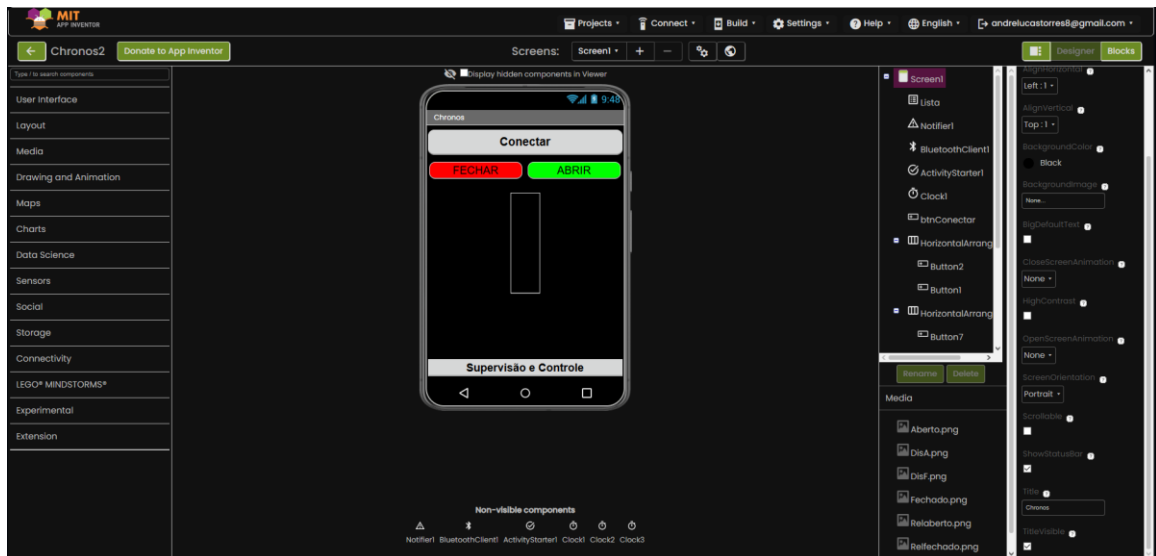


Fonte: Autoria própria.

4.2 Aprimoramento da Interface Homem-Máquina

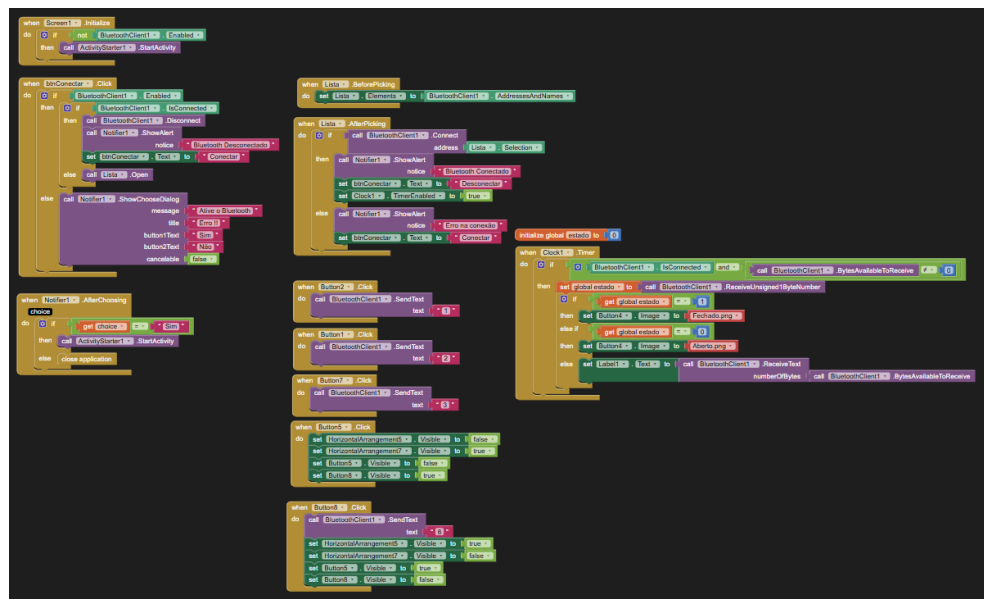
A IHM do Chronos foi refeita utilizando o MIT App Inventor, uma plataforma gratuita de desenvolvimento de aplicativos para Android e iOS, desenvolvida pelo Massachusetts Institute of Technology (MIT), que utiliza programação visual baseada em blocos lógicos.

Figura 15 – Criação da interface no MIT App Inventor



Fonte: Autoria própria.

Figura 16 – Código IHM



Fonte: Autoria própria.

O aplicativo possui, inicialmente, um botão destinado ao estabelecimento da conexão entre o smartphone e o módulo Bluetooth HC-05. Essa conexão é fundamental para viabilizar a comunicação serial entre a IHM e o microcontrolador Arduino Mega, permitindo a troca de dados e comandos em tempo real.

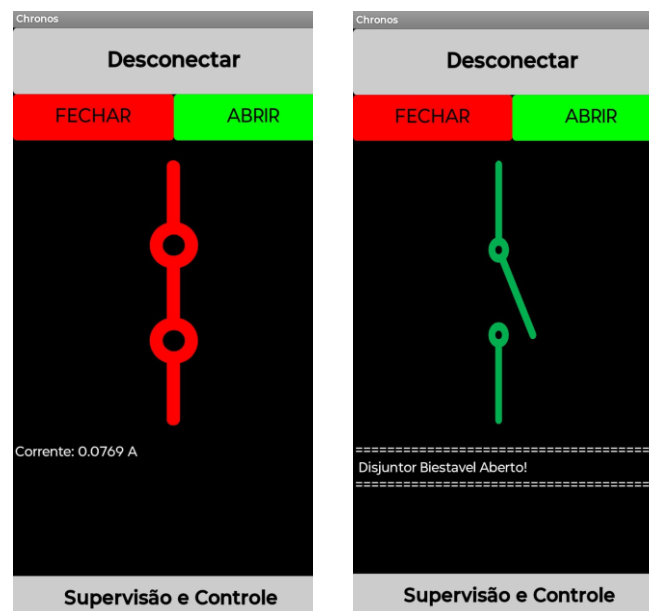
Após o estabelecimento da conexão, a interface disponibiliza três botões principais, cada um associado a uma funcionalidade específica do sistema: acionamento de fechamento do disjuntor, acionamento de abertura e execução do modo de medição.

Ao acionar o comando de fechamento, o aplicativo envia um sinal via comunicação Bluetooth para o Arduino, que, por sua vez, ativa um relé auxiliar responsável por energizar a bobina de fechamento do disjuntor. Esse processo permite a circulação de corrente no circuito principal, caracterizando o estado de disjuntor fechado.

De forma análoga, ao selecionar o comando de abertura, a IHM transmite uma instrução ao microcontrolador, que aciona a bobina de abertura do disjuntor por meio do relé auxiliar. Como resultado, ocorre a abertura do disjuntor biestável e a interrupção do fluxo de corrente no circuito, colocando o sistema no estado de disjuntor aberto.

Importante ressaltar que o sistema faz a leitura automática do estado do disjuntor para saber se o comando do usuário deve ser atendido, tendo em vista evitar algum pulso desnecessário que possa danificar o disjuntor, e se tem a exibição do estado do disjuntor na tela do app.

Figura 17 – Tela de supervisão e controle do app.

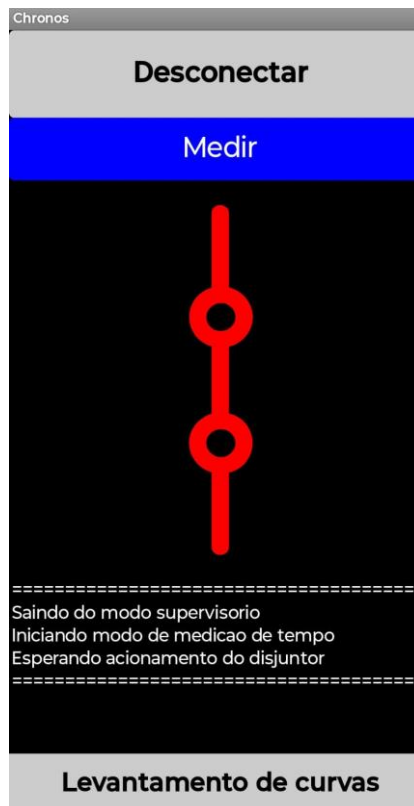


Fonte: Autoria própria.

Na segunda tela, a interface permite a execução do modo de medição, no qual o sistema realiza o acompanhamento das variáveis elétricas e o envio contínuo de dados ao aplicativo. Esse recurso possibilita a visualização em tempo real do estado do

sistema, contribuindo para o monitoramento e análise do seu comportamento. Para alternar entre as telas basta pressionar o botão do canto inferior.

Figura 18 – Tela de medição do tempo de atuação do URP 5000



Fonte: Autoria própria.

Dessa forma, a IHM desenvolvida não apenas permite o controle remoto do disjuntor, mas também atua como uma ferramenta de supervisão, consolidando as funcionalidades típicas de um sistema SCADA embarcado.

4.3 Implementação da Leitura Automática e Comunicação Bluetooth

A lógica de comunicação entre o Arduino e o aplicativo foi reestruturada com a finalidade de possibilitar a transmissão contínua de dados via Bluetooth, substituindo o modelo anterior que se baseava em requisições pontuais feitas pelo usuário.

O sistema foi programado para funcionar de maneira cíclica dentro do laço principal do microcontrolador, realizando constantemente a aquisição e o envio das informações. A cada ciclo de execução, o Arduino lê a corrente elétrica através do sensor ACS712, verifica o estado do disjuntor com base nos sinais de supervisão e processa essas informações para enviá-las ao aplicativo.

Após essa fase, os dados são transmitidos em um formato de mensagem estruturada, que inclui informações como o estado do disjuntor e o valor instantâneo da corrente medida. Esse formato padronizado permite que o aplicativo interprete os dados recebidos e atualize automaticamente a interface em tempo real, sem necessidade de intervenção manual por parte do usuário.

Além da transmissão contínua dos dados, foi implementada a leitura automática do estado do disjuntor, permitindo que mudanças de estado, como abertura ou fechamento, sejam detectadas e refletidas imediatamente na Interface Homem Máquina. Essa funcionalidade amplia a capacidade de supervisão do sistema, aproximando seu funcionamento ao comportamento esperado em aplicações supervisórias reais.

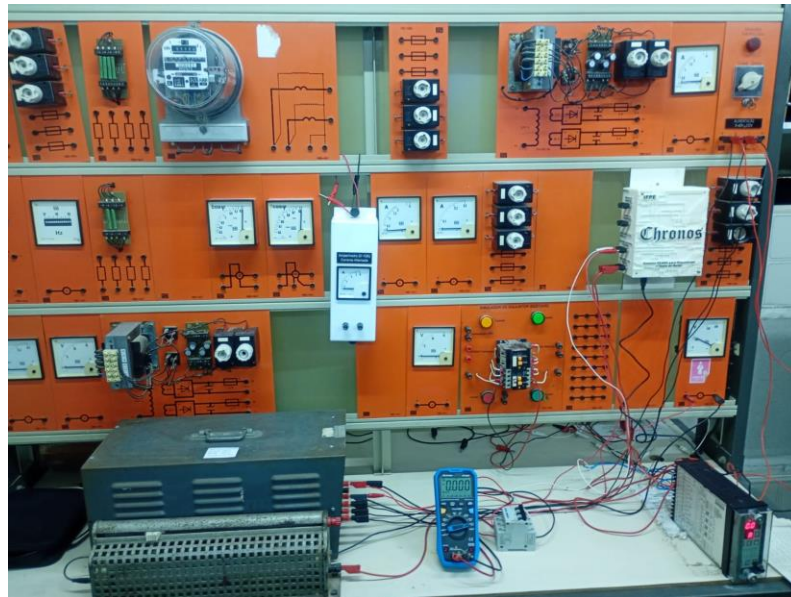
Essa abordagem elimina a necessidade de comandos repetitivos para consulta das informações, reduzindo atrasos na comunicação e melhorando a fluidez da interação entre o sistema embarcado e o aplicativo. Como resultado, obtém-se uma maior confiabilidade na atualização dos dados, uma estabilidade superior na comunicação Bluetooth e uma experiência de monitoramento em tempo real mais eficiente.

4.5 Testes de Levantamento de Curva do Relé de Sobrecorrente

Com o relé devidamente integrado à bancada didática, iniciaram-se os testes destinados à verificação do desempenho do sistema desenvolvido. Os procedimentos experimentais foram planejados com o objetivo de avaliar a capacidade do Chronos em realizar medições dos tempos de atuação do relé digital de sobrecorrente, além de validar a confiabilidade do sistema supervisório embarcado proposto neste trabalho.

Durante os testes realizados no Chronos, utilizou-se a curva extremamente inversa padronizada pela IEC, configurada com os parâmetros $K = 80$ e $\alpha = 2$, dial de tempo igual a 0,07 e corrente de *pick-up* de 2,5 A.

Figura 19 – Chronos integrado na bancada de testes



Fonte: Autoria própria.

Procedeu-se então à medição dos tempos de atuação do relé para correntes de 3 A, 4 A, 5 A, 6 A e 8 A, sendo realizados três ensaios para cada valor de corrente, cujos resultados são apresentados na Tabela 2. Observa-se um bom grau de repetibilidade nos valores medidos, indicando estabilidade e confiabilidade no processo de medição desenvolvido neste trabalho.

Tabela 2 – Constantes utilizadas na parametrização do relé URP5000.

Corrente(A)	t_1 (s)	t_2 (s)	t_3 (s)	$t_{\text{médio}}(\text{s})$	$t_{\text{teórico}}(\text{s})$	Erro	Erro (%)
3	12,059	11,955	12,009	12,008	12,727	0,720	5,6
4	3,474	3,494	3,465	3,478	3,589	0,111	3,1
5	1,861	1,886	1,864	1,870	1,866	0,004	0,21
6	1,160	1,131	1,224	1,172	1,176	0,004	0,34
8	0,598	0,595	0,591	0,595	0,606	0,011	1,81

Fonte: Autoria própria.

Após a obtenção dos dados experimentais, realizou-se o cálculo da média dos tempos medidos, os quais foram posteriormente comparados com os respectivos valores teóricos obtidos a partir da Equação 1 e esse procedimento permitiu determinar o erro absoluto, e utilizando a Equação 2 foi obtido o erro percentual das medições realizadas, evidenciado na última coluna da tabela 2.

Conforme visto na Tabela 1 a margem de erro do relé com unidade de tempo definido temporizado é de 2,5% de precisão ou $\pm 35\text{ms}$ e ao comparar os valores médios medidos com os respectivos tempos teóricos, verifica-se que os erros percentuais que estão dentro do limite aceitável são das correntes de 5, 6 e 8 A, com valores operando abaixo do limite. Para as correntes de 3 A e 4 A, os erros ultrapassam o limite aceitável, mas isso se deve pelas correntes estarem muito próximas da corrente de pick-up, fazendo a sensibilidade ficar muito alta e qualquer variação de corrente altera o resultado final, diante assim, os resultados obtidos indicam que o sistema desenvolvido possui capacidade adequada para realizar a medição dos tempos de atuação do relé URP 5000, validando a proposta de utilização do Chronos como ferramenta didática para análise e levantamento de curvas de relés de sobrecorrente.

5. CONCLUSÕES

O desenvolvimento deste projeto representou uma fase significativa na consolidação dos conhecimentos adquiridos durante o curso de Engenharia Elétrica, especialmente nas áreas de automação, sistemas embarcados e proteção de sistemas elétricos. Com a proposta de otimização do simulador didático Chronos, foi possível aplicar, de maneira integrada, conceitos teóricos e práticos voltados ao monitoramento e controle de sistemas elétricos.

As melhorias implementadas, que incluíram o redesenho do hardware através da placa de circuito impresso, a reformulação da Interface Homem-Máquina e a otimização da lógica operacional do sistema, mostraram resultados notáveis. A confecção da PCI ajudou a aumentar a estabilidade elétrica e a confiabilidade das medições, enquanto a nova interface ofereceu uma experiência mais intuitiva e eficiente para o usuário.

A implementação da leitura automática do estado do disjuntor e da comunicação contínua via Bluetooth representou um avanço significativo em relação à versão anterior do sistema, permitindo uma supervisão em tempo real mais fluida e próxima das aplicações reais. Os testes realizados evidenciaram melhorias na consistência dos dados, na estabilidade da comunicação e na interação com o sistema.

Outro aspecto relevante observado durante o desenvolvimento do projeto foi a viabilidade econômica da solução proposta. Enquanto uma mala didática comercial monofásica possui custo aproximado de R\$ 10.000 a R\$ 17.000, o Chronos foi desenvolvido com um custo estimado de aproximadamente R\$ 237. Mesmo com essa diferença de investimento, o sistema desenvolvido atende aos objetivos didáticos propostos, oferecendo recursos de supervisão, controle e levantamento de curvas de atuação de relés, tornando-se uma alternativa acessível para laboratórios de ensino e pesquisa.

Além dos aspectos técnicos, o desenvolvimento do projeto também enfrentou desafios relacionados à integração entre hardware e software, assim como à organização física dos componentes, ressaltando a importância de uma abordagem sistêmica no desenvolvimento de soluções em engenharia.

Para as perspectivas futuras, destaca-se a possibilidade de expansão do sistema por meio da integração de novos dispositivos e funcionalidades, além da realização de testes comparativos com equipamentos profissionais para avaliar com mais precisão a acurácia do sistema desenvolvido. Também se vislumbra um aprimoramento contínuo da interface e da lógica de controle, buscando aproximar ainda mais o sistema das aplicações reais.

Em resumo, o trabalho não apenas alcançou os objetivos propostos, mas também contribuiu para o aprimoramento de um sistema acessível com grande potencial educacional, aproximando os estudantes das aplicações práticas em sistemas supervisórios no contexto do Sistema Elétrico de Potência.

REFERÊNCIAS

PINTO, Milton. *Fundamentos de Sistemas Elétricos de Potência*. Rio de Janeiro: LTC, 2014.

ARDUINO. *Arduino Mega 2560 Rev3 Documentation*. Disponível em: <https://docs.arduino.cc/hardware/mega-2560>. Acesso em: 02 nov. 2025.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS (IEEE). *IEEE Guide for Intelligent Electronic Devices (IEDs) Cybersecurity Capabilities*. New York: IEEE, 2019.

BOYER, Stuart A. *SCADA: Supervisory Control and Data Acquisition*. 4. ed. North Carolina: ISA, 2009.

ALLEGRO MICROSYSTEMS. *ACS712 Fully Integrated, Hall-Effect-Based Linear Current Sensor IC*. Worcester, 2024. Disponível em: [Datasheet ACS712 – Allegro Microsystems](#)
Acesso em: 14 maio 2026.

Bluetooth SIG. **Bluetooth Core Specification**. 2022. Disponível em: <https://www.bluetooth.com>. Acesso em: 02 abr. 2026.

HC SERIAL BLUETOOTH PRODUCTS. *HC-05 Bluetooth to Serial Port Module Datasheet*. 2010. Disponível em: [Datasheet HC-05 Bluetooth Module](#) Acesso em: 14 maio 2026.

MAMEDE, João Filho. *Manual de equipamentos elétricos*. 3. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011.

João Mamede Filho. **Instalações elétricas industriais**. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2017.

MAMEDE, J. F.; MAMEDE, D. R. *Proteção de sistemas elétricos de potência*. LTC, 2013.

ROSÁRIO, J. M. *Princípios de Mecatrônica*. São Paulo: Pearson, 2005.

SENAI. *Sistemas lógicos programáveis*. Rio Grande do Sul: Departamento Regional do RS, 2013. Disponível em: <https://toaz.info/doc-view-2>. Acesso em: 06 abr. 2026.

TELLES, Í. B. *Desenvolvimento de um simulador didático de sistema supervisório (SCADA) para disjuntores de alta tensão*. IFPE, 2023.

PEXTRON. MANUAL DE OPERAÇÃO. URP 5000 VERSÃO: 12.33. 2008.

OLIVEIRA, Jéferson Matheus de et al. Análise da Viabilidade Técnica de Manobras de Paralelismo entre Alimentadores de Distribuição Utilizando Chaves Monopolares. In: Congresso Brasileiro de Automática-CBA. 2020.

GTMAX3D. **Arduino Mega 2560 R3**. Disponível em: <https://www.gtmax3d.com.br/componentes/arduino-mega-2560-r3-2>.

RS ROBÓTICA. **Sensor de Corrente AC/DC 30A ACS712**. Disponível em: <https://www.rsrobotica.com.br/produto/sensor-de-corrente-ac-dc-30a-ac712.html>.

ARDUINO E ELETRÔNICA. **Módulo BT Bluetooth Master Slave HC-05**. Disponível em: <https://arduinoeeletronica.com.br/produto/modulo-bt-bluetooth-master-slave-hc-05/>.

FERMARC. **Módulo Relé 5V 10A 1 Canal para Arduino**. Disponível em: <https://www.fermarc.com/produto/modulo-rele-5v-10a-1-canal-para-arduino.html>.