

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

Development of an educational supervisory control and data acquisition (SCADA) system simulator for high voltage circuit breakers.

Ícaro Bezerra Teles

icaroteles14@hotmail.com

Edson Ricardo Calado Sabino

edson.sabino@pesqueira.ifpe.edu.br

RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um Sistema de Controle e Aquisição de Dados (SCADA) projetado para monitorar e controlar um disjuntor biestável de alta tensão. A principal meta foi criar um sistema embarcado que integrasse sensores, microcontroladores e componentes eletrônicos, permitindo intervenções rápidas com base em dados em tempo real sobre o estado do disjuntor. Além disso, foi incluída uma função de levantamento de curvas de atuação dos relés de sobrecorrente. A implementação incluiu a programação de algoritmos no Arduino Mega, com a incorporação de um módulo Bluetooth para comunicação com dispositivos externos, como smartphones. A Interface Homem-Máquina (IHM), desenvolvida no MIT App Inventor, proporciona uma experiência intuitiva para o usuário final. Além de possibilitar o controle e supervisão do disjuntor, o sistema também executa funções extras, como o levantamento de curva de atuação de um relé digital. Os resultados obtidos demonstram a eficácia do sistema SCADA embarcado desenvolvido, oferecendo uma solução flexível e financeiramente acessível para o controle do disjuntor biestável em ambientes experimentais didáticos.

Palavras-chave: SCADA. Sistema Embarcado. Levantamento de Curvas de Relés. Automação de Sistemas Elétricos. Proteção de Sistemas Elétricos.

ABSTRACT

This work presents the development of a Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA) System designed to monitor and control a high-voltage bistable breaker. The main goal was to create an embedded system that integrates sensors, microcontrollers, and electronic components, allowing for quick interventions based on

real-time data about the state of the breaker. Additionally, a function for collecting the operating curves of overcurrent relays was included. The implementation involved programming algorithms on the Arduino Mega, with the incorporation of a Bluetooth module for communication with external devices such as smartphones. The Human-Machine Interface (HMI), developed in MIT App Inventor, provides an intuitive experience for the end user. In addition to enabling control and supervision of the breaker, the system also performs additional functions, such as collecting the operating curve of a digital relay. The obtained results demonstrate the effectiveness of the developed embedded SCADA system, offering a flexible and financially accessible solution for controlling the bistable breaker in didactic experimental environments.

Keywords: SCADA. Embedded System. Relay Curve Testing. Automation of Electrical Systems. Electrical Systems Protection.

1 INTRODUÇÃO

O Sistema Elétrico de Potência (SEP) desempenha um papel crucial no desenvolvimento das nações modernas. Este sistema interligado abrange a geração, transmissão e distribuição de energia elétrica, conforme destacado por Zanetta Jr. (2006). A eletricidade, por sua vez, é um elemento fundamental para uma ampla gama de atividades econômicas, desde a produção industrial até as tarefas cotidianas. Na década de 1950, as redes elétricas no Brasil eram notavelmente simples e limitadas, enfrentando diversos desafios. Uma das principais desvantagens é a descentralização do sistema, que resulta na falta de interconexão entre várias unidades geradoras. Essa descentralização impacta diretamente na eficiência e confiabilidade do sistema elétrico, impondo limitações à capacidade de atender à crescente demanda por eletricidade.

Devido a necessidade de aprimoramento, o Brasil empreendeu esforços significativos para modernizar e expandir seu Sistema Elétrico de Potência. Investimentos em infraestrutura, interconexão de unidades geradoras e avanços tecnológicos têm sido parte integrante dessa transformação. A busca por uma rede mais robusta e interligada visa não apenas atender à crescente demanda, mas também garantir a confiabilidade e a estabilidade do fornecimento de eletricidade em todo o país (PINTO, 2018).

A evolução do SEP no Brasil reflete uma busca contínua por eficiência, impulsionada em grande parte pelo avanço dos equipamentos de proteção. Notavelmente, o progresso na tecnologia e eletrônica de potência tem tornado esses dispositivos cada vez mais inteligentes e seguros. Algo necessário, pois o comportamento do sistema elétrico não segue uma regularidade, apresentando picos em diferentes momentos do dia (MAMEDE, 2013). Os equipamentos de proteção cumprem um papel fundamental na garantia da estabilidade e confiabilidade do SEP, capazes de identificar e responder rapidamente a eventos adversos, contribuindo para a segurança e eficiência operacional do sistema.

Diante deste cenário, fica evidente a necessidade de monitoramento dos equipamentos do SEP. É indispensável o uso de sistemas supervisórios em redes de transmissão e distribuição. Um exemplo notável é o Sistema SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition* - Sistemas de Supervisão e Aquisição de Dados), que tem a função de monitorar os equipamentos e a qualidade da energia. Ele aquisita grandezas elétricas como tensão, corrente e frequência, fornecendo dados em tempo real que são essenciais para a tomada de decisões e a manutenção da estabilidade operacional. Desta forma, a combinação de equipamentos de proteção avançados e sistemas supervisórios inteligentes representa um marco significativo na modernização do SEP no Brasil, permitindo enfrentar os desafios decorrentes da variabilidade da demanda e garantir um fornecimento de energia mais eficiente e confiável (SENAI,2013).

Dada a importância dos sistemas supervisórios em diversas áreas do setor elétrico, é fundamental que os discentes de Engenharia Elétrica tenham acesso a esses dispositivos empregados nas redes de distribuição. Contudo, os custos elevados desses equipamentos frequentemente dificultam, e em alguns casos, impossibilitam sua aquisição. Frente a essa realidade, o propósito deste trabalho é desenvolver um protótipo capaz de reproduzir as principais funcionalidades das tecnologias que utilizam uma interface SCADA, acrescentando ainda a capacidade de realizar ensaios para levantar curvas de relés.

Esse projeto busca superar as barreiras financeiras que o Instituto Federal – Campus Pesqueira enfrenta ao tentar comprar esses dispositivos essenciais para uma compreensão prática dos princípios da Engenharia Elétrica. Ao criar um protótipo que simula as principais funcionalidades, proporciona uma alternativa acessível e eficaz para experimentação prática no campo das redes de distribuição e proteção. Além de oferecer uma solução economicamente viável, o projeto visa disponibilizar uma ferramenta educacional versátil e interativa, capacitando os estudantes a explorarem as complexidades das interfaces SCADA e a realizar ensaios para análise de curvas de relés. Dessa forma, não apenas enfrentamos as restrições financeiras, mas também promovemos uma abordagem prática e inovadora para o aprendizado, preparando os futuros profissionais para os desafios do setor elétrico de maneira acessível e próxima à realidade.

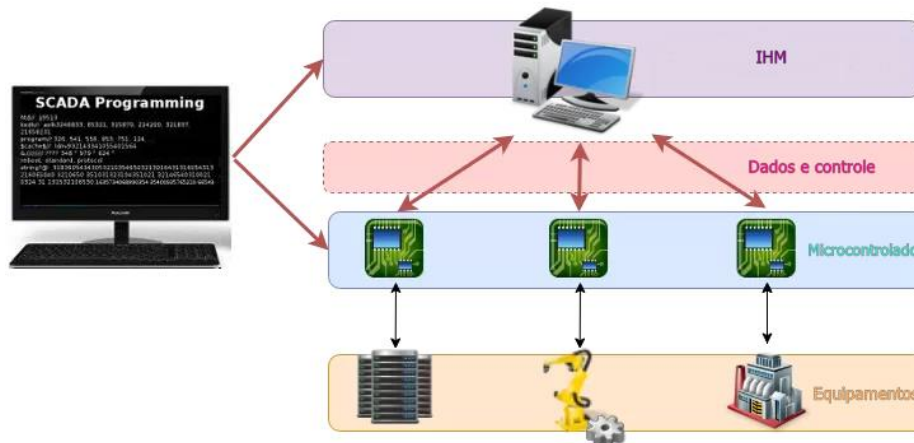
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Sistema SCADA

De acordo com Rosário (2005), o sistema supervisório representa uma integração sofisticada entre software e hardware, projetado para coletar, monitorar e controlar dados em tempo real. Essa tecnologia opera através do armazenamento de informações em forma de variáveis, acessíveis posteriormente por meio de uma Interface Homem-Máquina (IHM). O funcionamento básico do sistema SCADA é ilustrado na Figura 1, onde, no primeiro nível, encontram-se os equipamentos a serem controlados. Esses dispositivos variam de acordo com a finalidade do sistema, muitas vezes consistindo em sensores especializados responsáveis por captar grandezas específicas conforme a aplicação. Em conjunto, microcontroladores executam ações programadas com base nos dados coletados. A comunicação entre sensores e

microcontroladores é essencial para a eficiência do sistema, e os microcontroladores contêm algoritmos complexos que orientam a execução de rotinas específicas.

Figura 1 – Fluxograma do sistema SCADA.



Fonte: Adaptado de DPS Telecom, 2022.

A Interface Homem-Máquina (IHM), desempenha um papel fundamental, proporcionando uma interação intuitiva entre humanos e máquinas. Dentro do escopo da IHM, encontramos elementos visuais que podem variar de gráficos informativos a botões de controle programados previamente. Esses botões, por sua vez, executam funções dentro dos algoritmos dos microcontroladores, facilitando a operação e o controle do sistema. A troca de dados através da IHM possibilita o controle de variáveis, a visualização de informações em tempo real e, assim, uma comunicação eficaz entre operadores e o sistema. Essa abordagem técnica do SCADA reflete sua complexidade e importância nas redes elétricas, onde a eficiência, precisão e interação intuitiva são fundamentais (MORAES,2001).

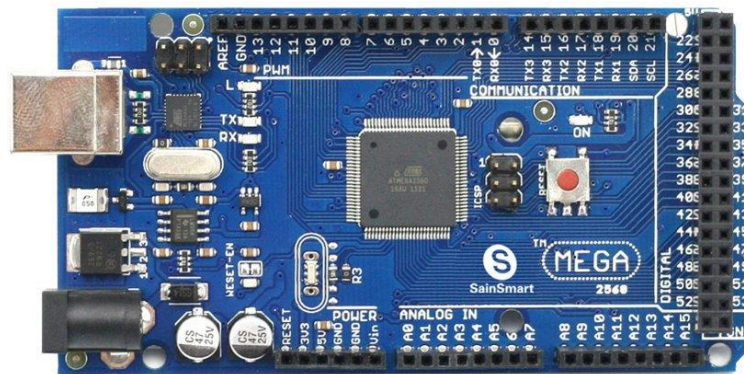
2.2. Arduino Mega 2560

O Arduino IDE oferece uma gama diversificada de recursos, com destaque para a capacidade de utilizar bibliotecas nativas do aplicativo. Além disso, os usuários têm a possibilidade de instalar bibliotecas desenvolvidas por outros membros da comunidade, disponíveis em fóruns e repositórios de desenvolvedores. Essa flexibilidade e extensibilidade são elementos cruciais para o processo de programação.

O Arduino Mega 2560 é uma placa de desenvolvimento baseada no microcontrolador ATmega2560 da Atmel, que opera a uma frequência de clock máxima de 16 MHz. Apesar de compartilhar a mesma velocidade de clock do ATmega328P, empregado no Arduino Uno, o ATmega2560 possui uma arquitetura que permite um processamento mais eficiente de dados (Arduino, 2023). A placa

oferece 54 pinos de entrada/saída digitais, sendo que 15 destes podem ser utilizados como saída PWM (*Pulse Width Modulation* – Modulação por Largura de Pulso). Além disso, apresenta 16 entradas analógicas, conforme ilustrado na Figura 2, tornando-se uma escolha ideal para projetos que demandam uma maior quantidade de entradas e saídas.

Figura 2 – Arduino Mega 2560.

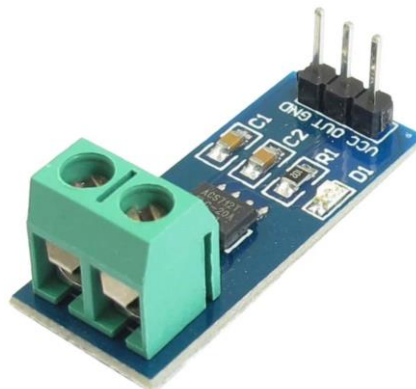


Fonte: Autoria própria.

2.3 Sensor de corrente

O sensor de corrente ACS712 é um dispositivo eletrônico utilizado em conjunto com o Arduino para medir corrente elétrica, tanto contínuas quanto alternadas. Seu princípio de funcionamento é fundamentado no efeito Hall. Conforme descrito pela Honeywell (2016), o Efeito Hall se manifesta quando um condutor retangular, percorrido por uma corrente elétrica, gera um campo magnético perpendicular. Isso provoca o deslocamento dos elétrons em direção às extremidades do condutor, resultando em uma tensão elétrica.

Figura 3 - ACS712.



Fonte: Autoria própria.

Conforme evidenciado na Figura 3, o sensor é composto por três pinos: VCC (5V), GND (terra) e OUT (saída analógica). Além disso, o sensor possui dois conectores que desempenham a função de conectar o módulo em série ao circuito a ser medido pela corrente. Essa configuração simplificada permite uma fácil integração do sensor ACS712 em diferentes circuitos, proporcionando uma medição eficaz da corrente elétrica.

2.4 Módulo RTC DS1302

O Módulo RTC (*Real Time Clock* – Relógio de Tempo Real) é componente eletrônico que proporciona um relógio de tempo real para aplicações de sistemas embarcados. Este módulo incorpora um calendário integrado, permitindo o acesso preciso a informações de data e hora. uma vez que. Projetado com uma precisão de segundos por dia, torna-se ideal para atividades que exigem registro de dados. Além disso, o módulo possui uma bateria de backup, garantindo seu funcionamento contínuo mesmo quando a fonte de alimentação do Arduino é desligada. Essa característica confere ao módulo RTC uma confiabilidade excepcional em diversas situações de aplicação (MONK,2014).

Conforme mostrado na Figura 4, o módulo é composto por cinco pinos essenciais: VCC (2 a 5V), GND (terra), CLK (*clock*), responsável por gerar os pulsos de clock necessários para a sincronização entre o microcontrolador e o módulo, DAT (data), encarregado das trocas de dados, e o pino RST (*reset*), utilizado para reiniciar o DS1302, caso seja necessário. Essa configuração clara de pinos oferece uma compreensão direta das funções de cada conexão, facilitando a integração do módulo RTC em projetos que exigem um relógio de tempo real preciso e confiável.

Figura 4 – Módulo RTC DS1302.



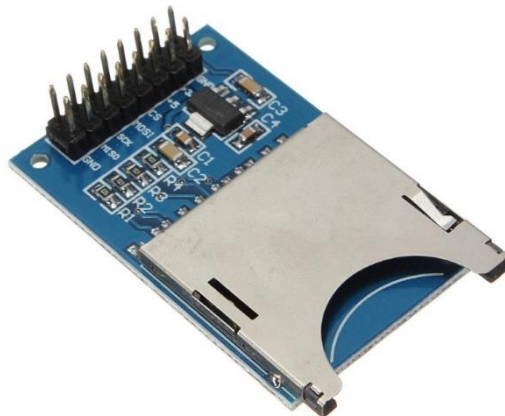
Fonte: Autoria própria.

2.5 Leitor de cartão SD

O Módulo de Leitor de Cartão SD é um dispositivo eletrônico que possibilita a leitura e gravação de informações em uma memória portátil. Essa funcionalidade permite a exportação desses dados, que podem ser utilizados para montagem de um banco de dados, registro de eventos e plotagem de gráficos com o auxílio de um computador. Esse módulo desempenha um papel essencial em projetos que demandam armazenamento de dados de forma eficiente e prática, contribuindo para a flexibilidade e versatilidade de aplicações em sistemas embarcados (BLUM,2018).

Conforme demonstrado na Figura 5, o leitor de cartão SD é composto por 8 pinos, sendo quatro deles designados para alimentação e os outros quatro para comunicação. É possível alimentá-lo com uma tensão de 3.3V ou 5V. Os pinos restantes estão divididos em CS (*Chip Select*), usado para selecionar o leitor de cartão SD; MOSI (*Master Out Slave In*), responsável por transmitir dados do Arduino para o leitor de cartão; SCK (*Serial Clock*), utilizado para sincronizar a comunicação entre o Arduino e o leitor de cartão SD; e MISO (*Master In Slave Out*), responsável por transmitir dados do leitor de cartão para o Arduino.

Figura 5 – Leitor de cartão SD.



Fonte: Autoria própria.

2.6 Módulo relé

O módulo de relés consiste em interruptores eletromecânicos que possibilitam o controle de cargas elétricas de alta potência, como motores, lâmpadas, entre outros, por meio de sinais de baixa tensão gerados pelo Arduino. Esse controle é viabilizado pelo princípio de funcionamento dos relés eletromecânicos, onde, de maneira geral, a passagem de uma corrente elétrica pelas espiras de uma bobina gera um campo eletromagnético. Esse campo cria uma força de atração, resultando no deslocamento da armadura móvel e alterando o estado dos contatos do relé. Essa capacidade de controle de dispositivos de alta potência torna o módulo de relés uma peça fundamental em projetos que demandam acionamento de cargas elétricas

significativas, proporcionando uma interface eficaz entre o Arduino e dispositivos de alta potência. (MCROBERTS, 2018)

Como mostrado na Figura 6, o módulo é composto por três pinos, dos quais dois são reservados para a alimentação, VCC (5V) e GND (terra). O último é destinado à comunicação, recebendo informações do Arduino. O relé, por sua vez, é um interruptor eletromecânico que, na presença de corrente elétrica, pode ativar ou desativar uma carga, conforme a necessidade da aplicação. Cada relé possui três terminais: contatos NA (Normal Aberto), NF (Normal Fechado) e C (Comum).

Figura 6 – Módulo de relé.



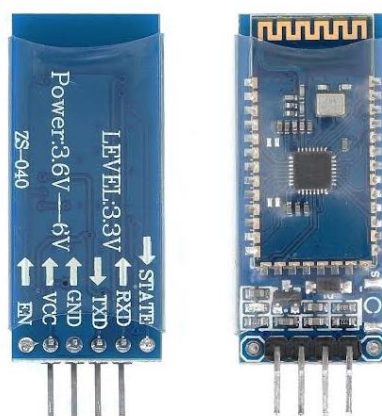
Fonte: Autoria própria.

2.7 Módulo Bluetooth HC-06

Segundo Monk (2014), o módulo Bluetooth HC-06 é um aparelho eletrônico empregado para comunicação sem fio entre dispositivos, permitindo a transmissão de dados a curtas distâncias. A troca de informações ocorre através da interface serial UART (*Universal Asynchronous Receiver/Transmitter* – Receptor/Transmissor Assíncrono Universal), proporcionando uma comunicação eficaz entre dispositivos. Essa tecnologia possibilita não apenas a transmissão de dados, mas também o monitoramento e controle de variáveis específicas, previamente estabelecidas no código. Essa flexibilidade torna o módulo Bluetooth HC-06 uma escolha popular em projetos que demandam interação sem fio, permitindo a comunicação remota e o gerenciamento de variáveis programadas de forma conveniente.

Conforme mostrado na Figura 7, o módulo Bluetooth HC-06 é composto por quatro pinos. Dois desses pinos são dedicados à alimentação, sendo o VCC (5V) e o GND (terra). Os outros dois pinos destinam-se à comunicação, sendo o TX (transmissão) e o RX (recepção), responsáveis por enviar e receber dados, respectivamente.

Figura 7 – Módulo HC-06.



Fonte: Autoria própria.

2.8 Relés de sobrecorrente

Os relés de sobrecorrente têm como principal função a proteção e controle do sistema elétrico. Esses dispositivos são projetados para detectar e responder a correntes elétricas anormais que excedem os valores pré-determinados, indicando condições de sobrecarga ou falhas no sistema. Os relés de sobrecorrente operam com base no princípio de monitoramento contínuo da corrente elétrica que flui através de um circuito. Quando a corrente ultrapassa os limites estabelecidos, o relé é ativado, disparando a abertura de contatos elétricos ou iniciando outras ações para interromper o circuito. Os principais tipos de relés de sobrecorrentes são: instantâneo, temporizado e direcional.

Um parâmetro de extrema importância para os relés de sobrecorrente é a corrente de pick-up, também conhecida como corrente de partida. Segundo Mamede (2011), essa medida define o limiar de atuação do relé, representando o valor específico de corrente elétrica que, quando atingindo ou ultrapassado, aciona o relé para interromper o fluxo de corrente no circuito. Em termos gerais, a corrente de pick-up define o ponto em que o relé interrompe o fluxo de corrente ao detectar uma corrente no circuito acima da nominal, protegendo assim o sistema elétrico.

É importante salientar que a corrente de pick-up é um dado técnico fundamental na especificação e configuração de relés, sendo necessário ajustá-la de acordo com as características específicas do circuito e os requisitos de proteção. Uma escolha inadequada desse valor pode resultar em atuações indevidas ou falhas na detecção de condições anormais.

Com relação à temporização, os relés são divididos em:

- Instantâneos;
- Temporizados.

2.8.1 Relés instantâneos (50)

Os relés de sobrecorrente instantâneos, tem como principal característica não apresentar retardo intencional no tempo de atuação, dessa forma, proporcionando uma resposta rápida e efetiva em situações de surtos de correntes. De acordo com a definição da Pextron (2023), esses relés são identificados como relés 50, indicando sua quase imediata reação à detecção de sobrecorrente. Já a função 50N opera de forma semelhante, concentrando seu monitoramento na corrente que flui pelo neutro do sistema elétrico.

2.8.2 Relés temporizados (51)

Existem basicamente dois tipos de relés de sobrecorrente temporizados: tempo definido e tempo inverso. Os relés de tempo definido são projetados para proporcionar uma resposta controlada através de ajuste da corrente de pick-up. Isso permite, em determinados cenários, um atraso controlado na atuação, sendo particularmente útil em situações envolvendo condições transitórias ou cargas momentâneas durante o funcionamento normal do sistema elétrico. Conforme especificado pela Pextron (2023), a função 51 é ativada quando o relé reage em um tempo definido diante de uma sobrecorrente. A função 51N opera de maneira semelhante, porém, o monitoramento é direcionado para a corrente no neutro do sistema elétrico.

Os relés de tempo inverso podem ser subdivididos em três categorias principais: relés de tempo normalmente inverso (NI), relés de tempo muito inverso (MI) e relés de tempo extremamente inverso (EI), conforme ilustrado na Figura 8. A principal distinção entre essas categorias reside na suavização apresentada por cada curva, o que influencia diretamente no valor da corrente de atuação do relé e, conseqüentemente, no tempo necessário para sua atuação. Para cada tipo de curva selecionado, há valores associados de constantes, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 – Constantes utilizadas na parametrização do relé URP5000.

Curva	Normalmente inversa (NI)	Muito inversa (MI)	Extremamente inversa (EI)
K	0,14	13,5	80
α	0,02	1	2

Fonte: Adaptado da Pextron, 2008.

Para que seja realizado o cálculo do tempo de atuação em função da corrente, é utilizada a Equação 1.

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

Onde:

T: Tempo de atuação teórico;

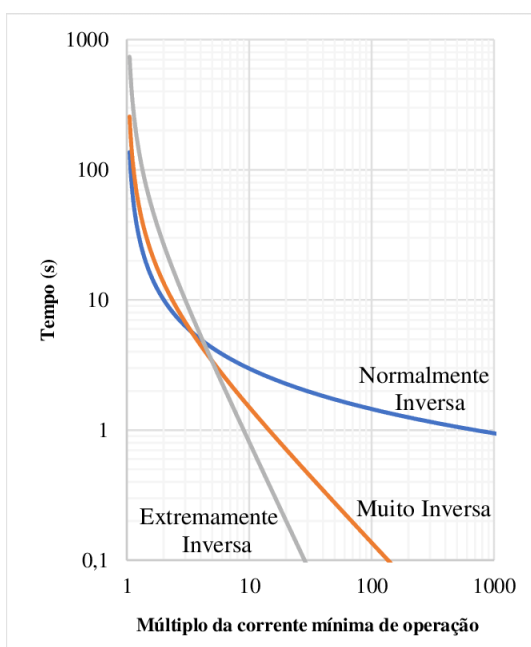
I: Corrente no circuito;

I_p : Corrente de *pick-up*;

K e α : Constantes que caracterizam a curva (NBR 7099);

Dt: Dial de tempo.

Figura 8 – Tipos de curvas características.



Fonte: Oliveira, 2020.

2.8.3 Precisão

A precisão de um relé é fundamental para a confiabilidade e eficácia de um sistema elétrico. Esses parâmetros garantem que o relé atue em uma faixa específica determinada pelo fabricante, conforme valor padronizado pela NBR 7099. É essencial que todas as fabricantes sigam essa normativa, garantido, assim, a uniformidade com os padrões estabelecidos.

A precisão do relé digital, modelo URP 5000, é delineada nas seguintes faixas, conforme ilustrado no Tabela 2.

Tabela 2 – Margem de erro na atuação do relé.

Amperímetro	Exatidão do amperímetro	± 2,5% do ponto (verificar item 1.8)
Unidade Instantânea	Exatidão de operação	± 2,5% do valor ajustado
Unidade temporizada	Exatidão de pick-up	± 2,5% do valor ajustado
Unidade temporizada de tempo definido	Exatidão de tempo	± 2,5% do valor ajustado ou 3,5ms (adotar como critério o que apresentar maior valor)
Unidade temporizada de tempo dependente	Exatidão de tempo	Item 5.2.2.2 (NBR 7099) ou 3,5ms (adotar como critério o que apresentar maior valor)

Fonte: Adaptado da Pextron, 2008.

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

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

Onde:

E %: Erro percentual;

V_{Ref}: Valor de referência;

V_M: Valor medido.

3 METODOLOGIA

Com o intuito de criar de um sistema supervisório SCADA simplificado, que incorporasse as funções de medição, controle e monitoramento em instalações do SEP, assim como um dispositivo voltado à medição dos tempos de atuação dos relés de sobrecorrentes utilizados no SEP, propôs-se o desenvolvimento do Chronos. Este protótipo está baseado em microcontrolador e foi projetado para ser integrado à bancada didática de medidas elétricas, assegurando compatibilidade tanto com o notebook do professor quanto com os smartphones dos discentes.

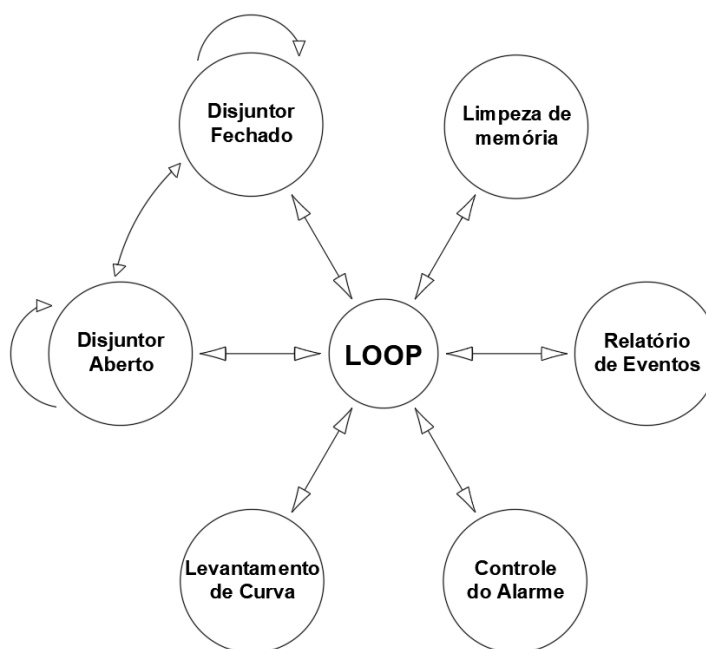
O protótipo precisa apresentar capacidade para executar funções essenciais de um sistema SCADA, abrangendo o monitoramento do estado do disjuntor, aquisição de medidas da corrente do disjuntor e controle. Adicionalmente, deve permitir o armazenamento de dados elétricos e ter a capacidade de emitir um alarme sonoro para eventos considerados anormais.

O princípio de operação do Chronos segue um padrão semelhante ao de uma máquina de estados, conforme mostrado na Figura 9. No estado 1, denominado “Disjuntor Fechado”, o Chronos deve permitir a medição de corrente, o monitoramento

do estado do disjuntor e, quando for o caso, a chegada de um pulso de tensão positiva na bobina de abertura. De modo análogo, no estado 2, intitulado “Disjuntor Aberto”, permitirá o monitoramento do estado do disjuntor e a chegada de um pulso elétrico para a botoeira de fechamento.

Na Figura 9, o estado 3 deve ser capaz de realizar o cálculo do tempo de atuação do relé digital, possibilitando a construção de um gráfico do tempo de atuação do relé em função das correntes usadas no teste. O quarto estado deverá desativar o sistema de alarme sonoro em caso de detecção de uma eventual sobrecorrente durante o funcionamento do sistema. A quinto estado, por sua vez, terá a responsabilidade de exibir um relatório de eventos (data e a duração de cada sobrecorrente detectada) registrados na memória do Arduino. Por fim, o último estado terá que limpar a memória de eventos, permitindo o registro de novas ocorrências, tanto na própria memória do Arduino quanto na memória do cartão SD.

Figura 9 – Diagrama de estados do Chronos.

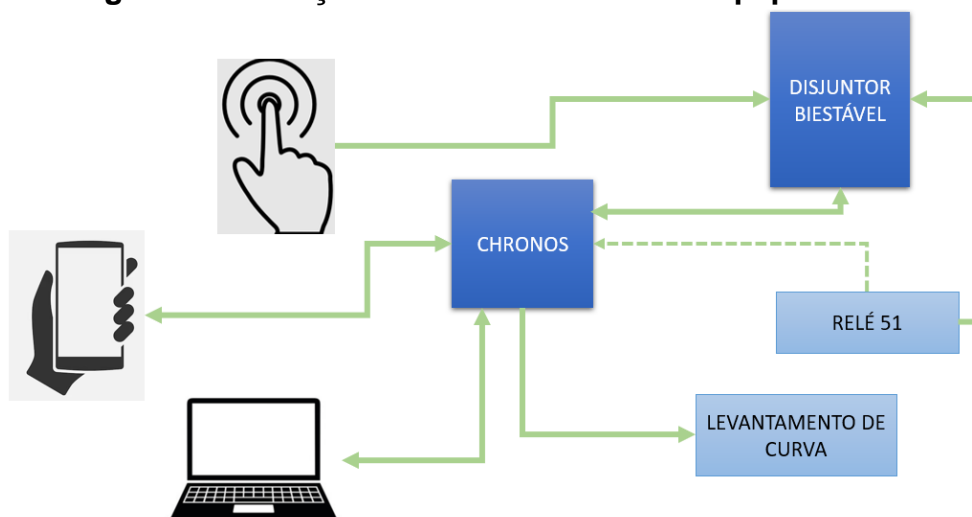


Fonte: Autoria própria.

O código deve viabilizar o controle do disjuntor biestável por três modalidades: manual, via computador e através de smartphones, garantindo que, independentemente da origem do comando, o disjuntor execute a função desejada. e permita o monitoramento do real estado em que o mesmo se encontra. Essas informações deverão ser apresentadas de maneira fluida tanto na tela do monitor serial do notebook quanto na Interface Homem-Máquina (IHM, desenvolvida para ser utilizada nos smartphones dos discentes). O relé 51 será interligado ao disjuntor biestável. Quando for realizar o levantamento de curva do relé, seus contatos de trip deverão ser conectados ao Chronos, conforme ilustrado na Figura 10.

Para avaliar todas as funcionalidades do Chronos, foram propostos 2 testes. O primeiro teste consiste na operação de abertura e fechamento do disjuntor biestável de três maneiras: local (nível 0, no próprio equipamento), via notebook (serial monitor da própria IDE do Arduino) e, por fim, por meio de uma IHM (aplicativo em um smartphone).

Figura 10 –Relação entre o Chronos e os equipamentos

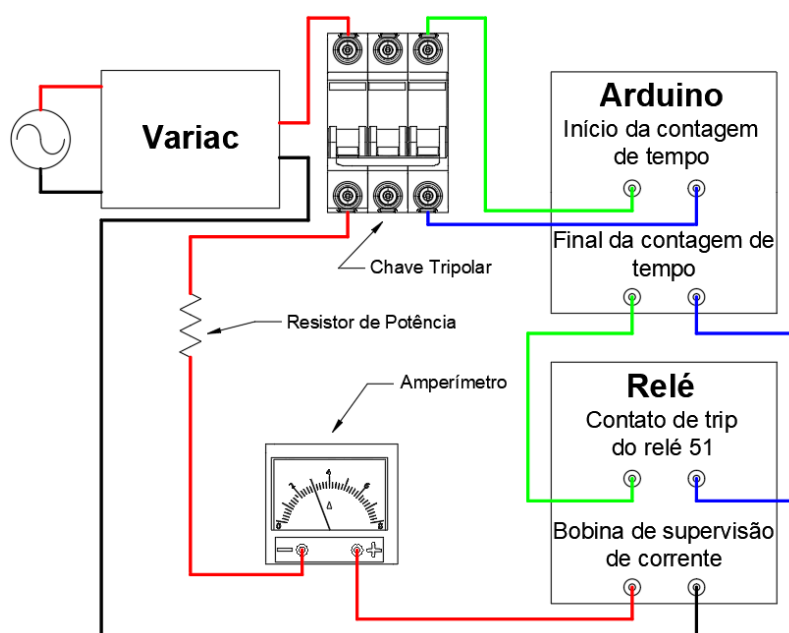


Fonte: Autoria própria.

O segundo teste está associado à função de levantamento da curva do relé, empregando uma topologia proposta por este trabalho e ilustrada na Figura 11, na qual o relé, o Chronos e uma chave tripolar estarão interligados. Valores de corrente serão selecionados de acordo com a corrente de pick-up ajustada no relé. Os tempos de atuação para cada valor de corrente serão medidos pelo Chronos e armazenados em sua memória. Esses tempos poderão ser então comparados com o tempo teórico de atuação do relé. Tal confronto tem o propósito de quantificar o erro e avaliar a precisão do Chronos.

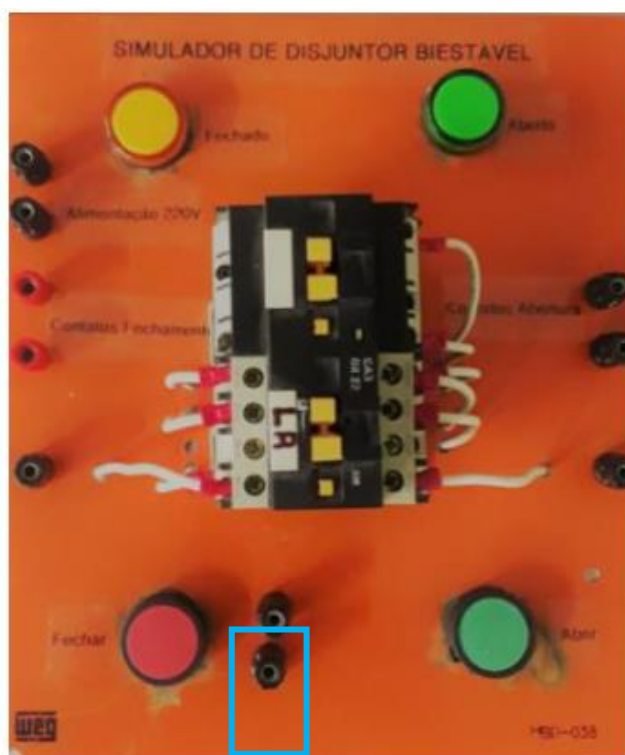
É relevante destacar que o disjuntor biestável é equipado com contatos auxiliares conectados à botoeira de fechamento, conforme destacado na Figura 12. Esses contatos poderiam informar ao Arduino o momento no qual foi dada a ordem de fechamento manual do disjuntor. No entanto, cabe mencionar que esses contatos não foram utilizados durante o processo de levantamento de curva devido ao fato de que, conforme dados fornecidos pela fabricante WEG (WEG, 2023), a chave contatora pode introduzir um tempo de até 45 ms no fechamento. Esse intervalo de tempo teria impacto nos cálculos de levantamento de curva. Como solução para contornar esse impasse, optou-se pela utilização da chave tripolar. Essa chave é responsável por estabelecer a corrente de teste e, simultaneamente, informar ao Arduino o início da contagem do tempo.

Figura 11 – Esquema de ligação.



Fonte: Autoria própria.

Figura 12 – Esquema de ligação.



Fonte: Autoria própria.

Após essa etapa, foi elaborada uma Interface Homem-Máquina (IHM) com um design limpo e objetivo. Essa IHM é capaz de estabelecer comunicação entre o

smartphone e o Arduino, possibilitando o controle de abertura e fechamento do disjuntor biestável por meio do Bluetooth. Além disso, a interface deve permitir realizar o levantamento de curva e exibição dos dados relevantes, como corrente e tempo de atuação do relé digital. Com a implementação dessas etapas, teremos um sistema embarcado funcional, integrando suas funções de monitoramento, supervisão e controle.

Por último, para abrigar todo esse conjunto de hardware de forma a se integrar fisicamente com a bancada, iniciou-se o processo de elaboração de um modelo 3D de encapsulamento. Nesta etapa, foram estabelecidas as dimensões da caixa de maneira a acomodar todos os componentes eletrônicos, priorizando tanto a estética quanto a funcionalidade.

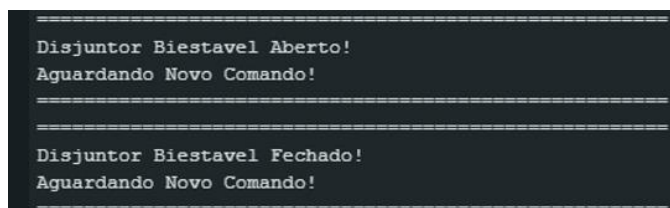
4 RESULTADOS E ANÁLISE

Nesta seção, serão apresentados e discutidos os resultados alcançados no contexto deste estudo. Os dados e conclusões derivados das análises serão minuciosamente explorados, proporcionando uma compreensão mais aprofundada das implicações e contribuições do trabalho desenvolvido. Além disso, serão destacadas as conexões entre os resultados obtidos e os objetivos traçados inicialmente, consolidando o entendimento do impacto e relevância das descobertas no contexto da pesquisa.

4.1 Desenvolvimento do algoritmo

O algoritmo do sistema SCADA simplificado foi implementado através do software IDE (*Integrated Development Environment* - Ambiente de Desenvolvimento Integrado) do Arduino. As informações de supervisão coletadas pelo sistema SCADA podem ser visualizadas no monitor serial do Arduino IDE, conforme ilustrado na Figura 13. Testes foram realizados para confirmar a capacidade do Arduino em ler o estado atual do disjuntor biestável.

Figura 13 – Função de Supervisão do Sistema SCADA vista através do Serial Monitor do Arduino.



```
=====
Disjuntor Biestavel Aberto!
Aguardando Novo Comando!
=====

Disjuntor Biestavel Fechado!
Aguardando Novo Comando!
=====
```

Fonte: Autoria própria.

No que diz respeito à segunda função do sistema SCADA, a aquisição de dados, a Figura 14 exemplifica a criação de uma base de dados operacional. Esta função é realizada combinando o sensor de corrente, módulo RTC e leitor de cartão SD.

Figura 14 – Função de aquisição de dados do Sistema SCADA vista através do Serial Monitor do Arduino.

```
>> Sexta | Data: 24/11/2023 | Horas: 16:47:8 | Corrente: 0.0000 A
>> Sexta | Data: 24/11/2023 | Horas: 16:47:9 | Corrente: 0.0000 A
>> Sexta | Data: 24/11/2023 | Horas: 16:47:10 | Corrente: 0.0000 A
>> Sexta | Data: 24/11/2023 | Horas: 16:47:11 | Corrente: 0.0000 A
>> Sexta | Data: 24/11/2023 | Horas: 16:47:12 | Corrente: 0.0000 A
>> Sexta | Data: 24/11/2023 | Horas: 16:47:13 | Corrente: 0.0000 A
>> Sexta | Data: 24/11/2023 | Horas: 16:47:14 | Corrente: 0.0000 A
>> Sexta | Data: 24/11/2023 | Horas: 16:47:15 | Corrente: 0.0000 A
```

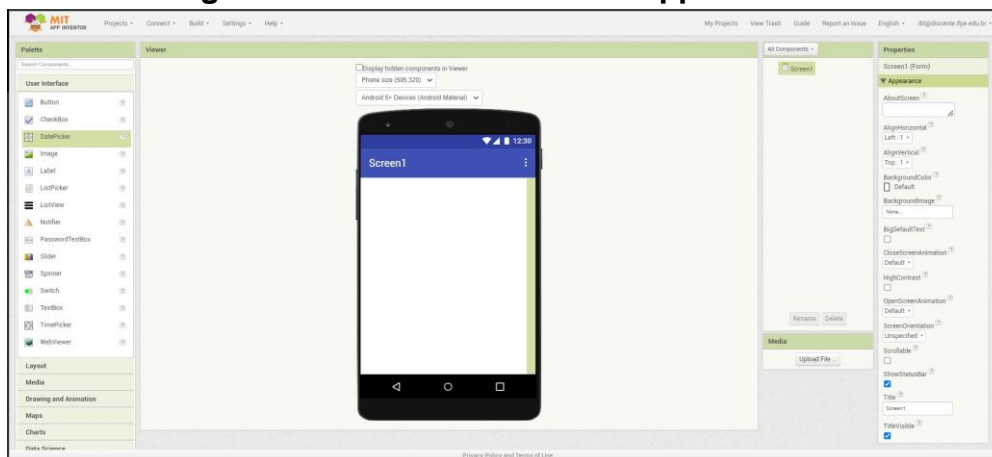
Fonte: Autoria própria.

Nesta etapa, conduzimos diversos testes com diferentes correntes para validar a precisão do valor medido e apresentado pelo sensor do Arduino. Como parte deste processo, utilizamos um amperímetro analógico e o próprio relé digital Pextron URP5000, que realiza a medição de corrente, conectando-os em série. Os equipamentos mensuraram a mesma corrente, mantendo a mesma ordem de magnitude, com apenas uma diferença observada na segunda casa decimal. Este procedimento validou a acurácia das medições realizadas pelo sensor do Arduino.

4.2 Desenvolvimento da IHM

A tela inicial do MIT App Inventor, plataforma visual de desenvolvimento de aplicativos Android, representada na Figura 15, revela uma interface rica, na qual o programa é construído através da integração de botões, caixas de seleção e outras funções nativas do software.

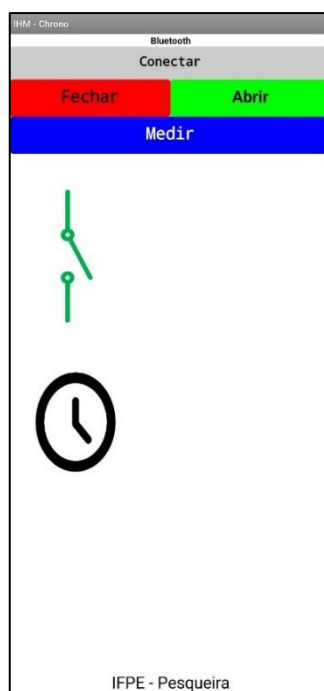
Figura 15 – Plataforma do MIT App Inventor.



Fonte: Autoria própria.

Ao concluir o processo de construção do algoritmo no MIT App Inventor, a plataforma oferece a capacidade de gerar um arquivo APK, o qual deve ser instalado no Smartphone. O aplicativo gerado não apenas engloba a programação elaborada, mas também abarca a interface construída durante o processo. Na Figura 16.1, temos a captura de tela do smartphone exibindo o aplicativo finalizado.

Figura 16.1 – Tela da IHM.



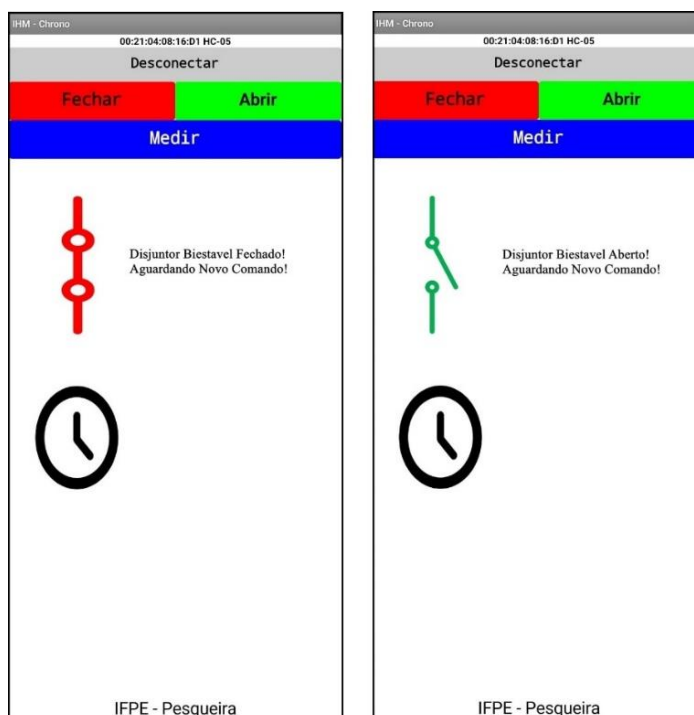
Fonte: Autoria própria.

O primeiro botão tem como objetivo estabelecer a conexão entre o smartphone e o módulo Bluetooth (HC-06), permitindo a comunicação entre a Interface Homem-Máquina (IHM) e o Arduino Mega.

A interface apresenta mais três botões, cada um associado a funções específicas, tais como Fechamento e Abertura do relé, e por último, o levantamento de curva.

Conforme mostrado na Figura 16.2, ao pressionar o comando "Fechar", a IHM envia uma ordem para o Arduino, que executa a função fechando um relé auxiliar e permitindo a circulação de corrente pela bobina de fechamento do disjuntor. De maneira semelhante, ao pressionar "Abrir", a IHM emite uma instrução para o Arduino, que realiza a operação via bobina de abertura do disjuntor, abrindo o mesmo e interrompendo o fluxo de corrente no circuito principal. Este processo demonstrou a capacidade do sistema SCADA embarcado de realização do controle de equipamentos.

Figura 16.2 – Ilustração da tela da IHM nos estados disjuntor fechado (à esquerda) e disjuntor aberto (à direita).

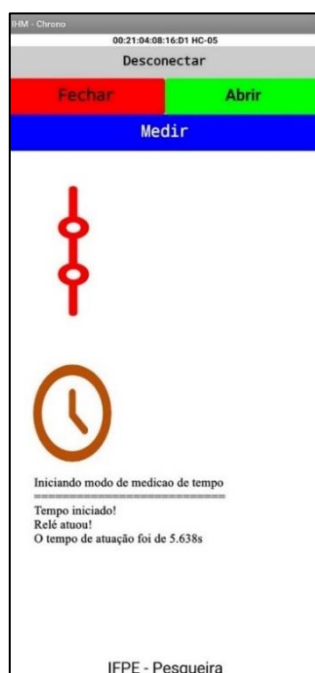


Fonte: Autoria própria.

O terceiro botão, intitulado "Medir", inicia o processo de levantamento de curva tempo *versus* corrente do relé de sobrecorrente temporizado. Nesse cenário, o Arduino aguarda o acionamento da chave tripolar responsável pelo controle da passagem de corrente. A corrente do circuito é previamente ajustada em um valor acima da corrente de *pick-up*. No momento do fechamento da chave tripolar são iniciadas simultaneamente a passagem de corrente pela bobina de supervisão do relé de sobrecorrente e a contagem de tempo (realizada no Arduino). Esse procedimento sensibiliza o relé digital, ativando a função 51. Após um determinado tempo, o relé 51 fecha seus contatos de trip, os quais, neste momento, devem estar conectados ao Arduino, indicando que o relé atuou e parando assim a contagem de tempo.

Com as informações anteriores, o Arduino calcula o tempo de atuação do relé após o início da alimentação do circuito, desempenhando um papel idêntico aos das caixas de testes de relés usadas pelos profissionais da área. Um exemplo de resultado obtido pelo Chronos nessa etapa está ilustrado na Figura 16.3. Os resultados destes testes servirão para diagnosticar eventuais problemas nos relés e indicar a necessidade de manutenção. Eles se encontram detalhados na Seção 4.5.

Figura 16.3 – Tela da IHM no estado de levantamento de curva.



Fonte: Autoria própria.

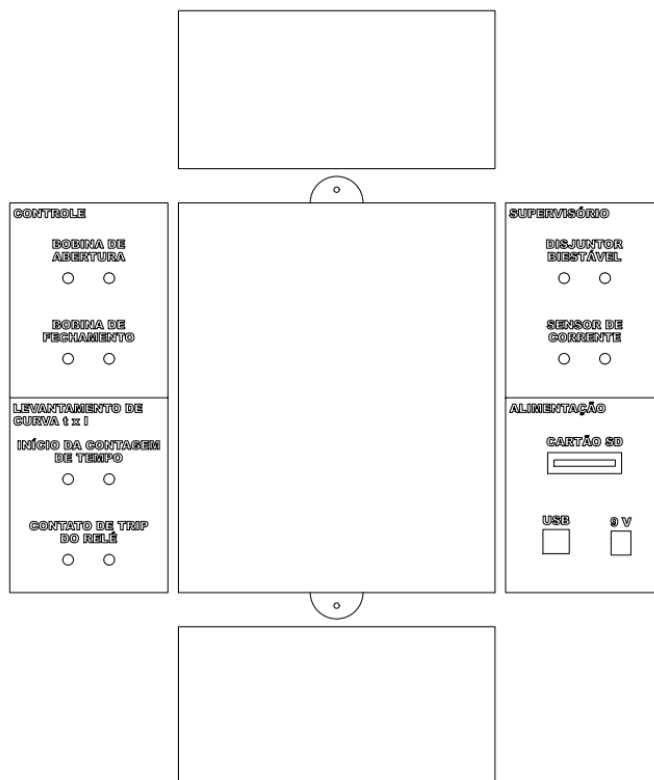
4.3 Modelagem da caixa

A modelagem da caixa destinada a abrigar diversos componentes eletrônicos, desenvolvida no AutoCAD, revelou-se um processo importante no projeto. O cuidadoso planejamento e execução dessa estrutura resultaram em uma solução eficiente para acomodar os diferentes elementos, assegurando tanto a funcionalidade quanto a estética do dispositivo final.

Ao empregar o AutoCAD, uma ferramenta de design amplamente reconhecida, alcançamos a capacidade de criar uma representação precisa da caixa em duas dimensões. Durante esse processo, não apenas definimos as dimensões essenciais para a acomodação dos componentes eletrônicos, mas também detalhamos visualmente os pontos estratégicos para a passagem de fios e conexões externas. Ao término deste processo, foram obtidos os seguintes resultados, representados nas Figuras 17.1 e 17.2.

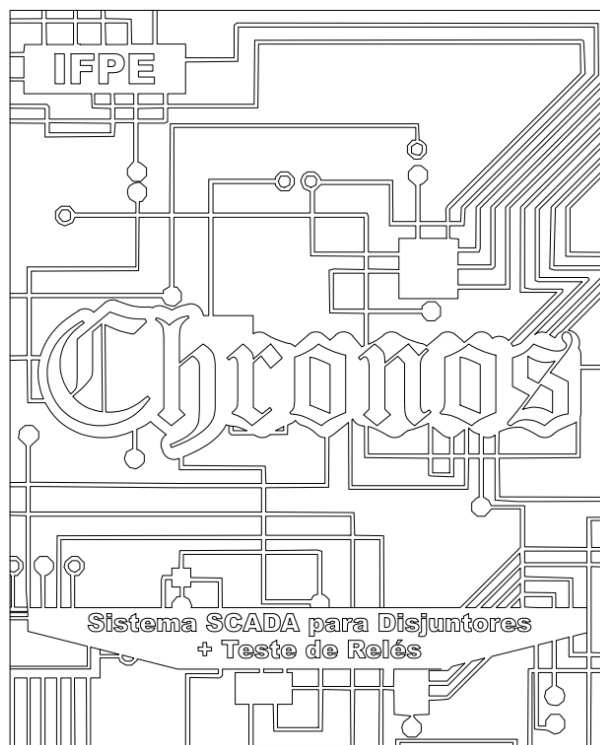
A criação de suportes usando o AutoCAD e o corte com uma máquina CNC a laser é uma abordagem eficiente e econômica em comparação com a impressão 3D. Este método proporcionou uma solução simplificada e robusta, reduzindo os custos associados à utilização de filamento em impressoras 3D. A economia de filamento, aliada à rapidez e precisão do corte a laser, destaca a eficiência desse processo, especialmente para estruturas simples como suportes em MDF. Essa abordagem é particularmente valiosa em cenários onde a simplicidade e a economia de custos são fatores cruciais. Na Figura 17.3 é mostrado o suporte do Chronos para fixação na bancada.

Figura 17.1 – Vistas 2D das laterais e fundo da caixa.



Fonte: Autoria própria.

Figura 17.2 – Vista 2D da parte frontal da caixa.



Fonte: Autoria própria.

Figura 17.3 – Suporte.

Fonte: Autoria própria.

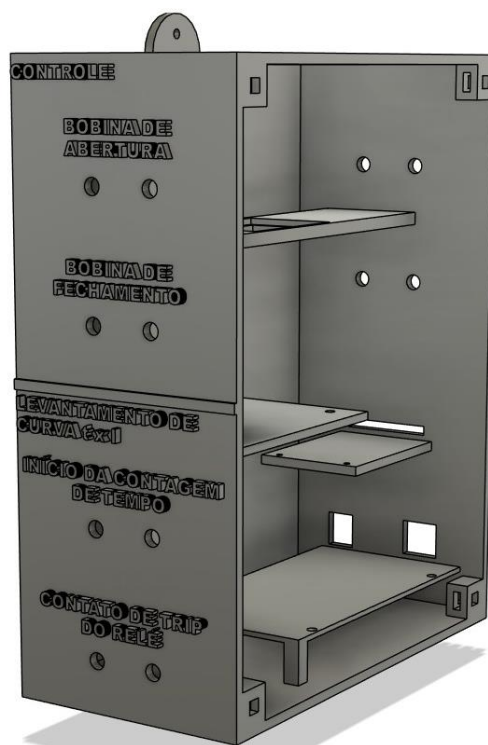
Ao concluir a modelagem, o desenho foi exportado no formato DXF, escolhido devido à compatibilidade com o software Fusion 360, também desenvolvido pela Autodesk, proporcionando uma transição suave entre as etapas de design e produção. Essa integração entre ferramentas otimiza o fluxo de trabalho, facilitando ajustes finos e garantindo a eficiência no processo de fabricação da caixa.

Após concluir a modelagem em 2D, o arquivo foi pré-separado conforme as vistas da caixa. No Fusion 360, procedeu-se à criação de um sólido tridimensional, utilizando algumas ferramentas nativas do próprio software para essa finalidade. Essa transição para o ambiente tridimensional permitiu a visualização mais realista da caixa.

Dentro do Fusion 360, ferramentas como extrusão, chanfro e arredondamento foram empregadas para transformar o desenho 2D em uma representação tridimensional da caixa. Ao concluir essa etapa, foram alcançados os resultados pretendidos, os quais estão apresentados nas Figuras 18.1, 18.2 e 18.3.

Após a conclusão da fase de design no software Fusion 360, deu-se início ao processo de fatiamento da peça, utilizando o software Cura para a preparação dos arquivos destinados à impressão. Destaco que a escolha do filamento ABS foi cuidadosamente considerada, visando otimizar a qualidade e resistência do caixa e tampa do Chronos. O processo de impressão é ilustrado na Figura 18.4, onde para a produção das duas peças utilizou-se uma impressora 3D GTMax 3D, modelo A3V2. Conforme evidenciado nas Figuras 18.5 e 18.6, temos a caixa finalizada, juntamente com a tampa, demonstrando o êxito deste procedimento. Esse sucesso é refletido na obtenção de uma impressão de alta qualidade, caracterizada pela resistência mecânica essencial para o manuseio e montagem dos componentes do Chronos.

Figura 18.1 – Modelagem 3D da caixa (vista esquerda).



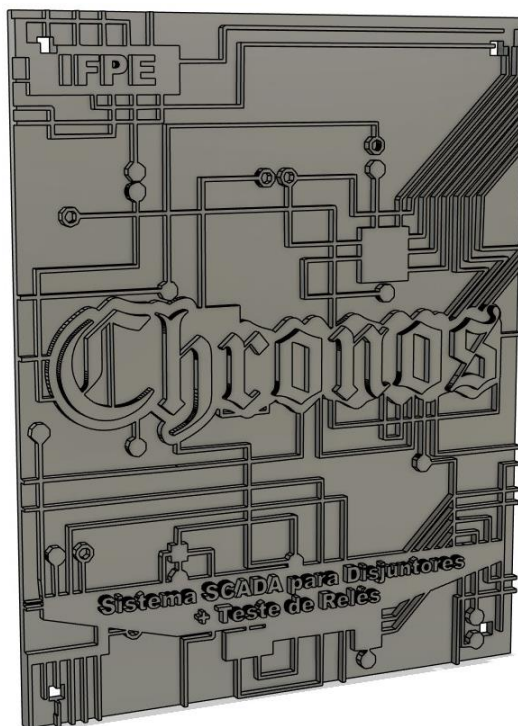
Fonte: Autoria própria.

Figura 18.2 – Modelagem 3D da caixa (vista direita).



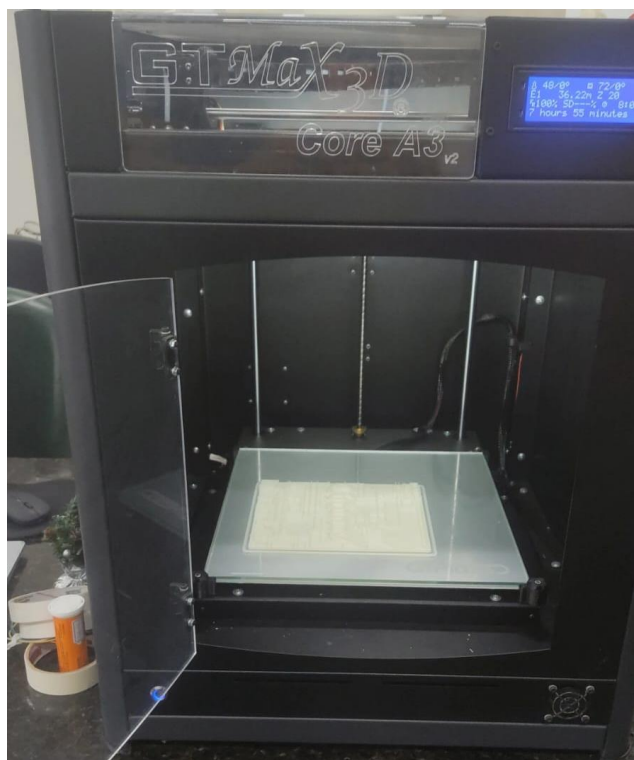
Fonte: Autoria própria.

Figura 18.3 – Modelagem 3D da tampa da caixa.



Fonte: Autoria própria.

Figura 18.4 – Processo de impressão.



Fonte: Autoria própria.

Figura 18.5 – Caixa do Chronos.



Fonte: Autoria própria.

Figura 18.6 – Caixa do Chronos.



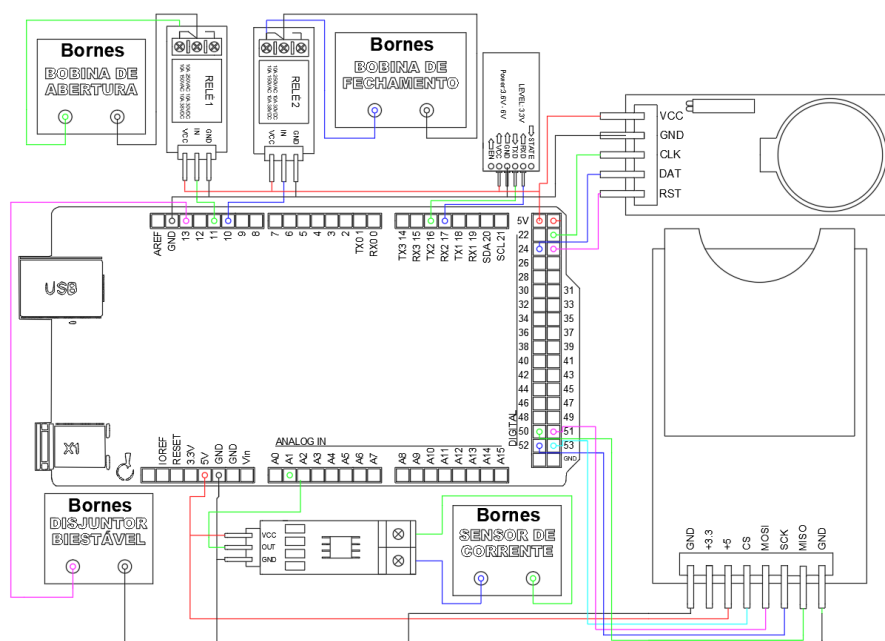
Fonte: Autoria própria.

4.4 Ligações internas dos componentes

Internamente ao Chronos, a conexão de cada dispositivo aos seus respectivos pontos no Arduino foi realizada conforme Figura 19.

Com o objetivo de integrar os equipamentos de proteção (disjuntor biestável e o relé digital) à bancada de medidas elétricas do Campus Pesqueira, foram utilizados sensores e relés auxiliares eletromecânicos. Estes últimos são responsáveis por acionar os contatos das bobinas de abertura e fechamento do disjuntor. Além desses, foram incorporados outros dispositivos.

Figura 19 – Esquema de ligação interna do Chronos.



Fonte: Autoria própria.

4.5 Testes de levantamento de curva do relé de sobrecorrente

Com os equipamentos devidamente interligados, iniciaram-se os testes para verificação do desempenho global do sistema. Os procedimentos de teste foram planejados para abranger diferentes cenários e condições de operação, permitindo avaliar a resposta do sistema a sobrecorrentes simuladas e verificar a atuação adequada do relé digital.

Durante os testes, surgiram alguns problemas de interferência no funcionamento do Chronos. Os ajustes foram realizados conforme necessário, refinando as configurações do sistema e garantindo o correto funcionamento operacional. Os resultados obtidos nos testes permitiram validar a operacionalidade do sistema SCADA embarcado desenvolvidos neste trabalho.

A Figura 20 retrata o momento da integração do Chronos com a bancada de teste e o relé digital da Pextron, seguindo o esquema de ligação proposto na Figura 11, com o objetivo de medir os tempos de atuação do relé digital Pextron. Os principais ajustes do relé de sobrecorrente temporizado para este teste foram: curva extremamente inversa (parâmetros $K = 80$ e $\alpha = 2$), dial de tempo de 0,07 e a corrente de pick-up de 2,5 A.

Figura 20 – Chronos integrado a bancada de teste.



Fonte: Autoria própria.

Procedeu-se então a medição dos tempos de atuação do relé para correntes de 3, 4, 5, 6 e 8 A, sendo feitos quatro ensaios para cada valor de corrente, cujos resultados são apresentados na Tabela 3. Nota-se um alto grau de repetibilidade (precisão) nos valores medidos, o que sugere uma robustez do processo de medição proposto neste trabalho.

Tabela 3 – Tempos de atuação do relé 51 medidos e teóricos.

Corrente (A)	t_1 (s)	t_2 (s)	t_3 (s)	t_4 (s)	$t_{\text{médio}}$ (s)	$t_{\text{teórico}}$ (s)	Erro	Erro (%)
3	11,942	12,432	12,880	12,401	12,416	12,727	0,311	2,4
4	4,060	4,196	4,198	4,273	4,197	3,589	0,608	16,9
5	1,927	1,916	1,919	1,932	1,923	1,866	0,057	3,1
6	1,283	1,287	1,290	1,292	1,285	1,176	0,109	9,3
8	0,665	0,662	0,680	0,663	0,664	0,606	0,058	9,6

Fonte: Autoria própria.

Após a obtenção dos dados, procedeu-se a realização da média desses valores, os quais foram comparados com os valores teóricos calculados via Equação 1. Este processo teve como objetivo calcular o erro percentual, conforme Equação 1 e evidenciado na última coluna da Tabela 3.

Conforme indicado no Tabela 2, para as curvas de tempo dependente é adotado um erro de $\pm 2,5\%$ do valor medido ou $\pm 35\text{ms}$, adotando-se o critério que resultar em um maior valor. Ao analisar os dados apresentados na Tabela 3, observa-se que, para correntes de 3 A, o erro está abaixo do limite considerado aceitável. No entanto, para as demais correntes, especialmente para 4 A, o erro ultrapassa os 16%. Esses resultados sugerem a necessidade de uma manutenção no relé, considerando que os erros estão além das expectativas estabelecidas pelo fabricante.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O desenvolvimento deste projeto representa uma jornada marcante para a formação em engenharia elétrica. Ao longo desta pesquisa, os objetivos estabelecidos foram atingidos, proporcionando percepções valiosas sobre a integração de tecnologias para aprimorar o controle e a supervisão de sistemas elétricos.

A implementação do algoritmo no Arduino IDE, aliada à construção da Interface Homem-Máquina (IHM) utilizando o MIT App Inventor, mostrou-se uma abordagem eficaz e acessível. A flexibilidade dessas ferramentas permitiu a criação de uma IHM intuitiva, conectada diretamente ao Arduino, proporcionando controle remoto e visualização de dados de maneira eficiente.

Os testes realizados, abrangendo desde o controle manual até o levantamento de curvas de corrente, demonstraram a robustez do sistema. A resposta precisa às medições de tempo de atuação mostrou-se com boa precisão, validando a topologia proposta neste trabalho para medição de tempos de atuação dos relés.

A modelagem e construção da caixa para abrigar os componentes eletrônicos revelou-se uma etapa desafiadora, na qual se prezou pela estética do protótipo e pela organização e segurança dos componentes.

Como perspectivas futuras, vislumbra-se a ampliação do sistema, contemplando a integração de mais dispositivos e o desenvolvimento de funcionalidades adicionais. A exploração de microprocessadores mais avançados, com maior capacidade de processamento e recursos inovadores surge como uma possibilidade promissora para aprimorar a eficiência e a versatilidade do sistema.

Além disso, considera-se a implementação de uma base de dados online, proporcionando armazenamento remoto e acesso facilitado aos dados coletados. Pretende-se também implementar um conjunto de regras no software para permitir registros de oscilografia, ou seja, regras para selecionar eventos que irão habilitar a gravação das grandezas em janelas tempos importantes, a fim de prover um histórico

para análise de oscilogramas de anormalidades e distúrbios que afetam a operação de sistemas elétricos.

Será realizada uma comparação, sob condições idênticas, entre os tempos medidos pelo Chronos e os tempos registrados por uma caixa de testes profissional. Essa análise visa avaliar a acurácia do Chronos.

Em síntese, este projeto não apenas alcançou seus objetivos, mas também abriu portas para investigações mais avançadas e aplicações práticas no campo da automação e controle de sistemas elétricos. Agradeço a todos os envolvidos nesta jornada e espero que este trabalho contribua para o avanço contínuo nesse domínio empolgante da engenharia elétrica.

REFERENCIAS

ARDUINO. **Arduino Mega 2560 Rev3**. 2023. Disponível em: <https://docs.arduino.cc/hardware/mega-2560>. Acesso em: 13 de agosto de 2023.

BLUM, Jeremy. **Explorando o Arduino: Técnicas e ferramentas para mágicas de engenharia**. Alta Books Editora, 2018.

DPS Telecom, **How Do SCADA Systems Work?** 2022. Disponível em: <https://www.dpstele.com/scada/how-systems-work.php>. Acesso em: 15 de novembro de 2023.

HONEYWELL. **Hall Effect Sensing and Application**.2016. Disponível em: <https://www.rsp-italy.it/Electronics/Databooks/Honeywell/>. Acesso em: 22 de setembro de 2023.

MAMEDE, João Filho. **Manual de equipamentos elétricos**. 3 ed. RIO DE JANEIRO: LTC, 2011.

MAMEDE, João Filho; MAMEDE, Daniel Ribeiro. **Proteção de sistemas elétricos de potência**. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

MCROBERTS, Michael. **Arduino básico**. Novatec Editora, 2018.

MONK, Simon. **30 Projetos com Arduino-2**. Bookman Editora, 2014.

MONK, Simon. **Projetos com Arduino e Android: Use seu Smartphone ou Tablet para Controlar o Arduino-Série Tekne**. Bookman Editora, 2014.

MORAES, Cícero Couto; CASTRUCCI, P.L. **Engenharia de automação industrial**. Rio de Janeiro: LTC, 2001.

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. Disponível em: https://www.sba.org.br/open_journal_systems/index.php/cba/article/view/1085. Acesso em: 11 de novembro de 2023.

PEXTRON. **ANSI Tabela de numerações e funções**. São Paulo: 2023. Disponível em: <https://www.pextron.com/arquivos/Tabela%20ANSI%201d%20v002.pdf>. Acesso em: 19 de outubro de 2023.

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

PINTO, M. **Energia Elétrica: geração, transmissão e sistemas interligados**. Rio de Janeiro: LTC, 2018.

ROSÁRIO, João Maurício. **Princípios de mecatrônica**. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2005.

SENAI, Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial. **Sistemas lógicos programáveis**. Rio Grande do Sul: Departamento Regional do Rio Grande do Sul, 2013. (Automação Industrial). Disponível em: <https://toaz.info/doc-view-2>. Acesso em: 14 de outubro de 2023.

WEG, **Contatores CWB**. Disponível em: https://www.weg.net/catalog/weg/BR/pt/Automa%C3%A7%C3%A3o-e-Controle-Industrial/Controls/Partida-e-Prote%C3%A7%C3%A3o-de-Motores/Contatores/Pot%C3%Aancia/Contatores-CWB/Contatores-CWB/p/MKT_WDC_BRAZIL_PRODUCT_CONTACTOR_CWB. Acesso em: 01 de dezembro de 2023.

ZANETTA JR, Luiz Cera. **Fundamentos de sistemas elétricos de potência**. Editora Livraria da Física, 2006.