

SISTEMA SUPERVISÓRIO REMOTO PARA RELÉ ELETRÔNICO UTILIZADO NA PROTEÇÃO DE MOTORES ELÉTRICOS

FUJITA, Henrique de Souza
Engenharia Mecatrônica
Instituto Federal de Santa Catarina
Criciúma, Santa Catarina, Brasil
henrique.sf@aluno.ifsc.edu.br

UGGIONI, Périson Pavei
Professor Orientador
Instituto Federal de Santa Catarina
Criciúma, Santa Catarina, Brasil
perison.uggioni@ifsc.edu.br

Resumo — Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um sistema supervisório remoto para um relé eletrônico utilizado na proteção de motores elétricos de indução trifásicos. O projeto combina tecnologias de *hardware* e *software* para fornecer o monitoramento remoto ao sistema, utilizando o microcontrolador ATmega2560 como componente principal para o processamento de dados do relé eletrônico e o protocolo de comunicação LoRa para troca de dados com o supervisório. A metodologia inclui a atualização dos sensores, placa de controle e comunicação do relé eletrônico utilizado como base e a implementação de um sistema supervisório baseado no microcomputador Raspberry Pi e na linguagem de programação Python. Os resultados demonstraram que o relé eletrônico opera eficientemente tanto em modo local quanto remoto, garantindo a proteção do motor contra sobrecarga, subtensão e falta de fase. Além disso, o sistema supervisório proporcionou de forma intuitiva e eficiente a visualização das informações do motor, sendo útil como recurso didático no Instituto Federal de Santa Catarina, campus Criciúma.

Palavras-Chave — *Supervisório, Raspberry Pi, Relé Eletrônico, LoRa, Proteção de motores elétricos.*

I. INTRODUÇÃO

O advento da automação industrial trouxe muitas vantagens para os meios de produção: aumento da segurança para os trabalhadores, melhor padronização, confiabilidade nos produtos e crescimento da produtividade [1].

Dentro da automação industrial, a escolha dos componentes certos é essencial para garantir eficiência e confiabilidade nos processos produtivos. Entre esses componentes, os motores elétricos desempenham um papel fundamental, pois são responsáveis por transformar energia elétrica em movimento mecânico, acionando desde pequenas engrenagens até grandes sistemas automatizados. Sua presença é indispensável em máquinas industriais, robôs e esteiras transportadoras, contribuindo diretamente para a padronização e o aumento da produtividade

Motores elétricos utilizam campos magnéticos que atuam entre si para converter energia elétrica em energia mecânica [2]. Segundo Souza [3], “essa categoria de motor é a mais usada no mundo, pois possui atributos como: robustez, versatilidade e baixo custo”. Ainda segundo Souza [3], “esse equipamento é utilizado em diversas aplicações como: acionamento de máquinas na indústria, dispositivos eletroeletrônicos, brinquedos, transportes, etc.”.

A proteção de motores elétricos tem sido objeto de análise tanto internacional quanto nacionalmente, devido à importância dos equipamentos no correto funcionamento dos

setores produtivos. Dessa forma, com a devida proteção dos motores elétricos, é possível evitar danos ao equipamento, assim como demasiadas interrupções no andamento da produção [4].

Com a evolução da tecnologia e a união dos processos dentro das indústrias, foi possível alcançar sistemas de produção mais inteligentes, envolvendo a integração de tecnologias físicas e digitais, passando por todas as etapas de um processo. Por conseguinte, houve um impacto muito positivo, gerando maior eficiência e produtividade [5].

Portanto, para a evolução dos processos de proteção de motores elétricos, faz-se necessária a integração dos equipamentos utilizados para a leitura e controle com os sistemas de produção inteligentes, possibilitando o controle e supervisão dos motores elétricos de forma remota e integrada.

O equipamento a ser utilizado como base no presente trabalho foi inicialmente desenvolvido por Souza [3] em seu trabalho de conclusão de curso. O dispositivo consiste em um relé eletrônico utilizado para proteção de motores elétricos trifásicos, que possui o objetivo de substituir os relés de sobrecarga térmicos existentes.

O principal componente utilizado no equipamento foi o microcontrolador ATmega328P do fabricante Atmel, que é responsável pelo processamento dos dados recebidos pelos sensores, botões e chaves, além de realizar a interface de comunicação com o circuito de comando. Utilizou-se os sensores de corrente elétrica modelo SCT-013 do fabricante YHDC e, para a detecção de falta de fase/subtensão, desenvolveu-se um circuito eletrônico baseado em um retificador trifásico de meia onda não controlado que se conecta ao circuito do motor, permitindo comparar a tensão de saída do retificador com um valor de referência.

O sistema de medição de corrente elétrica presente no relé eletrônico apresentou resultados satisfatórios, segundo Souza [3] não apresentou erros significativos, assim como o sistema de medição de tensão elétrica. O conjunto de proteção contra sobrecarga embarcado no equipamento, por meio de testes, teve resultados mais eficientes quando sujeito a um tempo de disparo mais rápido, ou seja, mais próximo do tempo determinado pela curva de disparo.

Em contrapartida, o sistema de proteção contra falta de fase e subtensão não atuou de forma esperada nos testes práticos: apontava falta de fase em instantes em que ela não estava em falta, embora nas simulações feitas ele tenha apresentado funcionamento adequado. Segundo Souza [3], o circuito deve ser redimensionado para que o sinal que corresponde à presença das fases no sistema seja próximo a

zero, apesar de afirmar que o *hardware* foi corretamente desenvolvido, pois as simulações realizadas obtiveram sucesso.

O supervisor foi desenvolvido utilizando o *software* livre ScadaBR, que possibilita a conexão da interface física utilizando o protocolo ModBus, através da rede RS485. O supervisor reconheceu o módulo de comunicação e obteve as variáveis do processo, porém, após a primeira atualização do *software*, as variáveis não eram mais recebidas, evidenciando problemas de comunicação entre os componentes do sistema.

Portanto, para o correto funcionamento do sistema supervisorio proposto neste trabalho, faz-se necessária a correção dos erros de proteção contra falta de fase, além da realização de testes de subtensão.

Este trabalho tem como objetivo a elaboração de um sistema supervisorio remoto para relé eletrônico utilizado na proteção de motores elétricos de indução trifásicos, equipamento que se encontra no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina (IFSC), campus Criciúma. O monitoramento remoto acrescenta ao relé eletrônico novas funcionalidades, servindo como importante recurso didático para o laboratório de Acionamentos e Máquinas Elétricas, além de fornecer um sistema supervisorio de código aberto desenvolvido na linguagem de programação Python, em substituição ao ScadaBR, e com sistema de comunicação sem fio e independente via LoRa.

Sendo assim, para cumprir o objetivo geral, faz-se necessário realizar as seguintes etapas: a atualização do *hardware* e *software* do relé eletrônico, montagem e criação do *hardware* e *software* do sistema supervisorio, validação do projeto completo e a confecção de documentação para utilização e manutenção dos equipamentos.

II. METODOLOGIA

O projeto foi composto por dois módulos: relé eletrônico e sistema supervisorio. O primeiro realiza a medição de tensão e corrente elétrica do motor trifásico. Caso seja detectado falta de fase, subtensão ou sobrecarga, o mesmo é desligado (contato auxiliar do relé eletrônico em série com o circuito de comando). O relé eletrônico, por meio de seu microcontrolador, realiza o processamento dos dados obtidos pelos sensores de corrente SCT-013 e tensão ZMPT101K e os transmite ao sistema supervisorio utilizando o módulo de transmissão serial LoRa, além de receber comandos do sistema supervisorio, quando o modo de funcionamento está configurado para remoto.

Por sua vez, o sistema supervisorio recebe, através do módulo LoRa, as variáveis necessárias para supervisão do equipamento pelo usuário, como os valores de tensão e corrente elétrica medidos pelos sensores e valores de limitação de corrente de sobrecarga e tensão de subtensão ajustados pelo usuário, exibindo-as em uma interface gráfica. Há a possibilidade de realizar o ajuste das variáveis monitoradas, localmente, via potenciômetros, botões e chaves localizadas na estrutura do relé ou remotamente via interface do supervisorio. Para isso, há uma chave de seleção entre os modos de funcionamento.

A Figura 1 ilustra o diagrama de blocos do projeto desenvolvido.



Figura 1: Diagrama de blocos do projeto

Com relação ao equipamento base utilizado para o desenvolvimento deste projeto, mantiveram-se a estrutura do relé e os componentes de interface com o usuário, assim como o sensor de corrente e o circuito de condicionamento para o sinal de saída do referido sensor. Dessa forma, houve a troca do sensor de tensão, placa de controle, módulo de comunicação e desenvolveu-se um novo sistema supervisorio.

A. Atualização do hardware do relé eletrônico

1) Leitura da tensão elétrica

Para aumentar a confiabilidade do sistema de medição de tensão elétrica, optou-se por utilizar um sensor comercial. Após pesquisas de sensores de tensão alternada disponíveis no mercado brasileiro, selecionou-se o modelo ZMPT101K da fabricante Qingxian Zeming Langxi Electronic, com a capacidade de medição de tensão alternada de até 250 V e tensão de saída de 0 a 5 V, que foi conectada a uma porta analógica do microcontrolador para realização da leitura. A alimentação do sensor é feita com tensão contínua de 5 V, sendo possível alimentá-lo utilizando um dos pinos do microcontrolador ou utilizando uma fonte externa [11]. A Figura 2A exibe a vista superior do sensor, no qual seus conectores em verde são ligados através de fios/cabos às fases do motor, já a Figura 2B apresenta a vista inferior do dispositivo, onde é possível observar o esquema de ligação do sensor.

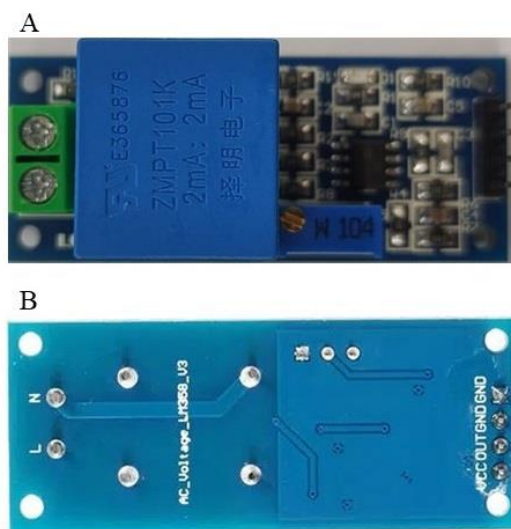


Figura 2: Sensor de tensão ZMPT101K

2) Protocolo de comunicação

Para a comunicação sem fio entre o relé eletrônico e o software supervisorio, selecionou-se um módulo de transmissão de rádio frequência LoRa (*Long Range*), que consiste em uma nova tecnologia que recentemente evoluiu e está ganhando popularidade em sistemas embarcados alimentados por bateria e que necessitam transferir uma

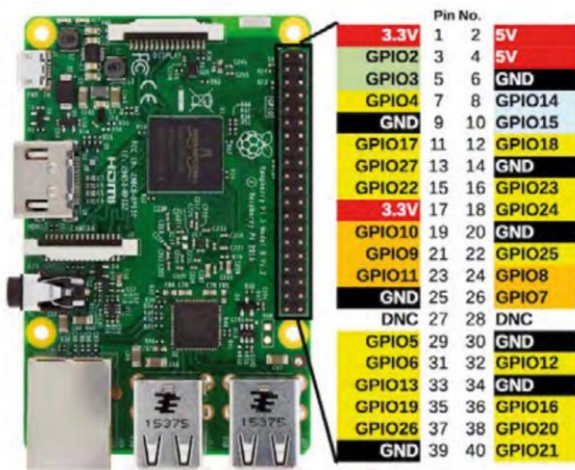


Figura 5: Raspberry Pi 3 modelo B

A placa Raspberry Pi 3 modelo B possui 26 pinos GPIOs, ou seja, têm a função de enviar e receber dados de outros módulos; quatro pinos de fornecimento de energia elétrica, sendo dois de 5 V e dois de 3,3 V; dois pinos DNC (*Do Not Connect*), que permitem alterações diretamente na memória EEPROM (*Electrically-Erasable Programmable Read-Only Memory*) por meio de pulsos elétricos e possuem oito pinos terra [7].

D. Software do sistema supervisorio

Para a criação do *software* do sistema supervisorio, que contém a interface gráfica para interação com o usuário e as funções de envio e recepção de dados, selecionou-se a biblioteca Tkinter. Essa ferramenta é habitualmente utilizada para criação de interfaces gráficas para programas na linguagem Python, sendo muito útil para a criação de interfaces simples até as mais complexas [8].

Dessa forma, criaram-se as funções para comunicação e funcionamento do sistema supervisorio utilizando a linguagem de programação Python, que é suportada inicialmente pela plataforma Raspberry Pi e a biblioteca para serial, para comunicação sem fio utilizando o módulo de radiofrequência LoRa.

E. Documentação

Para atingir o objetivo de ser um equipamento didático para estudantes do IFSC campus Criciúma, necessitou-se a criação de dois importantes documentos: manual de utilização/manutenção e apostila de circuitos/programação.

O manual de utilização/manutenção contém seções com informações essenciais e complementares para orientação dos usuários sobre como utilizar o equipamento de forma segura e eficaz, além de instruções para a realização de manutenções.

A apostila de circuitos/programação consiste em um documento com o projeto de todos os circuitos eletroeletrônicos e sistemas de *hardwares* e *softwares* existentes no equipamento como um todo, para auxiliar em futuras reposições de partes com defeitos e em possíveis melhorias e trabalhos futuros.

III. DESENVOLVIMENTO

Para a realização deste trabalho, separou-se o desenvolvimento em dois grupos inicialmente independentes: relé eletrônico e sistema supervisorio.

A. Relé eletrônico

1) Placa eletrônica para aquisição e processamento de sinais

Para a realização do projeto e confecção da placa eletrônica do relé de proteção, testou-se o circuito de condicionamento para o sensor de corrente em bancada, utilizando uma placa de prototipação. Dessa forma, o circuito foi validado e prosseguiu-se para o projeto da placa eletrônica final.

Os sensores de tensão, relé de interface com o circuito de comando do motor, o circuito de condicionamento do sinal de saída do sensor de tensão e a placa microcontrolada foram integrados em uma placa eletrônica que se encontra no interior da estrutura do relé eletrônico. Pode-se observar, na Figura 6, o projeto e montagem destes componentes do trabalho.



Figura 6: Projeto da placa eletrônica

Os blocos em verde, encontrados na área superior esquerda e lateral direita da imagem, compõem os conectores de alimentação da placa eletrônica e dos componentes de interface com o usuário, como potenciômetros, botões e chaves. Em azul, identificados como (a) na Figura 6, situam-se os três sensores de tensão utilizados, acompanhados, logo acima (b), do relé de interface com o circuito de comando do motor. Ao centro (c), localiza-se a placa Mega 2560 Pro Mini, utilizada para o processamento dos dados e controle. Acima dos sensores de tensão e da placa Mega, em (d) estão os circuitos de condicionamento para o sinal de saída dos sensores de corrente elétrica, que são compostos pelos resistores, capacitores e pelo circuito integrado LM324. Por fim, na área inferior direita e lateral direita, em (e), encontram-se os 15 terminais de conexão entre os componentes de interface com o usuário, localizados no exterior da estrutura do relé, com a placa microcontrolada.

2) Componentes de interface com o usuário

Para possibilitar ao usuário do relé eletrônico realizar o controle e verificação localmente, utilizou-se os componentes disponíveis na estrutura do relé.

Para a leitura da tensão e corrente elétrica das três fases do motor, existem seis conectores disponíveis na área frontal do relé. Para a realização da interface com o circuito de comando do motor trifásico, são disponibilizados três encaixes: porta de entrada, porta de saída normalmente aberta e normalmente fechada.

Com o objetivo de possibilitar o ajuste local da tensão de subtensão, corrente de sobrecarga e tempo para sobrecarga, existem três potenciômetros encontrados também na área

frontal. Por fim, há o botão de rearme manual do motor e duas chaves elétricas: uma para seleção de controle local ou remoto e outra para selecionar se o rearme será de forma manual ou automática.

3) Software do relé eletrônico

Para a detecção de sobrecarga no motor, utilizou-se a curva de desarme apresentada na Figura 7 [9].

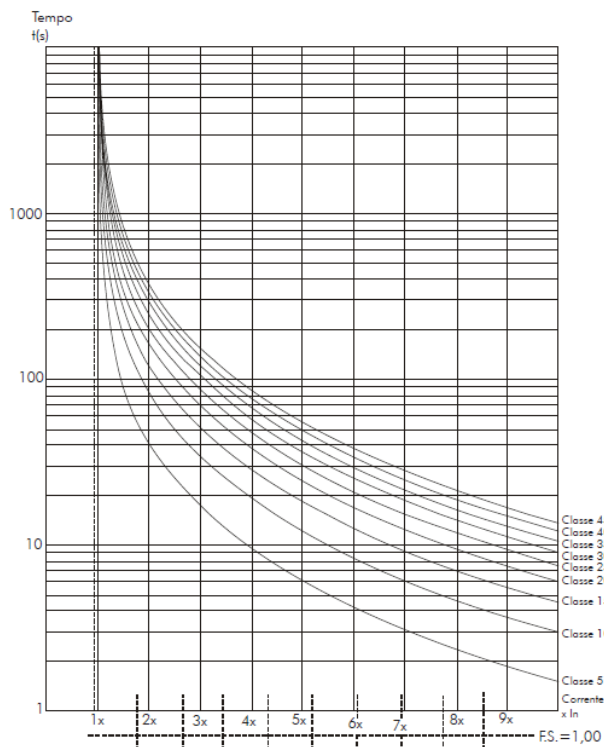


Figura 7: Classes de disparo para motor a frio, IEC 60947-4-1

Para a realização da proteção contra sobrecarga no motor, utilizou-se a curva de classe 10, a qual é utilizada para motores com tempo de partida de até dez segundos, conforme a norma IEC 60947-4-1 [3]. Sendo assim, quanto maior é a corrente elétrica medida pelos sensores e menor é o valor de corrente máxima ajustada, o tempo até a atuação do relé diminui.

A fórmula utilizada no *software* do relé pode ser vista na Equação 1, nos quais os valores das constantes utilizadas no modelo matemático foram reproduzidos da literatura [3].

$$T = \frac{k \cdot T_{ms}}{M^{\alpha-1}} \quad (1)$$

Onde: T = Tempo de disparo (s)

k = 80 (Constante do relé)

T_{ms} = 3,6 (Curva de temporização)

$$M = \frac{\text{Corrente medida}}{\text{Corrente ajustada}}$$

α = 2 (Constante exponencial)

Para a proteção contra subtensão e falta de fase, optou-se por utilizar os parâmetros escolhidos pelo usuário, o qual pode ajustar a tensão para subtensão (0 a 200 Vac) e o tempo para subtensão (0 a 10 segundos).

B. Sistema supervisorio

1) Interface gráfica

Desenvolveu-se a interface gráfica de forma a se assemelhar a sistemas supervisorios usuais, com a inclusão de um histórico de alarme, elementos gráficos para acompanhamento de variáveis e componentes de controle, como botões. A Figura 8 exibe a interface gráfica desenvolvida.

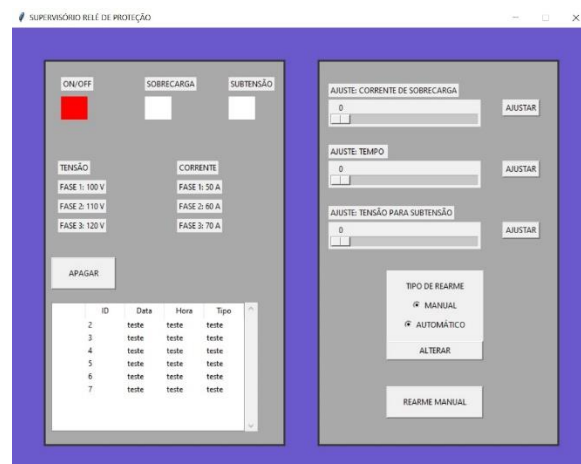


Figura 8: Interface gráfica do supervisorio

A disposição dos elementos foi separada em dois grupos: supervisão, à esquerda, e controle, à direita. Dessa forma, o sistema se torna mais intuitivo ao usuário. Em seguida, são explicadas as funções separadamente. Sendo a primeira, o recebimento de informações do motor via serial.

2) Funções de comunicação serial

Para receber e tratar os dados, foi estabelecido uma lógica de comunicação serial via protocolo LoRa, na qual o microcontrolador presente no relé eletrônico envia um número inteiro de seis dígitos. Quando o Raspberry Pi recebe esse número, uma função o transforma em um vetor e, utilizando os dois primeiros dígitos como identificador do dado e os quatro últimos dígitos como valores a receber, o *software* atualiza a interface gráfica e o histórico de alarmes. Exemplo de número enviado: 211205. O primeiro dígito informa que se trata de uma leitura de tensão, o segundo dígito informa que o dado é referente à primeira fase do motor, os três dígitos seguintes são os valores inteiros da tensão elétrica medida e o último dígito comunica o valor decimal da tensão elétrica. No exemplo, o valor de tensão elétrica da primeira fase do motor equivale a 120,5 V.

3) Histórico de alarmes

Para a criação do histórico de alarmes, que possui a função de registrar os momentos em que o relé eletrônico atuou, utilizou-se o banco de dados relacional SQLite.

Os bancos de dados relacionais, conhecidos pela utilização da linguagem de programação SQL (*Structured Query Language*), a qual em português significa Linguagem de Consulta Estruturada [10], são utilizados por diversos profissionais em diferentes áreas. Como os dados gravados no histórico de alarmes constituem uma tabela, o tipo de banco de dados mencionado se torna uma solução viável.

Cada linha do banco de dados representa um evento de falta de fase/subtensão ou sobrecarga. Como pode ser visto na

Figura 8, os dados gravados são: identificador, data, horário e o motivo da atuação do relé. Exemplo: para a primeira atuação do relé, o identificador será 1, a data é gravada no padrão DD/MM/AAAA, o horário é gravado no padrão HH:MM:SS e o tipo será sobrecarga ou subtensão.

4) Comunicação LoRa

Conectou-se o módulo LoRa ao Raspberry Pi utilizando fios do tipo jumper, com o objetivo de tornar a comunicação entre os equipamentos mais simples de desfazer a conexão, pois assim, os alunos e professores do IFSC Criciúma têm a possibilidade de utilizar os componentes para diversas aplicações e, quando necessário, voltar a montar esse sistema de comunicação novamente.

IV. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A. Relé eletrônico

A estrutura frontal do relé eletrônico, montada em parte sobre uma placa de circuito impresso e parte na área exterior do invólucro, pode ser vista na figura a seguir.

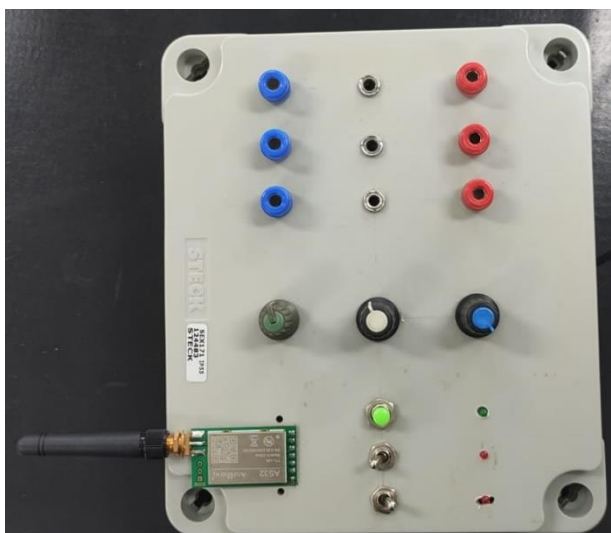


Figura 9: Parte frontal do relé eletrônico

A Figura 9 exibe a parte frontal do relé eletrônico, o qual possui as mesmas dimensões externas e mesmos componentes de interface com o usuário, em comparação com o equipamento base. A diferença particular com o equipamento anterior, se estabelece apenas no módulo de comunicação com o sistema supervisor, que neste trabalho utiliza o módulo de radiofrequência LoRa. Na Figura 9, na área inferior esquerda é o local em que se localiza o módulo de comunicação LoRa, o qual foi posicionado em uma placa de prototipagem para os testes laboratoriais.

Os conectores em vermelho encontrados na Figura 9, são os responsáveis por receber a tensão elétrica de cada fase do motor, assim como os conectores em cinza são responsáveis por receber o sinal de saída de cada sensor de corrente. Já os conectores em azul, compõem as saídas do relé de interface com o circuito de comando do motor. Os potenciômetros em verde, branco e azul desempenham o papel, respectivamente, de ajuste de tempo para subtensão, corrente elétrica de sobrecarga e tensão elétrica para subtensão. Utiliza-se o botão verde para rearme manual e as chaves para seleção de modo de rearme manual e automático, ao lado do botão de rearme, e

seleção de modo de operação de local para remoto, encontrada na parte mais externa da interface frontal.

B. Sistema supervisor

O hardware completo do sistema supervisor utilizado nos testes práticos pode ser visto na figura a seguir.

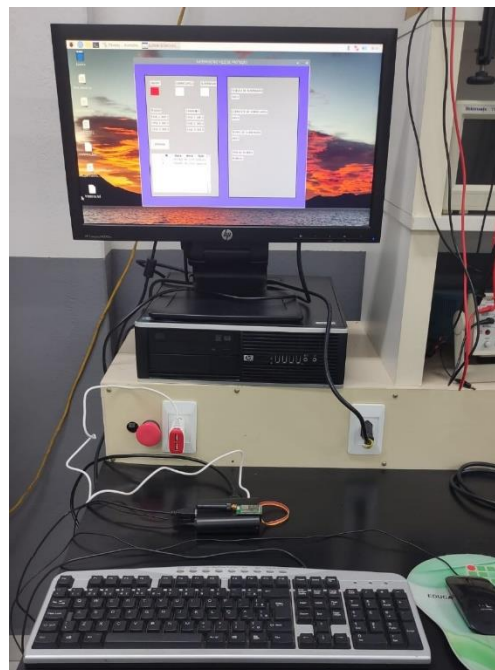


Figura 10: Hardware completo do sistema supervisor

A Figura 10 exibe todos os equipamentos necessários para a utilização do sistema supervisor. Para visualizar e supervisionar a interface gráfica, um monitor e um mouse ou teclado são necessários.

A interface gráfica do sistema supervisor recebeu algumas mudanças devido ao funcionamento da comunicação via LoRa pelo microcontrolador utilizado no relé eletrônico, atuando como sistema de monitoramento. Sendo assim, alterou-se a interface para o sistema supervisor apenas exibir as variáveis do motor, os ajustes feitos nos limites impostos pelo usuário e o histórico de alarmes, no qual guarda as informações dos momentos em que o relé eletrônico se ativa. A figura a seguir, apresenta a interface gráfica utilizada nos testes práticos com o equipamento.

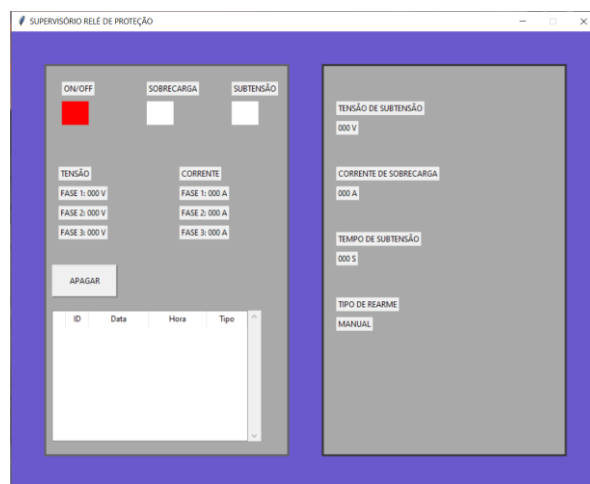


Figura 11: Interface gráfica ajustada para testes

A Figura 11 exibe a interface gráfica simplificada, com foco em apresentar os dados do relé eletrônico e gravar as informações no histórico de alarmes. No retângulo esquerdo da interface gráfica, se encontram os sinais luminosos que indicam se o relé eletrônico está em funcionamento no modo remoto, se está em sobrecarga ou subtensão. Abaixo dos componentes anteriores, existem os campos que exibem os valores de tensão e corrente elétrica enviados pelo relé, e logo após, se encontra o botão de apagar registro do histórico de alarmes, que constitui o último elemento da parte esquerda da interface gráfica. Já na área direita da interface, se encontram os campos que exibem os valores ajustados pelo usuário na interface física do relé eletrônico.

C. Testes em bancada

Os testes foram realizados em bancada encontrada no laboratório de Comandos e Acionamentos do Instituto Federal de Santa Catarina – Campus Criciúma, pois este é o local onde o equipamento será utilizado pelos alunos e professores do curso de Engenharia Mecatrônica. A figura a seguir exibe a montagem feita em bancada para os testes práticos.



Figura 12: Montagem em bancada para testes

A instalação vista na Figura 12 contém o circuito de potência do motor, no qual engloba o disjuntor, relé de interface com circuito de comando e ligação direta do tipo triângulo no motor trifásico. Já o circuito de comando, também encontrado na Figura 12, contém o relé de interface, chave para ligar e desligar o motor e o relé eletrônico de proteção contra sobrecarga, subtensão e falta de fase.

Selecionou-se dois motores elétricos de indução trifásicos para a realização de testes para proteção contra sobrecarga, os quais são apresentados na Tabela I.

Tabela I: Dados dos motores

Dados	Motor A	Motor B
Fabricante	Voges	Voges
Rotação (rpm)	1695	1730
Tensão de alimentação (V)	220 / 380	220 / 380
Corrente nominal (A)	1,11 / 0,64	13,5 / 7,80
Potência mecânica (cv)	0,25	5
Frequência (Hz)	60	60

Em primeiro momento, realizaram-se testes com o relé eletrônico em modo local em um motor trifásico de corrente

nominal igual a 1,11 A quando alimentado por uma tensão alternada de 220 V. Em relação à leitura de corrente e tensão elétrica, foi possível obter resultados satisfatórios com variação notada de menos de 10% em comparação ao alicate amperímetro da marca Fluke modelo 325. A Tabela II exibe os dados obtidos pelo sensor de corrente do tipo alicate amperímetro e pelo sensor utilizado no relé eletrônico.

Tabela II: Dados obtidos pelos sensores de corrente

Dados	Corrente Elétrica Motor A (A)	Corrente Elétrica Motor B (A)
Alicate amperímetro	0,8	5,7
SCT-013	0,9	5,8

Para a realização dos testes de sobrecarga, utilizou-se como corrente ajustada para o Motor A, o valor de 0,6 A e, para o Motor B, o valor de 1,8 A. Utilizando-se a Equação 1, é possível obter o tempo de disparo teórico para os valores de corrente ajustada e medida. Os resultados dos três testes realizados para cada motor são exibidos na tabela a seguir.

Tabela III: Resultados dos testes de sobrecarga

Dados	Motor A	Motor B
Tempo calculado pela equação (s)	230,40	30,70
Tempo calculado pelo software (s)	234,37 / 237,78 / 235,01	31,05 / 30,54 / 31,60
Tempo de disparo efetivo (s)	226,00 / 231,55 / 232,44	30,70 / 31,11 / 31,89

Conforme a Tabela III, é possível notar que o relé eletrônico é capaz de fornecer a proteção contra sobrecarga de forma eficaz, principalmente pelo fato de ser um equipamento didático, o qual não será utilizado no seu estado atual para a proteção de motores em ambiente industrial. Consta-se, também, que o tempo de disparo obtido na prática se aproxima do calculado nos momentos em que existe uma maior diferença entre o valor medido pelo sensor e o valor de corrente ajustada.

Ao testar a proteção contra sobrecarga no modo remoto, constatou-se que o relé atuava em tempo adequado, igualmente ao modo local, pois a função que realiza o cálculo e o disparo do relé no modo remoto é igual ao modo local, se diferindo apenas no envio dos dados em tempo real para o supervisor.

Em seguida, iniciaram-se os testes de proteção contra subtensão e falta de fase. Ajustes de diferentes valores para tensão de subtensão e tempo para subtensão foram utilizados e, em todos os momentos em que se retirou um cabo de alimentação do motor para simular falta de fase e subtensão, o relé atuou conforme o tempo estabelecido.

Em modo remoto, o sistema de comunicação via LoRa atuou adequadamente, enviando os valores de tensão e corrente sem atraso aparente. Utilizou-se o mesmo método para realização dos testes de subtensão e falta de fase no modo remoto, de forma que foi possível obter resultados iguais: o relé atuou conforme o tempo estabelecido nos momentos em que houve falta de fase ou subtensão. Dessa forma, é possível afirmar que o relé eletrônico realiza a proteção do motor contra sobrecarga, subtensão e falta de fase.

Com o sistema supervisorio em funcionamento, nos momentos em que o relé foi testado em modo remoto, foi possível observar, em tempo real, as variáveis de corrente e tensão elétrica, as variáveis ajustadas pelo usuário nos potenciômetros e, no histórico de alarmes e nos LEDs indicadores, os momentos em que o relé eletrônico de proteção atua. A Figura 13 apresenta o funcionamento do supervisorio no momento de um teste de sobrecarga, onde é possível observar, em vermelho, o aviso de sobrecarga no motor e o evento registrado no histórico de alarmes.

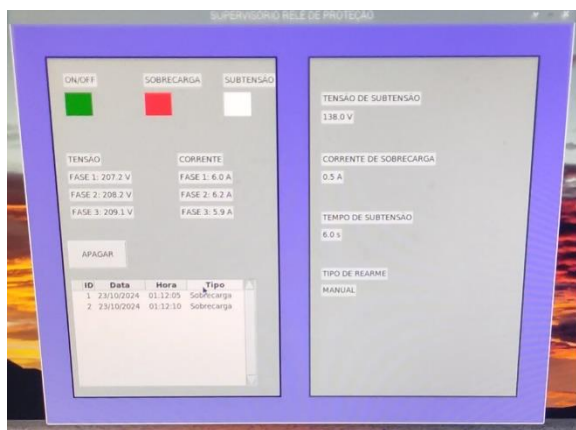


Figura 13: Interface do supervisorio em testes

Conforme pode ser observado na Figura 13, há um botão de apagar, que possui a função de excluir um evento do histórico de alarmes no momento em que o evento é selecionado através de um clique duplo e, em seguida, pressionado o botão com o ponteiro do mouse.

D. Análise dos resultados

A proteção contra subtensão e falta de fase funcionou de forma adequada, conforme o ajuste do usuário, já que não se obteve variação relevante. O relé eletrônico, quando submetido a testes de proteção contra sobrecarga, teve êxito na realização da proteção.

A proteção contra sobrecarga, nos testes realizados, atuou de forma eficaz, dentro de uma margem de erro aceitável em relação aos cálculos teóricos. Ademais, para confirmar a eficácia desse tipo de proteção, faz-se necessário a realização de testes com diferentes tipos de motores elétricos de indução trifásicos e com um tempo maior, para verificação do funcionamento do relé em diversos momentos de atuação e rearme.

O modo remoto do relé eletrônico foi utilizado com os módulos de comunicação LoRa a uma distância de cerca de dois metros, obtendo comunicação, na prática, instantânea. Assim, para objetivos didáticos, a comunicação e o sistema supervisorio obtiveram resultados satisfatórios, apesar da possibilidade de novos testes práticos utilizando maiores distâncias entre o relé eletrônico e o equipamento supervisorio, a fim de analisar o atraso de comunicação.

E. Trabalhos futuros

A implementação de um *display* do tipo LCD na parte frontal do equipamento é uma sugestão para trabalhos futuros, pois possibilita ao usuário o acompanhamento das variáveis lidas pelo relé eletrônico ao utilizá-lo em modo local.

Outra possibilidade de alteração no equipamento, seria a troca do protocolo de comunicação LoRa por uma

comunicação via internet, utilizando um módulo Wi-Fi. Dessa forma, não seria necessária a conexão de outro dispositivo de comunicação no Raspberry Pi, visto que ele já possui a comunicação via Wi-Fi integrada em seus componentes.

V. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O relé eletrônico de proteção desenvolvido neste trabalho apresentou seu funcionamento de forma adequada para proteção contra sobrecarga, falta de fase e subtensão, além de possibilitar o acompanhamento remoto das informações obtidas e ajustadas no relé eletrônico através do sistema supervisorio, em modo remoto. Além disso, em comparação ao equipamento utilizado como base, houve avanços em funcionalidades e resultados, apesar do recebimento, pelo relé eletrônico, dos comandos enviados pelo sistema supervisorio não funcionar corretamente.

Dessa forma, considerando os resultados obtidos, é possível concluir que os objetivos deste trabalho foram alcançados, proporcionando a utilização do equipamento didático para a proteção e supervisão de motores elétricos trifásicos utilizados nas aulas laboratoriais do Instituto Federal de Santa Catarina, campus Criciúma.

REFERÊNCIAS

- [1] LAMB, Frank. Automação industrial na prática. (Tekne). Grupo A, 2015. E-book. ISBN 9788580555141. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788580555141/>. Acesso em: 18 mai. 2023.
- [2] PETRUZELLA, Frank D. Motores elétricos e acionamentos. (Tekne). Grupo A, 2013. E-book. ISBN 9788580552584. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788580552584/>. Acesso em: 20 abr. 2023.
- [3] SOUZA, Sabrina de. Relé eletrônico para proteção e monitoramento de motores elétricos de indução trifásicos. 2022. 8 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecatrônica, Instituto Federal de Santa Catarina, Criciúma, 2022.
- [4] DIAS, Luiz Felipe. PROTEÇÃO DE MOTORES ELÉTRICOS DE GRANDE PORTE. Orientador: Rubens Alves Dias. 2013. 103 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá. 2013. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/118880/000735097.pdf?sequenc e=1&isAllowed=y>. Acesso em: 06 abr. 2023.
- [5] ALMEIDA, Paulo Samuel de. INDÚSTRIA 4.0 - PRINCÍPIOS BÁSICOS, APLICABILIDADE E IMPLANTAÇÃO NA ÁREA INDUSTRIAL. Editora Saraiva, 2019. E-book. ISBN 9788536530451. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788536530451/>. Acesso em: 04 abr. 2023.
- [6] DEVALAL, Shilpa; KARTHIKEYAN, A.. LoRa Technology - An Overview. 2018. Second International Conference On Electronics, Communication And Aerospace Technology (Iceca), [S.L.], v. 1, n. , p. 1-8, mar. 2018. IEEE. <http://dx.doi.org/10.1109/iceca.2018.8474715>.
- [7] CERQUEIRA, Marcos V B.; MASCHIETTO, Luis G.; ZANIN, Aline; et al. Sistemas Operacionais Embarcados. Grupo A, 2021. E-book. ISBN 9786556902616. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/#/books/9786556902616/>. Acesso em: 16 mai. 2023.
- [8] FALCÃO, Yuri Henrique de Oliveira. COMO CRIAR INTERFACES GRÁFICAS (GUI) COM TKINTER E PYTHON. 2023. Disponível em: <https://pythonacademy.com.br/blog/interfaces-graficas-com-tkinter-e-python>. Acesso em: 17 set. 2023.
- [9] WEG. SRW01 - Manual do usuário. Disponível em https://www.weg.net/catalog/weg/BR/pt/Automa%C3%A7%C3%A3o-e-Control-Industrial/Controls/Partida-e-Prote%C3%A7%C3%A3o-de-Motores/Rel%C3%A9s-Inteligentes/Rel%C3%A9-Inteligente-SRW01/Unidades-de-Control/SRW01---Unidades-de-Control/p/MKT_WDC_BRAZIL_PRODUCT_SRW01_UC. Acesso em: 10 dez. 2024.

- [10] OLIVEIRA, Danielle. Saiba tudo sobre SQL – A linguagem padrão para trabalhar com banco de dados relacionais. 2023. Disponível em: <https://www.alura.com.br/artigos/o-que-e-sql?srsId=AfmBOormOhEEjhMM_H-e2gxyEhTOUBIaQTMylFUUSbeh6ZNQdLqhgMTs>. Acesso em: 10 dez. 2024.
- [11] QINGXIAN ZEMING LANGXI ELECTRONIC.ZMPT101K Current-type Voltage Transformer. 2020. Disponível em: <<https://www.alldatasheet.com/html-pdf/1821975/MICRO-TRANSFORMER/ZMPT101K/2023/1/ZMPT101K.html>>. Acesso em: 30 jan.2025.
- [12] MICROCHIP.ATmega640/V-1280/V-1281/V-2560/V-2561/V. 2014. Disponível em: <<https://www.alldatasheet.com/html-pdf/1821975/MICRO-TRANSFORMER/ZMPT101K/2023/1/ZMPT101K.html>>. Acesso em: 10 dez. 2024.
- [13] CIA, Arduino e. Comunicação Arduino e Raspberry Pi com LoRa. 2020. Disponível em: <https://www.arduinoocia.com.br/comunicacao-arduino-e-raspberry-pi-com-lora/>. Acesso em: 20 mai. 2023.
- [14] BORIN, Vinicius Pozzobon; FONSECA, Mauro; MUNARETTO, Anelise. Análise dos limites da tecnologia LoRaWAN. Simposio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais, Campina Grande PB, 16 set. 2018.