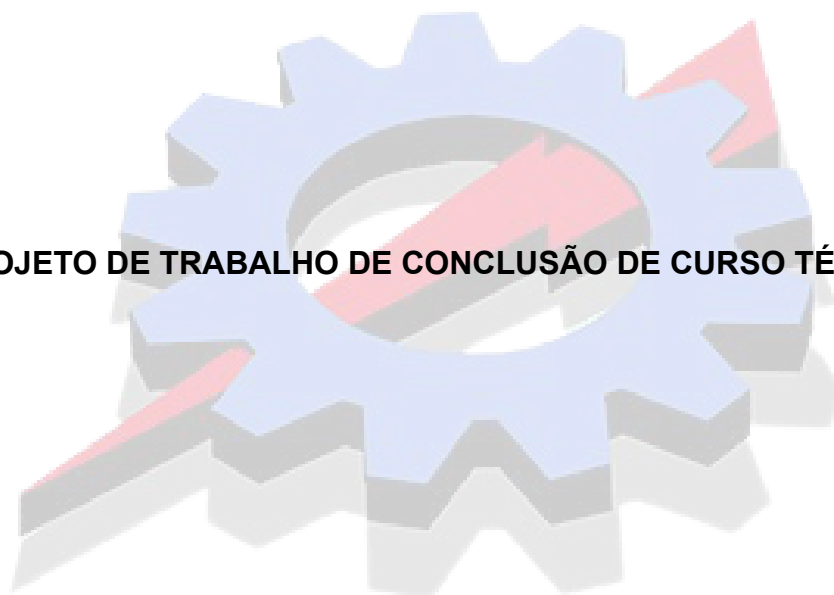


**ESCOLA TÉCNICA ESTADUAL FREDERICO GUILHERME SCHMIDT**

**TÉCNICO EM ELETROMECAÂNICA E ELETROTÉCNICA**

**PROJETO DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO TÉCNICO**



**SISTEMA INTELIGENTE DE MEDIÇÃO ELÉTRICA PARA PMES**

**ARTHUR GÓRSKI**

**CAUÃ MARTINS**

**KAUANE MIKAELLA PEREIRA LEITES**

**SÃO LEOPOLDO**

**2025**

ARTHUR GÓRSKI  
CAUÃ MARTINS  
KAUANE MIKAELLA PEREIRA LEITES

## **SISTEMA INTELIGENTE DE MEDIÇÃO ELÉTRICA PARA PMES**

Projeto de Trabalho de Conclusão de Curso Técnico apresentado ao Curso de Eletromecânica e Eletrotécnica da Escola Técnica Estadual Frederico Guilherme Schmidt como requisito para aprovação nas disciplinas do curso sob orientação da professora Ceris Diane Oliveira de Menezes e coorientação do professor Marcos Rogério dos Santos Barbosa.

SÃO LEOPOLDO  
2025

## RESUMO

A implementação de um sistema de monitoramento de redes elétricas para pequenas e médias indústrias focado em medição e supervisão em tempo real, proporciona benefícios significativos para o desempenho e segurança do sistema elétrico. O projeto utiliza tecnologias de monitoramento remoto e sensores não invasivos para substituir a medição manual por um dispositivo automatizado, capaz de monitorar continuamente variáveis elétricas, como corrente, tensão e fator de potência. O objetivo principal é automatizar operações nas redes elétricas, melhorar a segurança, evitar desequilíbrios e prevenir penalidades relacionadas a um fator de potência desregulado. Esses aspectos são especialmente críticos em ambientes industriais, onde a demanda por energia é alta e os desequilíbrios podem gerar custos elevados e riscos operacionais. O dispositivo desenvolvido utiliza sensores de corrente não invasivos (SCT-013) e sensores de tensão (ZMPT101B), conectados a uma placa ESP32, para monitorar as variáveis elétricas em tempo real. A implementação é integrada ao software Node-RED, permitindo a visualização contínua dos dados em uma interface gráfica que facilita a análise. Testes simulados em ambientes industriais mostraram que o sistema é eficaz na identificação de desequilíbrios de fase, permitindo correções imediatas antes de impactar o desempenho dos equipamentos. Entre os resultados, destaca-se a redução significativa do tempo de inatividade das máquinas, otimização do consumo de energia e aumento da vida útil dos equipamentos. O dispositivo mostrou-se eficaz na prevenção de multas associadas ao fator de potência, oferecendo uma solução prática e de baixo custo para a gestão eficiente de redes elétricas industriais.

Palavras-chave: monitoramento; rede elétrica; indústria; segurança elétrica; eficiência operacional.

## **ABSTRACT**

The implementation of an electrical network monitoring system for small and medium-sized industries, focused on real-time measurement and supervision, provides significant benefits for the performance and safety of the electrical system. The project employs remote monitoring technologies and non-invasive sensors to replace manual measurement with an automated device capable of continuously monitoring electrical variables such as current, voltage, and power factor. The main goal is to automate operations in electrical networks, enhance safety, prevent imbalances, and avoid penalties related to an unregulated power factor. These aspects are particularly critical in industrial environments, where energy demand is high and imbalances can lead to increased costs and operational risks. The developed device uses non-invasive current sensors (SCT-013) and voltage sensors (ZMPT101B), connected to an ESP32 board, to monitor electrical variables in real time. The implementation is integrated with Node-RED software, allowing continuous data visualization through a graphical interface that facilitates analysis. Simulated tests in industrial environments demonstrated that the system is effective in identifying phase imbalances, enabling immediate corrections before impacting equipment performance. Among the results, notable improvements include a significant reduction in machine downtime, optimized energy consumption, and extended equipment lifespan. The device proved to be effective in preventing fines associated with power factor issues, offering a practical and low-cost solution for efficient management of industrial electrical networks.

**Keywords:** monitoring; electrical network; industry; electrical safety; operational efficiency.

## **LISTA DE ILUSTRAÇÕES**

- Figura 1 - Distribuição de energia
- Figura 2 - Baixa e Média Tensão
- Figura 3 - Rede de distribuição aérea
- Figura 4 - Rede de distribuição subterrânea
- Figura 5 - Rede de distribuição subterrâneas 2
- Figura 6 - Grandezas elétricas
- Figura 7 - Medidor de energia AC
- Figura 8 - Transformador de corrente
- Figura 9 - Medidor de tensão
- Figura 10 - Esp 32
- Figura 11 - SCT-013
- Figura 12 - Sensor tensão
- Figura 13 - Placa Fenolite Perfurada
- Figura 14 - Resistor
- Figura 15 - Capacitor
- Figura 16 - Jack P2
- Figura 17 - Borne KRE
- Figura 18 - P4 Fêmea
- Figura 19 - Porta Fusível
- Figura 20 - Botão Mini
- Figura 21 - Módulo Carregador Bateria
- Figura 22 - Bateria 3,7v
- Figura 23 - Conector JST
- Figura 24 - ADS1115
- Figura 25 - LED
- Figura 26 - Display
- Figura 27 - I2C
- Figura 28 - 7805
- Figura 29 - ESP32
- Figura 30 - SCT-013
- Figura 31 - Sensor tensão ZMPT101B
- Figura 32 - Placa Fenolite Perfurada 7x5cm
- Figura 33 - Resistor
- Figura 34 - Capacitor
- Figura 35 - Conector Jack P4 Fêmea
- Figura 36 - Porta Fusível
- Figura 37 - Borne KRE
- Figura 38 - Jack P2
- Figura 39 - Cabo Jumper
- Figura 40 - Botão Chave Mini Interruptor
- Figura 41 - Módulo Carregador Bateria de Lítio 1A
- Figura 42 - BATERIA 18650 3,7V

Figura 43 - Conector JST XH2.54 2 Pinos

Figura 44 - ADS1115

Figura 45 - LED

Figura 46 - Display 16x2

Figura 47 - I2C

Figura 48 - 7805

Figura 49 - Fluxograma

Figura 50 - Esquema elétrico

Figura 51 - Evolução

Figura 52 - Gráfico TxC

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 - Estado da Arte

Tabela 2 - Acidentes elétricos

Tabela 3 - Acidentes por choque 2022-2023

Tabela 4 - Incêndios por sobrecargas.

Tabela 5 - Investimento inicial

Tabela 6 - Custos operacionais e de manutenção anuais

Tabela 7 - Benefícios Econômicos Anuais

Tabela 8 - REST vs MQTT

Tabela 9 - Especificações do ESP32

Tabela 10 - Especificações do SCT-013

Tabela 11 - Especificações do ZMPT101B

Tabela 12 - Cronograma

Tabela 13 - Recursos

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

|             |                                                                                       |
|-------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| IoT         | Internet das Coisas                                                                   |
| software    | Conjunto de componentes lógicos de um computador ou sistema de processamento de dados |
| GRASP       | Procedimento de pesquisa adaptativa randomizada gananciosa                            |
| AHP         | Processo de hierarquia analítica                                                      |
| ThingSpeak. | Software de código aberto                                                             |
| ZigBee      | Protocolo de comunicação e transferência de dados sem fio                             |
| firmware    | Software integrado a um hardware específico                                           |
| dual-core   | CPU com dois núcleos                                                                  |
| Node-RED    | Ferramenta de programação Low Code                                                    |
| MicroPython | Compilador Python para bytecode                                                       |
| PMEs        | Pequenas e Médias Indústrias/Empresas                                                 |
| ESP32       | Microcontrolador, principal componente do protótipo                                   |
| SCT-013     | Sensor de Corrente Não Invasivo                                                       |
| ZMPT101B    | Módulo Sensor Tensão                                                                  |
| ADS1115     | Conversor Analógico-Digital                                                           |
| I2C         | Protocolo de Comunicação/Barramento                                                   |
| 7805        | Regulador de Tensão (CI)                                                              |
| ROI         | <i>Return on Investment</i> (Retorno sobre o Investimento)                            |

|       |                                                     |
|-------|-----------------------------------------------------|
| MQTT  | Protocolo de comunicação/transferência de mensagens |
| REST  | Protocolo/Arquitetura para serviços web             |
| QoS   | Qualidade de Serviço (Quality of Service)           |
| CC    | Corrente Contínua                                   |
| CA    | Corrente Alternada                                  |
| SCADA | Supervisory Control and Data Acquisition            |
| CLPs  | Controladores Lógicos Programáveis                  |
| NR-10 | Norma Regulamentadora 10                            |

## LISTA DE SÍMBOLOS

W – watt  
N – Newton  
Hz – hertz  
V – volts  
A – ampére  
KW – kilowatt  
kV – kilovolt  
R – resistência  
 $\Omega$  – Ohms  
P – potência  
 $E$  – energia  
J – joules  
G – condutância  
S – siemens  
 $t$  – tempo  
C – capacitância  
F – farads  
Q – carga elétrica armazenada  
L – indutância  
H – henrys  
VA – volt-ampéres  
VAR – volt-amperes reativos  
kWh – kilowatt-horas  
 $\Delta t$  – variação do tempo  
 $\cos(\theta)$  – cosseno  
 $\sin(\theta)$  – seno  
 $S$  – potência aparente  
 $FP$  – fator de potência  
 $\Delta V$  – variação de velocidade  
 $V_{max}$  – velocidade máxima  
 $V_{min}$  – velocidade mínima  
I - Corrente Elétrica  
 $\Theta$ - Ângulo de desfasamento/fase

## SUMÁRIO

|                                                                                                                                   |           |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1 INTRODUÇÃO</b>                                                                                                               | <b>11</b> |
| 1.1 TEMA E SUA DELIMITAÇÃO                                                                                                        | 12        |
| 1.2 PROBLEMA                                                                                                                      | 12        |
| 1.3 OBJETIVOS                                                                                                                     | 13        |
| <b>1.3.1 Objetivo Geral</b>                                                                                                       | <b>13</b> |
| <b>1.3.2 Objetivos Específicos</b>                                                                                                | <b>13</b> |
| 1.4 JUSTIFICATIVA                                                                                                                 | 14        |
| <b>2 ESTADO DA ARTE</b>                                                                                                           | <b>15</b> |
| 2.1 DESBALANCEAMENTO DE FASES E OS IMPACTOS NA DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA                                                            | 16        |
| 2.2 RECONFIGURAÇÃO AUTOMÁTICAS DAS REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA COM MONITORAMENTO EM TEMPO REAL                      | 16        |
| 2.3 DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE AUTOMAÇÃO RESIDENCIAL BASEADO EM IOT PARA CONTROLE E MONITORAMENTO DE DISPOSITIVOS ELÉTRICOS | 17        |
| 2.4 SISTEMA DE MONITORAMENTO DE REDES ELÉTRICAS PARA PEQUENAS E MÉDIAS INDÚSTRIAS                                                 | 17        |
| <b>3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>                                                                                                    | <b>18</b> |
| 3.1 REVISÃO DE LITERATURA                                                                                                         | 18        |
| <b>3.1.1 Estudos sobre Monitoramento de Rede Elétrica</b>                                                                         | <b>18</b> |
| 3.2 INTRODUÇÃO A REDE ELÉTRICA E MONITORAMENTO                                                                                    | 19        |
| <b>3.2.1 Rede Elétrica</b>                                                                                                        | <b>19</b> |
| 3.2.1.2 Distribuição de Energia Elétrica                                                                                          | 20        |
| <b>3.2.2 Monitoramento Elétrico</b>                                                                                               | <b>25</b> |
| 3.2.2.1 Importância do Monitoramento de Rede Elétrica Industrial                                                                  | 26        |
| 3.3 MÁQUINAS CAPAZES A DANOS SEM A UTILIZAR MONITORAMENTO                                                                         | 28        |
| 3.4 SEGURANÇA E NORMAS                                                                                                            | 29        |
| 3.5 MANUTENÇÃO ELÉTRICA                                                                                                           | 30        |
| <b>3.5.1 Manutenção Preventiva</b>                                                                                                | <b>31</b> |
| <b>3.5.2 Manutenção corretiva</b>                                                                                                 | <b>31</b> |
| <b>3.5.3 Manutenção preditiva</b>                                                                                                 | <b>31</b> |
| 3.6 INDÚSTRIA                                                                                                                     | 32        |
| <b>3.6.1 Breve história sobre a indústria.</b>                                                                                    | <b>32</b> |
| <b>3.6.2 Acidentes elétricos nas indústrias</b>                                                                                   | <b>32</b> |
| <b>3.6.3 Aplicação na indústria</b>                                                                                               | <b>33</b> |
| 3.7 PEQUENAS E MÉDIAS INDÚSTRIAS                                                                                                  | 34        |
| <b>3.7.1 Faturamento anual</b>                                                                                                    | <b>34</b> |
| <b>3.8.2 Número de funcionários</b>                                                                                               | <b>35</b> |
| 3.8.2.1 Comércio e serviço                                                                                                        | 35        |
| 3.8.2.2 Indústria                                                                                                                 | 35        |
| <b>3.8.3 PMEs no Brasil</b>                                                                                                       | <b>35</b> |

|                                                          |           |
|----------------------------------------------------------|-----------|
| <b>3.8.4 Importância das PMEs para a economia</b>        | <b>36</b> |
| 3.9 ACIDENTES ELÉTRICOS.                                 | 37        |
| <b>3.9.1 Dados gerais</b>                                | <b>37</b> |
| <b>3.9.2 Por região brasileira</b>                       | <b>39</b> |
| <b>3.9.3 Incêndios por sobrecarga de energia</b>         | <b>40</b> |
| 3.10 GRANDEZAS ELÉTRICAS                                 | 41        |
| <b>3.10.1 Teoria dos Circuitos Elétricos</b>             | <b>44</b> |
| 3.11 FATOR DE POTÊNCIA                                   | 44        |
| 3.12 MEDIÇÃO DE ENERGIA E POTÊNCIA                       | 46        |
| 3.13 ANÁLISE DE CUSTO-BENEFÍCIO                          | 48        |
| <b>3.13.1 Payback</b>                                    | <b>48</b> |
| <b>3.13.2 ROI (Return on Investment)</b>                 | <b>49</b> |
| <b>3.13.3 Investimento inicial</b>                       | <b>50</b> |
| <b>3.13.4 Custos operacionais e de manutenção anuais</b> | <b>51</b> |
| <b>3.13.5 Ganhos evitados (Benefícios)</b>               | <b>52</b> |
| 3.13.5.1 Multas por Fator de Potência                    | 52        |
| 3.13.5.2 Redução de Paradas Não Planejadas               | 52        |
| 3.13.5.3 Redução de Visitas Técnicas                     | 52        |
| 3.13.5.4 Aumento da Vida Útil dos Equipamentos           | 53        |
| <b>3.13.6 Utilizando cálculo do payback e ROI</b>        | <b>54</b> |
| 3.13.6.1 Calculo Payback                                 | 54        |
| 3.13.6.2 Calculo ROI                                     | 54        |
| 3.14 ARQUITETURA IOT E PROTOCOLOS                        | 55        |
| <b>3.14.1 MQTT</b>                                       | <b>55</b> |
| 3.14.1.1 Importancia MQTT                                | 55        |
| 3.14.1.2 Como funciona o MQTT                            | 55        |
| 3.15 REST                                                | 55        |
| <b>3.15.1 REST vs MQTT</b>                               | <b>55</b> |
| <b>3.15.2 Broker</b>                                     | <b>56</b> |
| <b>3.15.3 QoS (Qualidade de Serviço)</b>                 | <b>56</b> |
| <b>3.15.4 Latência</b>                                   | <b>57</b> |
| <b>3.15.5 Relação uso do Esp-32 e Node-RED</b>           | <b>57</b> |
| 3.16 FONTES DE ERRO E MITIGAÇÃO                          | 58        |
| <b>3.16.1 Efeito ruído</b>                               | <b>58</b> |
| <b>3.16.2 Acoplamento</b>                                | <b>59</b> |
| <b>3.16.3 Offset DC</b>                                  | <b>59</b> |
| <b>3.16.4 Fase entre sensor e medição</b>                | <b>60</b> |
| <b>3.16.5 Calibração</b>                                 | <b>60</b> |
| <b>3.16.6 Filtro passa-baixa\anti-alias</b>              | <b>61</b> |
| 3.17 APLICAÇÕES PRÁTICAS E PROTOTIPAGEM                  | 61        |
| <b>3.17.1 Prototipagem de Sistemas de Monitoramento</b>  | <b>61</b> |

|                                                                         |    |
|-------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.17.2 Funcionamento e aplicação Esp32                                  | 62 |
| 3.17.3 Funcionamento e aplicação SCT                                    | 63 |
| 3.17.4 Funcionamento e aplicação Sensor Tensão                          | 64 |
| 3.17.5 Funcionamento e aplicação Placa Fenolite Perfurada 7x5cm         | 65 |
| 3.17.6 Funcionamento e aplicação Resistor                               | 67 |
| 3.17.7 Funcionamento e aplicação Capacitor                              | 68 |
| 3.17.8 Funcionamento e aplicação Conector Jack P2 Audio 3.5mm           | 69 |
| 3.17.10 Funcionamento e aplicação Conector Borne KRE                    | 70 |
| 3.17.11 Funcionamento e aplicação Conector Jack P4 Fêmea                | 71 |
| 3.17.12 Funcionamento e aplicação Porta Fusível                         | 72 |
| 3.17.13 Funcionamento e aplicação Botão Chave Mini Interruptor          | 73 |
| 3.17.14 Funcionamento e aplicação Módulo Carregador Bateria de Lítio 1A | 74 |
| 3.17.15 Funcionamento e aplicação Bateria 18650 3,7V                    | 75 |
| 3.17.16 Funcionamento e aplicação Conector JST XH2.54 2 Pinos           | 76 |
| 3.17.17 Funcionamento e aplicação ADS1115                               | 77 |
| 3.17.18 Funcionamento e aplicação Light Emission Diode (LED)            | 78 |
| 3.17.19 Funcionamento e aplicação Display 16x2                          | 79 |
| 3.17.20 Funcionamento e aplicação I2C                                   | 80 |
| 3.17.21 Funcionamento e aplicação 7805                                  | 81 |
| 4 METODOLOGIA                                                           | 82 |
| 4.1 TIPO DE PESQUISA                                                    | 82 |
| 4.1.2 Propósito do Projeto                                              | 82 |
| 4.2 DESENVOLVIMENTO E IMPLEMENTAÇÃO                                     | 83 |
| 4.3 COMPONENTES                                                         | 85 |
| 4.3.1 Placa ESP32 / 30 pinos / Wifi                                     | 85 |
| 4.3.2 Sensor de Corrente Não Invasivo 100A SCT-013                      | 86 |
| 4.3.3 Módulo Sensor Tensão Ac 0-250v Voltímetro ZMPT101B                | 87 |
| 4.3.4 Placa Fenolite Perfurada 7x5cm                                    | 88 |
| 4.3.5 Resistor                                                          | 88 |
| 4.3.6 Capacitor                                                         | 89 |
| 4.3.7 Conector Jack P4 Fêmea                                            | 89 |
| 4.3.8 Porta Fusível                                                     | 89 |
| 4.3.9 Conector Borne KRE                                                | 90 |
| 4.3.10 Conector Jack P2 Áudio 3,5mm                                     | 90 |
| 4.3.11 Cabo Jumper                                                      | 90 |
| 4.3.12 Botão Chave Mini Interruptor                                     | 91 |
| 4.3.13 Módulo Carregador Bateria de Lítio 1A                            | 91 |
| 4.3.14 BATERIA 18650 3,7V                                               | 91 |
| 4.3.15 Conector JST XH2.54 2 Pinos                                      | 92 |
| 4.3.16 ADS1115                                                          | 92 |

|                                                        |            |
|--------------------------------------------------------|------------|
| <b>4.3.17 LED</b>                                      | <b>93</b>  |
| <b>4.3.18 Display 16x2</b>                             | <b>93</b>  |
| <b>4.3.19 I2C</b>                                      | <b>94</b>  |
| <b>4.3.20 7805</b>                                     | <b>94</b>  |
| 4.4 FLUXOGRAMA                                         | 95         |
| 4.5 CÁLCULOS UTILIZADOS                                | 95         |
| 4.6 DESCRIÇÃO TÉCNICA                                  | 98         |
| 4.7 ESQUEMA ELÉTRICO                                   | 99         |
| 4.8 MONTAGEM DO PROTÓTIPO                              | 99         |
| <b>4.8.1 Evolução</b>                                  | <b>100</b> |
| <b>4.8.2 Esquema elétrico Módulo de cartão microsd</b> | <b>101</b> |
| 4.9 PROGRAMAÇÃO                                        | 101        |
| <b>5 CRONOGRAMA</b>                                    | <b>107</b> |
| <b>6 RECURSOS</b>                                      | <b>108</b> |
| <b>7 RESULTADOS ESPERADOS</b>                          | <b>110</b> |
| <b>8 CONCLUSÃO</b>                                     | <b>111</b> |
| <b>REFERÊNCIAS</b>                                     | <b>111</b> |

## **1 INTRODUÇÃO**

O monitoramento da rede elétrica de pequenas e médias indústrias é essencial para a gestão segura e eficaz de sistemas elétricos, especialmente em ambientes industriais onde a demanda por energia é alta, e falhas podem acarretar custos significativos e riscos à segurança. A crescente complexidade das redes elétricas modernas exige tecnologias avançadas que assegurem a operação contínua e otimizada dos sistemas, minimizando falhas e otimizando o consumo de energia. Tradicionalmente, a medição e análise das grandezas elétricas eram realizadas de forma manual, um processo demorado e sujeito a erros, o que dificultava a identificação precoce de problemas. Com a evolução tecnológica, especialmente na Internet das Coisas (IoT), surgiram ferramentas que permitem o monitoramento em tempo real de variáveis críticas, como corrente, tensão e fator de potência. Esse avanço possibilita maior precisão e uma resposta rápida e eficaz aos desequilíbrios.

Este projeto investiga a viabilidade de desenvolver um dispositivo que, por meio de software, monitore automaticamente as fases da rede elétrica, simplificando

a manutenção e reduzindo a necessidade de medições manuais. O sistema visa resolver um problema comum em empresas: multas relacionadas ao fator de potência desregulado, identificando irregularidades em tempo real e gerando economia financeira e confiabilidade operacional.

Os avanços em dispositivos de monitoramento eletrônico são fundamentais para medições precisas de corrente e tensão, essenciais para detectar desequilíbrios e sobrecargas em tempo real, prevenindo falhas e reforçando a segurança das operações industriais. Este projeto é particularmente relevante por preencher uma lacuna na automação da manutenção elétrica, proporcionando uma solução que facilita a identificação de problemas e automatiza a análise de grandezas elétricas. O público-alvo inclui engenheiros elétricos, técnicos de manutenção, operadores industriais e gestores de energia, que se beneficiarão de uma ferramenta que aprimora a segurança e eficiência das redes elétricas.

O projeto combina uma investigação inicial sobre tecnologias emergentes no monitoramento de redes industriais, especialmente no uso de sensores não invasivos e sistemas em tempo real. Em seguida, desenvolveu e implementou um protótipo integrado com o microcontrolador ESP32 e sensores como o SCT-013 e o ZMPT101B. Previsto para testes em uma rede industrial, o dispositivo terá como foco a precisão dos sensores, a estabilidade do sistema e a eficácia na detecção de desequilíbrios e sobrecargas, tudo em conformidade com as normas da NBR 5410 para garantir padrões de segurança elevados.

Com a integração de tecnologias avançadas e automação no monitoramento de redes elétricas industriais, o projeto promete não apenas melhorar a eficiência e segurança das operações, mas também oferecer uma ferramenta valiosa para profissionais do setor, promovendo um ambiente industrial mais seguro e eficiente.

## 1.1 TEMA E SUA DELIMITAÇÃO

Desenvolvimento de um dispositivo de baixo custo para monitoramento em tempo real de redes elétricas trifásicas em pequenas e médias indústrias, com foco

em identificação de desequilíbrios de fase, controle de fator de potência e prevenção de sobretensões.

## 1.2 PROBLEMA

Como pequenas e médias indústrias podem monitorar de forma eficaz e acessível a qualidade da energia elétrica trifásica consumida, identificando desequilíbrios, variações de tensão e baixo fator de potência, a fim de evitar danos a equipamentos, interrupções produtivas e custos adicionais com penalidades energéticas?

## 1.3 OBJETIVOS

### 1.3.1 Objetivo Geral

Desenvolver e implementar, de forma teórica, um dispositivo de monitoramento baseado em Internet das Coisas (IoT) para redes elétricas industriais, utilizando o microcontrolador ESP32 e sensores não invasivos de corrente e tensão. O objetivo é permitir o acompanhamento em tempo real das grandezas elétricas, identificando automaticamente desequilíbrios e sobrecargas nas fases, além de contribuir para a correção do fator de potência. Dessa forma, busca-se aumentar a eficiência energética, reduzir custos com penalidades e aprimorar a segurança e a confiabilidade das operações elétricas em pequenas e médias indústrias.

### 1.3.2 Objetivos Específicos

- Projetar e integrar sensores não invasivos para medição de corrente e tensão em tempo real;
- Implementar o sistema utilizando o microcontrolador ESP32;
- Realizar testes de precisão e estabilidade dos sensores;
- Detectar desequilíbrios e sobrecargas na rede elétrica;
- Avaliar a eficácia do sistema na prevenção de multas por fator de potência e na otimização do consumo de energia.

## 1.4 JUSTIFICATIVA

O protótipo deve ser desenvolvido para simplificar e agilizar a medição e manutenção elétrica, reduzindo a dependência de medições manuais nas redes elétricas que podem ser demoradas e imprecisas. Isso é especialmente crucial em momentos críticos que necessitam de medição ágil, como em questões de saúde e segurança da indústria, onde a rápida identificação e resolução de problemas podem prevenir acidentes e falhas graves.

Além disso, o sistema proposto visa evitar multas relacionadas ao fator de potência desregulado, um problema comum que muitas empresas enfrentam. Frequentemente, as empresas só descobrem irregularidades no fator de potência quando já foram penalizadas, mas com o monitoramento em tempo real, é possível detectar e corrigir esses problemas antes que as multas sejam aplicadas.

Os avanços tecnológicos tornaram os dispositivos de monitoramento eletrônico ferramentas essenciais para a medição precisa de correntes e tensões em sistemas elétricos. A capacidade de detectar desequilíbrios e sobrecargas em tempo real é fundamental para prevenir falhas e defeitos na rede, aumentando a segurança e a confiabilidade das operações industriais.

Este projeto é relevante porque preenche a lacuna na automação da manutenção elétrica em ambientes de pequenas e médias indústrias, fornecendo uma solução que não apenas facilita a identificação de problemas, o baixo custo do equipamento, mas também automatiza a análise das grandezas elétricas. O público-alvo inclui engenheiros elétricos, técnicos de manutenção, operadores de plantas industriais e gestores de energia, que se beneficiarão de uma ferramenta que otimiza a operação das redes elétricas de pequenas e médias indústrias, tornando-as mais seguras e eficientes.

A pesquisa é significativa para a área de estudo porque aborda a necessidade crescente de sistemas de monitoramento avançados que possam acompanhar a complexidade e a demanda das redes elétricas industriais modernas. Ao implementar este sistema, espera-se melhorar a gestão de energia e reduzir riscos, custos e a ocorrência de falhas nas operações industriais.

2 ESTADO DA ARTE

Tabela 1 - Estado da Arte

| Pesquisa                                                                                                                      | Autoria                                                                                                       | Ano de publicação |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|
| Desbalanceamento de fases e os impactos na distribuição de energia                                                            | Henrique Machado Fernandes, Karine Joice de Sousa Magalhães, Victor Muniz de Oliveira, Wilke Freire Rodrigues | 2023              |
| Reconfiguração automáticas das redes de distribuição de energia elétrica com monitoramento em tempo real                      | Luciano Lopes Pfitscher                                                                                       | 2013              |
| Desenvolvimento de um sistema de automação residencial baseado em iot para controle e monitoramento de dispositivos elétricos | Isabella Ferreira de Oliveira                                                                                 | 2019              |

Fonte: os autores (2024)

## 2.1 DESBALANCEAMENTO DE FASES E OS IMPACTOS NA DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA

Publicado em 2023 pelo Centro Universitário UNA, de autoria de Henrique Machado Fernandes, Karine Joice de Sousa Magalhães, Victor Muniz de Oliveira e Wilke Freire Rodrigues. Tem como objetivo analisar o desbalanceamento de cargas em uma rede de distribuição de energia, coletando dados sobre o somatório das cargas em cada ponto da rede. Foi utilizado para análise o procedimento GRASP que se resulta em um perfil de cargas mais equilibrada, assim conseguindo reduzir os custos adicionais e evitando danos em equipamentos industriais e residenciais.

## 2.2 RECONFIGURAÇÃO AUTOMÁTICAS DAS REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA COM MONITORAMENTO EM TEMPO REAL

Este projeto tem como objetivo principal desenvolver um sistema de reconfiguração automática de redes de distribuição elétrica em tempo real. Esse sistema utiliza um método heurístico para determinar a melhor configuração da rede, considerando apenas as chaves telecomandadas. A técnica multicritério AHP (Analytic Hierarchy Process) é empregada para definir pesos para os critérios de otimização e determinar a melhor sequência de chaveamentos na rede. A viabilidade técnica de ligar alimentadores em paralelo durante a reconfiguração é analisada, focando nas respostas transitórias e permanentes do sistema. Os algoritmos desenvolvidos são integrados a um Sistema Supervisório, que monitora dados em tempo real e aplica automaticamente os comandos de abertura e fechamento de chaves. A metodologia foi validada com dados de uma rede real de uma concessionária de energia elétrica.

### 2.3 DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE AUTOMAÇÃO RESIDENCIAL BASEADO EM IOT PARA CONTROLE E MONITORAMENTO DE DISPOSITIVOS ELÉTRICOS

O projeto tem como objetivo criar um protótipo para automação residencial que monitore e controle dispositivos elétricos através de uma aplicação em nuvem, utilizando a Internet das Coisas (IoT). O trabalho utiliza a aplicação ThingSpeak para interface com o usuário, medição de corrente e tensão alternada, cálculo da potência consumida, e controle remoto de dispositivos (liga/desliga). Os dados monitorados são armazenados e exportados para planilhas para cálculo de energia consumida. Testes foram realizados com lâmpada halógena e desktop, confirmando a viabilidade do sistema para gestão remota de energia. A estrutura do trabalho inclui introdução, revisão bibliográfica abordando conceitos de automação residencial, sistemas embarcados, e padrões de comunicação sem fio como WiFi, Bluetooth, e ZigBee, metodologia detalhando a arquitetura do sistema, sensores de tensão e corrente, placa de circuito impresso, e configuração do ThingSpeak, desenvolvimento do firmware, testes e resultados, e conclusões destacando a viabilidade e benefícios do sistema desenvolvido.

### 2.4 SISTEMA DE MONITORAMENTO DE REDES ELÉTRICAS PARA PEQUENAS E MÉDIAS INDÚSTRIAS

O projeto consiste em um sistema compacto e de baixo custo para monitoramento em tempo real da qualidade de energia elétrica trifásica em pequenas e médias indústrias, medindo tensão, corrente e fator de potência em cada fase, detectando desequilíbrios e variações fora dos padrões normativos. Diferentemente de soluções industriais tradicionais, que exigem hardware caro, infraestrutura complexa e equipe especializada, esta proposta usa componentes acessíveis (ESP32, TCs e divisores de tensão) e comunicação MQTT sobre redes simples, permitindo implantação rápida, fácil operação pelo próprio gestor da PME e escalabilidade modular conforme o crescimento da demanda.

### **3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

#### **3.1 REVISÃO DE LITERATURA**

##### **3.1.1 Estudos sobre Monitoramento de Rede Elétrica**

Estudos sobre o monitoramento de rede elétrica em sistemas trifásicos enfatizam a importância de manter a estabilidade do sistema e evitar falhas, com destaque para o monitoramento contínuo como ferramenta fundamental na prevenção de problemas. Pesquisas indicam que sistemas com maior granularidade nas informações, facilitando o feedback e a autoavaliação dos usuários, oferecem melhor desempenho e detalhamento até o nível de cada aparelho ou aplicação.

Diante do surgimento de aplicações tridimensionais elaboradas e enriquecidas em dados, empregadas na construção e na gestão do ciclo de vida das edificações, tornou-se atrativa a possibilidade de sincronizar sistemas de monitoramento, baseado em sensores, com os modelos produzidos (MACHADO, pág. 22, 2018 apud HAILEMARIAM et al., 2010; ISIKDAG, 2015).

Nos últimos anos, o monitoramento elétrico avançou com a introdução de tecnologias de IoT, que possibilitam o monitoramento remoto e em tempo real. Essas inovações permitem coletar dados continuamente, facilitando análises detalhadas do desempenho e antecipando falhas críticas. A IoT, integrada a plataformas de análise de dados com inteligência artificial e aprendizado de máquina, amplia a capacidade de identificar padrões, prever falhas e sugerir ações corretivas, promovendo uma gestão proativa das redes elétricas industriais. Além disso, sensores inteligentes e medidores digitais fornecem dados detalhados sobre cada componente da rede, permitindo desagregar o consumo e otimizar o uso da energia.

Entre os estudos de caso analisados, os que disponibilizaram múltiplas opções de feedback para os usuários foram considerados bem-sucedidos. Dentre essas opções, destacam-se os tipos de exibição por comparação histórica e normativa. Além disso, os casos que incluíram atividades de auto monitoramento e automedicação demonstraram um melhor desempenho. Outro fator relevante foi a presença de sistemas com um alto nível de granularidade das informações, permitindo a visualização detalhada até o nível de cada aparelho ou aplicação específica, o que pode ser associado ao tipo de exibição por desagregação (MACHADO, p. 33, 2018).

Essas tecnologias estão transformando a gestão e a proteção de sistemas elétricos, tornando as operações industriais mais seguras, eficientes e resilientes.

## 3.2 INTRODUÇÃO A REDE ELÉTRICA E MONITORAMENTO

### 3.2.1 Rede Elétrica

As redes elétricas no Brasil podem ser monofásicas, bifásicas ou trifásicas, com características e aplicações que variam conforme a demanda.

**Sistema Monofásico:** Composto por dois condutores — fase e neutro — e tensão de 127V ou 220V, este sistema é adequado para cargas de até 8KW, geralmente utilizado em pequenos equipamentos e iluminação.

**Sistema Bifásico:** Utiliza três condutores, com tensões de 127/220V ou 220/380V, e é ideal para cargas médias de até 25KW.

**Sistema Trifásico:** Constituído por três condutores de fase e um neutro, fornece potências de até 75KW e é o mais adequado para aplicações industriais. Com fases defasadas em 120 graus, garante melhor eficiência na distribuição de energia, menor demanda de materiais condutores e suporta o uso de motores com partida direta e torque constante, reduzindo vibrações e perdas.

Os sistemas trifásicos são os mais indicados para ambientes industriais, devido à sua capacidade de suportar altas cargas com eficiência e otimização energética, sendo fundamentais para a operação segura e eficaz de grandes equipamentos industriais.

#### 3.2.1.2 Distribuição de Energia Elétrica

No Brasil, a eletricidade corresponde a cerca de 17% do consumo final de energia. O Balanço Energético Nacional (BEN) de 2016 estratifica esse percentual por classes de consumo e indica maior demanda do setor industrial (31,9%), seguido pelos setores residencial (21,3%) e de serviços 1 (21,7%) (MME; EPE, 2016a). Essas estimativas atribuem às edificações residenciais, comerciais e públicas a responsabilidade por 43% do consumo de energia elétrica do país fazendo com que a eletricidade no Brasil e no mundo inteiro seja extremamente hoje em dia. (MACHADO, p. 19, 2018)

O desenvolvimento humano está fortemente associado ao uso da energia. Segundo Goldemberg e Lucon (2007), no ano de 2003, quando a população mundial era de 6,27 bilhões de habitantes, o consumo médio total de energia era de 1,69 tonelada equivalentes de petróleo per capita.

A energia elétrica gerada em usinas é transportada por cabos aéreos, que são revestidos com isolantes e fixados em torres metálicas. Esse conjunto de cabos e torres forma a rede de transmissão de energia elétrica. As linhas de transmissão, que podem operar em diferentes níveis de tensão, desempenham um papel crucial na entrega eficiente da energia elétrica aos consumidores.

Além dos cabos e torres, os isoladores, geralmente feitos de vidro ou porcelana, são componentes vitais das redes de transmissão. Eles evitam descargas elétricas e ajudam a prevenir acidentes, reduzindo custos associados a perdas de energia. As redes de transmissão também incluem subestações, que são responsáveis pela transformação e controle da energia elétrica ao longo do caminho.

Figura 1 - Distribuição de energia



Fonte: O futuro das coisas (2016)

## Linhas de Transmissão

As linhas de transmissão são compostas por fios condutores metálicos suspensos em torres metálicas, separados por isoladores cerâmicos ou materiais semelhantes. Essas linhas conectam usinas geradoras a grandes consumidores, como fábricas e empresas distribuidoras de energia. No Brasil, as linhas de transmissão são classificadas de acordo com o nível de tensão, com códigos que indicam a faixa de operação, como:

- **A1:** Tensão de fornecimento igual ou superior a 230 kV
- **A2:** Tensão de fornecimento entre 88 kV e 138 kV
- **A3:** Tensão de fornecimento de 69 kV

## **Subestações de Transmissão**

As subestações de transmissão são localizadas em pontos estratégicos para conectar geradores, consumidores e distribuidoras de energia. Elas elevam ou reduzem os níveis de tensão da energia elétrica conforme necessário. Equipadas com dispositivos para manobras de manutenção, disjuntores e sistemas de medição e proteção, essas subestações garantem a eficiência e segurança do sistema elétrico.

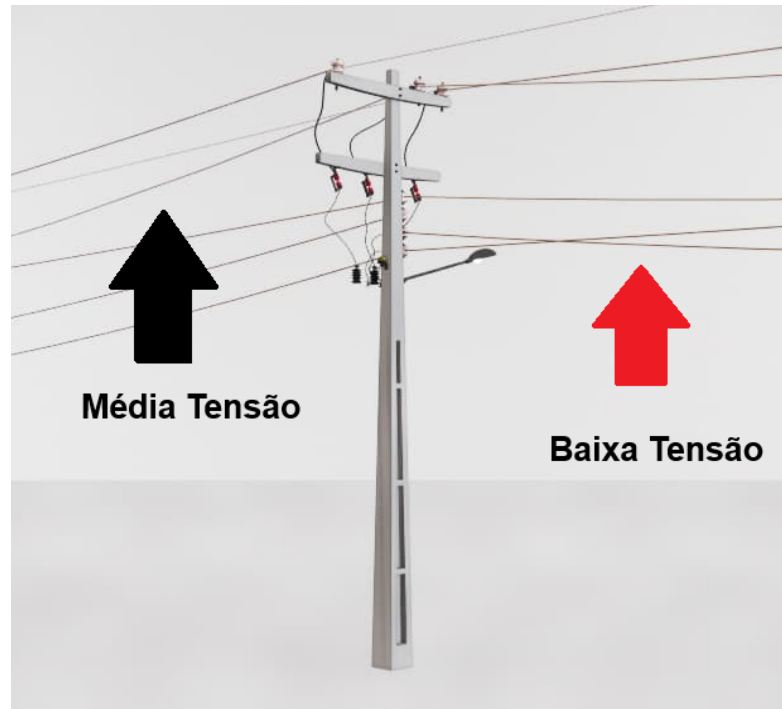
## **Redes de Distribuição**

As redes de distribuição são constituídas por linhas de baixa, média e alta tensão, e são responsáveis por levar a eletricidade até os consumidores finais. As linhas de alta tensão, com tensão igual ou superior a 230 kV, são conhecidas como rede básica. As linhas com tensão entre 69 kV e 138 kV, operadas por distribuidoras de energia, são chamadas de linhas de subtransmissão.

As redes de distribuição incluem:

- **Linhas de média tensão:** Com tensão entre 2,3 kV e 44 kV, são frequentemente visíveis em áreas urbanas.
- **Linhas de baixa tensão:** Com tensão variando entre 110 e 440 V, estão localizadas mais próximas ao solo e são suportadas pelos mesmos postes de concreto das linhas de média tensão.

Figura 2 - Baixa e Média Tensão



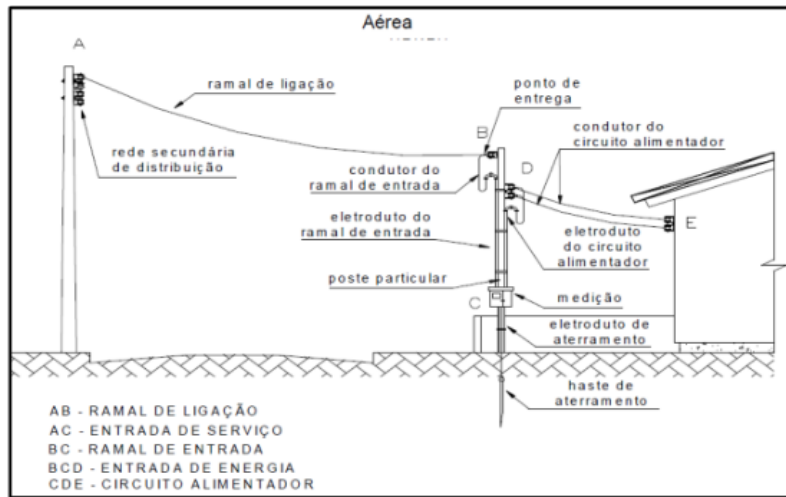
Fonte: Maquettaria 3D (2024)

### Tipos de Redes de Distribuição

Existem quatro tipos principais de redes de distribuição de energia elétrica:

- **Rede de Distribuição Aérea Convencional:** Caracterizada pela falta de isolamento nos condutores, tornando-a mais suscetível a curto-circuitos.
- **Rede de Distribuição Aérea Compacta:** Oferece maior proteção e ocupa menos espaço, com condutores isolados.
- **Rede de Distribuição Aérea Isolada:** Apresenta alta proteção com condutores encapados e é usada em condições especiais.

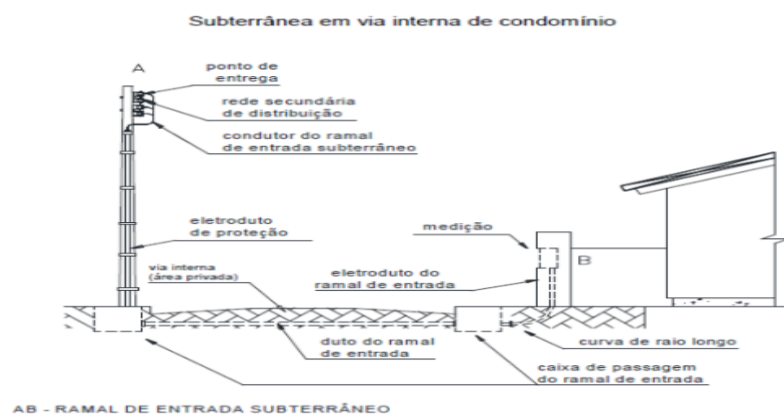
Figura 3 - Rede de distribuição aérea



Fonte: Brazilian Journal of Production Engineering - BJPE (2019)

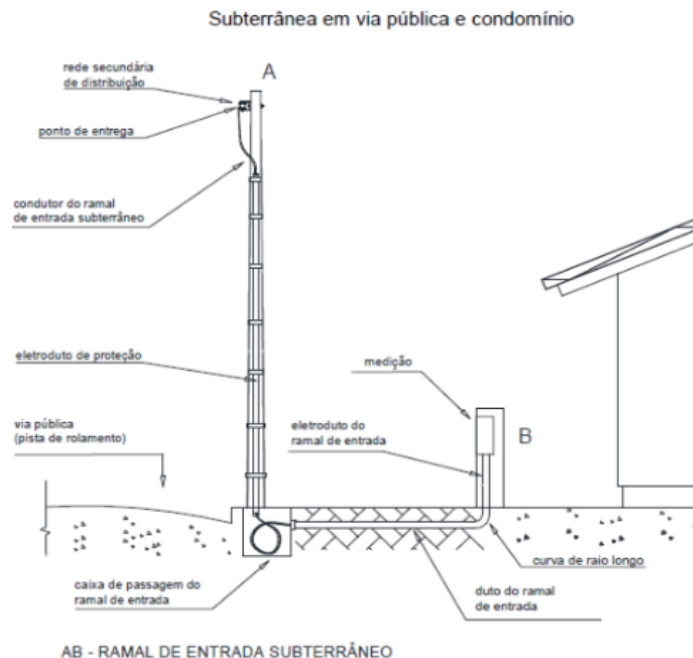
- **Rede de Distribuição Subterrânea:** Oferece alta confiabilidade e um melhor resultado estético, com redes enterradas para evitar poluição visual. No entanto, é mais cara e comum em áreas densamente povoadas ou com restrições para redes aéreas.

Figura 4 - Rede de distribuição subterrânea



Fonte: Brazilian Journal of Production Engineering - BJPE (2019)

Figura 5 - Rede de distribuição subterrâneas 2



Fonte: Brazilian Journal of Production Engineering - BJPE (2019)

Cada tipo de rede tem suas próprias vantagens e aplicações, dependendo das necessidades específicas de distribuição e das condições locais.

### 3.2.2 Monitoramento Elétrico

O monitoramento de rede elétrica industrial é uma prática essencial para garantir a eficiência, segurança e confiabilidade dos sistemas elétricos em ambientes industriais. Este processo envolve o uso de uma variedade de sensores, medidores e dispositivos que monitoram constantemente o consumo de energia, a qualidade da distribuição elétrica e a integridade dos componentes do sistema.

### 3.2.2.1 Importância do Monitoramento de Rede Elétrica Industrial

**Detecção de Desequilíbrios:** Em sistemas elétricos industriais, a distribuição de carga deve ser equilibrada entre as fases para evitar problemas de desempenho e danos ao equipamento. O monitoramento contínuo permite identificar qualquer desvio no equilíbrio de carga, permitindo que as equipes de manutenção corrijam o problema antes que ele cause falhas mais graves, como queima de motores ou disjuntores disparados.

**Prevenção de Sobrecargas:** Sobrecargas podem resultar em aquecimento excessivo dos cabos, danos a equipamentos e até mesmo incêndios. Sistemas de monitoramento identificam rapidamente os pontos onde a corrente elétrica está além dos limites seguros, alertando os operadores para tomar medidas preventivas, como redistribuir a carga ou substituir componentes antes que ocorram danos permanentes.

**Eficiência Energética:** Monitorar o consumo de energia em tempo real permite às indústrias identificar áreas onde a energia está sendo desperdiçada. Com essas informações, é possível implementar medidas de eficiência energética, como a otimização do uso de equipamentos, a instalação de dispositivos de controle de demanda, ou o ajuste de processos produtivos para reduzir o consumo de energia durante os picos de demanda. Isso não só reduz os custos operacionais, mas também contribui para a sustentabilidade ambiental.

**Sistemas de Monitoramento em Tempo Real:** A integração de sistemas de monitoramento em tempo real é crucial em indústrias que operam com grandes quantidades de energia, como siderúrgicas, plantas químicas, e fábricas de automóveis. Nesses ambientes, qualquer interrupção ou desequilíbrio na rede elétrica pode resultar em perdas financeiras significativas devido a paradas de produção não planejadas. Sistemas de monitoramento avançados podem incluir análises preditivas, que usam dados históricos e algoritmos de aprendizado de máquina para prever falhas antes que elas ocorram, permitindo uma manutenção preventiva mais eficaz.

**Integração com Sistemas de Automação Industrial:** O monitoramento da rede elétrica pode ser integrado com sistemas de automação industrial, como SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) ou PLCs (Programmable Logic Controllers), permitindo uma resposta automática a problemas detectados. Por exemplo, se um sistema de monitoramento detectar uma sobrecarga iminente, ele pode automaticamente reduzir a demanda desligando temporariamente certos processos ou redirecionando a energia para evitar danos ao sistema.

**Segurança e Conformidade:** Além dos benefícios operacionais, o monitoramento da rede elétrica também garante que as operações industriais estejam em conformidade com normas e regulamentos de segurança. A conformidade com padrões como a NR-10 no Brasil, que regula a segurança em instalações e serviços em eletricidade, é facilitada pelo uso de sistemas de monitoramento que documentam e reportam às condições da rede elétrica em tempo real.

O monitoramento de rede elétrica industrial é uma prática indispensável para qualquer indústria que busca maximizar sua eficiência operacional e minimizar os riscos de falhas e acidentes. Com a evolução da tecnologia, os sistemas de monitoramento estão se tornando cada vez mais avançados, oferecendo capacidades de análise em tempo real e preditiva que são essenciais para a operação segura e eficiente das redes elétricas industriais.

### 3.3 MÁQUINAS CAPAZES A DANOS SEM A UTILIZAR MONITORAMENTO

O desequilíbrio das fases de uma rede elétrica pode causar uma série de problemas que afetam tanto a eficiência quanto a segurança dos equipamentos e instalações. Sem o uso de um dispositivo de monitoramento como o que está sendo desenvolvido, podem ocorrer danos significativos. Por exemplo, sobretensões podem danificar máquinas sensíveis, como computadores, servidores e controladores lógicos programáveis (CLPs), reduzindo a vida útil dos componentes eletrônicos e podendo causar falhas. Além disso, o aumento da corrente no neutro pode sobrecarregar transformadores, cabos de neutro e sistemas de aterramento, resultando em aquecimento excessivo, derretimento de isolamentos e, em casos extremos, até incêndios.

Outro problema decorrente do desequilíbrio é o disparo indevido de sistemas de proteção, como disjuntores e fusíveis, o que pode causar interrupções inesperadas na produção, perda de dados, paradas repentinas de máquinas e danos mecânicos em processos que exigem controle preciso. Além disso, motores, sistemas de iluminação, aquecedores e sistemas de HVAC (aquecimento, ventilação e ar condicionado) podem consumir mais energia do que o necessário devido ao desequilíbrio, aumentando os custos operacionais e levando ao desgaste prematuro dos equipamentos.

O desequilíbrio também pode sobrecarregar transformadores, cabos de alimentação e geradores, causando falhas nos transformadores, aquecimento excessivo dos cabos e danos aos geradores, o que compromete a continuidade do fornecimento de energia. Além disso, motores elétricos, geradores e compressores podem apresentar vibrações e ruídos anormais devido ao desequilíbrio de tensão e corrente, resultando em danos mecânicos, desalinhamento de componentes rotativos e aumento do desgaste. Como resultado, qualquer equipamento elétrico, especialmente aqueles que operam continuamente, pode ter sua eficiência energética e vida útil reduzidas ao operar fora das condições ideais, resultando em maiores custos de manutenção e substituição.

Esses problemas são ainda mais graves em instalações industriais, onde a confiabilidade do fornecimento de energia é essencial para a produção e a segurança. O monitoramento contínuo e o balanceamento de cargas por meio do dispositivo proposto podem prevenir muitos desses problemas, garantindo uma operação mais segura e eficiente das instalações elétricas.

### 3.4 SEGURANÇA E NORMAS

A segurança elétrica em ambientes industriais depende do cumprimento rigoroso das normas NR-10 e NBR 5410, com responsabilidades compartilhadas entre empregadores e trabalhadores. A NR-10 estabelece diretrizes para a segurança em instalações e serviços elétricos, incluindo treinamentos regulares, o uso de Equipamentos de Proteção Individual (EPIs), como luvas e capacetes isolantes, e a desenergização de equipamentos antes de intervenções, evitando acidentes e garantindo condições seguras para os trabalhadores.

A NBR 5410, voltada para instalações de baixa tensão, orienta desde o planejamento até a execução e manutenção dessas instalações, assegurando a conformidade com critérios de segurança e durabilidade. Ela exige dispositivos de seccionamento, proteção contra choques elétricos com uso de disjuntores e fusíveis, aterramento adequado e inspeções periódicas para garantir o funcionamento seguro e eficiente. No contexto de monitoramento em tempo real, o cumprimento da NBR 5410 é essencial para validar a precisão das medições de tensão e corrente, seguindo critérios de proteção e confiabilidade operacionais.

Essas normas são aplicadas no projeto para assegurar que o sistema de monitoramento ofereça uma operação segura, esteja em conformidade com os padrões industriais e minimize riscos de acidentes, como choques e incêndios, além de garantir que o sistema possa ser implementado de forma segura em ambientes industriais.

### 3.5 MANUTENÇÃO ELÉTRICA

A Manutenção elétrica é um conjunto de práticas para garantir um bom funcionamento de sistemas ou de aparelhos, a segurança e a eficiência operacional dos sistemas elétricos e equipamentos. Esta manutenção é algo crucial para prevenir acidentes como choques elétricos e incêndios, além de assegurar que as operações sejam eficientes nos sistemas, reduzindo custos e prolongando a vida útil dos componentes elétricos. A frequência das manutenções depende da complexidade e do uso do sistema, normalmente sendo realizada trimestral ou semestralmente. Apenas os profissionais qualificados e habilitados, como os eletricitas e técnicos, devem realizar as atividades utilizando as normas de segurança e regulamentações vigentes. A manutenção elétrica adequada não apenas previne problemas e reduz custos, mas também aumenta a vida útil e a eficiência dos sistemas elétricos. Os principais tipos de manutenção elétrica que existem são preventiva, corretiva e preditiva.

### **3.5.1 Manutenção Preventiva**

A manutenção preventiva elétrica é uma prática necessária para garantir segurança, eficiência e durabilidade nos sistemas elétricos. Seu objetivo principal é identificar e corrigir problemas antes que eles ocorram e se transformem em graves falhas, evitando assim paradas não planejadas e aumentando a segurança dos sistemas elétricos.

### **3.5.2 Manutenção corretiva**

A manutenção corretiva elétrica é um tipo de intervenção realizada após a ocorrência de falhas ou defeitos em um sistema elétrico. Ao contrário da manutenção preventiva, que é planejada e realizada com o objetivo de evitar falhas antes que elas aconteçam, a manutenção corretiva visa restaurar o funcionamento normal do sistema após a identificação de algum erro.

### **3.5.3 Manutenção preditiva**

A manutenção preditiva é um procedimento avançado de controle de sistemas elétricos que tem como o objetivo de um monitoramento contínuo e na análise de dados para prever erros antes que ocorram. Ao contrário da manutenção preventiva que realiza intervenções em base de cronogramas fixos ou após a ocorrência de problemas como na manutenção corretiva, a manutenção preditiva emprega tecnologias e técnicas de monitoramento para identificar sinais de desgaste ou deterioração, permitindo assim que as ações corretivas sejam tomadas exatamente quando forem necessárias.

## 3.6 INDÚSTRIA

### 3.6.1 Breve história sobre a indústria.

A indústria, como a conhecemos hoje, teve suas origens na Revolução Industrial, iniciada no final do século XVIII na Inglaterra. Antes desse período, a produção de bens era realizada principalmente através do artesanato e da manufatura. O artesanato envolvia a produção manual, onde um único artesão executava todas as etapas do processo produtivo. A manufatura, que veio a seguir, introduziu a divisão do trabalho, mas ainda dependia em grande parte do trabalho manual.

Com a Revolução Industrial, a indústria passou a transformar matérias-primas em produtos acabados de forma mecanizada, utilizando máquinas movidas a energia e a força de trabalho humana organizada em grande escala. Esse processo, conhecido como maquinofatura, marcou uma ruptura com as formas anteriores de produção e deu início à produção em massa.

Hoje, a indústria desempenha um papel vital na economia global, produzindo uma vasta gama de bens, desde alimentos e roupas até veículos e eletrônicos. Ela continua a evoluir, impulsionada por inovações tecnológicas que prometem aumentar a eficiência, reduzir custos e criar novos produtos e serviços.

### 3.6.2 Acidentes elétricos nas indústrias

Hoje, graças aos avanços tecnológicos e ao conhecimento acumulado, a indústria moderna oferece inúmeros benefícios, como maior eficiência, automação e produção em larga escala. Contudo, apesar de todas as melhorias e inovações, os riscos de acidentes, especialmente aqueles relacionados à eletricidade, continuam presentes e exigem atenção constante.

Os acidentes elétricos na indústria são uma realidade que pode ter consequências graves, incluindo a perda de vidas. Mesmo com o uso de tecnologia avançada e a implementação de normas de segurança rigorosas, ainda ocorrem incidentes que, em muitos casos, parecem inacreditáveis, dada a sofisticação dos sistemas e a expertise disponível.

Embora possam parecer inacreditáveis, são reais e ocorrem com frequência. Um dos exemplos mais comuns é o contato acidental com fios ou equipamentos expostos a altas voltagens, que pode resultar em choques elétricos fatais, mesmo em ambientes onde as medidas de segurança parecem estar adequadas. Além disso, acidentes envolvendo arcos elétricos, onde a corrente salta entre dois condutores ou de um condutor para o solo, têm causado queimaduras graves e até mortes, frequentemente decorrentes de falhas no sistema ou erros humanos. Outro exemplo significativo é a falta de desenergização adequada durante a manutenção de equipamentos. Quando os procedimentos de bloqueio e sinalização (lockout/tagout) não são seguidos corretamente, há um risco elevado de choques e eletrocussão, acidentes que poderiam ser facilmente evitados com o cumprimento rigoroso das normas de segurança.

Segundo o Bom dia Amazônia, “Em 2023, a Abradee registrou 782 acidentes com a rede elétrica, a maioria ligada à construção ou manutenção predial, seguida por cabo energizado. No solo, foram 250 acidentes fatais. Na região norte, houve 111 acidentes, a maior parte com cabo energizado no solo, com 17 ocorrências e 9 mortes.”

A modernização da indústria trouxe muitos avanços, mas também aumentou a complexidade dos sistemas e, consequentemente, os riscos potenciais. Acidentes elétricos são uma ameaça real e contínua, e a complacência pode ter consequências trágicas. Portanto, é essencial manter uma cultura de segurança robusta, onde a prevenção de acidentes é prioridade máxima. Só assim será possível proteger vidas e garantir que os benefícios da modernização industrial não sejam ofuscados pelos perigos que ela ainda pode representar.

### **3.6.3 Aplicação na indústria**

A aplicação de sistemas de monitoramento elétrico é crucial para garantir a eficiência e a segurança das operações industriais. O monitoramento contínuo das grandezas elétricas entre fases, como discutido no projeto de "Sistema de monitoramento de redes elétricas de pequenas e médias indústrias", é uma prática essencial para evitar falhas graves, sobrecargas e possíveis acidentes, que podem ter consequências catastróficas em termos de danos materiais e perda de vidas

Ao implementar tecnologias avançadas, como o uso de sensores de corrente não invasivos e módulos de medição de tensão, as indústrias podem otimizar suas operações, garantindo que os sistemas elétricos operem dentro dos parâmetros seguros e eficientes. Essas tecnologias permitem a detecção precoce de desequilíbrios de carga e variações de tensão, possibilitando intervenções rápidas antes que problemas maiores ocorram

Além disso, a integração desses sistemas com plataformas wi-fi e a automação da análise de dados em tempo real aumentam a confiabilidade do sistema elétrico, reduzindo a dependência de medições manuais e aumentando a precisão na identificação de falhas. Dessa forma, a aplicação desses sistemas não só previne acidentes, mas também otimiza o consumo de energia, reduz custos operacionais e prolonga a vida útil dos equipamentos elétricos na indústria.

### 3.7 PEQUENAS E MÉDIAS INDÚSTRIAS

PME é a sigla para designar as Pequenas e Médias Empresas, e é utilizada, geralmente, para classificar o porte de empreendimentos, de acordo com dois fatores: seu rendimento anual e o número de empregados que trabalham nela. As PMEs têm um papel muito importante na economia mundial, pois geram inúmeros postos de trabalho e movimentam recursos importantes na formação do PIB dos países. Veja a seguir, como é feita a classificação do porte dos negócios, de acordo com o Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas (Sebrae).(SERASA EXPERIAN, 2021)

#### 3.7.1 Faturamento anual

- Microempreendedores Individuais (MEIs) — têm faturamento anual bruto de até R\$81 mil;
- MPEs — podem ser Microempresas (MEs), quando o faturamento anual for de até R\$360 mil;
- e Empresas de Pequeno Porte (EPPs) — quando o faturamento estiver acima de R\$360 mil e for de até R\$4,8 milhões.(SERASA EXPERIAN, 2021)

### **3.8.2 Número de funcionários**

#### **3.8.2.1 Comércio e serviço**

- Microempresas (MEs) — até nove funcionários;
- Empresas de Pequeno Porte (EPPs) — de 10 a 49 funcionários;
- Empresas de Médio Porte — de 50 a 99 funcionários;
- Grandes Empresas — 100 ou mais funcionários.(SERASA EXPERIAN, 2021)

#### **3.8.2.2 Indústria**

- Microempresas (MEs) — até 19 funcionários;
- Empresas de Pequeno Porte (EPPs) — de 20 a 99 funcionários;
- Empresas de Médio Porte — de 100 a 499 funcionários;
- Grandes Empresas — 500 ou mais funcionários.(SERASA EXPERIAN, 2021)

O Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) classifica as empresas conforme a Receita Operacional Bruta (ROB): pequenas empresas possuem receita anual entre R\$360 mil e R\$4,8 milhões, enquanto médias empresas faturam de R\$4,8 milhões a R\$300 milhões. O Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), por sua vez, utiliza o número de funcionários para definir as categorias: nas indústrias, as micro e pequenas empresas (MPEs) têm até 99 empregados, enquanto as médias variam de 100 a 499 funcionários; no comércio e serviços, micro e pequenas empresas empregam até 49 pessoas, enquanto médias empresas têm entre 50 e 99 funcionários. Além desses órgãos, a Agência Nacional de Vigilância Sanitária (Anvisa) e a Política Nacional do Meio Ambiente também apresentam classificações para o porte das empresas. Em resumo, as PMEs são aquelas com faturamento e número de empregados superiores aos de microempresas, mas ainda distantes das grandes empresas, e podem ser encontradas em diversos setores, como panificadoras, mercados, academias e salões de beleza.(SERASA EXPERIAN, 2021)

### **3.8.3 PMEs no Brasil**

A origem das pequenas e médias empresas (PMEs) no Brasil é incerta, mas acredita-se que a pequena propriedade sempre esteve presente no país desde o

período colonial, com a atividade produtiva dessa época. A crise na agricultura canavieira, por exemplo, possibilitou que pequenos agricultores comessem novos empreendimentos. Durante o período colonial, esses agricultores desempenharam papel crucial ao substituir alimentos europeus por produtos locais, como sorgo, inhame, cará, banana e manga, abastecendo cidades como Recife, Salvador e Rio de Janeiro, além de fornecer para as frotas que partiam para a Ásia, África e Portugal. Embora originários da agricultura, esses pequenos empresários também se destacaram no transporte, manufatura, serviços e comércio, demonstrando a relevância das PMEs desde seus primeiros momentos no Brasil.(SERASA EXPERIAN, 2021)

#### **3.8.4 Importância das PMEs para a economia**

No Brasil, as pequenas e médias empresas (PMEs) representam 99% das cerca de 6,4 milhões de empresas e são responsáveis por 52% dos empregos com carteira assinada no setor privado. De acordo com um estudo do Sebrae de 2017, aproximadamente 50,6 milhões de pessoas têm sua renda relacionada a essas empresas, incluindo empregados, empresários, autônomos e familiares. Isso demonstra a importância das PMEs no Produto Interno Bruto (PIB) do país. Internacionalmente, cerca de 70% a 90% dos trabalhadores em países da Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE) também estão empregados em PMEs. As principais razões para sua relevância incluem a capacidade de oferecer produtos e serviços personalizados, atuar como prestadoras de serviços para grandes empresas (B2C), e desenvolver atividades produtivas adequadas, como cooperativas agrícolas.

Uma vantagem das PMEs é a sua agilidade e capacidade de adaptação, devido à estrutura mais enxuta, o que facilita a resposta a mudanças. No entanto, enfrentam desafios para acessar crédito adequado, dado seu maior risco e o impacto da inadimplência em seus resultados. Assim, estratégias de concessão de crédito eficazes, como a consulta a CNPJ e CPF, e uma gestão eficiente da recuperação de dívidas, são essenciais para sua sustentabilidade.(SERASA EXPERIAN, 2021)

3.9 ACIDENTES ELÉTRICOS.

3.9.1 Dados gerais

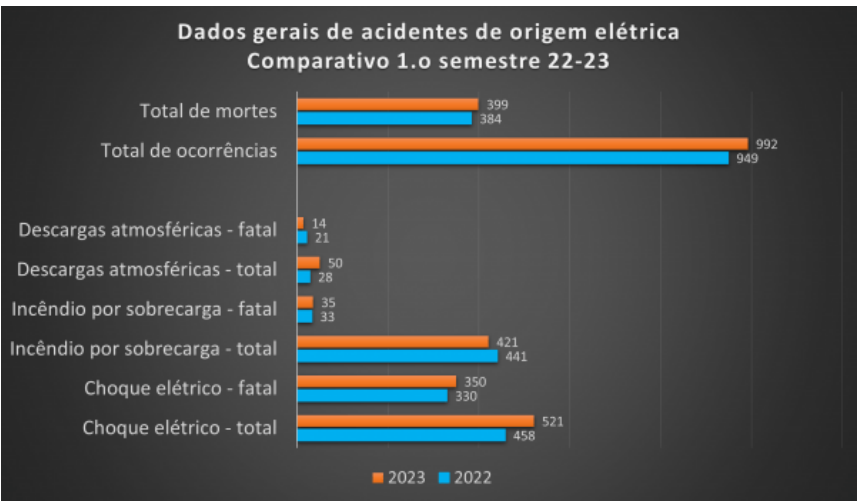
Os números mostram um aumento tanto no total de acidentes quanto nas fatalidades. Em 2022, o período registrou 949 acidentes, incluindo choques elétricos, incêndios e raios. Em 2023, esse número subiu para 992. As mortes também aumentaram, passando de 384 em 2022 para 399 em 2023.

Os choques elétricos continuam a ser a principal causa desses acidentes. Em 2022, foram registrados 458 acidentes por choque, enquanto em 2023, o número subiu para 521. As fatalidades relacionadas a choques elétricos também aumentaram, de 330 em 2022 para 350 em 2023.

Os incêndios causados por sobrecarga elétrica seguem uma tendência preocupante. Em 2022, houve 441 incêndios com 33 mortes no primeiro semestre, números que subiram para 874 acidentes e 55 mortes até o final do ano. Em 2023, foram registrados 421 incêndios e 35 mortes apenas no primeiro semestre. Se essa tendência continuar, é provável que mais um recorde negativo seja alcançado.

As descargas atmosféricas, como raios, também aumentaram, passando de 28 incidentes no primeiro semestre de 2022 para 50 em 2023. Apesar do aumento nos incidentes, as mortes por raios caíram de 21 para 14 no mesmo período

Tabela 2 - Acidentes elétricos



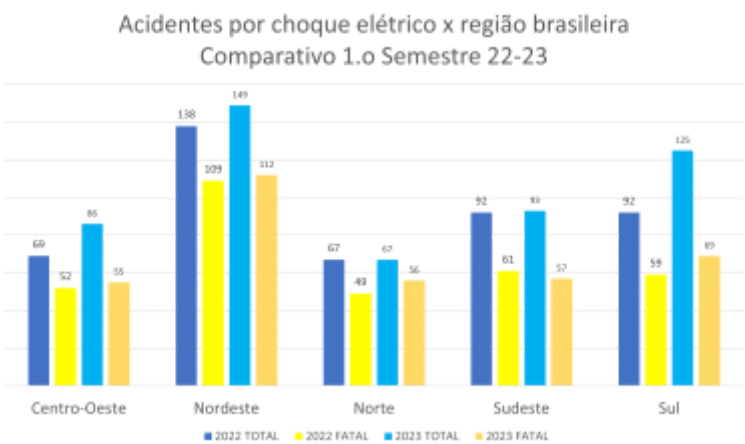
Fonte: Abracopel (2023)

3.9.2 Por região brasileira

O Nordeste continua a liderar em número de acidentes por choque elétrico, com 149 ocorrências e 112 mortes em 2023, comparado a 138 ocorrências e 109 mortes em 2022. Essa região é composta por nove estados, muitos dos quais enfrentam desafios significativos com a infraestrutura elétrica.

Entretanto, o Sul do Brasil tem mostrado um crescimento constante nos acidentes e mortes por choque elétrico e incêndios por sobrecarga nos últimos anos. Em 2022, a região registrou 92 acidentes e 59 mortes por choque elétrico, números que aumentaram para 125 e 69, respectivamente, em 2023. No ranking de mortes por choque elétrico, o Rio Grande do Sul se destaca negativamente, seguido de perto pelo Paraná e Santa Catarina. A Bahia, que tradicionalmente liderava esse ranking, caiu para a quarta posição. As regiões Centro-Oeste e Norte continuam apresentando os menores números.

Tabela 3 - Acidentes por choque 2022-2023



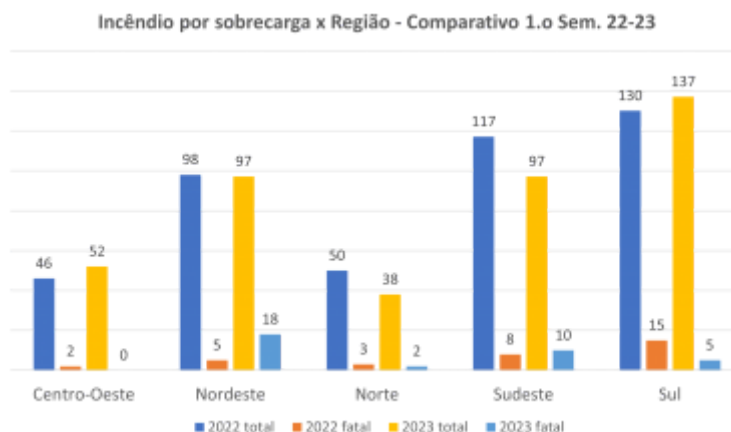
Fonte: Abracopel (2023)

### 3.9.3 Incêndios por sobrecarga de energia

Os incêndios causados por sobrecarga de energia permanecem uma preocupação significativa para a ABRACOPEL. Em parceria com o Sindicel e Qualifio, a associação monitora de perto o mercado de fios e cabos elétricos, cuja má qualidade é frequentemente a causa desses incêndios. Embora tenha havido uma leve queda no número de incêndios por sobrecarga – de 441 em 2022 para 421 em 2023 –, o aumento no número de mortes (de 33 para 35) é motivo de preocupação.

Novamente, a Região Sul se destaca negativamente nesses números. No primeiro semestre de 2023, as residências foram responsáveis por quase 50% dos incêndios causados por sobrecarga, resultando em mais de 80% das mortes. Foram registrados 210 incêndios em residências, com 29 mortes. O segundo local com mais ocorrências foi o comércio, com 91 incidentes, embora sem fatalidades. As escolas também chamaram atenção, com um aumento de 15 ocorrências em 2022 para 26 em 2023, sem mortes registradas.

Tabela 4 - Incêndios por sobrecargas.



Fonte: Abracopel (2023)

*“É preciso atentar para os riscos que a eletricidade oferece. Normalmente, nos esquecemos ou deixamos passar situações em que o risco está ali e pode causar acidentes gravíssimos, às vezes até fatais. Dentro de nossas casas a atenção deve ser redobrada, principalmente com crianças pequenas e idosos. A situação das instalações elétricas– das casas deve ser um ponto a ter prioridade na vida das pessoas: a maioria das casas construídas há mais de 20 anos não possuem capacidade para ‘aguentar’ a quantidade de equipamentos que temos, e com a situação de pandemia e isolamento, nossas casas passaram a ser nosso local de trabalho, aumentando e muito a quantidade de energia elétrica usada. Pensem nisso!”(MARTINHO, 2021)*

### 3.10 GRANDEZAS ELÉTRICAS

A eletricidade é um dos pilares da tecnologia moderna e, para entender como os circuitos elétricos funcionam, é fundamental conhecer as principais grandezas elétricas. Essas grandezas descrevem as diferentes formas de energia e suas interações em um circuito. Cada grandeza tem seu papel específico e suas propriedades únicas, que juntas determinam o comportamento de sistemas elétricos. Compreender essas grandezas e suas inter-relações é essencial para o projeto, análise e funcionamento de circuitos elétricos e dispositivos eletrônicos.

Figura 6 - Grandezas elétricas



Fonte: Manual da eletrônica (s.d)

**Tensão (Voltagem)** é a diferença de potencial elétrico entre dois pontos em um circuito. Representada pelo símbolo  $V$  é medida em volts (V), a tensão é o que impulsiona os elétrons a se moverem através do circuito. Ela indica a força que empurra a corrente elétrica. Em termos simples, uma maior tensão significa que há mais energia disponível para fazer os elétrons se moverem, o que pode resultar em uma corrente elétrica mais forte.

**Corrente Elétrica** refere-se à quantidade de carga elétrica que passa por um ponto de um circuito por unidade de tempo. Denotada pelo símbolo  $I$  e medida em amperes (A), a corrente pode ser visualizada como a taxa de fluxo dos elétrons. Em circuitos de corrente contínua (CC), a corrente é constante, enquanto em circuitos de corrente alternada (CA), a corrente varia ao longo do tempo. A corrente é essencial para o funcionamento de qualquer circuito elétrico, pois é o meio pelo qual a energia é transportada.

**Resistência Elétrica** é a oposição ao fluxo de corrente elétrica em um circuito. Representada pelo símbolo  $R$  e medida em ohms ( $\Omega$ ), a resistência depende da natureza do material e das suas dimensões. Materiais com alta resistência dificultam o fluxo de corrente, enquanto materiais com baixa resistência permitem que a corrente passe mais facilmente. A resistência é uma característica crucial para controlar o fluxo de corrente em um circuito.

**Potência Elétrica** é a taxa na qual a energia elétrica é consumida ou convertida em outras formas de energia, como calor ou luz. Representada pelo símbolo  $P$  e medida em watts (W), a potência é calculada pela multiplicação da tensão pela corrente ( $P=V \times I$ ). A potência é um aspecto importante para entender quanta energia está sendo utilizada em um circuito e como ela está sendo dissipada.

**Energia Elétrica** refere-se à quantidade total de trabalho realizado pela corrente elétrica. Medida em joules (J), a energia elétrica é calculada multiplicando a potência pelo tempo ( $E=P \times t$ ). Esta grandeza é importante para avaliar o consumo total de energia em um dispositivo ou sistema ao longo do tempo.

**Condutância** é o inverso da resistência e mede a facilidade com que a corrente passa através de um condutor. Representada pelo símbolo G e medida em Siemens (S), a condutância é calculada como  $G=1/R$ . Uma alta condutância indica baixa resistência e facilidade para o fluxo de corrente.

**Capacitância** é a capacidade de um componente (capacitor) de armazenar carga elétrica. Representada pelo símbolo e medida em farads (F), a capacitância é dada pela fórmula  $C=Q/V$ , onde Q é a carga armazenada e V é a tensão aplicada. Os capacitores são usados para armazenar e liberar energia em muitos circuitos elétricos.

**Indutância** é a capacidade de um componente (indutor) de armazenar energia na forma de um campo magnético. Representada pelo símbolo L e medida em henrys (H), a indutância determina a oposição ao fluxo de corrente alternada. Indutores são frequentemente usados para filtrar sinais e armazenar energia em circuitos elétricos.

Essas grandezas elétricas estão inter-relacionadas e são descritas por leis fundamentais da eletricidade, como a Lei de Ohm e as Leis de Kirchhoff, e compreender essas relações é essencial para a análise e o projeto de circuitos elétricos. Este projeto terá ênfase nas grandezas elétricas principais: tensão, corrente, potência e energia.

### 3.10.1 Teoria dos Circuitos Elétricos

A teoria dos circuitos elétricos é essencial para compreender o fluxo de corrente elétrica em um sistema e a interação entre seus diversos componentes. No contexto do monitoramento de redes elétricas, essa teoria desempenha um papel crucial ao permitir a análise detalhada de como a carga é distribuída entre diferentes partes do sistema, identificando possíveis desequilíbrios e prevenindo falhas. Por meio da aplicação das leis fundamentais, como a Lei de Ohm e as Leis de Kirchhoff, é possível entender como a corrente se comporta em resposta a variáveis como tensão e resistência, o que é vital para otimizar a eficiência energética e garantir a segurança operacional. Além disso, essa compreensão permite a detecção precoce de anomalias, como sobrecargas ou correntes de fuga, que podem comprometer a integridade do sistema. O monitoramento contínuo, fundamentado na teoria dos circuitos, possibilita a tomada de decisões informadas, garantindo que a rede opere de maneira eficiente e segura, minimizando riscos e melhorando o desempenho global do sistema elétrico.

### 3.11 FATOR DE POTÊNCIA

O fator de potência é um fator essencial nas operações de sistemas elétricos industriais, ele mede a eficácia com que a energia elétrica fornecida é convertida em trabalho útil. Em um sistema elétrico, a energia é dividida em duas partes, a potência real e a potência reativa. A potência real é a parte da energia que realiza o trabalho, como acender uma lâmpada ou acionar um motor e utiliza a medida em watts (W). Já a potência reativa, por outro lado, não realiza trabalho direto, mas é indispensável pois cria campos magnéticos em motores e transformadores e é medida em volt-amperes reativos (VAR).

A relação dessas duas formas de potência é expressa pelo fator de potência, que é a razão entre a potência real e a potência aparente. A potência aparente, medida em volt-amperes (VA), é a junção da potência real e da potência reativa. O fator de potência é calculado utilizando as seguintes fórmulas:

$$FP = \frac{\text{Potência Real (W)}}{\text{Potência Aparente (VA)}}$$

$$FP = \cos(\theta) \quad (\text{FERNANDO, 2023})$$

No ambiente industrial, o fator de potência é importante por várias razões. O fator de potência elevado indica que a energia elétrica está sendo utilizada de forma eficiente. Se o fator de potência está baixo, isso indica que alguma parte significativa da energia fornecida está sendo desperdiçada, o que pode levar a incompetências operacionais. Essas ineficiências não apenas aumentam o consumo de energia, mas podem resultar em custos adicionais significativos, pois muitas concessionárias de energia cobram baseado na potência aparente, e não na potência real utilizada.

Um fator de potência baixo pode requerer que os equipamentos elétricos, como transformadores e geradores, sejam dimensionados para suportar uma maior quantidade de potência aparente. Com isso pode aumentar os custos das instalações e das operações, já que os equipamentos precisam ser maiores e mais robustos para lidar com a demanda adicional de potência reativa. Com a melhora do fator de potência pode-se reduzir esses custos, e permitir o uso de equipamentos adequados e econômicos.

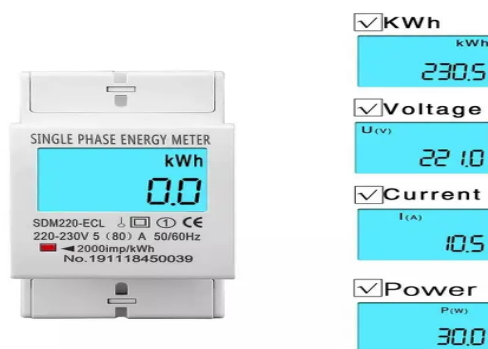
A qualidade da energia pode ser afetada por um fator de potência baixo causando problemas como quedas de tensão e sobrecargas, assim afetando a estabilidade e a confiabilidade nos sistemas elétricos. Na indústria, onde a constância e a eficiência das operações são cruciais, esses problemas podem causar interrupções e falhas, prejudicando a operação geral.

Para corrigir o fator de potência baixo, várias técnicas são recomendadas. Como a instalação de capacitores, que fornecem uma potência reativa necessária para compensar a potência reativa gerada por equipamentos indutivos. Os bancos de capacitores são constantemente empregados com essa finalidade, ajudando a melhorar o fator de potência e reduzir a quantidade de potência reativa que precisa ser fornecida pela rede elétrica.

É importante que a correção do fator de potência seja feita de maneira cuidadosa para evitar problemas como a sobrecompensação. Isso ocorre quando há um excesso de capacidade de correção, o que pode derivar em um fator de potência negativo e criar outras novas ineficiências. Com isso, a escolha e o enquadramento dos dispositivos de correção devem ser adequados com as necessidades específicas do sistema industrial.

### 3.12 MEDIÇÃO DE ENERGIA E POTÊNCIA

Figura 7 - Medidor de energia AC



Fonte: Magalu (2024)

A medição de energia elétrica geralmente envolve o uso de medidores de energia (FIGURA 7), que registram o consumo de eletricidade em kilowatt-horas (kWh). Esses dispositivos são essenciais para monitorar a rede elétrica industrial, permitindo a detecção de sobrecargas e a otimização da distribuição de energia.

Oliveira (2019) Apesar de no Sistema Internacional de Unidades (S.I.) a unidade de energia ser o Joule (J), se tratando de consumo da energia elétrica é

utilizado o kilowatt-horas (kWh) e o seu cálculo pode ser realizado mediante a equação:

$$E = P \times \Delta t$$

Substituindo a Equação, tem-se:

$$E = V \times I \times \Delta t$$

Onde, E é a energia elétrica em kWh, P a potência do equipamento em kW, V a tensão aplicada no equipamento em kV, I a corrente do equipamento em kA e  $\Delta t$  a variação do tempo em horas.

Figura 8 - Transformador de corrente



Fonte: Medição de Energia (2020)

Sensores como transformadores de corrente (CTs) e medidores de tensão são frequentemente utilizados para monitorar cargas elétricas em sistemas trifásicos. Eles fornecem dados críticos sobre o desempenho do sistema elétrico, permitindo intervenções rápidas em caso de anomalias.

Figura 9 - Medidores de tensão



Fonte: Zilocchi loja (2024)

### 3.13 ANÁLISE DE CUSTO-BENEFÍCIO

Para tornar clara a vantagem econômica do sistema automatizado frente à solução manual, vamos decompor custos e benefícios em três grandes frentes: (a) **investimento inicial**; (b) **custos operacionais e de manutenção**; e (c) **ganhos evitados (penalidades, paradas e mão de obra)**. No final, apresentamos o **payback** e o **retorno sobre investimento (ROI)**.

#### 3.13.1 Payback

Payback (do inglês “retorno” ou “recuperação”) representa o período de tempo necessário para que um investimento se pague, ou seja, para que os lucros gerados pelo investimento sejam iguais ao valor investido. (EQUIPE TOTVS, 2023)

Matematicamente, em sua forma mais simples, calcula-se pela relação entre o investimento inicial ( $C_i$ ) e o fluxo de caixa médio periódico ( $FC_m$ ):

$$Payback = \frac{C_i}{FC_m}$$

Um payback reduzido sinaliza menor exposição ao risco de recuperação do capital investido, mas essa métrica não incorpora o valor temporal do dinheiro nem considera os fluxos de caixa que ocorrem após o ponto de equilíbrio.

### 3.13.2 ROI (Return on Investment)

O termo ROI vem do inglês Return On Investment ou, como é traduzido, Retorno sobre o Investimento. Por meio de uma fórmula matemática simples, esse indicador oferece aos gestores de Marketing uma informação importante: quanto retornou cada R\$1 investido em determinadas ações. (PINGBACK, 2022)

Formalmente, expressa-se como:

$$ROI_{(\%)} = \left( \frac{Ganhos\ totais - Custos\ totais}{Custos\ totais} \right) \times 100_{\%}$$

Um ROI elevado indica alta eficiência na geração de valor financeiro em comparação ao capital aplicado. Entretanto, similar ao payback simples, o cálculo tradicional de ROI desconsidera a depreciação do valor do dinheiro ao longo do tempo e não diferencia temporalmente os diversos fluxos de caixa recebidos.

### 3.13.3 Investimento inicial

Tabela 5 - Investimento inicial

| Item                              | Solução Manual (R\$)                          | Solução Automatizada (R\$)         |
|-----------------------------------|-----------------------------------------------|------------------------------------|
| Equipamento de medição            | 200 (alicate) + 300 (multímetro) = <b>500</b> | 3×TC (80) + 3×VD (50) = <b>390</b> |
| Microcontrolador / Computador     | PC Básico: <b>2.000</b>                       | ESP32: <b>80</b>                   |
| Placa de condicionamento de sinal | -                                             | <b>150</b>                         |
| Desenvolvimento de software       | -                                             | Dashboard web: <b>300</b>          |
| Instalação                        | 2 visitas iniciais x 200 = <b>400</b>         | Instalação única: <b>300</b>       |
| <b>Total inicial</b>              | <b>2900</b>                                   | <b>1220</b>                        |

### 3.13.4 Custos operacionais e de manutenção anuais

Tabela 6 - Custos operacionais e de manutenção anuais

| Item                                 | Manual (R\$/Ano) | Automatizado (R\$/Ano) |
|--------------------------------------|------------------|------------------------|
| Licença de software / Excel          | <b>500</b>       | -                      |
| Visitas de manutenção (12×200)       | <b>2400</b>      | -                      |
| Ajustes e parametrizações adicionais | -                | <b>300</b>             |
| <b>Total Operacional</b>             | <b>2900</b>      | <b>300</b>             |

### 3.13.5 Ganhos evitados (Benefícios)

#### 3.13.5.1 Multas por Fator de Potência

De acordo com as normas tarifárias das concessionárias de energia, consumidores com fator de potência inferior ao mínimo exigido (geralmente 0,92) estão sujeitos a penalidades. A tarifa média aplicada é de aproximadamente R\$ 0,50 por kVA<sub>rh</sub> excedente.

Considerando uma Pequena ou Média Empresa (PME) com consumo mensal médio de 500 kVA<sub>rh</sub> fora do padrão, a penalidade mensal pode chegar a:

**500 kVA<sub>rh</sub> × R\$ 0,50 = R\$ 250/mês**, o que representa um custo anual de **R\$ 3 000**.

A correção do fator de potência por meio do sistema proposto elimina essa despesa, configurando um benefício direto.

#### 3.13.5.2 Redução de Paradas Não Planejadas

As falhas elétricas, em especial aquelas causadas por sobrecargas, quedas de tensão ou distorções harmônicas, podem ocasionar paradas não programadas nos processos produtivos.

Considerando um custo médio de **R\$ 500 por hora de parada**, e uma estimativa de **10 horas/ano de downtime evitadas** com a adoção do sistema de monitoramento e prevenção, estima-se um benefício anual de:

**10 h × R\$ 500 = R\$ 5 000**.

#### 3.13.5.3 Redução de Visitas Técnicas

No cenário atual, sem o sistema automatizado, são necessárias medições manuais mensais, totalizando **12 visitas técnicas por ano**. Essas visitas já estão incluídas no custo operacional da empresa.

Com a implementação do sistema de monitoramento remoto, elimina-se a necessidade de visitas rotineiras para coleta de dados, o que representa uma economia estimada de:

**12 visitas × R\$ 200 = R\$ 2 400/ano**.

#### 3.13.5.4 Aumento da Vida Útil dos Equipamentos

Com a estabilização da rede elétrica, redução de sobrecargas e distúrbios elétricos, é possível prolongar a vida útil de equipamentos como motores e inversores. Estima-se um ganho médio de **20% na durabilidade desses componentes**, o que pode representar uma **redução de aproximadamente R\$ 1 500/ano** em custos com reposição e manutenção preventiva.

Este é considerado um **benefício indireto**, mas com impacto relevante na economia operacional de médio e longo prazo.

#### Total de Benefícios Econômicos Anuais

Tabela 7 - Benefícios Econômicos Anuais

| Tipo de Benefício                          | Valor Anual (R\$) |
|--------------------------------------------|-------------------|
| Eliminação de multas por fator de potência | 3 000             |
| Redução de paradas não planejadas          | 5 000             |
| Redução de visitas técnicas                | 2 400             |
| Aumento da vida útil de equipamentos       | 1 500             |
| <b>Total estimado</b>                      | <b>11 900</b>     |

### 3.13.6 Utilizando cálculo do payback e ROI

Ambos os cálculos foram utilizados com exemplos figurativos, para sua demonstração.

#### 3.13.6.1 Calculo Payback

Se você investe R\$ 1.220 e espera economizar R\$ 995 por mês, o payback será  $1.220 \div 995 \approx 1,27$  meses.

$$Payback = \frac{Ci}{FC \ m}$$

$$Payback = \frac{1220}{995}$$

$$Payback = 1,27$$

**Interpretação:** Quanto menor o payback, mais rápido o projeto “se paga” e menor é o risco associado.

**Limitações:** Não considera fluxos de caixa após o ponto de retorno nem o valor do dinheiro no tempo (não desconta fluxos futuros).

#### 3.13.6.2 Calculo ROI

No exemplo anterior, com ganhos de R\$ 11.900 e custos totais (inicial + operacional) de R\$ 1.520, temos:

$$ROI_{(\%)} = \left( \frac{Ganhos \ totais - Custos \ totais}{Custos \ totais} \right) \times 100_{\%}$$

$$ROI_{(\%)} = \left( \frac{11900 - 1520}{1520} \right) \times 100_{\%}$$

$$ROI_{(\%)} = (6,828) \times 100_{\%}$$

$$ROI_{(\%)} = 682,8\%$$

**Interpretação:** indica quantas vezes o capital investido foi “retornado” em forma de lucro; um ROI de 100% significa que você dobrou o capital.

**Limitações:** assim como o payback simples, o ROI tradicional não leva em conta o valor do dinheiro no tempo nem o risco de cada fluxo futuro.

### 3.14 ARQUITETURA IOT E PROTOCOLOS

#### 3.14.1 MQTT

MQTT (*Message Queuing Telemetry Transport*) é um protocolo de mensagens leve, projetado para ambientes com recursos limitados, baixa largura de banda e alta latência — ideal para IoT e sistemas M2M.

##### 3.14.1.1 Importancia MQTT

O protocolo MQTT se tornou um padrão para transmissão de dados IoT porque oferece estes benefícios: Leve e eficiente, confiável, escalável, seguro, bom suporte. (Amazon, 2022)

##### 3.14.1.2 Como funciona o MQTT

Abaixo, há uma visão geral de como o MQTT funciona.

1. Um cliente MQTT estabelece uma conexão com o agente MQTT.
2. Depois de conectado, o cliente pode publicar mensagens, assinar mensagens específicas ou fazer as duas coisas.
3. Ao receber uma mensagem, o agente MQTT a encaminha aos assinantes interessados. (Amazon, 2022)

### 3.15 REST

REST (Representational State Transfer) é um estilo arquitetural comum para APIs web que usa requisições HTTP (GET, POST, PUT, DELETE) entre cliente e servidor. (“Módulo MQTT - UFPR”, 2024)

#### 3.15.1 REST vs MQTT

Tabela 8 - REST vs MQTT

| Característica      | REST (HTTP)                            | MQTT (Publish/Subscribe)            |
|---------------------|----------------------------------------|-------------------------------------|
| Modelo              | Síncrono, cliente–servidor             | Assíncrono, publish/subscribe       |
| Conexões            | Sob demanda (abre e fecha)             | Persistente via TCP                 |
| Latência            | Maior, por re-conexões e overhead HTTP | Baixa, com payloads pequenos        |
| Consumo de energia  | Alto devido a conexões constantes      | Baixo — ideal para sensores IoT     |
| Escalonamento       | Pode sobrecarregar servidores          | Broker centralizado facilita escala |
| Garantia de entrega | Depende da implementação               | Controle via QoS (0, 1, 2)          |

### 3.15.2 Broker

#### Função

O broker atua como mediador entre **publishers** e **subscribers**, entregando as mensagens aos inscritos nos respectivos tópicos. (EQUIPE DE REDAÇÃO, 2025)

#### Exemplos populares

- **Mosquitto** (open source) — leve e fácil de configurar
- Outros: HiveMQ, EMQX

#### Ponto único de falha

Se o broker falhar, toda a comunicação é afetada. É necessário considerar redundância ou alta disponibilidade. (EQUIPE DE REDAÇÃO, 2025)

### 3.15.3 QoS (Qualidade de Serviço)

O MQTT oferece três níveis de QoS para equilibrar confiabilidade, duplicação e overhead:

- **QoS 0 – “At most once”**

Sem confirmação ou retransmissão — rápido, mas sem garantia de entrega

- **QoS 1 – “At least once”**

Garantia de entrega, com risco de duplicação

- **QoS 2 – “Exactly once”**

Mais confiável, evita duplicação, porém com maior latência e custo computacional

Aplicação no ESP-32: importante balancear confiabilidade vs. overhead, considerando memória e instabilidade de conexão. (Leandro Roisenberg, 2023)

### **3.15.4 Latência**

#### **Latência**

MQTT geralmente oferece menor latência que REST devido à conexão mantida e mensagens leves.

#### **Perda de pacotes**

Redes instáveis podem causar perdas. QoS melhora isso, mas com trade-offs: QoS 2 reduz perda, mas aumenta atraso. REST também pode ser vulnerável devido à reconexão HTTP. (Marcelo V. Souza)

#### **Monitoramento em tempo real**

- Com MQTT, especialmente usando QoS 0, é possível fluxos rápidos com baixa latência, adequados à maioria dos sensores.
- Em aplicações críticas (como alarmes ou comandos), QoS 1 ou 2 são mais apropriados, ainda que mais lentos. (Marcelo V. Souza)

### **3.15.5 Relação uso do Esp-32 e Node-RED**

#### **ESP-32 com MQTT**

- Dispositivo microcontrolador com Wi-Fi/Bluetooth, ideal para soluções IoT
- Envia (publica) dados via MQTT e se inscreve em tópicos via bibliotecas como *PubSubClient*. (Marcelo V. Souza)

## **Node-RED**

- Ferramenta visual baseada em fluxo para integrar dados de forma simples
- Funciona como subscriber MQTT, processa dados e exibe dashboards em tempo real. (Marcelo V. Souza)

### **Fluxo geral do sistema**

1. ESP-32 publica via MQTT.
2. Broker recebe e repassa.
3. Node-RED processa e exibe via dashboard (gráficos, indicadores). (Marcelo V. Souza)

### **3.16 FONTES DE ERRO E MITIGAÇÃO**

Em sistemas de aquisição de dados e instrumentação, especialmente naqueles voltados à monitoração em tempo real, como os baseados em microcontroladores (ex. ESP32) e sensores analógicos ou digitais, a presença de erros é inevitável. Esses erros, no entanto, podem ser identificados, caracterizados e mitigados com técnicas adequadas. A seguir, são descritas as principais fontes de erro envolvidas na cadeia de medição e suas respectivas formas de mitigação.

#### **3.16.1 Efeito ruído**

O ruído é um dos principais fatores que afetam a precisão das medições em sistemas eletrônicos. Trata-se de sinais indesejados, geralmente de alta frequência, que se sobrepõem ao sinal útil. Suas fontes são diversas: interferência eletromagnética proveniente de equipamentos eletrônicos próximos, variações térmicas internas aos componentes, ruído de fonte de alimentação, e até mesmo o próprio ambiente (com motores, lâmpadas fluorescentes, Wi-Fi, entre outros). O impacto do ruído nas medições é significativo, pois provoca flutuações aleatórias nas leituras, reduz a estabilidade do sistema e pode gerar interpretações incorretas dos dados. A mitigação do ruído pode ser realizada por meio da blindagem

eletromagnética dos cabos e circuitos sensíveis, aterramento adequado, uso de fontes de alimentação reguladas e estáveis, além da aplicação de filtros – tanto analógicos quanto digitais – para suavizar as variações. Filtros como média móvel ou filtros passa-baixa são amplamente utilizados para reduzir o efeito do ruído em tempo real. (Genuen, [s.d.] )

### **3.16.2 Acoplamento**

O acoplamento indesejado entre circuitos ocorre quando sinais ou interferências são transferidos de um condutor para outro por meio de efeitos capacitivos, indutivos ou galvânicos. Em sistemas de instrumentação, esse fenômeno pode provocar a introdução de sinais espúrios em linhas de medição, especialmente quando trilhas de sinal e potência estão próximas ou quando cabos não são adequadamente isolados. O acoplamento pode gerar distorções, ruídos ou alterações de nível no sinal, prejudicando a exatidão das leituras. Para mitigar esses efeitos, é recomendável o uso de cabos blindados, separação física entre linhas de potência e sinal, uso de condutores trançados e, sempre que possível, adoção de sensores com saídas diferenciais, que são menos sensíveis a ruídos externos. Além disso, a aplicação de filtros de interferência eletromagnética (EMI) nos pontos críticos do sistema ajuda a reduzir os efeitos do acoplamento. (Genuen, [s.d.] )

### **3.16.3 Offset DC**

O offset DC refere-se a um deslocamento constante no sinal medido, mesmo quando o valor esperado deveria ser zero. Esse erro pode ser introduzido por imperfeições nos sensores, variações térmicas nos circuitos eletrônicos, falhas de calibração ou características dos conversores analógico-digitais (ADC). O offset resulta em uma leitura sistematicamente incorreta, o que compromete a confiabilidade das medições. Por exemplo, em sensores de corrente, um offset pode levar à indicação de corrente circulando mesmo quando o circuito está desligado. A mitigação do offset pode ser realizada de forma analógica, com o uso de amplificadores operacionais com ajuste de offset, ou digitalmente, por meio da calibração de zero e subtração do valor de offset via software. Essa compensação é

fundamental em sistemas que exigem alta precisão, como monitoramento de grandezas elétricas ou sensores de posição. (UNICAMP, [s.d.] )

#### **3.16.4 Fase entre sensor e medição**

Em aplicações dinâmicas, como análise de vibrações, corrente alternada ou fenômenos transitórios, a defasagem entre o sinal gerado pelo sensor e o momento em que ele é medido pelo sistema pode levar a distorções nas análises. Essa defasagem pode ser causada pelo tempo de resposta do sensor, atrasos nos circuitos de condicionamento do sinal, latência de processamento no microcontrolador ou mesmo pelo uso de filtros com fase não-linear. Quando não compensada, a defasagem pode provocar erros na identificação da frequência ou amplitude de sinais periódicos, e também gerar desalinhamento entre sinais correlacionados, como tensão e corrente. Para mitigar esse problema, é importante utilizar sensores com tempos de resposta compatíveis com a dinâmica do sistema monitorado, minimizar buffers ou circuitos que introduzam atraso e, quando necessário, aplicar correções via software, alinhando os dados com base em tempos de amostragem conhecidos.

#### **3.16.5 Calibração**

A calibração é o processo de ajuste e comparação de um instrumento de medição com um padrão conhecido e confiável. Em sistemas de monitoramento baseados em sensores, a calibração é essencial para garantir a exatidão e reprodutibilidade dos dados coletados. A ausência de calibração pode levar a leituras incorretas, inconsistência entre sensores e perda de confiabilidade nos dados. A calibração pode ser realizada de forma manual, com instrumentos padrão, ou automatizada, com softwares que aplicam curvas de correção. Além disso, é necessário considerar fatores como temperatura, tempo de uso e condições ambientais, que podem alterar as características dos sensores ao longo do tempo. A calibração periódica, associada à aplicação de funções de correção no firmware do microcontrolador, assegura maior precisão e uniformidade nas medições. (Dadao Energy, 2025)

### 3.16.6 Filtro passa-baixa\anti-alias

Um **filtro passa-baixa** permite que apenas frequências abaixo de um determinado corte (cut-off) passem, bloqueando as frequências mais altas. Em sistemas digitais de aquisição, isso é essencial para evitar o fenômeno de **aliasing** — quando componentes de alta frequência se “dobram” e aparecem como sinais de baixa frequência após a amostragem. (WIKIPEDIA, [s.d.] )

## 3.17 APLICAÇÕES PRÁTICAS E PROTOTIPAGEM

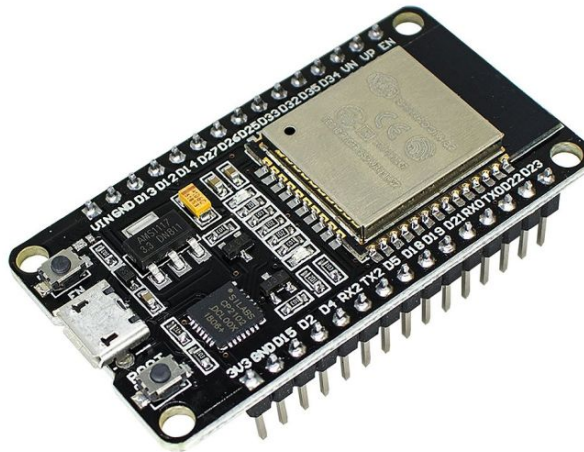
### 3.17.1 Prototipagem de Sistemas de Monitoramento

A construção de um protótipo para monitoramento de rede elétrica industrial envolve a integração de diversos componentes eletrônicos, como sensores, microcontroladores e sistemas de comunicação. A prototipagem permite testar a viabilidade das teorias e modelos discutidos anteriormente, garantindo que o sistema seja eficiente e eficaz na detecção de desequilíbrios de carga.

Com isso, o projeto de monitoramento de rede elétrica industrial teve a escolha de pensar nos seguintes componentes a favor do custo e do rendimento.

### 3.17.2 Funcionamento e aplicação Esp32

Figura 10 - Placa Esp 32 / 30 pinos / Wifi



Fonte: Saravati (2024)

O ESP32 é um microcontrolador versátil e poderoso, ideal para projetos de IoT. Equipado com um processador dual-core de 32 bits, ele oferece desempenho robusto para executar múltiplas tarefas simultaneamente. Com conectividade Wi-Fi e Bluetooth integrada, o ESP32 permite a comunicação sem fio, essencial para monitoramento remoto e controle em tempo real. Além disso, seus pinos GPIO permitem a interação com sensores e atuadores, suportando interfaces como SPI, I2C e UART. O ESP32 pode ser programado em C++ ou MicroPython, o que o torna flexível para diversas aplicações.

## Aplicação

O ESP32 é importante por suas capacidades de processamento e conectividade. Ele permite a coleta e transmissão de dados elétricos em tempo real, facilitando a supervisão remota e a detecção prévia de problemas. A conectividade sem fio integrada permite que os dados sejam enviados para servidores ou nuvem para análise. Além disso, a flexibilidade e escalabilidade do ESP32 permitem que o sistema seja facilmente adaptado ou expandido, tornando-o uma escolha ideal para ambientes industriais que exigem monitoramento contínuo e eficiente.

### 3.17.3 Funcionamento e aplicação SCT

Figura 11 - SCT-013



Fonte: Hu infinito (2024)

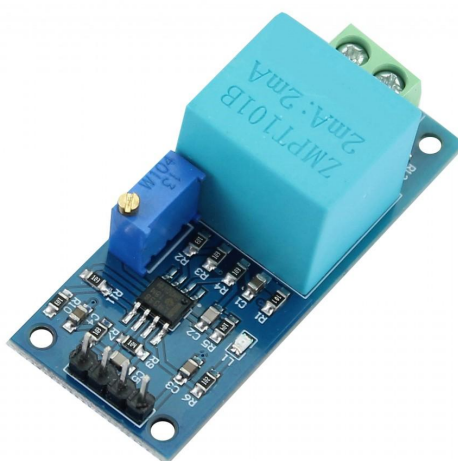
O sensor de corrente não invasivo 100A SCT-013 é um dispositivo que permite medir a corrente elétrica em um condutor sem a necessidade de contato direto. Ele funciona por meio do princípio da indução magnética, onde um transformador de corrente captura o campo magnético ao redor de um cabo condutor, convertendo-o em um sinal elétrico proporcional à corrente que passa pelo cabo. Esse sinal pode ser então utilizado para monitorar e analisar o consumo de energia elétrica de forma segura e precisa, sem interromper o circuito.

### **Aplicação**

O sensor SCT-013 é essencial para medir a corrente de forma segura e precisa, sem a necessidade de desconectar ou modificar o sistema elétrico existente. Ele facilita a instalação e manutenção do sistema de monitoramento, já que não requer a interrupção do fluxo elétrico. Além disso, a capacidade do sensor de medir correntes de até 100A torna-o adequado para ambientes industriais, onde são comuns altas correntes. Isso permite um monitoramento eficaz e contínuo do consumo de energia, contribuindo para a eficiência e segurança do sistema elétrico.

#### **3.17.4 Funcionamento e aplicação Sensor Tensão**

Figura 12 - Sensor Tensão 250v



Fonte: UsinaInfo (2024)

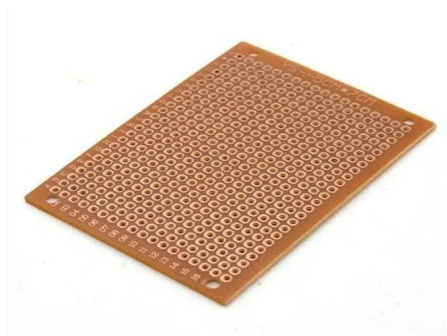
O módulo sensor de tensão AC 0-250V Voltímetro ZMPT101B é um dispositivo projetado para medir tensões alternadas de até 250V. Ele utiliza um transformador de tensão de alta precisão, o ZMPT101B, que converte a tensão alternada medida em um sinal de baixa amplitude proporcional, adequado para ser lido por um microcontrolador ou sistema de obtenção de dados. Esse módulo permite medir a tensão de forma precisa, mesmo em sistemas com flutuações ou distorções na forma de onda, garantindo uma leitura estável e confiável da tensão presente na rede elétrica.

### **Aplicação**

O módulo ZMPT101B desempenha um papel fundamental ao fornecer medições precisas da tensão da rede elétrica. A capacidade de monitorar tensões de até 250V o torna ideal para aplicações industriais, onde essas faixas de tensão são comuns. Sua integração no sistema permite a coleta de dados em tempo real sobre as variações de tensão, que são cruciais para a análise do desempenho da rede elétrica e a identificação de danos. Além disso, o ZMPT101B facilita a manutenção preditiva e a otimização do consumo de energia, contribuindo para a eficiência e a segurança operacional do sistema elétrico monitorado.

#### **3.17.5 Funcionamento e aplicação Placa Fenolite Perfurada 7x5cm**

Figura 13 - Placa Fenolite Perfurada 7x5cm



Fonte: Eletrogate (2024)

A Placa Fenolite Perfurada 7x5cm é amplamente utilizada no ramo elétrico e eletrônico para a montagem de circuitos. Fabricada com um material isolante, o fenolite, ela possui furos que permitem a inserção de componentes eletrônicos, como resistores, capacitores, transistores, e fios de conexão. A placa funciona como uma base que facilita a organização e soldagem desses componentes, garantindo que fiquem fixos de maneira estável, formando um circuito integrado e seguro. Esse tipo de placa é preferido em prototipagens e pequenas produções de circuitos devido à sua simplicidade, durabilidade e capacidade de evitar curtos-circuitos, graças às suas propriedades isolantes.

### **Aplicação**

No contexto do projeto de monitoramento de rede elétrica industrial, a Placa Fenolite Perfurada serve como suporte físico para os principais componentes eletrônicos, como o microcontrolador ESP32, sensores de corrente SCT-013, e sensores de tensão ZMPT101B. A aplicação dessa placa permite uma montagem organizada e segura dos circuitos necessários para captar e processar os dados das variáveis elétricas (corrente, tensão, fator de potência) monitoradas. Além disso, ela contribui para a robustez do protótipo, garantindo que os componentes eletrônicos fiquem bem conectados, evitando deslocamentos ou falhas, principalmente em ambientes industriais sujeitos a vibrações e condições adversas. Isso é crucial para manter a integridade do sistema de monitoramento e assegurar a precisão nas leituras e no controle em tempo real da rede elétrica.

### 3.17.6 Funcionamento e aplicação Resistor

Figura 14 - Resistor



Fonte: Curto Circuito (2024)

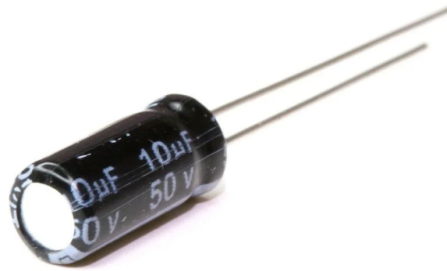
O resistor de ohm é um componente passivo que tem a função de limitar a corrente elétrica que passa por um circuito. Ao oferecer uma resistência, ele controla a quantidade de corrente que pode fluir, protegendo os componentes de sobrecargas e permitindo o funcionamento correto do circuito. Esse tipo de resistor é muito utilizado em circuitos de controle de tensão, divisão de corrente e em sistemas que exigem precisão no gerenciamento de energia elétrica.

#### **Aplicação**

No projeto de monitoramento de rede elétrica industrial, o resistor é utilizado para limitar a corrente que chega aos sensores e ao microcontrolador ESP32. Ele ajuda a evitar que picos de corrente danifiquem os componentes sensíveis, garantindo a segurança e a precisão das medições de corrente, tensão e fator de potência. Além disso, ao controlar a corrente em pontos estratégicos do circuito, ele assegura que os sinais captados pelos sensores sejam adequados para processamento sem riscos de sobrecarga.

### 3.17.7 Funcionamento e aplicação Capacitor

Figura 15 - Capacitor



Fonte: Baú da eletrônica (2024)

O capacitor é um componente que armazena energia elétrica em forma de campo eletrostático e a libera conforme necessário. Ele é utilizado para filtrar oscilações de tensão e eliminar ruídos indesejados em circuitos elétricos. Além disso, o capacitor ajuda a suavizar as flutuações de tensão, garantindo uma alimentação mais estável para os componentes eletrônicos.

#### **Aplicação**

No projeto de monitoramento de rede elétrica industrial, o capacitor é aplicado para estabilizar a tensão que alimenta o microcontrolador ESP32 e os sensores de corrente e tensão. Ele filtra as oscilações e ruídos na alimentação elétrica, garantindo que as medições realizadas pelos sensores não sejam comprometidas por variações indesejadas. Isso é especialmente importante em ambientes industriais, onde interferências e flutuações de energia são comuns e podem afetar a precisão do monitoramento elétrico.

### **3.17.8 Funcionamento e aplicação Conector Jack P2 Audio 3.5mm**

Figura 16 - Jack P2



Fonte: MakerHero (2024)

Na indústria, o Conector Jack P2 é geralmente usado em módulos de comunicação e testes. Ele permite uma conexão prática e rápida para equipamentos auxiliares, sem a necessidade de conexões permanentes, facilitando o diagnóstico e monitoramento de circuitos em campo.

#### **Aplicação**

Esse conector é usado para comunicação de dados e transmissão de sinais em pequenos módulos de áudio ou interfaces que exigem um tipo de entrada/saída flexível. No projeto, ele é utilizado para fazer a conexão dos sensores de corrente, que são saídas P2.

### **3.17.10 Funcionamento e aplicação Conector Borne KRE**

Figura 17 - Borne KRE



Fonte: Cromatek (2024)

Amplamente empregado para fixação de cabos em circuitos elétricos industriais, o Conector Borne KRE proporciona uma conexão confiável que minimiza a possibilidade de mau contato. Sua estrutura facilita a instalação e manutenção, pois permite a desconexão rápida dos fios em caso de ajustes ou trocas de componentes.

#### **Aplicação**

Este conector é utilizado para interligar os componentes do sistema de monitoramento, garantindo conexões firmes e seguras entre cabos e sensores. No projeto, ele serve como ponto de conexão do sensor de tensão ao microcontrolador, otimizando a transferência de dados e evitando perdas de sinal.

### 3.17.11 Funcionamento e aplicação Conector Jack P4 Fêmea

Figura 18 - P4 Fêmea



Fonte: Eletrogate (2025)

O **Conector Jack P4 Fêmea** é um componente utilizado para conexões de alimentação elétrica em corrente contínua (DC), garantindo uma passagem de energia estável entre o plug macho e o terminal interno. Possui estrutura metálica e isolamento adequado, oferecendo contato firme e baixa resistência elétrica.

#### **Aplicação**

Amplamente empregado em fontes de alimentação, câmeras de segurança, roteadores e placas de desenvolvimento, o conector P4 fêmea proporciona uma ligação prática e segura. Sua padronização facilita a montagem e manutenção de circuitos eletrônicos, assegurando eficiência e confiabilidade no fornecimento de energia aos dispositivos.

### 3.17.12 Funcionamento e aplicação Porta Fusível

Figura 19 - Porta Fusível



Fonte: Eletrogate (2025)

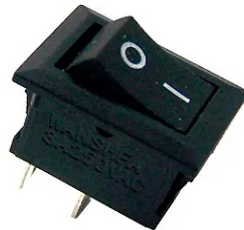
O **Porta Fusível** é um componente projetado para abrigar e proteger fusíveis elétricos, garantindo uma conexão segura entre o circuito e o elemento de proteção. Sua principal função é permitir a substituição rápida do fusível em caso de sobrecorrente, evitando danos aos dispositivos conectados. É fabricado em materiais isolantes e resistentes ao calor, assegurando proteção mecânica e elétrica durante o funcionamento.

#### Aplicação

O **Porta Fusível** é amplamente utilizado em fontes de alimentação, painéis elétricos, equipamentos industriais e sistemas eletrônicos em geral. Ele facilita a manutenção e aumenta a segurança do circuito, permitindo a rápida substituição do fusível sem necessidade de desmontar o sistema. Sua presença é essencial para proteger componentes sensíveis contra sobrecargas e curtos-circuitos, contribuindo para a confiabilidade e durabilidade do sistema elétrico.

### 3.17.13 Funcionamento e aplicação Botão Chave Mini Interruptor

Figura 20 - Botão Mini



Fonte: Eletrogate (2025)

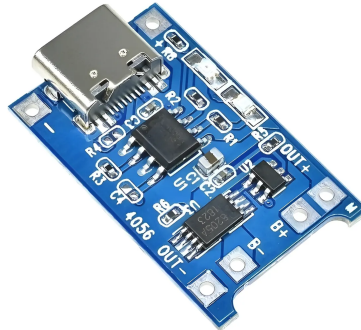
O **Botão Chave Mini Interruptor** é um componente eletromecânico utilizado para abrir ou fechar circuitos elétricos de forma manual. Seu funcionamento baseia-se em um mecanismo interno de contato que, ao ser acionado, permite ou interrompe a passagem de corrente elétrica. Esse tipo de interruptor é projetado para suportar baixas correntes e tensões, sendo ideal para aplicações em sistemas de controle e acionamento de baixo consumo.

#### **Aplicação**

O **Mini Interruptor** é amplamente empregado em painéis de controle, protótipos eletrônicos, projetos com microcontroladores e dispositivos portáteis. Ele possibilita o acionamento rápido e preciso de funções como ligar, desligar ou selecionar modos de operação. Graças ao seu tamanho reduzido, é facilmente integrado em circuitos compactos, oferecendo praticidade, confiabilidade e durabilidade em aplicações eletrônicas diversas.

### 3.17.14 Funcionamento e aplicação Módulo Carregador Bateria de Lítio 1A

Figura 21 - Módulo Carregador Bateria



Fonte: Eletrogate (2025)

O **Módulo Carregador de Bateria de Lítio 1A** é um circuito desenvolvido para realizar o carregamento controlado de baterias de íon-lítio de 3,7V. Ele utiliza o chip TP4056, responsável por regular a corrente e a tensão de carregamento, garantindo segurança e eficiência no processo. O módulo conta com indicadores LED que sinalizam o status da carga e possui proteção contra sobrecarga, sobretensão e descarga excessiva, prevenindo danos à bateria.

#### **Aplicação**

O **Módulo Carregador 1A** é amplamente utilizado em projetos eletrônicos portáteis, como power banks, sistemas com baterias recarregáveis e dispositivos alimentados por energia móvel. Sua fácil integração com microcontroladores e fontes USB o torna ideal para protótipos e sistemas autônomos. Além disso, sua capacidade de carregamento controlado assegura maior vida útil das baterias e estabilidade na alimentação dos circuitos.

### 3.17.15 Funcionamento e aplicação Bateria 18650 3,7V

Figura 22 - Bateria 3,7v



Fonte: Eletrogate (2025)

A **Bateria 18650 3,7V** é uma célula recarregável de íon-lítio amplamente utilizada em dispositivos eletrônicos devido à sua alta densidade de energia e longa vida útil. Seu funcionamento baseia-se na movimentação de íons de lítio entre os eletrodos positivo e negativo durante os ciclos de carga e descarga, permitindo um fornecimento estável e eficiente de energia elétrica. Ela oferece desempenho consistente, baixa taxa de autodescarga e boa capacidade de corrente.

#### Aplicação

A **Bateria 18650** é comumente empregada em lanternas, notebooks, power banks, robôs, módulos portáteis e sistemas de automação. Também é muito utilizada em projetos com microcontroladores e dispositivos alimentados por energia móvel. Sua versatilidade e capacidade de fornecer energia constante a tornam ideal para aplicações que exigem autonomia, estabilidade e confiabilidade no fornecimento elétrico.

### 3.17.16 Funcionamento e aplicação Conector JST XH2.54 2 Pinos

Figura 23 - Conector JST



Fonte: Eletrogate (2025)

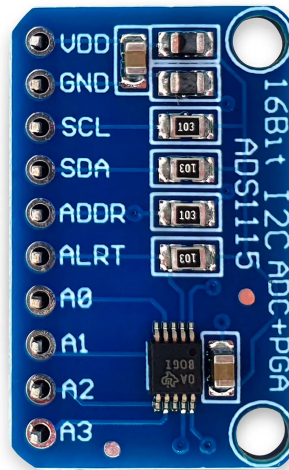
O **Conector JST XH2.54 de 2 pinos** é um conector elétrico compacto utilizado para realizar ligações seguras entre fios e placas eletrônicas. Ele possui passo de 2,54 mm entre os terminais e um sistema de travamento que garante contato firme e confiável, evitando desconexões acidentais. É composto por um conector macho e um conector fêmea, geralmente montados em cabos e placas de circuito impresso (PCI), facilitando conexões rápidas e organizadas.

#### **Aplicação**

O **Conector JST XH2.54 2 Pinos** é amplamente empregado em projetos com baterias, sensores, módulos eletrônicos e sistemas de automação. Seu uso é comum em placas de desenvolvimento como Arduino, ESP32 e controladores de carga, onde é necessário conectar e desconectar componentes com frequência. Além de proporcionar praticidade, o conector assegura estabilidade elétrica e uma montagem mais limpa e segura dos circuitos.

### 3.17.17 Funcionamento e aplicação ADS1115

Figura 24 - ADS1115



Fonte: Eletrogate (2025)

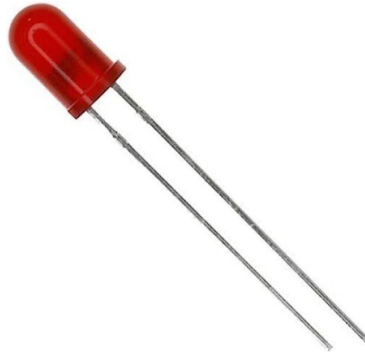
O **Módulo ADS1115** é um conversor analógico-digital (ADC) de 16 bits, utilizado para converter sinais analógicos em valores digitais com alta precisão. Ele opera por meio de comunicação I<sup>2</sup>C, permitindo fácil integração com microcontroladores como Arduino, ESP32 e Raspberry Pi. O módulo possui quatro entradas analógicas (ou duas diferenciais), além de ganho programável (PGA), o que possibilita ajustar a sensibilidade da leitura conforme a aplicação. Sua alta resolução e baixo ruído tornam as medições muito mais precisas que as dos conversores internos de microcontroladores comuns.

#### Aplicação

O **ADS1115** é amplamente usado em sistemas de aquisição de dados, medições de sensores analógicos, instrumentação e automação. Ele é ideal para aplicações que exigem leituras de tensão com grande precisão, como sensores de temperatura, pressão, corrente e tensão. Graças à sua interface I<sup>2</sup>C e ao baixo consumo de energia, o módulo é uma excelente escolha para projetos portáteis, laboratoriais e embarcados que necessitam de alta confiabilidade nas medições.

### 3.17.18 Funcionamento e aplicação Light Emission Diode (LED)

Figura 25 - LED



Fonte: Eletrogate (2025)

O **LED (Light Emitting Diode)** é um componente eletrônico semicondutor que emite luz quando percorrido por uma corrente elétrica direta. Ele é formado por um material semicondutor dopado que, ao permitir a recombinação de elétrons e lacunas, libera energia na forma de fótons. O LED possui polaridade — o terminal maior (ânodo) deve ser ligado ao positivo e o menor (cátodo) ao negativo do circuito. Disponível em diversas cores e intensidades, o LED apresenta alta eficiência energética e longa vida útil.

#### **Aplicação**

O LED é amplamente utilizado em sistemas de **sinalização, iluminação e indicação de estado** em circuitos eletrônicos. Pode ser empregado em painéis, displays, sistemas de comunicação óptica, lanternas e decoração. Sua eficiência e baixo consumo o tornam ideal para projetos de baixo custo e dispositivos portáteis.

### 3.17.19 Funcionamento e aplicação Display 16x2

Figura 26 - Display



Fonte: Eletrogate (2025)

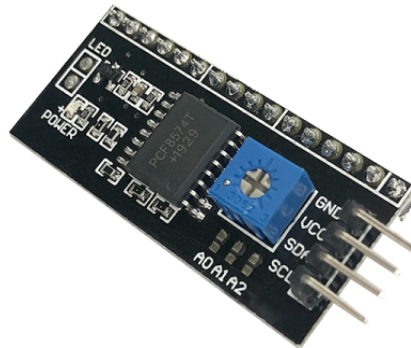
O **Display LCD 16x2** é um módulo de cristal líquido capaz de exibir **duas linhas com até 16 caracteres alfanuméricos cada**. Ele utiliza tecnologia de cristal líquido para formar os caracteres, sendo controlado por um driver interno (geralmente o HD44780). A comunicação pode ser feita por interface **paralela de 4 ou 8 bits**, permitindo controle direto por microcontroladores. Possui também pinos para ajuste de contraste e controle de retroiluminação.

#### **Aplicação**

O Display LCD 16x2 é amplamente usado em **projetos de automação, instrumentação e sistemas embarcados**, servindo para exibir medições, mensagens, menus e status de operação. Sua interface simples e baixo consumo o tornam ideal para aplicações com microcontroladores como Arduino e PIC.

### 3.17.20 Funcionamento e aplicação I2C

Figura 27 - I2C



Fonte: Eletrogate (2025)

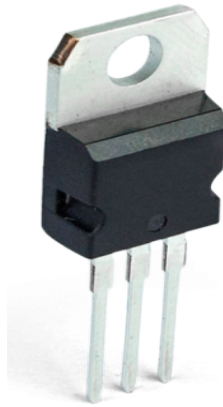
O **módulo I<sup>2</sup>C para LCD** é um adaptador que converte a comunicação paralela do display 16x2 em **interface serial I<sup>2</sup>C**, reduzindo significativamente a quantidade de pinos necessários para conexão ao microcontrolador. Ele utiliza um expensor de portas, geralmente o **PCF8574**, que traduz os sinais de controle em comandos compatíveis com o driver do display. A interface I<sup>2</sup>C opera com apenas dois fios de comunicação (SDA e SCL), além da alimentação.

#### Aplicação

O módulo I<sup>2</sup>C é utilizado principalmente para **simplificar a comunicação entre microcontroladores e displays LCD**, economizando pinos e facilitando a montagem de circuitos. É ideal para projetos que envolvem vários sensores e módulos, especialmente em sistemas com espaço físico ou número de portas limitadas, como em aplicações de IoT e protótipos compactos.

### 3.17.21 Funcionamento e aplicação 7805

Figura 28 - 7805



Fonte: Eletrogate (2025)

O **regulador de tensão 7805** é um componente da família de reguladores lineares da série 78XX, responsável por **fornecer uma tensão de saída fixa de 5V** a partir de uma entrada superior (geralmente entre 7V e 35V). Ele atua estabilizando a tensão, protegendo circuitos contra variações e ruídos. Possui três terminais: entrada (Vin), terra (GND) e saída (Vout). Por ser linear, o 7805 dissipa o excesso de energia em forma de calor, sendo recomendada a utilização de dissipador em aplicações de maior corrente.

#### Aplicação

O 7805 é amplamente utilizado em **fontes de alimentação, sistemas embarcados e projetos com microcontroladores** que necessitam de 5V estáveis. É comum em circuitos de prototipagem, reguladores de tensão para Arduinos, módulos sensores e interfaces lógicas, garantindo segurança e estabilidade na alimentação elétrica dos dispositivos.

## **4 METODOLOGIA**

A metodologia refere-se ao conjunto de métodos e técnicas sistematicamente organizados utilizados para conduzir uma pesquisa ou projeto, com o objetivo de alcançar resultados confiáveis e replicáveis. Ela define o caminho a ser seguido, detalhando as etapas, os procedimentos, e as ferramentas utilizadas para a coleta e análise de dados. Segundo Lakatos e Marconi (2017), a metodologia é essencial para garantir a validade e a precisão dos resultados, pois ela estabelece a estrutura lógica que orienta o processo investigativo, possibilitando a compreensão e a resolução de problemas complexos.

### **4.1 TIPO DE PESQUISA**

#### **4.1.2 Propósito do Projeto**

O projeto em questão possui um caráter tanto exploratório quanto descritivo. No aspecto exploratório, o foco está em investigar e explorar novas possibilidades para o monitoramento de cargas elétricas em redes industriais. O objetivo é compreender como tecnologias emergentes, como o uso de sensores e sistemas de monitoramento em tempo real, podem ser aplicadas para otimizar a análise e a manutenção de sistemas elétricos industriais. Essa abordagem exploratória também visa identificar problemas e oportunidades.

Por outro lado, o projeto também assume uma natureza descritiva, ao detalhar minuciosamente o processo de desenvolvimento, implementação e testes do protótipo criado para o monitoramento de cargas elétricas. Isso inclui a descrição dos componentes utilizados, o funcionamento do sistema, e a análise dos resultados obtidos a partir das medições elétricas realizadas. Essa abordagem descritiva permite uma compreensão aprofundada do processo, bem como das possibilidades oferecidas pelo sistema proposto, fornecendo uma base sólida para futuras aplicações e melhorias.

#### **4.1.2 Abordagem do Projeto**

A abordagem metodológica do projeto combina aspectos qualitativos e quantitativos, resultando em uma análise abrangente e eficaz. Na parte qualitativa, o foco está na descrição detalhada do processo de desenvolvimento do protótipo, incluindo a integração dos componentes de hardware e software. Essa abordagem é fundamental para compreender como cada parte do sistema contribui para seu funcionamento geral, permitindo identificar potenciais melhorias ou ajustes necessários. Além disso, a análise qualitativa abrange o estudo das características e do comportamento do sistema em diferentes condições operacionais, oferecendo insights sobre sua eficácia e aplicabilidade em cenários reais.

Por outro lado, a abordagem quantitativa se manifesta na coleta e análise dos dados elétricos medidos pelo sistema. O protótipo foi projetado para monitorar variáveis elétricas, como tensão, corrente e potência, entre outras. Esses dados são cruciais para validar o desempenho do sistema e fornecer informações concretas que podem ser utilizadas na manutenção e otimização de redes elétricas industriais. A análise quantitativa também permite comparar os resultados obtidos com padrões estabelecidos ou com outros métodos de monitoramento, contribuindo para a avaliação da eficácia do sistema.

A combinação dessas abordagens metodológicas fortalece a pesquisa, garantindo que ela seja abrangente e capaz de gerar conhecimentos tanto teóricos quanto práticos. Isso assegura uma análise completa e detalhada, essencial para o desenvolvimento e implementação de soluções eficazes em redes elétricas industriais.

#### **4.2 DESENVOLVIMENTO E IMPLEMENTAÇÃO**

O projeto do dispositivo de monitoramento para redes elétricas industriais adota uma abordagem experimental e aplicada, com o objetivo de criar e testar um protótipo que facilite a manutenção e análise das grandezas elétricas. Envolvendo o desenvolvimento de um circuito eletrônico integrado com sensores e um microcontrolador ESP32, que será responsável por processar e enviar dados para uma plataforma na nuvem. Os sensores utilizados incluem o Voltímetro ZMPT101B

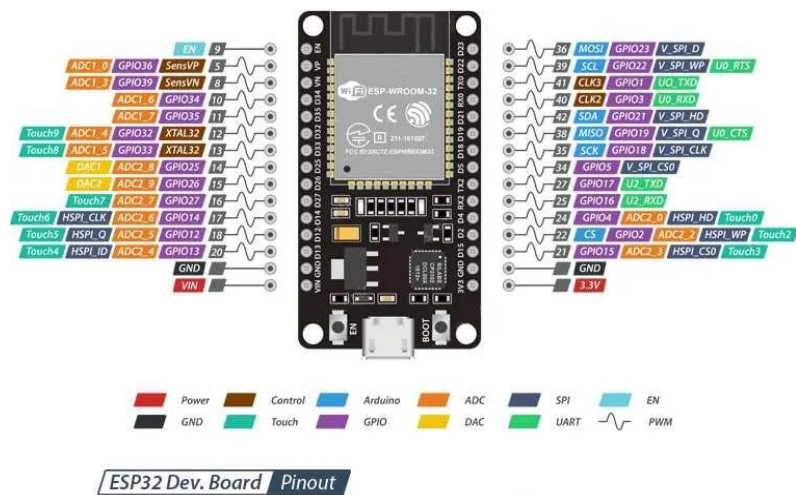
para medir a tensão AC de até 250V e o sensor de corrente não invasivo SCT-013, capaz de medir correntes de até 100A.

A primeira etapa compreende o planejamento detalhado, seguido pela montagem do protótipo e programação do ESP32. Após a construção, serão realizados testes iniciais para garantir o funcionamento adequado dos sensores e a comunicação com a internet. Os testes incluíram a verificação da precisão dos sensores, a estabilidade do sistema sob diferentes condições de carga, e a eficácia na identificação de desequilíbrios e sobrecargas. O projeto será realizado em conformidade com as normas e regulamentos aplicáveis, incluindo a NBR 5410, que estabelece as condições necessárias para o funcionamento seguro de instalações elétricas de baixa tensão (até 1.000V em corrente alternada e 1.500V em corrente contínua). Esta norma assegura a adesão às práticas de segurança e qualidade, garantindo que o sistema esteja em conformidade com os padrões exigidos para uma operação segura e eficiente.

4.3 COMPONENTES

4.3.1 Placa ESP32 / 30 pinos / Wifi

Figura 29 - ESP32



Fonte: Smartkits (2024)

Tabela 9 - Especificações do ESP32

|                       |                                   |
|-----------------------|-----------------------------------|
| MÓDULO NODEMCU LUA    | ESP-12E Amica                     |
| WIRELESS PADRÃO       | 802.11 b/g/n                      |
| CONTÉM                | Antena embutida                   |
| CONTÉM                | Conector micro-usb                |
| MODOS DE OPERAÇÃO     | STA/AP/STA+AP                     |
| SUPOSTA               | 5 conexões TCP/IP                 |
| PORTAS GPIO           | 11                                |
| GPIO COM FUNÇÕES DE   | PWM, I2C, SPI, etc                |
| TENSÃO DE OPERAÇÃO    | 4,5 ~ 9V                          |
| TAXA DE TRANSFERÊNCIA | 110-460800bps                     |
| SUPOSTA               | Upgrade remoto de firmware        |
| CONTÉM                | Conversor analógico digital (ADC) |
| DISTÂNCIA ENTRE PINOS | 2,54mm                            |
| DIMENSÕES             | 49 x 25,5 x 7 mm                  |

Fonte: Eletrogate (2024)

4.3.2 Sensor de Corrente Não Invasivo 100A SCT-013

Figura 30 - SCT-013



Fonte: Curto Circuito (2024)

Tabela 10 - Especificações do SCT-013

|                         |               |
|-------------------------|---------------|
| MODELO                  | SCT-013-000   |
| CORRENTE DE ENTRADA     | 0-100A        |
| MATERIAL DO CORE        | Ferrite       |
| DIELÉTRICO              | 6000V AC/1min |
| TAXA ANTI-CHAMA         | UL94-V0       |
| PLUG DE SAÍDA           | 3,5mm         |
| DIMENSÃO ABERTURA       | 13 x 13mm     |
| TEMPERATURA DE TRABALHO | -25 a +70°C   |
| COMPRIMENTO DO CABO     | 150cm         |

Fonte: Eletrogate (2024)

4.3.3 Módulo Sensor Tensão Ac 0-250v Voltímetro ZMPT101B

Figura 31 - Sensor tensão ZMPT101B



Fonte: Mercado Livre (2024)

Tabela 11 - Especificações do ZMPT101B

|                         |                 |
|-------------------------|-----------------|
| TRANSFORMADOR           | ZMPT101B        |
| TENSÃO DE ALIMENTAÇÃO   | 5 à 30VDC       |
| TENSÃO DE MEDIÇÃO       | 0 à 250 VAC     |
| TEMPERATURA DE OPERAÇÃO | -40 à 70 °C     |
| DIMENSÕES               | 22 x 20 x 51 mm |
| PESO                    | 20g             |

Fonte: Eletrogate (2024)

#### 4.3.4 Placa Fenolite Perfurada 7x5cm

Figura 32 - Placa Fenolite Perfurada 7x5cm



Fonte: Eletrogate (2024)

#### 4.3.5 Resistor

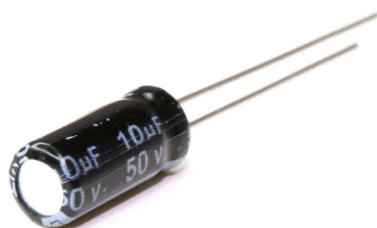
Figura 33 - Resistor



Fonte: Curto Circuito (2024)

#### 4.3.6 Capacitor

Figura 34 - Capacitor



Fonte: Baú da eletrônica (2024)

#### 4.3.7 Conector Jack P4 Fêmea

Figura 35 - Conector Jack P4 Femea



Fonte: Retha Ltda (2025)

#### 4.3.8 Porta Fusível

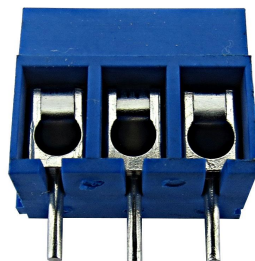
Figura 36 - Porta Fusível



Fonte: RoboCore (2025)

#### 4.3.9 Conector Borne KRE

Figura 37 - Borne KRE



Fonte: Cromatek (2024)

#### 4.3.10 Conector Jack P2 Áudio 3,5mm

Figura 38- Jack P2



Fonte: MakerHero (2024)

#### 4.3.11 Cabo Jumper

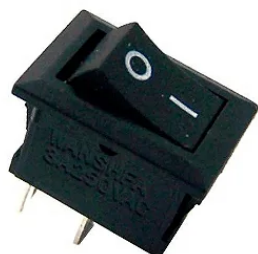
Figura 39 - Cabo Jumper



Fonte: Eletrogate (2024)

#### 4.3.12 Botão Chave Mini Interruptor

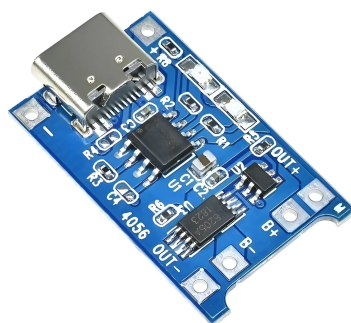
Figura 40 - Botão Chave Mini Interruptor



Fonte: Eletrogate (2025)

#### 4.3.13 Módulo Carregador Bateria de Lítio 1A

Figura 41 - Módulo Carregador Bateria de Lítio 1A



Fonte: Eletrogate (2025)

#### 4.3.14 BATERIA 18650 3,7V

Figura 42 - BATERIA 18650 3,7V



Fonte: Eletrogate (2025)

#### 4.3.15 Conector JST XH2.54 2 Pinos

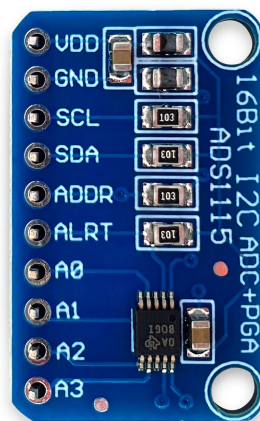
Figura 43 - Conector JST XH2.54 2 Pinos



Fonte: Eletrogate (2025)

#### 4.3.16 ADS1115

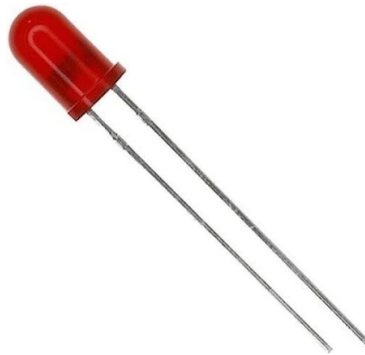
Figura 44 - ADS1115



Fonte: Eletrogate (2025)

#### 4.3.17 LED

Figura 45 - LED



Fonte: Eletrogate (2025)

#### 4.3.18 Display 16x2

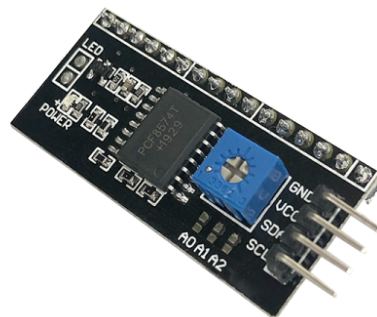
Figura 46 - Display 16x2



Fonte: Eletrogate (2025)

#### 4.3.19 I2C

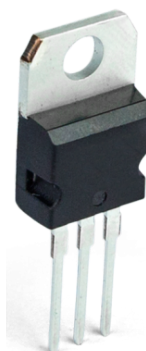
Figura 47 - I2C



Fonte: Eletrogate (2025)

#### 4.3.20 7805

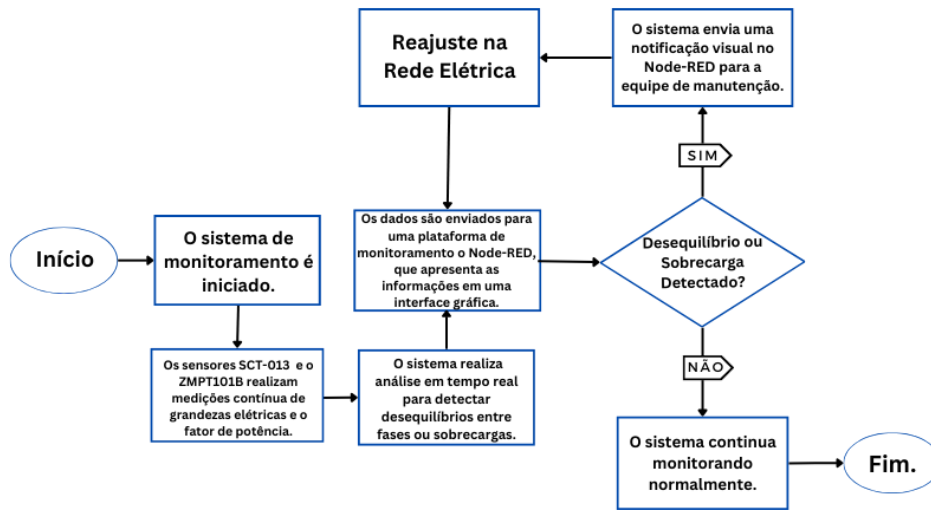
Figura 48 - 7805



Fonte: Eletrogate (2025)

#### 4.4 FLUXOGRAMA

Figura 49 - Fluxograma



Fonte : Os autores (2024)

#### 4.5 CÁLCULOS UTILIZADOS

No projeto, uma série de cálculos são utilizados para garantir o correto monitoramento e análise das variáveis elétricas em uma rede industrial. Cálculos de Tensão ( $V$ ) e Corrente ( $I$ ) não serão necessários, os dispositivos “sensor de corrente não invasivo SCT” e o “módulo sensor de tensão” já disponibilizam os dados de como as medições são realizadas e como são realizados os demais cálculos possíveis.

##### Cálculo de Potência Ativa ( $P$ )

$$P = V \times I \times \cos(\theta)$$

A potência ativa representa a energia efetivamente utilizada pelo equipamento para realizar trabalho. Este cálculo é fundamental para monitorar o consumo de energia de uma instalação. Se dá por **potência igual tensão multiplicada pela corrente e pelo cosseno do ângulo**.

### **Cálculo de Potência Aparente (S)**

$$S = V \times I$$

A potência aparente combina tanto a potência ativa quanto a reativa e é importante para avaliar a capacidade total do sistema elétrico. Se dá por **Potência aparente igual a tensão multiplicada pela corrente.**

### **. Fator de Potência (FP)**

$$FP = \frac{P}{S} = \cos(\theta)$$

O fator de potência indica a eficiência do uso da energia elétrica. Valores próximos a 1 indicam uma rede eficiente, enquanto valores baixos indicam que muita energia está sendo desperdiçada como potência reativa. Se dá por **Fator de potência igual a potência dividida por potência aparente isso igual a o cosseno do ângulo.**

### **Cálculo de Desequilíbrio de Fase**

$$\Delta V = V_{max} - V_{min}$$

Esse cálculo ajuda a identificar o desequilíbrio entre as fases da rede, o que pode causar danos aos equipamentos e aumentar o consumo de energia. Se dá pela **Variação de tensão igual a tensão máxima menos tensão mínima.**

## Cálculo de Consumo de Energia (kWh)

$$E = P \times t$$

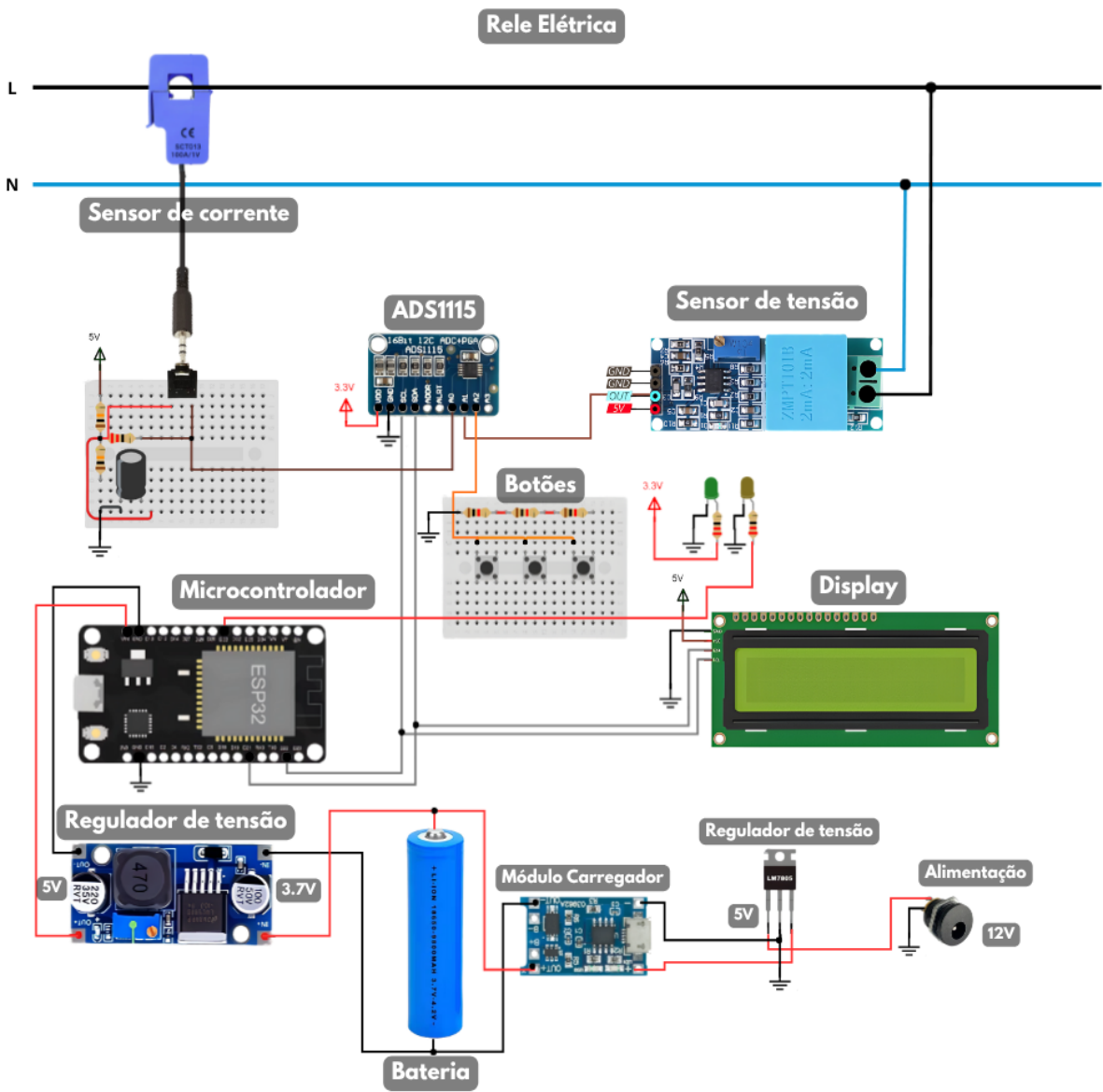
Esse cálculo é utilizado para determinar o consumo de energia ao longo do tempo, sendo vital para análise de custos e eficiência energética. Permite monitorar e ajustar o sistema para melhorar a eficiência e a segurança da instalação elétrica dentro deste projeto. Se dá por **Consumo de energia igual a potência multiplicado pelo tempo.**

## 4.6 DESCRIÇÃO TÉCNICA

Os sensores de corrente SCT-013 são conectados às fases R, S e T, com cada sensor possuindo um conector jack P2 de áudio conectado na placa. Eles medem a corrente de cada fase e enviam um sinal analógico proporcional ao valor da corrente para o circuito de condicionamento. Sensores de tensão, um para cada fase (R, S e T), medem a tensão alternada em cada linha e estão conectados aos bornes KRE. Os sinais de tensão são enviados à placa, onde são ajustados para níveis adequados ao ESP32. Na placa, o circuito de condicionamento de sinal conta com resistores de 10k organizados em pares, formando divisores de tensão que reduzem a amplitude dos sinais de tensão e corrente para que estejam dentro dos limites de leitura do ESP32. Três resistores de 33 ohms estão conectados na placa, um para cada fase, para o ajuste fino do sinal de corrente, o que aumenta a precisão das leituras. Três capacitores são usados para filtrar o sinal, reduzindo ruídos e oscilações indesejadas, melhorando a estabilidade das medições. O ESP32 atua como o microcontrolador central, processando os dados recebidos do sistema. Os sinais de tensão e corrente de cada fase, ajustados pelo circuito de condicionamento, são enviados ao ESP32 por meio de suas entradas analógicas. Além de realizar a leitura e processamento dos sinais, o ESP32 controla o armazenamento dos dados medidos.

# 4.7 ESQUEMA ELÉTRICO

Figura 50 - Esquema elétrico

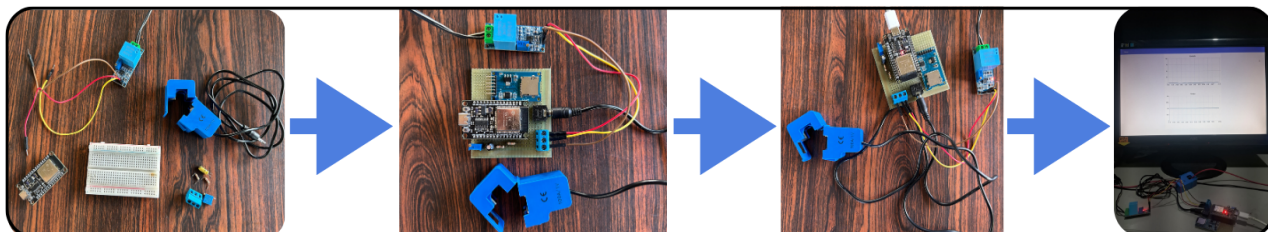


Fonte : Os autores (2024)

## 4.8 MONTAGEM DO PROTÓTIPO

### 4.8.1 Evolução

Figura 51 - Evolução



Fonte : Os autores (2024)

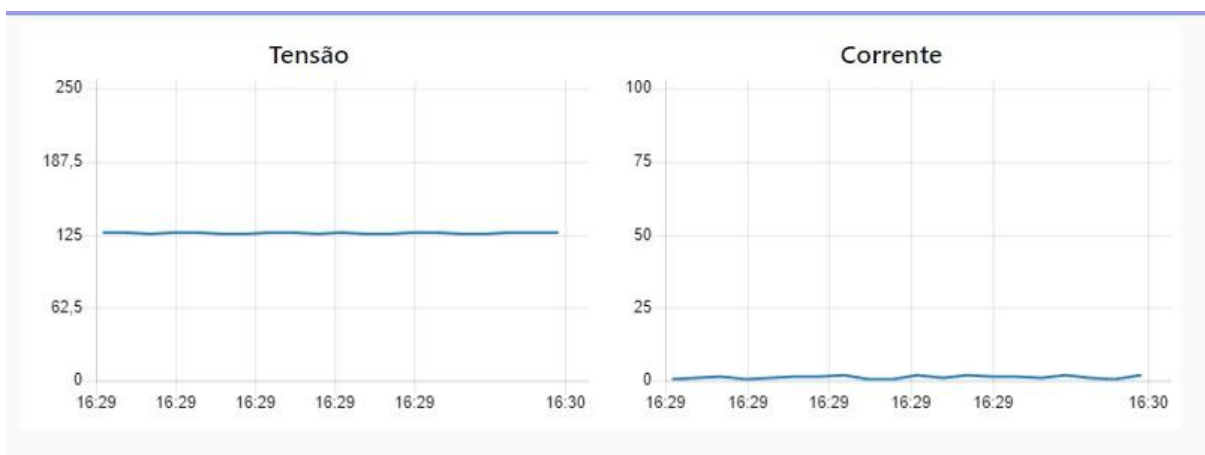
Na primeira imagem, são apresentados os equipamentos utilizados, incluindo o sensor de corrente SCT, uma protoboard (posteriormente substituída por uma placa de fenolite), o sensor de tensão ZMPT101B, o módulo para cartão microSD, capacitor, resistor, conector borne KRE e trimpot.

Na segunda imagem, estão mostrados os equipamentos já montados, com as soldas realizadas na parte inferior da placa, conforme indicado no esquema elétrico.

Na terceira imagem, observa-se o protótipo conectado a um cabo USB-C, utilizado para enviar o código de programação ao ESP32. Nessa imagem, é possível ver que os LEDs do ESP32 e do sensor de tensão estão acionados.

Na quarta imagem, por fim, é exibido o protótipo em funcionamento, com o sensor SCT conectado a um cabo, e o monitor exibe as representações gráficas do local onde a medição foi realizada.

Figura 52 - Gráfico TxC



Fonte : Os autores (2024)

## 4.9 PROGRAMAÇÃO

```
#include <WiFi.h>
#include <SD.h>
#include "EmonLib.h" // Biblioteca EmonLib para monitoramento de corrente e
tensão

// Variáveis WiFi
const char* ssid = "*****";
const char* password = "*****";
WiFiServer server(80);

// Definições de pinos e calibrações
#define sct013 15      // Pino para o sensor de corrente
#define VOLT_PIN 34     // Pino para o sensor de tensão
#define VOLT_CAL 575.46 // Calibração de tensão
#define SD_CS_PIN 5     // Pino CS do cartão SD

// Instâncias para monitorar corrente e tensão
EnergyMonitor emonCorrente;
EnergyMonitor emonTensao;

// Variáveis para medição e contagem de corrente e tensão
double corrente = 0.0;
float tensao = 0.0;
const int intervaloMedicao = 5000; // Intervalo de 5 segundos para medir a corrente e
tensão
unsigned long inicioMedicao = 0;

// Variável para verificar se o WiFi está conectado
bool wifiConectado = false;

// Função para salvar dados no cartão SD
void salvarNoSD(double valorCorrente, float valorTensao) {
```

```

File arquivo = SD.open("/dados.txt", FILE_WRITE);
if (arquivo) {
    arquivo.print("Corrente: ");
    arquivo.print(valorCorrente);
    arquivo.print(" A, Tensão: ");
    arquivo.print(valorTensao);
    arquivo.println(" V");
    arquivo.close();
    Serial.println("Valores salvos no SD.");
} else {
    Serial.println("Erro ao abrir o arquivo para escrita.");
}
}

```

// Função para conectar ao WiFi

```

void conectarWiFi() {
    if (!wifiConectado) {
        WiFi.begin(ssid, password);
        Serial.println("Tentando conectar ao WiFi...");
        int tentativas = 0;
        while (WiFi.status() != WL_CONNECTED && tentativas < 10) {
            delay(500);
            Serial.print(".");
            tentativas++;
        }
        if (WiFi.status() == WL_CONNECTED) {
            Serial.println("\nWiFi conectado.");
            Serial.print("Endereço IP: ");
            Serial.println(WiFi.localIP());
            wifiConectado = true;
        } else {
            Serial.println("\nFalha ao conectar ao WiFi.");
            WiFi.disconnect();
            wifiConectado = false;
        }
    }
}

```

```
}  
}  
}
```

// Tarefa de conexão WiFi

```
void tarefaWiFi(void * pvParameters) {  
    while (true) {  
        conectarWiFi();  
        if (wifiConectado) {  
            // Mantém a conexão WiFi por um tempo antes de desconectar  
            delay(5000); // 5 segundos conectado ao WiFi  
            WiFi.disconnect();  
            wifiConectado = false;  
            Serial.println("WiFi desconectado.");  
        }  
        delay(10000); // Espera 10 segundos antes de tentar reconectar  
    }  
}
```

// Tarefa de medição e salvamento no SD

```
void tarefaMedicao(void * pvParameters) {  
    emonCorrente.current(sct013, 111.1); // Configuração do sensor de corrente  
    emonTensao.voltage(VOLT_PIN, VOLT_CAL, 1.7); // Configuração do sensor de  
    tensão
```

```
    const int numLeituras = 100;  
    double leiturasCorrente[numLeituras];
```

```
    while (true) {  
        if (!wifiConectado) { // Só mede e salva se o WiFi estiver desconectado  
            for (int i = 0; i < numLeituras; i++) {  
                leiturasCorrente[i] = emonCorrente.calcIrms(1480); // Calcula o valor RMS da  
                corrente  
                delay(50); // Atraso entre leituras
```

```

    }

    // Encontrar o valor mais frequente entre as leituras de corrente
    double valorCorrenteMaisFrequente = leiturasCorrente[0];
    int contagem = 0;
    for (int i = 0; i < numLeituras; i++) {
        int tempContagem = 0;
        for (int j = 0; j < numLeituras; j++) {
            if (leiturasCorrente[i] == leiturasCorrente[j]) {
                tempContagem++;
            }
        }
        if (tempContagem > contagem) {
            contagem = tempContagem;
            valorCorrenteMaisFrequente = leiturasCorrente[i];
        }
    }

    // Medir a tensão
    emonTensao.calcVI(17, 2000); // Realiza a medição de tensão
    float tensaoMedida = emonTensao.Vrms; // Obtém o valor RMS da tensão

    // Salvar os valores mais frequentes de corrente e a tensão no SD
    salvarNoSD(valorCorrenteMaisFrequente, tensaoMedida);
}

// Espera até o próximo ciclo de medição
delay(intervaloMedicao);
}
}

void setup() {
    Serial.begin(9600);

```

```

// Inicializa o cartão SD
if (!SD.begin(SD_CS_PIN)) {
    Serial.println("Falha ao iniciar o cartão SD.");
    while (true);
}
Serial.println("Cartão SD inicializado.");

// Criação das tarefas para WiFi e medição
xTaskCreatePinnedToCore(
    tarefaWiFi,      // Função da tarefa WiFi
    "Tarefa WiFi",   // Nome da tarefa
    4096,            // Tamanho da pilha
    NULL,            // Parâmetros
    1,               // Prioridade
    NULL,            // Identificador da tarefa
    0                // Core onde a tarefa será executada
);

xTaskCreatePinnedToCore(
    tarefaMedicao,    // Função da tarefa de medição
    "Tarefa Medicao", // Nome da tarefa
    4096,            // Tamanho da pilha
    NULL,            // Parâmetros
    1,               // Prioridade
    NULL,            // Identificador da tarefa
    1                // Core onde a tarefa será executada
);
}

void loop() {
    // O loop principal pode permanecer vazio, pois estamos usando tarefas
    independentes.
}

```

**5 CRONOGRAMA**

Tabela 12 - Cronograma

| 2024                                  | MAR | ABR | MAI | JUN | JUL | AGO | SET | OUT | NOV |
|---------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Escolha do tema                       |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
| Levantamento de literatura científica |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
| Introdução                            |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
| Tema                                  |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
| Problema                              |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
| Objetivos                             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
| Justificativa                         |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
| Estado da Arte                        |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
| Fundamentação teórica                 |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
| Metodologia                           |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
| Cronograma                            |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
| Recursos                              |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
| Resultados esperados                  |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
| Referências                           |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
| Avaliação do CRC                      |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
| Produção do Banner                    |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
| 26ª Exposchmidt                       |     |     |     |     |     |     |     |     |     |

Fonte: os autores (2025)

## 6 RECURSOS

Tabela 13 - Recursos

| Material                                           | Valor unitário | Quantidade | Valor total | Fonte               | Data  |
|----------------------------------------------------|----------------|------------|-------------|---------------------|-------|
| Placa Esp32                                        | R\$42,60       | 1          | R\$42,60    | Stormbreak Shop     | 23/07 |
| Sensor de Corrente Não Invasivo 100A SCT-013       | R\$61,66       | 3          | R\$184,98   | Eletrogate          | 23/07 |
| Módulo Sensor Tensão Ac 0-250v Voltímetro ZMPT101B | R\$21,90       | 3          | R\$65,70    | Smart Componentes   | 23/07 |
| Placa Fenolite Perfurada 7x5cm                     | R\$2,76        | 1          | R\$2,76     | Eletrogate          | 23/10 |
| Resistores                                         | R\$0,15        | 6          | R\$0,90     | Ryndack Componentes | 23/10 |
| Capacitores                                        | R\$0,21        | 3          | R\$0,63     | Baú da eletrônica   | 23/10 |
| Conector Jack P4 Fêmea (J4 2,1mm) DC-022           | R\$3,75        | 1          | R\$3,75     | Robotios            | 02/11 |
| Conector Borne KRE                                 | R\$1,50        | 3          | R\$4,50     | Eletrogate          | 25/10 |
| Conector Jack P2 Áudio 3,5mm                       | R\$0,94        | 3          | R\$2,82     | MakerHero           | 25/10 |
| Cabos Jumper                                       | R\$0,16        | 9          | R\$1,44     | Eletrogate          | 25/10 |
| Porta Fusível Paineira Retangular PFR-P Metaltex   | R\$1,59        | 1          | R\$1,59     | RoboCore            | 02/11 |
| Botão Chave Mini Interruptor On Off 10x15mm        | R\$2,45        | 1          | R\$2,45     | Eletrogate          | 02/11 |
| Módulo Carregador Bateria de Lítio 1A - TP4056     | R\$4,90        | 1          | R\$4,90     | Eletrogate          | 02/11 |

|                                         |          |   |          |               |       |
|-----------------------------------------|----------|---|----------|---------------|-------|
| BATERIA 18650<br>3,7V                   | R\$19,40 | 1 | R\$19,40 | Mercado Livre | 02/11 |
| Conector JST<br>XH2.54 2 Pinos<br>Fêmea | R\$2,40  | 1 | R\$2,40  | Usinainfo     | 02/11 |
| ADS1115                                 | R\$14,60 | 1 | R\$14,60 | Eletrogate    | 02/11 |
| LED                                     | R\$0,20  | 2 | R\$0,40  | Eletrogate    | 03/11 |
| Display 16x2 + I2C                      | R\$29,90 | 1 | R\$29,90 | Eletrogate    | 03/11 |
| 7805                                    | R\$2,50  | 1 | R\$2,50  | RoboCore      | 03/11 |
| Valor final: R\$388,22                  |          |   |          |               |       |

Fonte: os autores (2025)

## 7 RESULTADOS

O protótipo desenvolvido para o sistema de monitoramento automatizado da rede elétrica apresentou resultados extremamente satisfatórios. O conjunto formado pelo microcontrolador ESP32 e os sensores de corrente e tensão foi capaz de coletar dados de forma contínua e precisa, eliminando completamente a necessidade de medições manuais. Esses dados foram transmitidos em tempo real para o software Node-RED, que exibiu gráficos detalhados sobre as oscilações e variações da rede elétrica, permitindo uma análise imediata e eficiente do comportamento energético. A comunicação entre o hardware e o software mostrou-se estável durante todo o período de testes, garantindo uma operação contínua, sem falhas significativas ou perdas de pacotes de dados.

Durante os testes, o sistema apresentou alta precisão nas medições. As leituras de tensão tiveram um erro médio de até 2%, enquanto as de corrente não ultrapassaram 3%. O cálculo de potência apresentou resultados consistentes, com variação média inferior a 4% em relação aos valores obtidos por equipamentos de referência. Essa precisão foi alcançada após a calibração dos sensores, realizada comparando os resultados do protótipo com os de instrumentos de medição convencionais. O sistema manteve estabilidade durante longos períodos de operação, com taxa de disponibilidade superior a 99%, demonstrando confiabilidade e robustez técnica. Além disso, o Node-RED exibiu as informações com baixa latência, permitindo o acompanhamento em tempo real e o envio de alertas automáticos em caso de oscilações fora da faixa de segurança.

Os testes também comprovaram a eficiência do sistema em detectar anomalias elétricas, como picos de tensão, quedas momentâneas e distorções harmônicas causadas por cargas não lineares. O Node-RED apresentou esses eventos de forma clara por meio de gráficos e relatórios automáticos, facilitando a identificação de falhas na rede. As notificações configuradas via Telegram e e-mail foram entregues corretamente, alertando instantaneamente sobre situações críticas. Essa funcionalidade torna o sistema útil tanto para aplicações residenciais quanto para ambientes industriais, onde a identificação precoce de falhas pode evitar danos a equipamentos e reduzir custos com manutenção corretiva.

A substituição da protoboard por uma placa fenolite perfurada de 7×5 cm representou uma evolução significativa na estrutura do projeto. Essa mudança aumentou a resistência física e a confiabilidade do sistema, eliminando os problemas de mau contato e instabilidade que frequentemente ocorrem em protoboards. O custo da placa fenolite foi de apenas R\$2,00, o que reforça sua viabilidade econômica sem comprometer a segurança elétrica. Todas as conexões foram devidamente soldadas e isoladas com tubo termo-retrátil, evitando curtos-circuitos e garantindo um manuseio seguro. Nenhum problema elétrico, como choques ou falhas de contato, foi registrado durante os testes, confirmando que a mudança trouxe benefícios tanto técnicos quanto de segurança.

Do ponto de vista socioeconômico, o sistema reduziu consideravelmente os custos operacionais ao eliminar a necessidade de medições manuais e deslocamento de técnicos. Estima-se que essa automação possa gerar uma economia de até 70% nas despesas relacionadas ao monitoramento periódico de redes elétricas. Com isso, as equipes especializadas podem se dedicar a tarefas mais complexas e produtivas, como manutenção preventiva e análise de eficiência energética. Ambientalmente, o sistema contribui para a redução de desperdício de energia, uma vez que a detecção precoce de falhas e irregularidades evita o funcionamento ineficiente de equipamentos e reduz o consumo desnecessário de energia elétrica.

Em termos de viabilidade técnica e financeira, o protótipo demonstrou ser uma solução de baixo custo, fácil implementação e alta eficiência. Todos os materiais utilizados são amplamente disponíveis no mercado, o que facilita a replicação e o aprimoramento do projeto. O sistema apresentou um funcionamento estável, seguro e com excelente custo-benefício, confirmando sua aplicabilidade em diferentes setores. Sua estrutura modular permite futuras expansões, como o armazenamento em nuvem, controle remoto e integração com plataformas de análise de dados mais avançadas.

## **8 CONCLUSÃO**

Conclui-se que o projeto atingiu plenamente seus objetivos, apresentando um sistema automatizado eficiente, preciso e de baixo custo para o monitoramento da rede elétrica. O protótipo substituiu com sucesso as medições manuais, coletando e

transmitindo dados de forma contínua através do ESP32 e do Node-RED, que exibiu informações em tempo real e permitiu a identificação rápida de oscilações e falhas na rede.

De modo geral, o sistema demonstrou excelente desempenho técnico e viabilidade prática, reduzindo custos operacionais e melhorando a precisão das medições. Assim, o protótipo se consolida como uma solução eficaz e acessível para o monitoramento automatizado de redes elétricas, com potencial para aplicações futuras e aprimoramentos tecnológicos.

## REFERÊNCIAS

ABRACOPEL. ABRACOPEL solta os dados mais recentes de acidentes de origem elétrica. In: **ABRACOPEL**. [S.l.], 29 ago. 2023. Disponível em: <https://abracopel.org/blog/noticias/abracopel-solta-os-dados-mais-recentes-de-acidentes-de-origem-eletrica/>. Acesso em: 20 ago. 2024.

AMAZON WEB SERVICES (AWS). O que é MQTT? – Explicação sobre o protocolo MQTT. In: **AWS**. [S.l.: s.n., s.d.]. Disponível em: [https://aws.amazon.com/pt/what-is/mqtt/?utm\\_source](https://aws.amazon.com/pt/what-is/mqtt/?utm_source). Acesso em: 2 set. 2025.

AQUISIÇÃO de dados. In: **WIKIPÉDIA**, a enciclopédia livre. [S.l.: s.n., s.d.]. Acesso em: 2 set. 2025.

BERNINI, P. C. **Redução de redes elétricas para análise de fluxo de carga**. 2020. 67 f. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) - Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas, Universidade Federal de Ouro Preto, João Monlevade, 2020. Acesso em: 9 ago. 2024. (*URL não fornecida no original*).

BIT A BIT. Arduino – Usando o módulo leitor de cartão micro SD. [S.l.]: Youtube, 2023. 1 vídeo (17min43s). Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=sYWjhoVdDF8>. Acesso em: 10 out. 2024.

CABOS GOLDEN. Entenda o que são os cabos Pigtail e Jumper. In: **CABOS GOLDEN**. [S.l.], 2023. Disponível em: <https://www.cabosgolden.com.br/loja/noticia.php?loja=774024&id=11#:~:text=O%20>

Jumper%20é%20um%20pequeno.com%20placas-mãe%20de%20computadores..>  
. Acesso em: 10 out. 2024.

CAMPOS, L. C. R.; MACEDO, A. S.; LOPES, D. M. Sistemas de redes subterrâneas de energia elétrica no Brasil. **Brazilian Journal of Production Engineering**, São Mateus, v. 5, n. 2, p. 151–169, 2019. Disponível em:  
[https://periodicos.ufes.br/bjpe/article/view/V05N02\\_14](https://periodicos.ufes.br/bjpe/article/view/V05N02_14). Acesso em: 1 set. 2024.

CONHEÇA a história da indústria e suas transformações em meio aos desafios. **MUV Blog**. [S.l.: s.n., s.d.]. Disponível em:  
<https://blog.muv.ind.br/historia-da-industria>. Acesso em: 16 ago. 2024.

CRUZ, G. A. da S. **Balanceamento de fases em redes elétricas utilizando procedimento adaptativo de busca aleatório e guloso (GRASP)**. 2019. 70 f. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) - Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas, Universidade Federal de Ouro Preto, João Monlevade, 2019. Acesso em: 26 jul. 2024. (*URL não fornecida no original*).

DADAO ENERGY. Distinguindo entre erro sistemático e erro aleatório em medições. In: **DADAO ENERGY**. [S.l.], 21 mar. 2025. Acesso em: 2 set. 2025. (*URL não fornecida no original*).

DIFERENÇAS entre sistema trifásico, bifásico e monofásico! **Mundo da Elétrica**. [S.l.: s.n., s.d.]. Disponível em:  
<https://www.mundodaeletrica.com.br/diferencas-entre-sistema-trifasico-bifasico-e-monofasico/>. Acesso em: 16 ago. 2024.

ELETROGATE. Placa Fenolite Perfurada 7x5cm. In: **ELETROGATE**. [S.l.], 2024. Disponível em: <https://www.eletrogate.com/placa-fenolite-perfurada-7x5cm>. Acesso em: 20 out. 2024.

ELETROKIT TERMINAIS E CONECTORES ELÉTRICOS. Bornes, terminais pino, ilhos simples e duplo eletrokit. [S.l.]: Youtube, 2019. 1 vídeo (1min40s). Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=wLzkVMwP2kU>. Acesso em: 10 out. 2024.

ENGENHARIA HÍBRIDA. Tudo o que você precisa saber sobre componentes eletrônicos. In: **ENGENHARIA HÍBRIDA**. [S.l.], 2023. Disponível em:

<https://www.engenhariahibrida.com.br/post/tudo-o-que-voce-precisa-saber-sobre-componentes-eletronicos>. Acesso em: 18 set. 2024.

ENEREY. Brasil registra 781 mortes por acidentes elétricos e se aproxima dos EUA, que tem 1 mil por ano. In: **ENEREY**. [S.l.], 27 maio 2024. Disponível em: <https://www.enerrey.com.br/blog/brasil-registra-781-mortes-por-acidentes-eletricos-e-se-aproxima-dos-eua-que-tem-1-mil-por-ano>. Acesso em: 20 ago. 2024.

FERNANDO. Fator de potência: descubra o que é e como calculá-lo. In: **LUTER LED**. São Paulo, 4 fev. 2023. Disponível em: [https://www.luterled.com.br/fator-de-potencia#:~:text=O%20fator%20de%20potência%20nada,-Ampere%20Reativo%20\(kVAr..>](https://www.luterled.com.br/fator-de-potencia#:~:text=O%20fator%20de%20potência%20nada,-Ampere%20Reativo%20(kVAr..>). Acesso em: 17 set. 2024.

FUJI ELECTRIC. Quais são as 5 fontes de erro nas medições dos sensores de pressão? In: **FUJI ELECTRIC**. [S.l.: s.n., s.d.]. Acesso em: 2 set. 2025. (*URL não fornecida no original*).

GENUEN. Top 8 ways to deal with noise in data acquisition and test systems. In: **GENUEN**. [S.l.], 2021. Disponível em: <https://www.genuen.com/blog/top-8-ways-to-deal-with-noise-in-data-acquisition-and-test-systems/>. Acesso em: 2 set. 2025.

GOLDEMBERG, J.; LUCON, O. Energia e meio ambiente no Brasil. **Estudos Avançados**, São Paulo, v. 21, n. 59, p. 7–20, 2007. Acesso em: 9 ago. 2024. (*URL não fornecida no original*).

GRANDEZAS elétricas – O que são e quais são elas!. **Manual da Eletrônica**. [S.l.: s.n., s.d.]. Disponível em: <https://www.manualdaeletronica.com.br/grandezas-eletricas-o-que-sao-quais-sao-elas/>. Acesso em: 9 ago. 2024.

INSTITUTO NCB. Como funcionam potenciômetros e trimpots (ART472). In: **INSTITUTO NCB**. [S.l.], 10 out. 2018. Disponível em: <https://www.newtoncbraga.com.br/como-funciona/3379-art472.html>. Acesso em: 3 nov. 2024.

INSTRUMENT error. In: **WIKIPEDIA**, the free encyclopedia. [S.l.], jan. 2025. Acesso em: 2 set. 2025. (*URL não fornecida no original*).

KUPHALDT, T. R. Harmonic phase sequences. In: **ALL ABOUT CIRCUITS**. [S.l.: s.n., s.d.]. Disponível em: <https://www.allaboutcircuits.com/textbook/alternating-current/chpt-10/harmonic-phase-sequences/>. Acesso em: [Data de acesso não fornecida no original].

KUPHALDT, T. R. Harmonics in polyphase power systems. In: **ALL ABOUT CIRCUITS**. [S.l.: s.n., s.d.]. Disponível em: <https://www.allaboutcircuits.com/textbook/alternating-current/chpt-10/harmonics-poly-phase-power-systems/>. Acesso em: [Data de acesso não fornecida no original].

LINHARES, L. L. **Estimação de perdas elétricas em redes de média tensão utilizando fluxo probabilístico e medidores de corrente**. 2019. 75 f. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) - Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas, Universidade Federal de Ouro Preto, João Monlevade, 2019. Acesso em: 9 ago. 2024. (*URL não fornecida no original*).

LRI – BLOG. Serviço QoS no MQTT na entrega de mensagens. In: **LRI BLOG**. [S.l.: s.n., s.d.]. Acesso em: 2 set. 2025. (*URL não fornecida no original*).

MAKERHERO. Conector Jack P2 Audio 3.5mm. In: **MAKERHERO**. [S.l.], 2024. Disponível em: <https://www.makerhero.com/produto/conector-jack-p2-audio-3-5mm/#:~:text=O%20conector%20Jack%20P2%20é,de%20corrente%20não%20invasivo%2020A..>>. Acesso em: 20 out. 2024.

MARTINHO, M. Abracopel pública uma prévia dos dados de acidentes de origem elétrica em 2021. In: **ABRACOPEL**. [S.l.], 26 jul. 2021. Disponível em: [https://abracopel.org/blog/abracopel-publica-uma-previa-dos-dados-de-acidentes-de-origem-eletrica-em-2021/?doing\\_wp\\_cron=1725142076.9941880702972412109375](https://abracopel.org/blog/abracopel-publica-uma-previa-dos-dados-de-acidentes-de-origem-eletrica-em-2021/?doing_wp_cron=1725142076.9941880702972412109375). Acesso em: 31 ago. 2024.

MARTINS, P. E. T. **Um modelo multiobjetivo para o problema de alocação ótima de medidores de qualidade de energia elétrica visando a detecção de variações de tensão de curta duração na presença de simetrias**. 2017. 168 f. Monografia

(Graduação em Engenharia Elétrica) - Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas, Universidade Federal de Ouro Preto, João Monlevade, 2017. Acesso em: 9 ago. 2024. *(URL não fornecida no original)*.

METODOLOGIA. **Ploomus Blog**. [S.l.: s.n., s.d.]. Disponível em: <https://blog.ploomes.com/metodologia/>. Acesso em: 16 ago. 2024.

MOTA, R. P. **Estudo de técnicas para monitoramento e controle de instrumentos a partir de uma rede CAN**. 2024. 69 f. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) - Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas, Universidade Federal de Ouro Preto, João Monlevade, 2024. Acesso em: 9 ago. 2024. *(URL não fornecida no original)*.

PEREIRA, L. H. J. **Monitoramento do consumo de energia elétrica e controle de equipamentos via aplicativo**. 2018. 60 f. Monografia (Graduação em Engenharia de Controle e Automação) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2018. Acesso em: 9 ago. 2024. *(URL não fornecida no original)*.

PFITSCHER, L. L. **Automatic reconfiguration of electrical distribution networks with real time monitoring**. 2013. 146 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2013. Acesso em: 26 jul. 2024. *(URL não fornecida no original)*.

PINGBACK. Qual é a diferença entre ROI e Payback e como calcular os dois? In: **PINGBACK**. [S.l.: s.n., s.d.]. Disponível em: [https://pingback.com/br/resources/diferenca-entre-roi-e-payback/?utm\\_source](https://pingback.com/br/resources/diferenca-entre-roi-e-payback/?utm_source). Acesso em: 28 ago. 2025.

SERASA EXPERIAN. PME: o que são pequenas e médias empresas. In: **SERASA EXPERIAN**. [S.l.: s.n., s.d.]. Disponível em: <https://www.serasaexperian.com.br/conteudos/pme-o-que-sao-pequenas-e-medias-empresas/>. Acesso em: 29 ago. 2025.

SIGNAL conditioning. In: **WIKIPEDIA**, the free encyclopedia. [S.l.], 2023. Disponível em: [https://en.wikipedia.org/wiki/Signal\\_conditioning](https://en.wikipedia.org/wiki/Signal_conditioning). Acesso em: 2 set. 2025.

SILVA, P. de P. **Implementação de um medidor digital de qualidade da energia elétrica: análise de harmônicos e variações de tensão de longa duração**. 2017. 77 f. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) - Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas, Universidade Federal de Ouro Preto, João Monlevade, 2017. Acesso em: 9 ago. 2024. *(URL não fornecida no original)*.

SISTEMA polifásico. In: **WIKIPÉDIA**, a enciclopédia livre. [S.l.: s.n., s.d.]. Disponível em: [https://pt.wikipedia.org/wiki/Sistema\\_polif%C3%A1sico](https://pt.wikipedia.org/wiki/Sistema_polif%C3%A1sico). Acesso em: 1 set. 2025.

STARTBIT. Criando um dashboard em tempo real: dados MQTT ESP32. In: **STARTBIT**. [S.l.: s.n., s.d.]. Acesso em: 2 set. 2025. *(URL não fornecida no original)*.

STARTBIT. QoS no MQTT com ESP32: aprenda a comunicação eficiente. In: **STARTBIT**. [S.l.: s.n., s.d.]. Acesso em: 2 set. 2025. *(URL não fornecida no original)*.

TOTVS. Payback: o que é, vantagens, desvantagens e cálculo. In: **TOTVS BLOG**. [S.l.: s.n., s.d.]. Disponível em: [https://www.totvs.com/blog/servicos-financeiros/payback/?utm\\_source](https://www.totvs.com/blog/servicos-financeiros/payback/?utm_source). Acesso em: 28 ago. 2025.

UNICAMP. **Roteiro 9 – Filtragem**. Campinas, 2025. Disponível em: <https://www.dca.fee.unicamp.br/cursos/EA701/1s2025/roteiros/Roteiro9.pdf>. Acesso em: 2 set. 2025.