

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
CURSO DE ENGENHARIA MECATRÔNICA

ANNA JULIA ZANOTTI

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE MONITORAMENTO DE MÁQUINAS
ELÉTRICAS CONECTADAS PARA INTERNET DAS COISAS INDUSTRIAIS

Joinville
2023

ANNA JULIA ZANOTTI

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE MONITORAMENTO DE MÁQUINAS
ELÉTRICAS CONECTADAS PARA INTERNET DAS COISAS INDUSTRIAIS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Mecatrônica no curso de Engenharia Mecatrônica, da Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Orientador: Gian Ricardo Berkenbrock

Joinville
2023

Dedico este trabalho a minha família,
que inquestionavelmente acreditaram na minha capacidade de chegar até aqui.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelos caminhos e oportunidades que colocou na minha frente. Agradeço a Ele por me guiar e proteger, até quando eu mesma não acreditei. Meu anjo da guarda fez sempre um ótimo trabalho, indo além das horas comerciais. Sem Ele, nada importaria.

Agradeço a universidade pública e de qualidade por todo o investimento na minha educação e dos meus colegas. Sempre acreditei na educação e na sua capacidade de transformar vidas, a Universidade Federal de Santa Catarina me desafiou diariamente nesses últimos seis anos. Sem ela, não me tornaria metade da engenheira que serei.

Agradeço ao laboratório LSE pelos equipamentos disponibilizados para que esse trabalho fosse executado. Agradeço também todos os membros do laboratório, que se sensibilizaram ao desafio de acabar esse projeto e ajudaram sempre que puderam. Se não fossem vocês, os dias e noites no laboratório não teriam sido interessantes e nem teríamos um conector de tomada fêmea 20A.

Agradeço a meu orientador, Dr. Gian Ricardo Berkenbrock, por todo o suporte e condução durante todas as etapas desse trabalho acadêmico. Obrigada pela parceria e conhecimentos compartilhados, eles fizeram e fazem toda a diferença. Sem ele, esse projeto provavelmente não teria seus requisitos definidos e muito menos uma caixa IP55.

Agradeço a meus amigos e colegas por estarem presentes em meio a tantos desafios. Vocês tem e sempre terão um pedaço do meu coração. Obrigada por todo o apoio emocional e incentivo que precisei, obrigada por cuidarem de mim quando eu mesma não conseguia. Esses seis anos foram maravilhosos. Se não fosse com vocês, não teria sido a mesma coisa.

Agradeço a minha família por todo o apoio emocional durante toda a minha graduação. Obrigada por acreditarem nos meus sonhos e me deixarem ir atrás deles, mesmo com o coração apertado. Agradeço especialmente a minha mãe, Kátia, padastro, João Roberto, irmã, Maria Eduarda e irmão, João Vicente.

Sem vocês, isso tudo não valeria de nada.

Ben Franklin pode ter descoberto a eletricidade, mas foi o homem que inventou o medidor que ganhou dinheiro (Wilson, 1969).

RESUMO

Conforme a necessidade de atualização das empresas perante novas tecnologias induzidas pela Indústria 4.0, ações de adaptação tiveram início desordenadamente em diversas companhias ao redor do mundo. Dessa forma, criou-se um contexto onde empresas em diferentes etapas de implementação 4.0 coexistem. Contudo, a primeira etapa para a consolidação da nova indústria é o monitoramento de variáveis imprescindíveis para um determinado processo produtivo. A variável comum para todas as empresas é a energia elétrica. O gerenciamento energético se faz necessário dentro do mercado competitivo por possibilitar uma visão geral de consumo do maquinário, o que melhora a eficiência de ciclos produtivos e auxilia na manutenção preditiva dos equipamentos. Nesse contexto, esse trabalho propõe a implementação de um sistema de monitoramento energético não invasivo, guiado conforme demandas do setor industrial dentro da ISO 50001 para máquinas monofásicas e trifásicas. Propõe-se também um monitoramento integrado, onde os dados adquiridos são organizados em um banco de dados, de modo a viabilizar análises estatísticas, de condicionamento do maquinário e visualização dos dados.

Palavras-chave: Máquinas elétricas. Energia. Monitoramento. Modbus. IIoT.

ABSTRACT

As companies needed to be up-to-date with the new technologies brought by Industry 4.0, adaptation actions started disorderly in several companies around the world. Thus, a context was created where companies in different stages of 4.0 implementation coexist. However, the first stage for the consolidation of the new industry is the monitoring of indispensable variables for a certain production process. The common variable for all companies is electrical energy. Energy management is necessary in a competitive market because it provides an overview of machinery consumption, which improves the efficiency of production cycles and assists in the predictive maintenance of equipment. In this context, this work proposes the implementation of a non-invasive energy monitoring system guided according to the demands of the industrial sector within ISO 50001 for single and three-phase machines. It is also proposed integrated monitoring, where the acquired data is organized in a database, in order to enable statistical analysis, machine conditioning and visualization of the data.

Keywords: Electric machines. Power. Monitoring. Modbus. IIoT.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 – Modelo Plan-Do-Check-Act do SGE | 15 |
| Figura 2 – Processo de planejamento energético conforme a ISO 50001 | 16 |
| Figura 3 – Análise do Indicador de Desempenho Energético | 18 |
| Figura 4 – Defasagem corrente e tensão alternadas | 20 |
| Figura 5 – Triângulo de potências | 21 |
| Figura 6 – Tensões trifásicas | 21 |
| Figura 7 – Construção do conceito Indústria 4.0 | 22 |
| Figura 8 – Pilares Indústria 4.0 | 23 |
| Figura 9 – Pilha de protocolo IIoT | 25 |
| Figura 10 – Transmissão Modbus | 27 |
| Figura 11 – Estrutura padrão de mensagem Modbus | 27 |
| Figura 12 – Encapsulamento mensagem Modbus RTU | 28 |
| Figura 13 – Descrição arquitetural do sistema | 33 |
| Figura 14 – Pinagem medidor monofásico DDS6619 | 34 |
| Figura 15 – Pinagem medidor trifásico XXX | 34 |
| Figura 16 – Módulo MAX485 | 36 |
| Figura 17 – Esquemático medidor monofásico | 37 |
| Figura 18 – Esquemático medidor trifásico | 37 |
| Figura 19 – Protocolos de comunicação utilizados para aquisição | 38 |
| Figura 20 – Arquitetura TIG | 39 |
| Figura 21 – Configuração para coleta monofásica com carga de 9W | 43 |
| Figura 22 – Configuração para coleta monofásica | 43 |
| Figura 23 – Torno CDL350B | 44 |
| Figura 24 – Medidor de energia trifásico e conectores de cinco pinos | 44 |
| Figura 25 – Torno CDL350B em operação com carga | 45 |
| Figura 26 – Coleta de dados ao longo de 17 dias | 47 |
| Figura 27 – Corrente, Potência ativa e Fator de potência quatro dias | 47 |
| Figura 28 – Frequência, Tensão e Potência Ativa total quatro dias | 48 |
| Figura 29 – Dados ensaios trifásicos referentes a fase A | 48 |
| Figura 30 – Potência ativa e Tensão diante variações de rotação | 49 |
| Figura 31 – Fator de potência das fases diante variações de rotação | 49 |
| Figura 32 – Potência Reativa e Corrente diante variações de rotação | 50 |
| Figura 33 – Fase A com carga | 50 |

LISTA DE QUADROS

| | |
|---|----|
| Quadro 1 – Principais funções de acesso de dados em 16 bits | 28 |
| Quadro 2 – Mapeamento de endereços wattímetro monofásico | 35 |
| Quadro 3 – Mapeamento de endereços wattímetro trifásico | 35 |
| Quadro 4 – Mapeamento de pinos do módulo MAX RS-485 | 36 |

LISTA DE SIGLAS

| | |
|-------|--|
| 4IR | Quarta Revolução Industrial |
| ABNT | Associação Brasileira de Normas Técnicas |
| ADU | Unidade de Dados do Protocolo de Aplicação |
| ANEEL | Agência Nacional de Energia Elétrica |
| ASCII | American Standard Code for Information Interchange |
| bps | Bits por segundo |
| CA | Corrente Alternada |
| CC | Corrente Contínua |
| CPPs | Cyber-physical production systems |
| CRC | Cyclic Redundancy Check |
| CTU | Unidade Terminal Central |
| EIA | Electronics Industries Association |
| IDE | Indicador de Desempenho Energético |
| IIOT | Internet das Coisas Industriais |
| IOT | Internet das Coisas |
| MQTT | Message Queuing Telemetry Transport |
| OSI | Open System Interconnection |
| PCR | Índice Percentual de Consumo no Período Reservado |
| PDCA | Plan-Do-Check-Act |
| PDU | Unidade de Dados de Protocolo |
| Q | Potência reativa |
| rpm | Rotações por Minuto |
| RTU | Modbus Remote Terminal Unit |

S Potência Aparente

SCADA Sistema de Supervisão e Aquisição de Dados

SGE Sistema de Gestão de Energia

TIG Telegraf, InfluxDB e Grafana

V Volts

VA volt-ampère

var volt-ampère reativo

W watts

SUMÁRIO

| | | |
|--------------|--|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 13 |
| 1.1 | Objetivos | 14 |
| 1.1.1 | Objetivo Geral | 14 |
| 1.1.2 | Objetivos Específicos | 14 |
| 2 | FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA | 15 |
| 2.1 | Sistema de gestão de energia | 15 |
| 2.2 | Medição de consumo de energia elétrica | 17 |
| 2.3 | Indústria 4.0 | 22 |
| 2.4 | IOT industrial | 25 |
| 2.5 | Protocolo Modbus | 26 |
| 2.5.0.1 | Modbus RTU | 28 |
| 2.5.0.2 | Camada física | 29 |
| 2.5.0.3 | Padrão EIA/TIA-485 | 29 |
| 2.6 | Trabalhos relacionados | 29 |
| 3 | MATERIAIS E MÉTODOS | 31 |
| 3.1 | Requisitos de projeto | 31 |
| 3.1.1 | Requisitos funcionais | 31 |
| 3.1.2 | Requisitos não funcionais | 32 |
| 3.2 | Modelagem | 32 |
| 3.3 | Materiais | 33 |
| 3.4 | Gerenciamento do fluxo de dados | 38 |
| 3.5 | Desenvolvimento do software embarcado | 39 |
| 3.6 | Cenários | 42 |
| 4 | RESULTADOS E DISCUSSÕES | 46 |
| 4.1 | Estudo de caso 1 | 46 |
| 4.2 | Estudo de caso 2 | 46 |
| 4.3 | Estudo de caso 3 | 48 |
| 4.4 | Discussões | 51 |
| 4.5 | Limitações | 52 |
| 5 | CONCLUSÕES | 53 |
| | REFERÊNCIAS | 54 |

1 INTRODUÇÃO

A indústria tem se adaptado desde o início da Primeira Revolução Industrial. De salas de controle de produção com múltiplos relés, cabos e blocos terminais, para dispositivos de controle dedicados e sistemas de integração entre processos, a era digital se faz hoje presente no coração do setor industrial (FINANCE, 2015).

Os centros produtivos, ao buscarem por um modelo de produção conectado e padronizado, possibilitaram o início da Quarta Revolução Industrial (4RI). Essa etapa da industrialização global é baseada na agregação de sistemas e na comunicação remota de dispositivos interconectados.

Centros produtivos ao redor do mundo, motivados pela necessidade e competitividade do mercado, ingressaram em uma jornada de implementação gradativa do novo modelo de produção. No Brasil, atualmente, companhias apresentam-se em diferentes etapas de adesão da Indústria 4.0 (FRONZA, 2022).

Essa revolução diz respeito a dados e sobre transformá-los em informações úteis para a malha produtiva, para melhorar o controle de produção e sua qualidade (OSSORIO, 2021). Para a geração de informações, variáveis de interesse precisam ser monitoradas e analisadas, a fim de traçar e prever comportamentos na cadeia de produção.

Decorrente da automatização e a adição de componentes eletroeletrônicos em linhas de fabricação, a demanda energética brasileira aumentou (MINISTERIO DE MINAS E ENERGIA, 2022). A conscientização energética faz-se fundamental na esfera social, como também industrial da sociedade. Atualmente, a indústria brasileira é responsável pelo uso de 40% da energia gerada no Brasil. Dentro desse valor, tem-se que os motores elétricos consomem 68% da energia elétrica em ambientes fabris (SENS, 2001).

O consumo final de eletricidade no país em 2021 progrediu 4,2%. Os setores que mais contribuíram para este avanço em valores absolutos foram o Industrial, que aumentou o seu consumo em 15,0 TWh (+7,5%), seguido pelo Comercial, que cresceu 4,8 TWh (+5,7%), pelo Agropecuário, com incremento de 1,4 TWh (+4,2%) e pelo Residencial, que cresceu em 1,6 TWh (+1,1%). (MINISTERIO DE MINAS E ENERGIA, 2022)

Dessa forma, o monitoramento do consumo de energia elétrica torna-se fundamental para implementação de conceitos iniciais da Indústria 4.0, referentes ao planejamento energético estratégico das instituições. A partir de um estudo de gerenciamento energético, é possível realizar o controle sobre a vida útil do equipamento e da qualidade do produto produzido. O monitoramento do consumo de

energia e a comparação com a demanda mensal contratada pela companhia também é um atrativo para sistemas de monitoramento, já que esses dados são geralmente disponibilizados apenas no final do mês pela concessionária elétrica.

O gerenciamento de energia tem participação fundamental na previsibilidade dos gastos energéticos e na identificação de pontos de melhora na malha produtiva. Ao monitorar o consumo durante a manufatura de um produto, a mensuração do valor monetário energético para aquele bem pode ser realizada. Além disso, a viabilização do uso de geradores em horários de tarifas elevadas pode ser discutida a partir das informações extraídas da situação energética da empresa.

Com base na necessidade do monitoramento do consumo de energia e na qualidade das malhas elétricas internas de produção, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) estabeleceu através da norma ABNT NBR ISO 50001, requisitos essenciais para a implementação de um Sistema de Gestão de Energia (ORBEN, 2016). Conforme a necessidade de monitoramento do consumo e qualidade de energia apresentadas, esse trabalho propõe um sistema de monitoramento para máquinas elétricas de uso industrial, com os dados armazenados em um banco de dados e exposto em tempo real para o usuário final do sistema.

1.1 OBJETIVOS

Para contribuir com o monitoramento energético de matrizes produtivas em fases iniciais da implementação de conceitos 4.0, propõem-se neste trabalho os seguintes objetivos.

1.1.1 Objetivo Geral

Desenvolver um sistema de monitoramento do consumo e qualidade de energia em máquinas elétricas inseridas em ambientes industriais, para contribuir para o rastreamento energético de companhias manufatureiras.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Definir indicadores que justificam o monitoramento de máquinas elétricas e sua demanda;
- Desenvolver um sistema de aquisição de dados, que possua adaptabilidade perante equipamentos distintos;
- Agrupar os dados adquiridos de maneira ordenada, com o propósito de assegurar análises e formulações de modelos estatísticos;
- Avaliar resultados experimentais obtidos em testes preliminares em laboratório com os obtidos em máquinas inseridas em ambientes industriais;

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

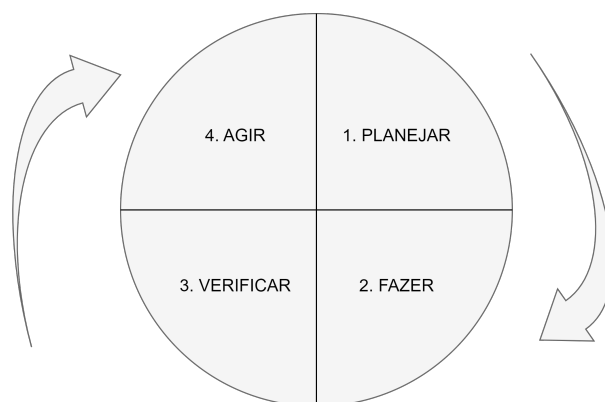
Nesse capítulo serão abordados conceitos utilizados para a construção de um sistema de monitoramento de uma malha elétrica produtiva. Inicialmente, será abordado a conceitualização de um sistema de gestão de energia e a norma que o regulariza no Brasil. Em seguida, os parâmetros utilizados para a medição do consumo elétrico serão definidos fisicamente. Depois, a contextualização do ambiente fabril da Indústria 4.0 é apresentado, juntamente com seus pilares. Por fim, a extrapolação dos conceitos que envolvem a transferência e armazenamento de dados serão discutidos, entre eles a caracterização do protocolo Modbus e seu meio físico, RS-485.

2.1 SISTEMA DE GESTÃO DE ENERGIA

A ABNT NBR ISO 50001 de Sistemas de Gestão de Energia - Requisitos com orientação para uso, foi publicada no ano de 2011 no Brasil (ABNT, 2011). Nela, consta a definição de um sistema de gestão de energia que visa não só promover o aumento da eficiência energética em companhias, como também, guiar as instituições com relação ao uso e consumo energético interno (FROZZA et al., 2012).

A norma é baseada no modelo Plan-Do-Check-Act (PDCA), que possui quatro etapas sequenciais, presentes na Figura 1. Esse modelo foi desenvolvido pelo físico Walter Andrew Shewhart nos Laboratórios Bell na década de 20, e refere-se a um ciclo de controle estatístico que pode ser aplicado continuamente sobre um estudo de caso (ORBEN, 2016).

Figura 1 – Modelo Plan-Do-Check-Act do SGE



Fonte: Elaborado pelo Autor (2023)

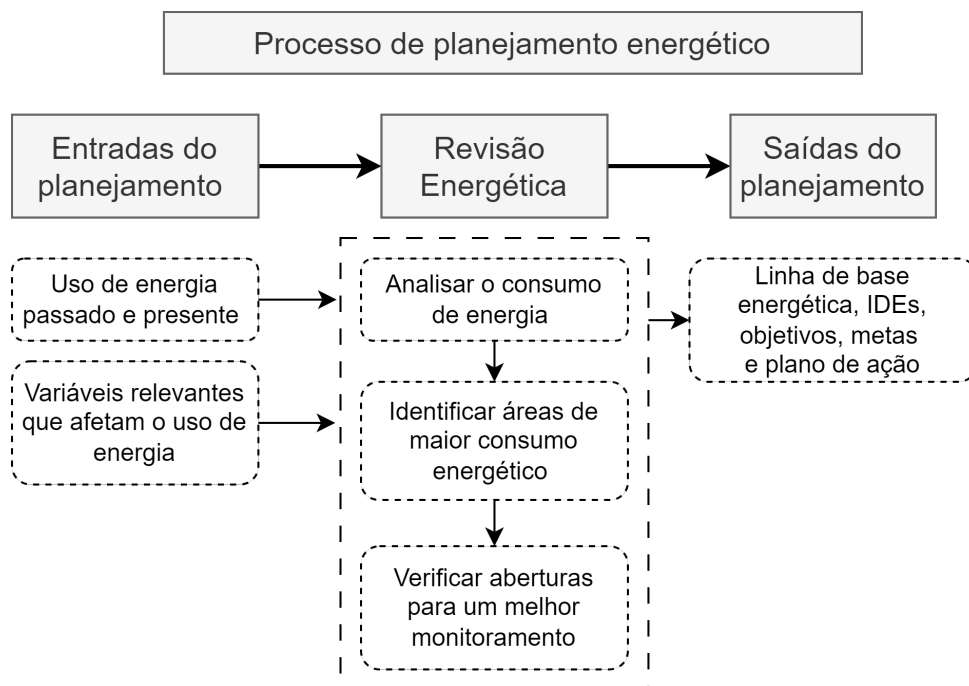
Ao estender o conceito do modelo PDCA à norma de SGE, a ISO 50001 esclarece que a primeira etapa do modelo, referente ao planejamento é fundamental

para que a gestão de energia atinja os resultados esperados. Esse planejamento provém de uma política energética empresarial interna (FROZZA et al., 2012), o que implica na existência de um processo que necessita de aperfeiçoamento dentro daquele ambiente fabril. Nessa fase, os objetivos a serem atingidos com a realização do SGE são traçados.

Com o plano de ação definido na etapa de planejamento, a fase da execução é responsável por validar todas as métricas de desejo da companhia (ORBEN, 2016). Em seguida, a verificação dos indicadores energéticos são realizadas, e.g aquisição de dados e relatórios. Com base na análise criteriosa dos resultados, a fase de agir reflete em análises críticas de cunho gerencial, onde problemas são corrigidos e novos identificados, o que pode gerar o início de um novo ciclo PDCA.

Apesar da norma não nominar variáveis de monitoramento comuns para todas as instituições, ela é aplicável a todas as métricas que influenciam o desempenho energético da empresa (ABNT, 2011). Todavia, a ISO 50001 especifica o fluxo do processo global do planejamento energético, que visto na Figura 2.

Figura 2 – Processo de planejamento energético conforme a ISO 50001



Fonte: Adaptado de (FROZZA et al., 2012)

O processo de planejamento consta com três principais etapas, sendo elas a entrada, a revisão energética e a saída do planejamento. Na segunda fase, etapa principal, o fluxo de energia pode ser caracterizado e as áreas críticas identificadas (FROZZA et al., 2012). Essa avaliação de todos os sistemas consumidores na malha elétrica pode ser obtido mediante uma auditoria interna na empresa (ABNT, 2011).

É a partir da revisão energética que planos de melhorias são traçados nas instituições e previsões de consumo são obtidas. Com o acesso a essas informações, cabe às companhias a definição das ações necessárias para o melhoramento do consumo na malha elétrica analisada.

2.2 MEDIÇÃO DE CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA

Existem quatro grupos de indicadores energéticos amplamente utilizados para análises elétricas quantitativas de processos (FROZZA et al., 2012). São eles os indicadores termodinâmicos, físicos-termodinâmicos, econômicos-termodinâmicos e os puramente econômicos, que correlacionam a mudança na eficiência energética e seu preço de mercado.

Segundo Saidel, Favato e Morales (2005), esses mesmos indicadores também são classificados em descritivos e explicativos. O primeiro grupo refere-se às variáveis de cunho energético descritivo, sem análises detalhadas sobre possíveis pontos de alto consumo ou caracterizações elétricas. Por outro lado, indicadores explicativos apresentam caráter investigativo frente aos motivos que levam as variações do consumo de energia. Nesse caso, existe a tentativa de justificar e categorizar comportamentos relacionados ao consumo (SAIDEL; FAVATO; MORALES, 2005).

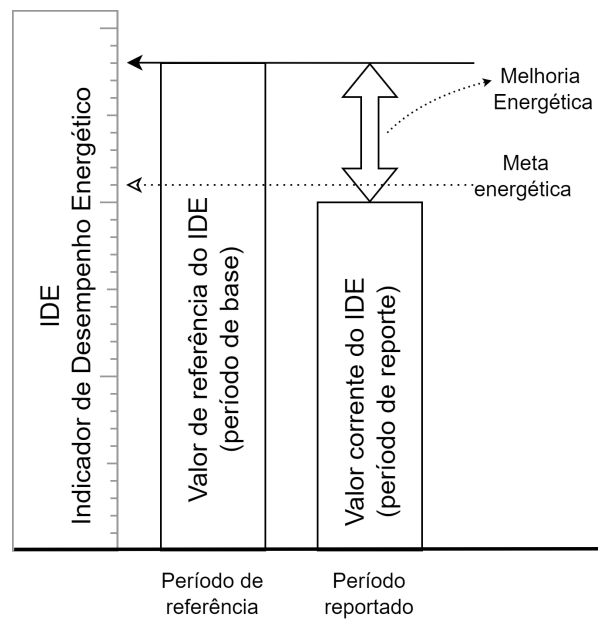
A norma ABNT NBR ISO 50001 deixa a critério das unidades consumidoras a escolha dos indicadores que serão monitorados para a potencialização da eficiência energética empresarial. Aqui, entende-se como melhora na eficiência energética, um processo que ao gerar o mesmo produto final, necessita de um menor consumo de energia do que quando comparado com um processo de mesmo resultado.

O uso de indicadores energéticos como ferramenta de gestão no que tange ao uso racional de energia elétrica é pouquíssimo explorado no Brasil (SAIDEL; FAVATO; MORALES, 2005)

A norma esclarece que independente de qual seja o Indicador de Desempenho Energético (IDE), o mesmo deve atuar como uma régua. Dessa forma, a diferença entre o valor de referência e a medição do mesmo indicador após a implementação de certo plano de ação representa as mudanças no desempenho energético da instituição. A Figura 3 foi adaptada da norma e demonstra a diferença entre o valor de referência do IDE e de seu valor corrente.

Apesar da falta de padronização, indicadores são propostos conforme as necessidades das instituições. Como exemplo, tem-se o Índice Percentual de Consumo no Período Reservado (PCR), proposto por Saidel, Favato e Morales (2005). Esse indicador tem como propósito quantificar o consumo durante um tempo fixo com relação ao consumo total da unidade.

Figura 3 – Análise do Indicador de Desempenho Energético



Fonte: Adaptado de (ABNT, 2011)

Assim, com a utilização desse parâmetro torna-se viável a identificação dos horários com maior consumo ou desperdícios atípicos na unidade consumidora. O PCR é calculado através da Expressão 1, onde a energia do período reservado em kWh é dividida pela energia total da unidade consumidora, também em kWh .

$$PCR = \frac{\text{Energia no tempo reservado (kWh)}}{\text{Energia total da unidade consumidora (kWh)}} \quad (1)$$

Vale ressaltar que as métricas devem ser escolhidas de forma estratégica, de forma que as não conformidades sejam identificadas, bem como suas respectivas ações corretivas (FROZZA et al., 2012). A título de exemplo, tem-se a medição da corrente elétrica em máquinas trifásicas. Nesse caso, ao existir uma diferença de corrente entre as fases, um novo balanço de cargas deve ser considerado.

Deste modo, entende-se que apesar de amplos e com distintas categorias, quando se trata do monitoramento de máquinas elétricas, alguns indicadores base são necessários para os cálculos do consumo de energia. De forma simplificada, a taxa mensal realizada pela concessionária elétrica tem como base o consumo mensal total, calculado pela Expressão 2.

$$\text{Consumo de Energia} = \text{Energia consumida (kW)} \times \text{Tempo de consumo (h)}, \quad (2)$$

onde o consumo de energia final é em kWh .

Nota-se que o consumo elétrico é dependente da potência consumida pela malha elétrica, e.g Energia Consumida. Essa potência, ou potência instantânea, é definida na Expressão 3 e representa a velocidade com que a energia é consumida, medida em watts (W) (ALEXANDER; SADIKU, 2013).

$$p = \frac{dw}{dt}, \quad (3)$$

em que dw expressa a energia absorvida em Joules (J) e dt a unidade de tempo em segundos (s) em que a potência é absorvida.

Outra forma de expressar a potência instantânea de um sistema é através da Expressão 4, onde i é a corrente elétrica consumida em Amperes (A) e v é a tensão medida em Volts (V).

$$p = i \times v \quad (4)$$

A corrente elétrica foi definida por Andre-Marie Ampere em meados de 1820 (ALEXANDER; SADIKU, 2013). Ele define a corrente como o fluxo de carga por unidade de tempo, onde carga refere-se a uma propriedade elétrica intrínseca dos átomos de cada material. A equação matemática que corresponde a definição de corrente elétrica pode ser vista na Expressão 5.

$$i = \frac{\Delta dq}{dt}, \quad (5)$$

aqui dq expressa o fluxo de carga em Coulomb (C) e dt o tempo em segundos.

A partir da Equação 5, entende-se que não necessariamente a corrente elétrica é limitada a uma função constante ao longo do tempo. Assim, pode-se categorizar a corrente elétrica em dois tipos, corrente contínua (CC) e corrente alternada (CA). A primeira refere-se a corrente expressa por uma função não variável no tempo, já a segunda, manifesta uma corrente em que há um fluxo de carga de caráter senoidal variável no tempo (ALEXANDER; SADIKU, 2013).

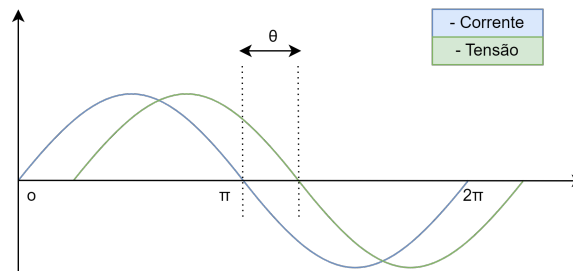
Como visto anteriormente, a tensão elétrica compõe a definição de potência, Expressão 4. Para cargas possam se locomover dois pontos de um condutor, um trabalho ou transferência de energia faz-se necessário (ALEXANDER; SADIKU, 2013). Desta forma, pode entender-se como tensão a diferença de potencial gerada entre esses pontos do condutor (JR, 2015). Na Expressão matemática de número 6, a definição formal de tensão elétrica é apresentada.

$$v_{ab} = \frac{dw}{dq}, \quad (6)$$

em que dw é a variação de energia (J) e dq a variação de carga (C), o que faz com que v_{ab} seja medido em Volts (V).

Até o momento, o conceito de potência abordado foi direcionado para circuitos CC. Contudo, ao tratar-se de circuitos CA senoidais, deve-se considerar a diferença de fase entre a tensão e a corrente alternada. Nesse caso, a potência instantânea ainda será o produto da tensão pela corrente instantânea, mas a potência média entregue a carga sofre alterações devido ao ângulo de defasagem (CHAPMAN, 2013). Esse

Figura 4 – Defasagem corrente e tensão alternadas



Fonte: Elaborado pelo Autor (2023)

ângulo de defasagem, Θ , gerado em circuitos CA é visto na Figura 4, onde a onda senoidal azul representa a corrente e a verde a tensão alternada.

Assim, ao expandir o conceito de potência instantânea para circuitos CA, onde pulsos de potência ocorrem, utiliza-se da Expressão 7, referente a potência ativa ou média do circuito. A unidade da potência ativa é o W , onde $1W = 1V \times 1A$ (CHAPMAN, 2013).

$$P = V \times I \times \cos(\Theta) \quad (7)$$

O segundo tipo de potência presente em circuitos alternados é a potência reativa (Q), Expressão 8. Responsável por caminhar continuamente da fonte de tensão para a carga e da carga de volta para a fonte, essa forma de energia pode representar a energia liberada pelo campo magnético de um indutor ou pelo campo elétrico de um capacitor (CHAPMAN, 2013).

$$Q = V \times I \times \sin(\Theta), \quad (8)$$

em que Q tem unidade de medida o volt-ampère reativo (var).

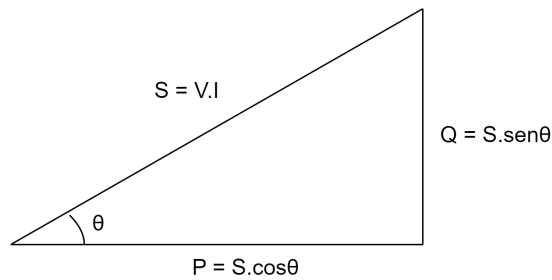
Ainda com relação à potência em circuitos alternados, a terceira e última potência é a potência aparente (S). Definida como o produto entre a corrente que circula na carga e sua respectiva tensão, sua formulação matemática é vista na Expressão 9.

$$S = V \times I \quad (9)$$

Essa é a potência que, ao desconsiderar o ângulo de defasagem entre tensão e corrente, aparenta ser fornecida a carga. A potência aparente tem como unidade de medida o volt-ampère (VA), onde $1VA = 1V \times 1A$. Nota-se que as unidades entre as três potências diferem, a fim de auxiliar na correta identificação de cada uma.

Essas três potências se relacionam entre si via um triângulo de potência, Figura 5. Nele, o ângulo de defasagem é indicado pelo ângulo Θ , no canto inferior esquerdo do triângulo retângulo. O cateto adjacente corresponde a potência ativa e o cateto oposto é a potência reativa. O $\cos(\Theta)$ também é conhecido como fator de potência e representa a fração da potência aparente que ativamente fornece potência ativa para a carga (CHAPMAN, 2013).

Figura 5 – Triângulo de potências

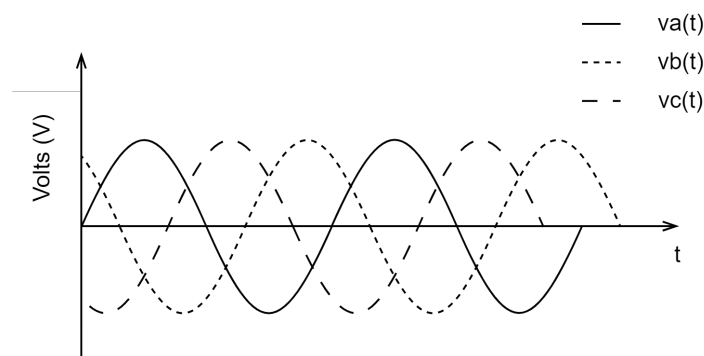


Fonte: Elaborado pelo Autor (2023)

O fator de potência fornece informações importantes sobre a rede elétrica. Através dele é possível saber se a defasagem entre corrente e tensão tem caráter indutivo ou capacitivo, ou até mesmo deliberar informações sobre a qualidade da malha elétrica. Segundo a Resolução Normativa N^o 414/201, da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), o fator de potência da rede elétrica deve ser maior ou igual a 0.92 (ANEEL, 2010).

Até o momento, a discussão das métricas foi realizada em torno de sistemas monofásicos contínuos e alternados. Para os conceitos debatidos poderem ser expandidos para um sistema trifásico, faz-se necessário o entendimento base desse tipo de circuito. Um sistema trifásico é composto por três geradores monofásicos e para o caso da tensão trifásica cada gerador fornece uma onda de mesma amplitude. Contudo, essas tensões diferem entre si 120° e podem ser vistas na Figura 6.

Figura 6 – Tensões trifásicas



Fonte: Elaborado pelo Autor (2023)

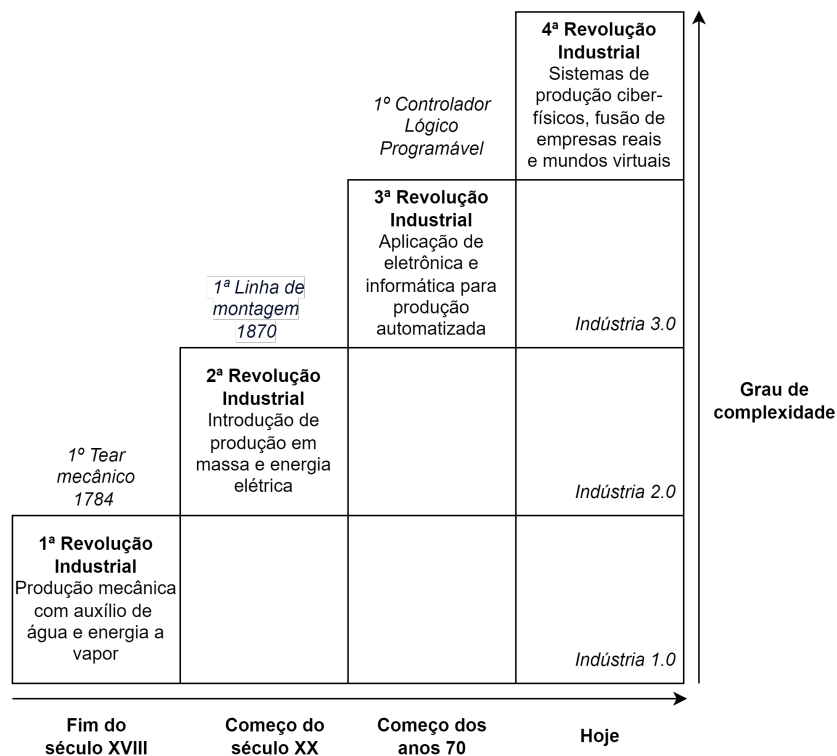
Assim, é possível concluir que os valores trifásicos de tensão e corrente estarão sempre associados a um ângulo de defasagem entre as cargas e para esse tipo de sistema a representação fasorial é usualmente utilizada. Vale ressaltar que as terminações negativas das três fases monofásicas podem ser ligadas de forma que compartilhem de uma linha comum de retorno, chamada de neutro (CHAPMAN, 2013).

2.3 INDÚSTRIA 4.0

Utilizado pela primeira vez em 2011 durante a feira de Hanover na Alemanha, o termo Indústria 4.0 faz jus a próxima etapa de desenvolvimento na cadeia produtiva das organizações. Também referenciada como Indústria do futuro e até mesmo Indústria inteligente, esse conceito atual de produção abraça a transformação digital em processos produtivos em ambientes industriais (FINANCE, 2015).

Dessa forma, a Quarta Revolução Industrial traz um modelo produtivo instrumentado, com uso de sensores para aquisição de dados, malhas internas de controle e a intercomunicação de dispositivos em diferentes níveis da produção. Essa rede de dispositivos virtuais representa e faz parte da organização real, o que torna as fronteiras reais e virtual cada dia mais turvas. Esses sistemas são chamados de Cyber-physical Production Systems (CPPS) e estimulam o desaparecimento das fronteiras de dados em meio a essa nova etapa produtiva (GUYON et al., 2019).

Figura 7 – Construção do conceito Indústria 4.0



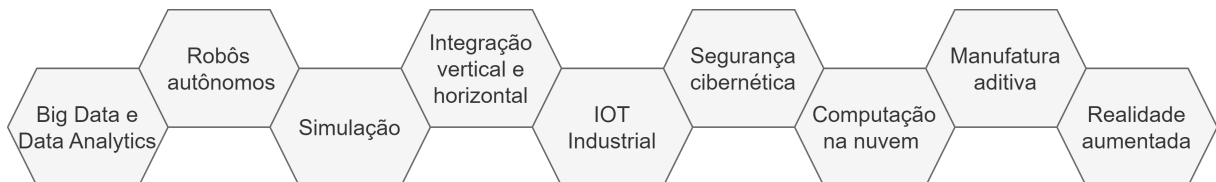
Fonte: Traduzido de (FINANCE, 2015)

Na Figura 7 observam-se as etapas industriais que foram aprimoradas e utilizadas para o desenvolvimento do que hoje conhece-se como 4IR. A construção da indústria moderna iniciou-se durante a primeira revolução industrial, onde mudanças estruturais, decorrentes da criação das fábricas, tiveram início na sociedade.

Assim como para o acontecimento das revoluções industriais anteriores,

tecnologias de propulsão auxiliaram no desenvolvimento 4.0. Na Figura 8 encontram-se os pilares que norteiam essa nova etapa. Apesar de tratarem-se de tecnologias já utilizadas pelo setor manufatureiro de formas individuais, a integração dessas ferramentas possibilita a assimilação de células distintas, a otimização do fluxo de produção e uma maior eficiência produtiva (RÜSSMANN et al., 2015).

Figura 8 – Pilares Indústria 4.0



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Inicialmente, tem-se o conceito de Big Data e Data Analytics. Análises estatísticas focadas na otimização da produção, com a utilização de dados em abundância, surgiram recentemente em ambientes industriais (RÜSSMANN et al., 2015). Essas técnicas visam a coleta de dados de pontos distintos da produção, o que as torna ideais para tomadas de decisões em tempo real frente a acontecimentos com consequências em diferentes partes da cadeia produtiva (GUYON et al., 2019).

Na sequência, tem-se o conceito de robôs autônomos, o qual é erroneamente apresentado como pilar dirigente da Indústria 4.0. Apesar de mais flexíveis e independentes, os robôs ainda precisam dos outros pilares para a otimização de suas atividades. Atualmente, as máquinas não apenas auxiliam em tarefas complexas, como também agem como agentes cooperativos no ambiente fabril (GUYON et al., 2019). A tendência é que interajam cada vez mais um com os outros e que trabalhem seguramente ao lado dos humanos (RÜSSMANN et al., 2015).

Ainda com relação aos robôs 4.0, há também a tendência da diminuição de seus respectivos preços. Com essa maior difusão no mercado, a adaptabilidade desses robôs perante a execução de tarefas distintas nas linhas de produção tendem a aumentar. A título de exemplo, tem-se a fabricante europeia Kuka, que já conta com robôs cooperativos de trajetórias automaticamente ajustáveis, decorrentes do estado do produto na linha de produção (RÜSSMANN et al., 2015).

O terceiro pilar 4.0 referente a simulações e suas correlações com processos de fabricação, são resultados de evoluções que tiveram início na década de 70, devido à utilização de sistemas CAD/CAM pelas indústrias aeronáutica e automobilística pela primeira vez (GUYON et al., 2019). Futuramente, simulações serão utilizadas em tempo real e paralelas à produção, o que irá permitir a personalização dos parâmetros das máquinas frente a diferentes demandas de tempo real da linha de produção.

As atualizações tecnológicas dos ambientes produtivos são responsáveis pelo aumento da integração entre setores distintos e relacionados ao desenvolvimento e fabricação de um mesmo produto final. Atualmente, é necessário um esforço coletivo em prol da integração de setores internos e externos da cadeia produtiva com seus respectivos fornecedores e clientes.

Dessa forma, a rede vertical utiliza de CPPs para que as plantas industriais reajam de maneira correta e em tempo real na ocorrência de eventos excepcionais. Exemplificativamente, tem-se como situação que exige alta taxa de velocidade para tomada de decisões o nível insuficiente de estoques e falhas gerais em sistemas primários e secundários na linha de produção (FINANCE, 2015). Na rede horizontal de integração há a utilização de CPPs para comunicação entre clientes e stakeholders também por meio de CPPs, de clientes e stakeholders, o que viabiliza a otimização global da cadeia de produção, bem como sua transparência para com partes de interesse.

A integração de sistemas na Indústria 4.0 gera como consequência o uso de protocolos de comunicação diversos e a transferência de dados elementares ao longo da rede e para pontos de acesso distintos. Assim, faz-se necessário assegurar que os dados não serão adulterados ao longo da cadeia, ou entregues a destinatário não identificados.

Esse fomento em prol da proteção dos dados, torna empresas de segurança novas partes de interesse no modelo de negócios de empresas que buscam pela quarta revolução tecnológica. Para garantir a segurança das redes de comunicação internas e da malha de produção em prol de equipamentos mais seguros e confiáveis (FINANCE, 2015), a segurança cibernética é um pilar fundamental.

A próxima estrutura 4.0 a ser discutida é a computação em nuvem. Com a 4RI, será necessária uma partilha maior de informações no complexo empresarial e suas fronteiras (RÜSSMANN et al., 2015). A rede cabeada já não serve aos propósitos de muitos centros industriais. O gerenciamento de dados na nuvem possibilita um tempo de reação menor dos sistemas e acesso à informação de terminais remotos (GUYON et al., 2019).

A adoção da manufatura aditiva, por meio de impressoras 3D teve um impacto positivo na indústria (RÜSSMANN et al., 2015). Utilizadas majoritariamente para a produção de protótipos e peças individuais, a próxima etapa para essa tecnologia tem base na utilização de materiais ainda mais leve, geometrias complexas e ainda mais personalizados (GUYON et al., 2019).

Centros de manufatura aditiva descentralizados terão impactos diretos na redução do tempo de transporte para finalização de produtos, já que a manufatura da mercadoria perto da demanda tem carácter simplificador nos processos de acabamento (FINANCE, 2015). A redução de peças de estoque também pode ser uma problemática

resolvida pela manufatura aditiva.

Por fim, a realidade aumentada visa a viabilização da integração dos dados e permite novas formas de acesso à informação (GUYON et al., 2019). Manuais de reparo, seleção de equipamentos em almoxarifados e treinamentos virtuais de colaboradores, são algumas das atividades possibilitadas por uma realidade aumentada.

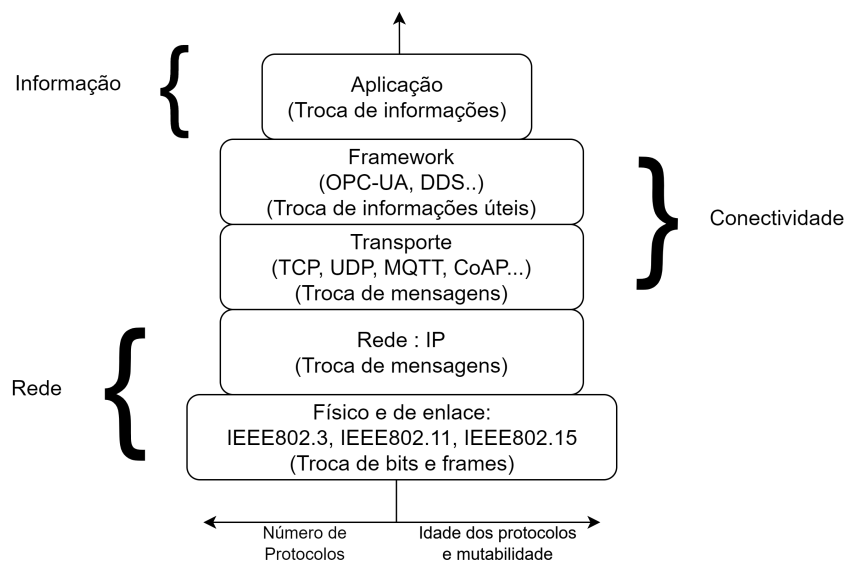
Como o pilar referente a Internet das Coisas Indústrias norteia o desenvolvimento desse projeto, esse conceito será abordado na próxima seção. Para consolidar seus conceitos e correlações com o trabalho proposto.

2.4 IOT INDUSTRIAL

A Internet das Coisas (IOT) encontra-se no mercado há alguns anos e visa a conexão de objetos rotineiros a rede (SISINNI et al., 2018). Esses dispositivos conectados ao mundo externo por meio de sensores, transformaram-se em agentes geradores de dados. No contexto moderno, onde tecnologias de ponta são baseadas em redes neurais e aprendizado de máquina, a abundância da disponibilidade de dados é apresentada como vantagem competitiva no mercado.

Contudo, não apenas equipamentos domésticos foram conectados, já que com o advento da manufatura digital e integrada, companhias ao redor do mundo clamam por operações conectados e protegidas. Nesse contexto, a Internet das Coisas Industriais (IIOT) surge como uma evolução da Internet das Coisas (SISINNI et al., 2018), ao possibilitar a integração entre ilhas de produção e principalmente, o gerenciamento da demanda dentro de todo o chão de fábrica.

Figura 9 – Pilha de protocolo IIoT



Fonte: Traduzido de (SISINNI et al., 2018)

Na Figura 9, a arquitetura da pilha de protocolos para a transmissão de mensagens dentro da IIOT é apresentada. Nota-se que para a troca de mensagens, sua estrutura é norteada por normas internacionais e diferentes camadas de transporte/comunicação. Dessa forma, com a correta utilização da arquitetura da rede e um gerenciamento prudente dos pacotes, a troca de dados através da Internet das Coisas Industriais pode ser assegurada.

Segundo Freitas (2017), em relação à segurança de dados, existem três grupos de objetivos desejáveis em processos que utilizam de IIOT. O primeiro deles é a confidencialidade, onde os dados transmitidos devem ser acessados unicamente por seus destinatários. Em sequência tem-se a integridade, referente a proteção contra interceptação e manipulação dos dados. Por último, a disponibilidade do sistema faz-se necessária, ao garantir uma troca de mensagens íntegra e segura a qualquer momento.

2.5 PROTOCOLO MODBUS

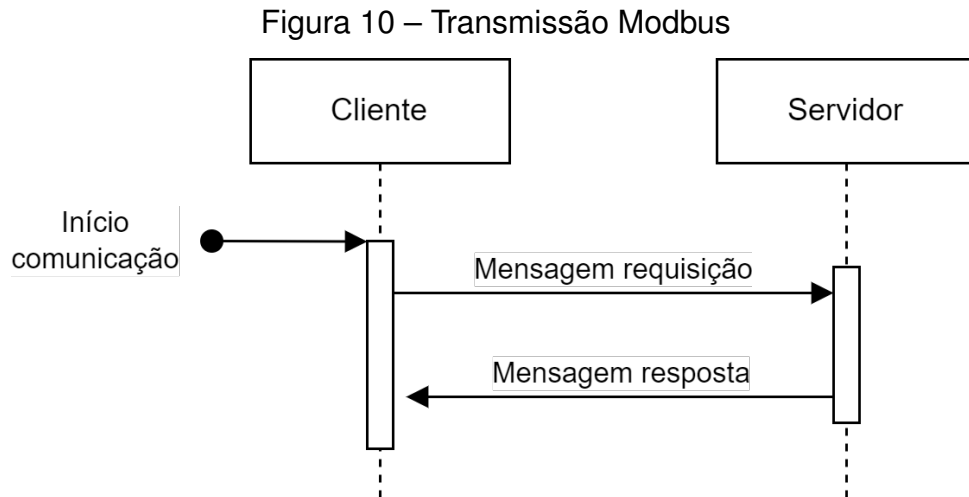
Criado em 1979 pela companhia Modicon, o protocolo Modbus tinha como propósito realizar a comunicação ponto a ponto dos CLPs da empresa e seus devidos painéis programáveis (THOMAS, 2008b). Apesar das alterações sofridas pelo protocolo ao longo dos anos, ele ainda possibilita a comunicação de milhões de dispositivos de automação (MODBUS-IDA, 2006b).

A comunicação Modbus, de modo geral, atua sobre a camada de aplicação e camada física do modelo Open System Interconnection (OSI) de rede de computadores (THOMAS, 2008a). Baseia-se em um protocolo do tipo mestre/escravo, onde apenas um mestre pode estar conectado ao barramento por vez, com a possibilidade de até 247 escravos conectados a linha.

O mestre possui duas formas de se comunicar com seus respectivos escravos. Através do endereço único do escravo, comunicação direta e unitária, ou na categoria transmissão aberta, na qual todos os escravos receberão a mesma mensagem de solicitação (THOMAS, 2008a). Nesse último caso, todos os escravos devem reconhecer o endereço da transmissão aberta, usualmente zero.

A comunicação tem início quando o mestre (cliente) inicia a transmissão, ao enviar uma mensagem que sinaliza ao servidor o tipo de ação que será realizada (MODBUS-IDA, 2006b). Os escravos nunca se comunicam entre si e o mestre apenas inicia uma transmissão de mensagens por vez, conforme Figura 10.

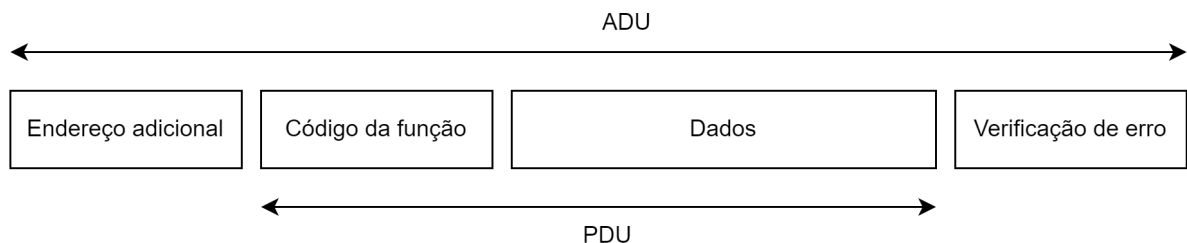
A troca de informação é feita por mensagens estruturadas que seguem os padrões estabelecidos pelo protocolo. A Figura 11 ilustra a segmentação da informação na mensagem, a qual é subdividida em duas categorias. Uma mensagem Modbus é composta por um campo reservado ao endereço adicional, outro para o código da função, seguido pelo espaço dos dados e finalmente pelo campo de verificação de erro.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

O protocolo de comunicação Modbus define uma simples Unidade de Dados de Protocolo (PDU), independente de camadas de comunicação subjacentes. Contudo, ao mapear uma mensagem Modbus em uma rede ou barramento específico, segmentos adicionais são concatenados a Unidade de Dados do Protocolo de Aplicação (ADU).

Figura 11 – Estrutura padrão de mensagem Modbus



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Os dados transferidos por Modbus são representados por quatro tipos de dados primitivos distintos. Sendo eles entradas discretas, coils, registradores de entrada e registradores de retenção, listados a seguir.

- Entradas discretas: Apenas de leitura, essas variáveis são do tipo de objetos de bit únicos. Provenientes de um sistemas de entrada e saída;
- Coils: Também variáveis de bit único, as coils possibilitam apenas escrita e são alteradas por um programa de aplicação;
- Registradores de entrada: São palavras de 16 bits de apenas leitura, promovidos por um sistema de entrada e saída;
- Registradores de retenção: Também palavras de 16 bits, mas agora são acessíveis tanto para escrita quanto para leitura. Esse tipo de dado pode ser alterado pela aplicação do programa.

As entradas direta e coils representam dados lógicos, enquanto os outros, registradores de entrada e registradores de retenção, dados de 16 bits.

O código de função possui um byte sendo ele o responsável por indicar ao escravo que ação será realizada sob seus registradores. As principais funções de acesso de dados em 16 bits podem ser vistas no Quadro 1.

Quadro 1 – Principais funções de acesso de dados em 16 bits

| Código da função | Descrição |
|------------------|--|
| 04 | Leitura de registrador de entrada |
| 03 | Leitura de registradores de retenção |
| 06 | Escrita um registrador de retenção único |
| 16 | Escrita em múltiplos registradores de retenção |
| 23 | Leitura e escrita em múltiplos registradores |
| 22 | Escrita na máscara de registradores |
| 24 | Leitura FIFO de fila |

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

O protocolo de comunicação Modbus também conta com dois modos de transmissão serial, um chamado de Modbus American Standard Code for Information Interchange (ASCII) e outro Modbus Remote Terminal Unit (RTU) (THOMAS, 2008b). A escolha para o uso de ambos é relacionado com o impacto do encapsulamento e tempo das mensagens, sem relação a topologia associada.

2.5.0.1 Modbus RTU

O termo RTU provém do termo Sistema de Supervisão e Aquisição de Dados (SCADA), onde o mestre é chamado de Unidade Terminal Central (CTU), que se comunica com dispositivos RTUs em diferentes localizações (THOMAS, 2008b). Tanto o Modbus ASCII quanto o RTU, ao operar sobre enlaces de comunicação serial utilizam de comunicação assíncrona, com um carácter enviado por vez.

A estrutura da mensagem do modo Modbus RTU é vista na Figura 12. Trata-se de uma estrutura compacta, com apenas 1 byte destinado ao endereço do escravo ou para transmissão global - broadcast, 1 byte para o código da função e 2 bytes para a verificação de erro chamada Cyclic Redundancy Check (CRC) (THOMAS, 2008a).

Figura 12 – Encapsulamento mensagem Modbus RTU

| Endereço do escravo | Código de função | Dados | CRC |
|---------------------|------------------|---------------|---------|
| 1 byte | 1 byte | 0 - 252 bytes | 2 bytes |

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

No Modbus RTU o final de uma mensagem não é demarcado na mensagem trocada, mas sim após um silêncio no barramento. O tempo é indiciado por aproximadamente 3,5 a 4,5 vezes o tempo de envio de um carácter (THOMAS, 2008a).

2.5.0.2 *Camada física*

A primeira versão do protocolo de comunicação Modbus, exigia a utilização de uma comunicação ponto a ponto partir do protocolo EIA-232C, desenvolvido pela Electronics Industries Association (EIA). Contudo, as especificações para o uso de Modbus sobre uma linha serial fomentam a utilização do padrão EIA-485, também conhecido como RS-485, pela suportabilidade de até 32 dispositivos conectados ao mesmo barramento (THOMAS, 2008a).

2.5.0.3 *Padrão EIA/TIA-485*

Também conhecido como protocolo RS485, esse padrão de comunicação da camada física da rede, possibilita a comunicação ponto a ponto e também de sistemas com múltiplos pontos (MODBUS-IDA, 2006a). Essa comunicação pode ser de dois tipos, com dois ou quatro fios.

Ao utilizar o modbus padrão, todos os dispositivos estão conectados em um cabo do tipo Trunk de três conectores internos, onde dois formam um par trançado que sustenta a transmissão bidirecional dos dados (MODBUS-IDA, 2006a). Usualmente, a taxa de transmissão utilizado é de 9600 bits pro segundo (bps) .

Em um barramento de dois fios, apenas um dispositivo pode realizar a transmissão por vez. Além disso, um terceiro fio deve interconectar todos os dispositivos do barramento.

2.6 TRABALHOS RELACIONADOS

O trabalho proposto por DAS N, ZIM M e SARKAR M (2021) propõe a construção do medidor de energia com base em um sensor de corrente e dois microcontroladores. Esse sistema opera com base na alimentação, e não opera caso a alimentação seja cortada. Os dados desse sistema seguem para a base de informações e são encaminhados até o servidor web, o que possibilita o acesso remoto dos dados.

Abordagens para a avaliação do consumo energético doméstico também já foram realizadas pela academia, como em GAJOWNICEK e ZABKOWSKI (2014). Nesse caso, o desenvolvimento do medidor de energia não foi realizado, mas sim o uso de um equipamento consolidado no mercado. A previsão do consumo energético foi realizada com o auxílio de redes neurais e máquinas de estados de vetores.

Apesar dos resultados obtidos preverem de maneira satisfatória o consumo energético do dia seguinte, o algoritmo não pode detectar mudanças no comportamento

da família, já que uma coleta de dados em um período maior do que 60 dias seria necessário (GAJOWNICEK; ZABKOWSKI, 2014). Com abordagens domésticas, esse projeto apresenta uma metodologia consciente, mas que apresenta inúmeras diferenças com um estudo de caso industrial.

O trabalho base que mais se assemelha ao que será desenvolvido é o apresentado por SYUFRIJAL et al. (2021). Com uma metodologia sistemática, apesar de também propor o monitoramento da energia elétrica residencial, faz-se uso de um medidor de energia, onde os dados são extraídos através do protocolo de comunicação Modbus, com o meio físico RS-485. Os dados são enviados para um serviço de mensagens, de onde as informações podem ser acessadas remotamente. Contudo, o trabalho não propõe uma aplicação de métodos para prever o consumo de energia.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesse capítulo serão discutidos os aspectos práticos para a execução desse projeto. Inicialmente os requisitos funcionais e não funcionais serão especificados, seguidos pela modelagem e planejamento para construção do demonstrador. Os materiais serão listados na sequência. De modo a viabilizar futuras montagens e expansões do projeto, o esquemático elétrico é apresentado no final da seção, assim como o planejamento dos cenários de testes.

3.1 REQUISITOS DE PROJETO

A definição dos requisitos funcionais e não funcionais aspira nortear a implementação prática dos sistemas de monitoramento de energia elétrica. Desse modo, os principais requisitos do projeto são listados abaixo, para que o manejo sistêmico dos objetivos e expectativas finais do projeto sejam atingidos.

3.1.1 Requisitos funcionais

Os requisitos funcionais rastreiam quais as funcionalidades atendidas pelo sistema através de suas funções ou serviços. Ao definir respostas específicas para entradas conhecidas e desconhecidas, esses requisitos conferem confiabilidade as aplicações (CONJO, 2022). A seguir, os requisitos funcionais para o sistema de monitoramento de energia serão listados.

RF1 Leitura dos indicadores de interesse para o monitoramento do comportamento das máquinas elétricas monofásicas e trifásicas.

Indicadores máquina monofásica: Tensão, corrente, potência ativa, fator de potência, frequência e potência ativa total.

Indicadores máquinas trifásicas: Tensão fase A, tensão fase B, tensão fase C, corrente fase A, corrente fase B, corrente fase C, potência ativa fase A, potência ativa fase B, potência ativa fase C, potência ativa total, potência reativa fase A, potência reativa fase B, potência reativa fase C, potência reativa total, fator de potência fase A, fator de potência fase B, fator de potência fase C e frequência da rede.

RF2 O sistema deve armazenar os dados coletados em um banco de dados.

RF3 O sistema deve ter uma interface para o usuário final.

RF4 A taxa de visualização do dado, deve ser de no mínimo um dado enviado a cada 30 segundos.

RF5 O sistema deve ser modular, capaz de organizar informações de múltiplos wattímetros.

RF6 Falhas de comunicação com o wattímetro devem ser comunicadas ao usuário.

RF7 O sistema deve ter uma fonte de alimentação secundária, e.g bateria. Em caso de falta de tomadas perto do local de instalação.

RF8 Enquanto o sistema estiver ativo e conectado na rede, o mesmo deve manter conectividade com o bando de dados.

RF9 Se a conexão com a rede falhar, o sistema deve permanecer em estado de tentativa de reconectar.

RF10 Em caso de falha de conexão com a rede, os dados devem ser armazenados em um dispositivo secundário, e.g Cartão de memória, e enviados assim que a conexão for reestabelecida.

RF11 O sistema deve garantir uma latência de no máximo 10% de perda de dados.

RF12 O microcontrolador deve realizar a transmissão dos dados via internet.

RF13 Deve haver uma comunicação entre o microcontrolador e o wattímetro de aquisição.

RF14 O sistema deve transmitir os dados adquiridos, a fim de disponibilizá-los para a parte do sistema responsável pela visualização dos dados.

3.1.2 Requisitos não funcionais

Os requisitos não funcionais abordam como as funcionalidades desejado serão atingidas. Dessa forma, referem-se a requisitos correlacionados com a arquitetura do sistema, os quais prezam pela qualidade do mesmo (CONJO, 2022). Os requisitos não funcionais do sistema de monitoramento proposto estão listados a seguir.

RNF1 O sistema deve ser capaz de realizar a medição de valores de corrente entre 0 e 60 A.

RNF2 O sistema deve ser capaz de realizar a medição de valores de tensão entre 100 e 230 volts.

RNF3 A conexão com o servidor de mensagens sempre deve ser mantida enquanto o sistema estiver ligado, a cada X segundos.

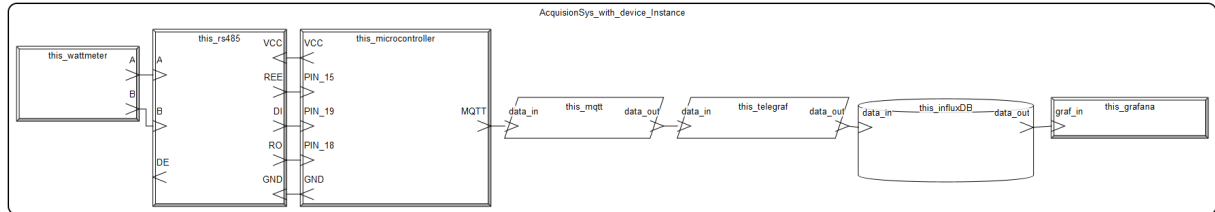
RNF4 O microcontrolador deve conseguir acessar o valor da variável de interesse usando uma comunicação serial.

3.2 MODELAGEM

De maneira a atender os requisitos necessários para o sistema de monitoramento das máquinas elétricas monofásicas e trifásicas, um primeiro esboço de descrição para a arquitetura do sistema foi desenvolvido, conforme Figura 13. Durante

o desenvolvimento da modelagem, materiais e componentes foram listados, os quais serão discutidos na próxima seção.

Figura 13 – Descrição arquitetural do sistema



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

O código utilizado para a geração do diagrama acima encontra-se no Apêndice A. Fica claro com o diagrama, que um fluxo de dados foi idealizado entre os medidores de energia até os campos de visualização dos dados. Apesar de genérico, considerações acerca do sistema já podem ser afirmadas após essa modelagem inicial, as quais serão discutidas nas próximas seções.

3.3 MATERIAIS

Durante o processo de modelagem do sistema, visando facilitar a montagem do demonstrador físico e atender os requisitos do projeto, os principais materiais a serem utilizados foram selecionados. Visto que o componente principal e de maior impacto na arquitetura do sistema é o wattímetro, as demais partes foram escolhidas a partir dele e suas especificações.

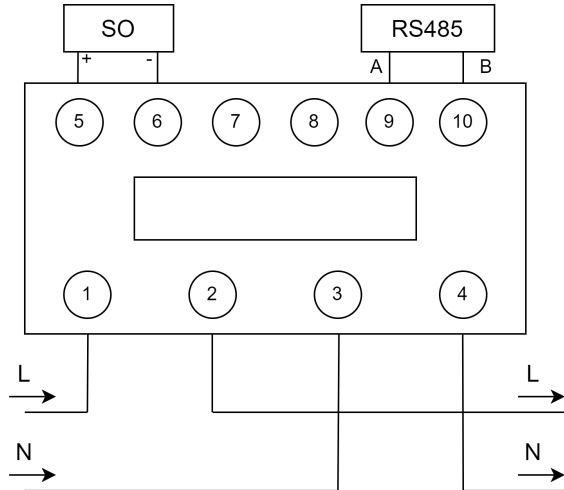
Como esse projeto visa monitorar tanto máquinas elétricas monofásicas, quanto trifásicas, dois demonstradores foram idealizados, cada um com seu respectivo wattímetro. O dispositivo de número serial DDT56619 de endereço 17 foi utilizado na construção do demonstrador monofásico e o de número serial DDT56619 de endereço 69, no trifásico. Esses equipamentos foram produzidos pelo fabricante SINOTIMER.

Ambos os dispositivos realizam a medição dos parâmetros de interesse de forma não invasiva, o que faz com que o objeto de estudo (máquina) esteja conectada no medidor e o medidor na rede elétrica. Dessa forma, esse modelo de interface externa tem como vantagem a portabilidade e adaptabilidade para diferentes equipamentos, ao possuírem o mesmo tipo de alimentação.

O mapa de pinos de entrada e saída do medidor monofásico é visto na Figura 14. O fluxo de energia no medidor inicia com o pino 1, onde a energia da rede entra, denominada de L. O pino 2 é responsável pela saída de energia do medidor para a carga utilizada, aqui é necessário ter o adaptador fêmea compatível com o macho do equipamento a ser medido. Note que os pinos 9 e 10 são os responsáveis pela

comunicação via Modbus do medidor de energia. O módulo da camada física do protocolo, RS485, é conectado a esses dois pinos.

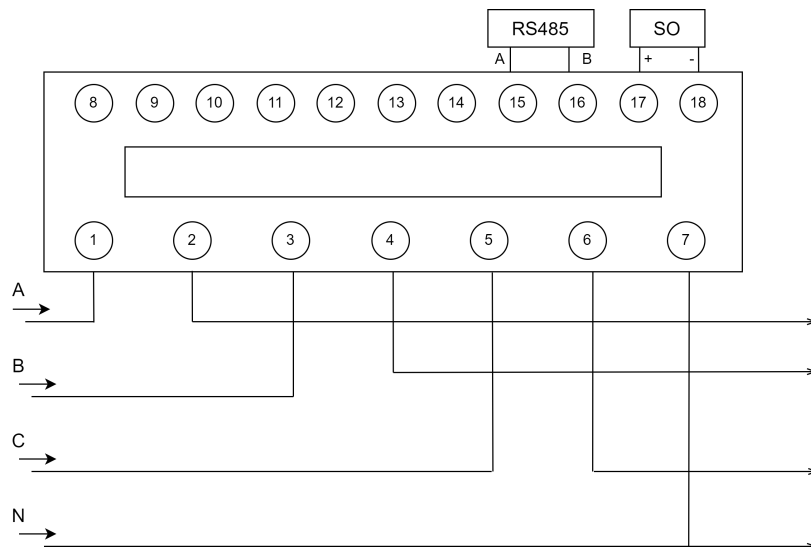
Figura 14 – Pinagem medidor monofásico DDS6619



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

O fluxo de energia do medidor monofásico é semelhante ao do wattímetro trifásico, Figura 15. A diferença base está na quantidade de fases lidas pelo aparelho, nesse caso, as entradas são as respectivas fases A, B e C da rede trifásica. Percebe-se que o neutro é apenas utilizado como referência pelo medidor.

Figura 15 – Pinagem medidor trifásico XXX



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Os valores das variáveis elétricas adquiridas pelos medidores são armazenados nos respectivos registradores. O mapeamento dos endereços para o wattímetro

monofásico pode ser visto no Quadro 2. Os indicadores disponíveis para leitura nesse dispositivo são a tensão, corrente, potência ativa, potência ativa total, fator de potência e frequência da rede.

Quadro 2 – Mapeamento de endereços wattímetro monofásico

| Endereço dos registradores de dados | Descrição do registrador |
|-------------------------------------|----------------------------|
| 0x0000 | Tensão (V) |
| 0x0008 | Corrente (A) |
| 0x0012 | Potência ativa (kWh) |
| 0x002A | Fator de potência |
| 0x0036 | Frequência da rede (Hz) |
| 0x1000 | Potência ativa total (kwh) |

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Já para o medidor trifásico, a medição de vinte indicadores é realizada de forma simultânea, Quadro 3. A única variável que difere do wattímetro monofásico é a potência reativa, total e por fase. Salvo essas variáveis, as outras permanecem idênticas, apenas expandidas para as três fases agora disponíveis no sistema.

Quadro 3 – Mapeamento de endereços wattímetro trifásico

| Endereço dos registradores de dados | Descrição do registrador |
|-------------------------------------|---------------------------------------|
| 0x0000 | Tensão fase A (V) |
| 0x0002 | Tensão fase B (V) |
| 0x0004 | Tensão fase C (V) |
| 0x0008 | Corrente fase A (A) |
| 0x000A | Corrente fase B (A) |
| 0x000C | Corrente fase C (A) |
| 0x0010 | Potência ativa fase A (kWh) |
| 0x0012 | Potência ativa fase B (kWh) |
| 0x0014 | Potência ativa fase C (kWh) |
| 0x0016 | Potência ativa total (kWh) |
| 0x0018 | Potência reativa fase A (VAr) |
| 0x001A | Potência reativa fase B (VAr) |
| 0x001C | Potência reativa fase C (VAr) |
| 0x001E | Potência reativa total (VAr) |
| 0x002A | Fator de potência fase A |
| 0x002C | Fator de potência fase B |
| 0x002E | Fator de potência fase C |
| 0x0036 | Frequência da rede (Hz) |
| 0x0100 | Potência elétrica ativa total (kwh) |
| 0x0400 | Potência elétrica reativa total (VAr) |

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Para o sistema de monitoramento, como os requisitos definem a conexão com a internet como mandatória, um microcontrolador com essa funcionalidade se fez necessário. Com relação ao microcontrolador utilizado, a placa de desenvolvimento ESP-32, com o microcontrolador WROOM-32D (ESPRESSIF, 2023), foi selecionada a fim de evitar a utilização de um módulo externo Wi-fi, já que a mesma já possui um integrado.

Para comunicação entre o microcontrolador e o wattímetro, o módulo físico do protocolo de comunicação Modbus MAX RS-485 foi utilizado. Esse módulo é conhecido por ser um transceptor de baixa potência para comunicação RS-485 (MAXIM INTEGRATED, 2014). Os pinos do módulo podem ser observados conforme Figura 16.

Figura 16 – Módulo MAX485



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

O Quadro 4 contém o mapeamento dos pinos do módulo no sistema de aquisição. Assim, é possível visualizar os pinos conectados ao medidor de energia, A e B, responsáveis pela transferência de dados e pinos RO, RE, DE e DI, conectados ao ESP32, responsáveis pelo envio dos dados.

Quadro 4 – Mapeamento de pinos do módulo MAX RS-485

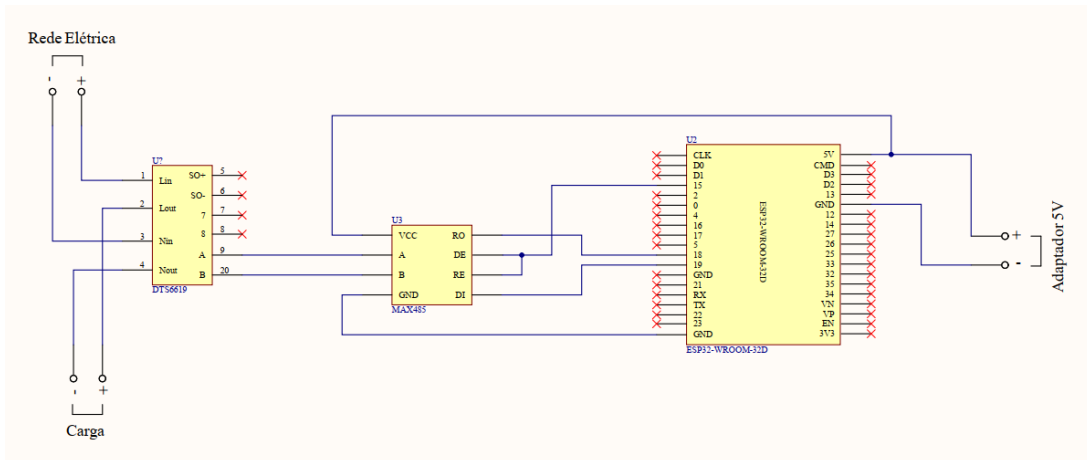
| Nome | Descrição | Conexão |
|------|----------------------------------|-------------------|
| RO | Saída do Receptor | 18 GPIO ESP32 |
| RE | Habilitador da saída do receptor | 15 GPIO ESP32 |
| DE | Habilitador da saída do driver | 15 GPIO ESP32 |
| DI | Entrada do Driver | 19 GPIO ESP32 |
| A | A Modbus, saída do driver | Wattímetro pino A |
| B | B Modbus, saída do driver | Wattímetro pino B |
| GND | GND | ESP32 GND |
| Vin | 5V | ESP32 5V |

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Nesse momento, com os pinos dos dispositivos já definidos, foi possível realizar os esquemáticos elétricos para o sistema de monitoramento monofásico e também trifásico. No caso do monofásico, Figura 17, tem-se a conexão do wattímetro com a rede elétrica alternada, seguido pela conexão do medidor com a carga. Aqui, é possível

visualizar a forma de medição não invasiva desse dispositivo.

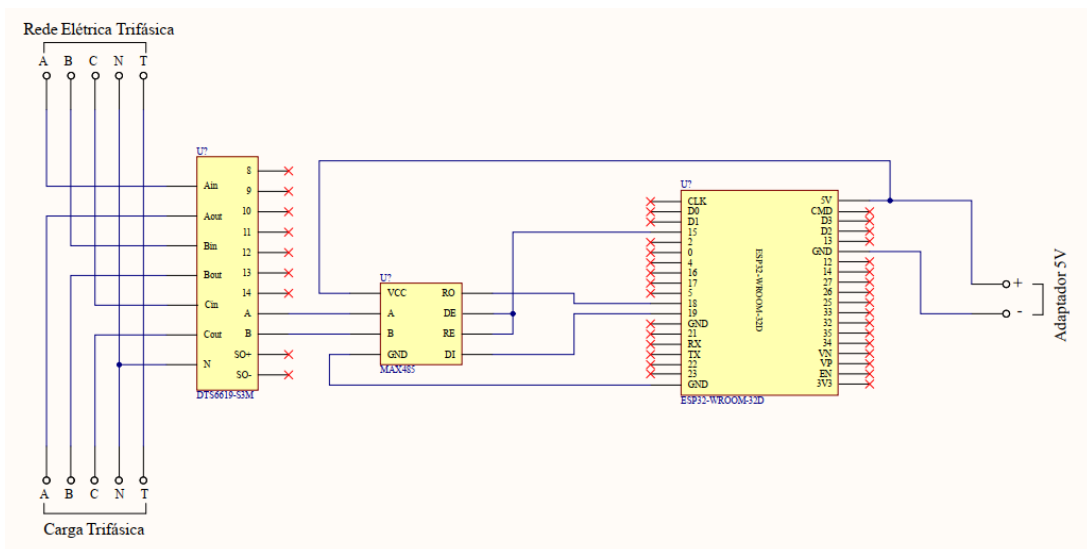
Figura 17 – Esquemático medidor monofásico



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Os pinos A e B do medidor são conectados aos respectivos A e B do módulo MAXRS-485, o que possibilita a comunicação através do Modbus. Para leitura de dados pelo microcontrolador, os pinos à direita do módulo RS485 são conectados ao microcontrolador, como já discutidos anteriormente.

Figura 18 – Esquemático medidor trifásico



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Na Figura 18 o diagrama elétrico do sistema trifásico é apresentado. Visto que, comparado com o modelo monofásico, a única diferença é o número de fases da rede elétrica e consequentemente o número de pinos do medidor, o esquemático do trifásico

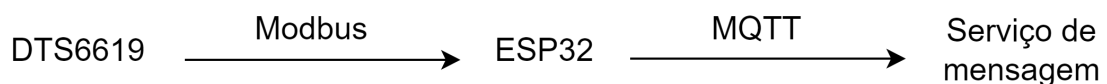
compreende a uma extensão e adaptação do monofásico. Ressalta-se que a tomada trifásica utilizada para a modelagem e futuramente para os testes é uma de cinco pinos, onde os mesmos correspondem a fase A, B, C, neutro e terra.

3.4 GERENCIAMENTO DO FLUXO DE DADOS

Para atender os requisitos especificados para o projeto, o sistema de monitoramento do consumo de energia deveria constar com um fluxo de dados com início na aquisição dos indicadores elétricos e término no painel de visualização do usuário. Assim, fez-se necessário a revisão dos requisitos para que as ferramentas utilizadas para o transporte das informações atingissem as diretrizes do projeto.

A princípio, como o **RF12** especifica uma transferência de dados realizada através da internet e o **RNF4** especifica a disponibilidade dos dados em um servidor, o protocolo escolhido para a troca de mensagens entre o microcontrolador e o servidor foi o Message Queuing Telemetry Transport (MQTT) (IBM, 2014). Assim, a organização dos protocolos do sistema fica conforme a Figura 19, onde via Modbus acontece a aquisição nos registradores dos medidores e com o uso do MQTT, a transferência dos dados.

Figura 19 – Protocolos de comunicação utilizados para aquisição



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

O serviço de mensagens MQTT, também chamado de broker, foi o ponto de acesso dos dados para as interfaces responsáveis pela visualização das métricas pelo usuário. As configurações foram realizadas em um contêiner em um computador conectado à rede sem-fio, eduroam, no laboratório. Nele, os dados ficaram disponíveis para serem ouvidos por outras aplicações.

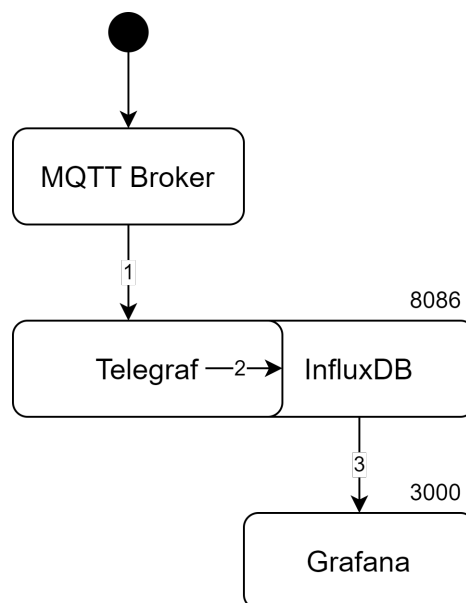
Para os dados poderem ser analisados posteriormente, o banco de dados InfluxDB (INFLUXDATA, 2013), também instalado em um contêiner, foi utilizado para esse gerenciamento. Na chegada de um novo dado em um tópico no broker, o mesmo é armazenado no InfluxDB, processo gerenciado pelo Telegraf, um agente de monitoramento individual com capacidade de monitorar diversas métricas e redirecionar dados entre elas. Aqui, o agente Telegraf é responsável por escutar dos tópicos MQTT onde ocorre a publicação dos dados e redirecionar para o banco de dados, seu arquivo de configuração apresenta-se no Apêndice B.

A interface Grafana foi escolhida para exibir os dados, já que possui compatibilidade com o banco de dados InfluxDB e relativa fácil manutenção. A partir do

momento em que uma fonte de dados é adicionada ao Grafana e um dashboard criado, as alterações só podem ser feitas se houver mudanças no tópico MQTT.

Assim como o InfluxDB e o broker MQTT, tanto o Grafana quanto o Telegraf estão instalados dentro de contêineres. Essa prática faz com que o sistema tenha alta portabilidade para outros computadores ou até mesmo sistemas operacionais. A arquitetura geral das ferramentas para o manejo dos dados pode ser vista com mais detalhes na Figura 20. A utilização dessas ferramentas de maneira conjunta é usualmente chamada de pilha TIG (Telegraf, InfluxDB e Grafana).

Figura 20 – Arquitetura TIG



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Com relação aos tópicos MQTT nos quais o Telegraf se inscreve, cada variável recebeu um tópico individual. Cada tópico contém o nome do dispositivo, seu endereço, indicador medido e valor da variável.

A título de exemplo tem-se o tópico *DTS6619/69/PowerFactorB*. Nesse caso, é possível encontrar informações referentes ao fator de potência da fase B do ao medidor de energia trifásico DTS6619 de endereço 69.

3.5 DESENVOLVIMENTO DO SOFTWARE EMBARCADO

Para o desenvolvimento do software do microcontrolador, responsável pela coleta dos dados brutos e as respectivas transmissões pela rede, a plataforma Arduino IDE foi utilizada. O código-fonte foi escrito na linguagem C++ e utiliza das bibliotecas *ModbusMaster*, para comunicação com o módulo RS485, *Wifi*, para comunicação com a rede de internet e *PubSubClient* para troca de mensagens através do protocolo

MQTT.

Conforme a **RF5**, a modularização do sistema e sua futura expansão para a utilização de múltiplos medidores de energia deveria ser garantida. A fim de assegurar esse requisito funcional, o código foi estruturado de forma que existisse uma classe wattímetro, responsável por conter o endereço do dispositivo, o endereço das variáveis de acesso e atributos privados para cada um dos indicadores. A classe wattímetro para o caso do DTS6619 monofásico, pode ser vista no trecho de Código 1.

```

1 class Wattmeter {
2     public:
3         Wattmeter(int addr, int baudRate);
4         ModbusMaster beginCommunication(ModbusMaster _node);
5         int getData(ModbusMaster _node);
6         float conversionToFloat(uint16_t []);
7         void saveData(uint16_t watt_register_begin, float data);
8         void printDataSerialMonitor();
9         float getVoltage();
10        float getCurrent();
11        float getActivePower();
12        float getFrequency();
13        float getPowerFactor();
14        float getTotalActivePower();
15    private:
16        float _current;
17        float _voltage;
18        float _activePower;
19        float _frequency;
20        float _powerFactor;
21        float _totalActivePower;
22        uint16_t wattReg[6] = {0x0000, 0x00008, 0x0012, 0x002A,
23        0x0036, 0x0100};
24        int _address;
25        int _baudRate;
26 };

```

Listing 3.1 – Trecho de código classe wattímetro monofásico

O mesmo conceito de classe foi utilizado no software do sistema de aquisição trifásico. A principal diferença entre ambos é a quantidade de variáveis e seus respectivos endereços, já que o medidor de endereço 69 possui vinte indicadores de acesso. Com a utilização de classes, a instanciação de mais de um objeto do tipo wattímetro torna-se viável.

De maneira geral, a estrutura dos códigos de ambos os casos, contam com

três arquivos de código. O primeiro, *Wattmeter.h*, é referente a biblioteca retentora da classe responsável por realizar o manejo dos medidores. O segundo arquivo faz a definição formal das funções instanciadas nas classes, *Wattmeter.cpp* e o terceiro, é responsável pela conexão com a internet e a coleta de dados chamado de *main.cpp*.

No arquivo que contém a classe wattímetro, além das funções de acesso individuais para cada métrica, a classe contém uma função para coleta das métricas, conversão de parâmetros para tipo float e para atualização do valor das variáveis a cada nova leitura. Dentre elas, a principal função é a de coleta de dados, Código 3.2.

```

1   for(int i = 0; i < 6; i++){
2       uint8_t result;
3       uint16_t data[2];
4       float value;
5       result = _node.readInputRegisters(Wattmeter::wattReg[i], 2);
6       if (result == _node.ku8MBSuccess) {
7           data[0]=_node.getResponseBuffer(0);
8           data[1]=_node.getResponseBuffer(1);
9           value = conversionToFloat(data);
10          saveData(wattReg[i], value);
11      }else{
12          Serial.println("Cannot get data ");
13          return 0;
14      }

```

Listing 3.2 – Trecho de código leitura dos registradores dos medidores

Nessa função, ocorre o acesso aos endereços dos wattímetros através do protocolo Modbus. Segundo o próprio fabricante dos dispositivos de medição de energia, o dado presente em cada registrador é do tipo float 32 bit com 4-bytes de precisão única. Assim, uma variável *data* do tipo *uint16_t* de duas posições é utilizada para armazenar ambas partes do valor. Uma função adicional para conversão para float é utilizada e uma terceira para salvar os dados nos respectivos atributos da classe também é necessária sendo chamada na sequência.

No código da função principal do monofásico, Código 3.3, tem-se noção de como é feita a coleta de dados a cada ciclo no microcontrolador. A conexão com o broker sempre é verificada e caso não seja atendida, o código entra em looping até que a conexão com o servidor seja sucedida. Em seguida, a função para coleta de dados do objeto wattímetro instanciado fora no cabeçalho do código é chamada. Após a atualização das variáveis os dados são publicados em seus respectivos tópicos MQTT.

```

1   void loop()
2   {
3       if (!client.connected()) {

```

```

4     reconnect();
5 }
6     client.loop();
7     if(DDS6619.getData(node)){
8         DDS6619.printDataSerialMonitor();
9     }
10    client.publish("DDS6619/17/Voltage", String(DDS6619.getVoltage())
        .c_str());
11    client.publish("DDS6619/17/Current", String(DDS6619.getCurrent())
        .c_str());
12    client.publish("DDS6619/17/ActivePower", String(DDS6619.
        getActivePower()).c_str());
13    client.publish("DDS6619/17/Frequency", String(DDS6619.
        getFrequency()).c_str());
14    client.publish("DDS6619/17/PowerFactor", String(DDS6619.
        getPowerFactor()).c_str());
15    client.publish("DDS6619/17/TotalActivePower", String(DDS6619.
        getTotalActivePower()).c_str());

```

Listing 3.3 – Trecho de código da função principal

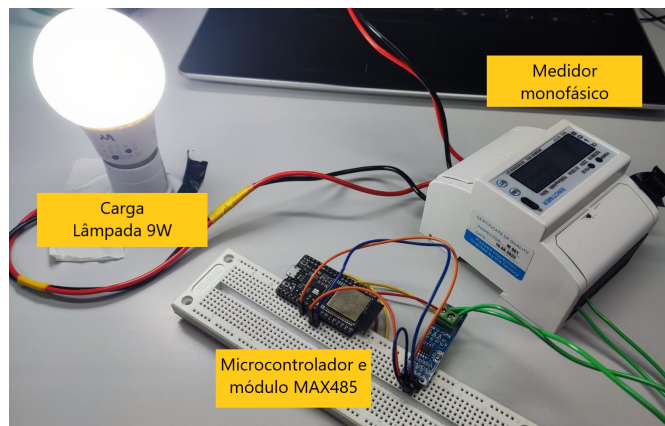
Visto que existe um retorno 0 para quando a atualização dos dados é impossibilitada, o usuário consegue distinguir quando a comunicação Modbus não se encontra em um estado operacional ideal. Já em relação às adversidades que podem ser causadas pelo protocolo de comunicação MQTT, o mais comum é a falta de conexão do microcontrolador com o servidor. Nesse caso o reporte é feito na saída terminal do ESP32.

3.6 CENÁRIOS

Para garantir uma implementação segura e gradual para sistemas monofásicos e trifásicos, três estudos de casos foram planejados. Primeiramente, com carácter de teste e para familiarização com o equipamento, uma lâmpada foi utilizada como carga e conectada ao wattímetro monofásico. Assim, os ajustes e testes de software para a aquisição dos indicadores poderiam ser realizados com maior praticidade, já que os componentes estariam próximos entre si e na mesma bancada. Na Figura 21, a organização da bancada e organização dos componentes durante os teste pode ser vista. Uma lâmpada LED de 9W foi utilizada para os testes de carga.

Em seguida, de maneira a executar testes com cargas reais e com um maior tempo de coleta de dados, o medidor monofásico foi conectada as duas régua principais de fornecimento de energia da bancada de testes. Destaca-se que nas régua de energia utilizadas, são conectados diariamente fontes de tensão, computadores,

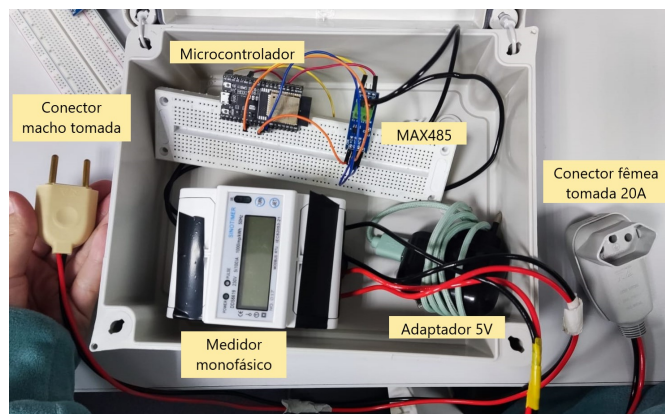
Figura 21 – Configuração para coleta monofásica com carga de 9W



Fonte: Autor (2023)

estações de solda e até mesmo impressoras 3D, categorizando um grupo de cargas com curvas de comportamento diversos, satisfatórios para os testes do sistema. Na Figura 22 vê a configuração interna da caixa com o sistema utilizado para esse cenário.

Figura 22 – Configuração para coleta monofásica



Fonte: Autor (2023)

Para esse estudo de caso, o tempo de coleta dos dados foi de 17 dias corridos. Nota-se também, que os conectores foram escolhidos para serem compatíveis com a régua elétrica, fêmea 20A, e com a configuração da tomada do laboratório. A caixa da aquisição foi posicionada em um lugar reservado e sem perturbações durante todo o tempo das medições, no mesmo ambiente físico que o servidor.

No terceiro e último cenário, um torno mecânico, do fabricante Timemaster modelo CDL350B (Figura 23), foi utilizado para os testes do sistema trifásico e as respectivas conexões com a rede. O estudo de caso três é particular e aprofunda a validação do sistema por apresentar uma distância física entre o equipamento instrumentado e o servidor que realiza a recepção dos dados.

Figura 23 – Torno CDL350B



Fonte: Autor (2023)

A caixa utilizada para aquisição dos dados é similar à do estudo de caso monofásico. A principal diferença está no wattímetro, agora trifásico, e nos conectores, especiais para a tomada de cinco pinos trifásicas dedicada ao torno. O wattímetro com os conectores de cinco pinos especiais para tomadas de 32A pode ser visto na Figura 24.

Figura 24 – Medidor de energia trifásico e conectores de cinco pinos

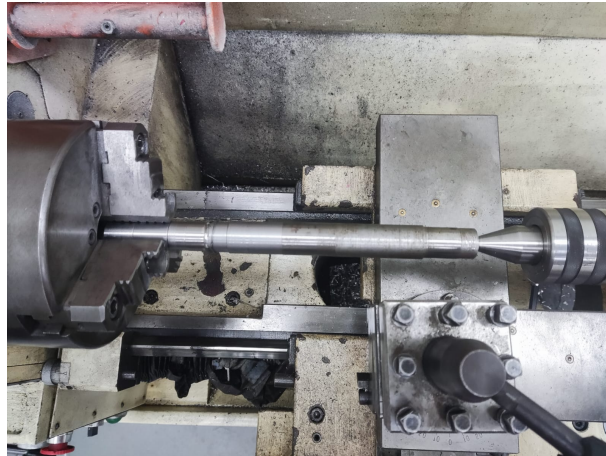


Fonte: Autor (2023)

Para realizar uma coleta de dados que fosse relevante para um rastreamento superficial do comportamento da máquina, algumas velocidades de rotação para o

torno foram escolhidas. No início do ensaio, o torno teve suas velocidades de rotação alteradas a vazio, com um tempo de operação similar para cada uma. As rotações utilizadas foram de 70, 755 e 2000 rotações por minuto (rpm). Quando concluídas as medições, um protótipo foi adicionado ao torno, para que um processo de torneamento com velocidade de rotação de 70 rpm fosse simulado, Figura 25.

Figura 25 – Torno CDL350B em operação com carga



Fonte: Autor (2023)

Além do teste de carga com velocidade de 70 rpm, simulações de freio foram realizadas, onde ao girar a vazio, uma força era aplicada para desacelerar o torno. Essa abordagem foi escolhida para que mudança na potência do rotor pudessem ser identificadas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesse capítulo, os resultados obtidos durante a implementação do sistema de monitoramento monofásico e trifásico serão discorridos. Inicialmente os cenários utilizados para a validação dos sistemas serão apresentados, seguidos pelos respectivos dados coletados. Seguidamente, as discussões referentes aos ensaios de cada estudo de caso serão realizadas. Por último, é realizado uma análise referente as limitações dos sistemas e ao comprimento dos requisitos do projeto.

4.1 ESTUDO DE CASO 1

Para o estudo de caso em que a lâmpada de 9W foi utilizada como carga, teve-se como principal resultado a estruturação de um código-fonte com a capacidade de ler os registradores do equipamento de medição. O cenário 1, por contar com uma carga de baixíssima potência e conseqüentemente consumo, não pode ser utilizado para a avaliação ou verificação de todas as variáveis disponíveis no wattímetro, já que algumas potências, medidas em kWh resultavam em zero.

Durante os testes do da primeira bancada o valor obtido para o fator de potência era de 1.02, resultado incoerente já que os valores possíveis para fatores de potência estão entre zero e um. Dessa forma, por tratar-se de uma carga de baixa potência, deu-se seqüência para o estudo de caso 2, para que as leituras dos indicadores também fossem validados.

4.2 ESTUDO DE CASO 2

Como descrito na seção referente aos cenários, o estudo de caso número dois tratava-se da implementação do sistema de monitoramento monofásico nas régua de energia da bancada do laboratório. No total, dados foram adquiridos por 17 dias consecutivos, como é possível visualizar na Figura 26.

A visualização da coletânea dos dados é da interface do Grafana, com os dados salvos no banco de dados InfluxDB, como já discutido. No dashboard apresentado, na primeira coluna, é possível observar os dados referentes a frequência da rede elétrica, seguidos pelos da tensão elétrica e potência ativa total consumida pelo sistema. A corrente, potência ativa e o fator de potência ao longo do tempo podem ser vistos na coluna da direita, sequencialmente.

Para analisar dados referentes a dias úteis na utilização do laboratório, sem feriados e finais de semanas, uma amostra de quatro dias foi selecionada para análise.

Figura 26 – Coleta de dados ao longo de 17 dias



Fonte: Autor (2023)

Na Figura 27, encontram-se os dados da corrente, potência ativa e fator de potência dos dias 5 a 8 de junho de 2023.

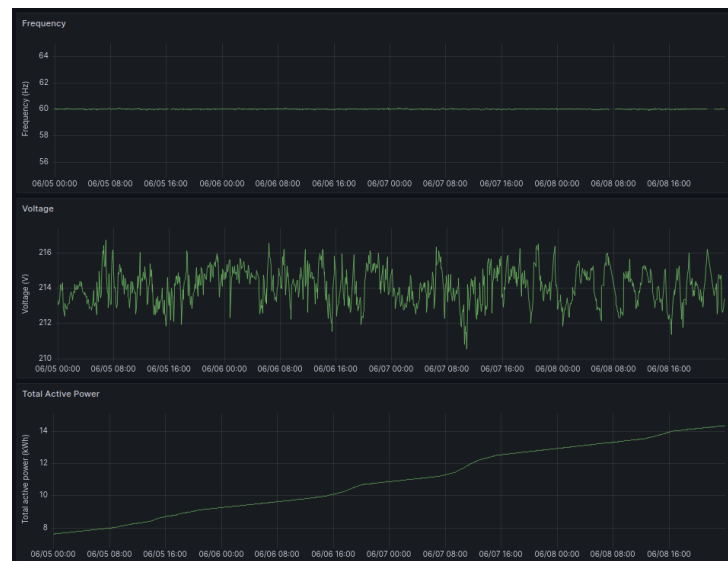
Figura 27 – Corrente, Potência ativa e Fator de potência quatro dias



Fonte: Autor (2023)

Já os dados que possuem a frequência da rede elétrica, tensão e a potência ativa total, são vistos na Figura 28.

Figura 28 – Frequência, Tensão e Potência Ativa total quatro dias



Fonte: Autor (2023)

4.3 ESTUDO DE CASO 3

O terceiro estudo de caso, referente a aquisição de dados de equipamentos trifásicos, teve como resultados iniciais os dados presentes na Figura 29. Visto que o sistema trifásico conta com um painel de visualização com vinte indicadores, para um primeiro resultado apenas os dados referentes a fase A foram selecionados.

Figura 29 – Dados ensaios trifásicos referentes a fase A



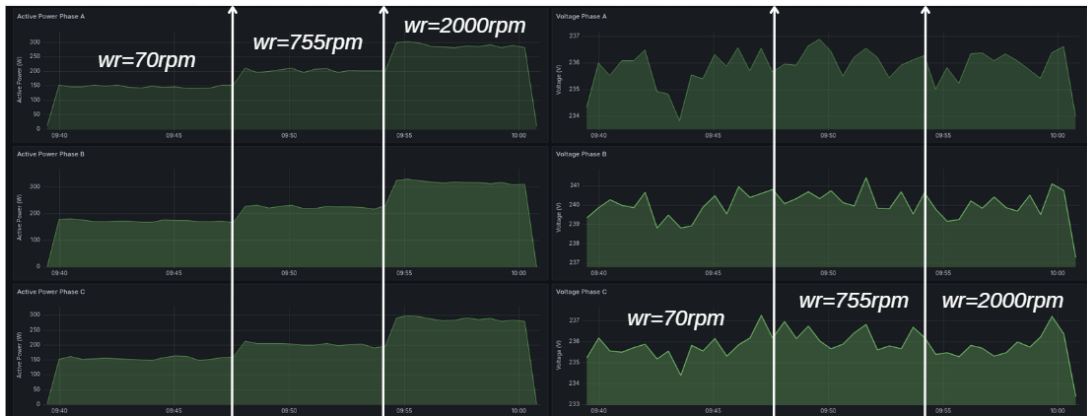
Fonte: Autor (2023)

Na primeira linha da Figura 29, o histórico da potência ativa e reativa são mostrados, seguidos pela tensão e fator de potência da rede elétrica. Por último, o gráfico do perfil da corrente na fase A ao longo dos ensaios é exibido.

O processo de preparo do sistema e aquisição de dados teve aproximadamente duas horas, como demonstra os tempos da coleta dos dados no eixo x. Contudo, com a

observação do histórico total a correlação dos dados obtidos com o comportamento da máquina, e.g velocidade de rotação, torna-se nebuloso. A fim de promover um melhor entendimento dos ciclos de operação, uma abordagem parcial da visualização dos dados será realizada.

Figura 30 – Potência ativa e Tensão diante variações de rotação



Fonte: Autor (2023)

Dessa forma, o primeiro período de análise escolhido foram os vinte minutos entre as nove e quarenta e dez horas da manhã. Durante esse intervalo ocorreram as trocas na velocidade de rotação do torno, as quais são claramente visíveis pelos degraus gerados no gráfico de potência ativa das fases A, B e C, na primeira coluna da Figura 30.

Figura 31 – Fator de potência das fases diante variações de rotação



Fonte: Autor (2023)

Nessa configuração, a operação do torno era a vazio e cada degrau corresponde a velocidades de 70, 755 e 2000 rpm, respectivamente. Outro parâmetro

adquirido foi o fator de potência de cada fase elétrica para as diferentes rotações do torno, Figura 31.

Uma métrica adicional que não estava presente na lista de variáveis do medidor monofásico é a potência reativa medida ao longo dos processos, Figura 32 primeira coluna. Nota-se que a mesma permanece constante para as três fases e durante as trocas de velocidade de operação da máquina. Já na coluna da direita, os dados referentes a corrente necessária pelo torno durante os processos são mostrados.

Figura 32 – Potência Reativa e Corrente diante variações de rotação



Fonte: Autor (2023)

Aqui já é possível perceber que a corrente utilizada pela carga é diretamente proporcional ao aumento de esforço/trabalho realizado pelo motor do torno, já que a corrente aumenta conforme ocorre o aumento da velocidade de rotação da máquina.

Figura 33 – Fase A com carga



Fonte: Autor (2023)

Por fim, na Figura 33 os dados referentes aos ensaios parciais com um objeto no

torno e as tentativas de desacelerar a máquina são apresentados. Novamente apenas os resultados da fase A são mostrados, já que para as outras fases os resultados são similares. Aqui vê-se os picos de corrente durante o processo de torneamento e de tentativa de aumento de potência consumida no gráfico presente na última linha.

4.4 DISCUSSÕES

A partir dos resultados obtidos nos três cenários analisados, algumas observações acerca do comportamento de ambos os sistemas de medição foram efetuadas. A começar por inconsistências encontradas nos dados fornecidos pelo manual do medidor monofásico e dos dados visualizados no mostrador desse wattímetro, fato observado durante o primeiro estudo de caso.

No documento técnico do wattímetro monofásico DTS6619 de endereço 17, seis variáveis com seus respectivos endereços de acesso são descritas, já discutidas com auxílio do Quadro 2. Contudo, ao ligar o medidor e fazer o acompanhamento das medições pelo tela digital do mesmo, duas novas variáveis foram observadas. Ambas são medidas em KVAR e acredita-se que sejam valores da potência reativa parcial e total circulantes no sistema.

Já em relação ao sistema trifásico, apesar dos dados se mostrarem constantes, muitos problemas de conexão foram reportados. Durante a primeira tentativa de aquisição dos dados, o microcontrolador se recusava a manter uma conexão estável com a rede da universidade enquanto o torno era ligado, impossibilitando diretamente a transferência dos dados via MQTT. Esse episódio foi atribuído a interferência eletromagnética causada na antena Wi-fi do ESP32 pelo campo produzido pelo motor do torno.

Assim, para diminuir os efeitos sobre a conexão, os fios A e B da comunicação Modbus foram estendidos e o ESP32 retirado de perto da máquina e do wattímetro. Isso fez com a conexão com a rede e conseqüentemente com o broker MQTT se manteve estável e os dados fossem transferidos. Contudo, apesar da conexão estável a latência para o recebimento dos dados no servidor foi maior do que comparado com o sistema monofásico.

Outro ponto observado no sistema trifásico, foi o desbalanceio das fases com relação a alguns parâmetros que deveriam ser constante e similares em cada uma, como, por exemplo, a tensão medida, Figura 30. A isso, tem-se como justificativa o parque industrial onde a universidade está inserida. Processos industriais e máquinas de alta potência são utilizados diariamente, dessa forma, a poluição da rede elétrica por banco de capacitores mal projetados ou descuidos é extremamente provável.

4.5 LIMITAÇÕES

Nessa seção serão abordadas as limitações observadas durante a implementação e testes do projeto. Essas restrições são provenientes de limitações físicas e exceções presentes no software dos sistemas.

Com relação a ambos os sistemas, o requisito **RF7** não é satisfeito, já que ambos os sistemas não constam com uma fonte de alimentação secundária. Contudo, durante a realização da definição dos requisitos não foi considerado a fonte de 5 volts utilizada por ambos. A solução com a fonte é robusta e só seria um problema caso não houvesse uma fonte de energia monofásica próximo às instalações onde o sistema seria colocado. Contudo, até mesmo na falta de tomadas, a extensão dos cabos de Modbus poderiam ser realizadas a fim de levar parte do sistema de aquisição, e.g microcontrolador e módulo RS485 para uma zona com acesso à energia.

Outra limitação do sistema monofásico e trifásico é a falta de um armazenamento intermediário, caso a conexão com a internet seja perdida no meio de algum processo, **RF7**. Na configuração atual do sistema, os dados adquiridos dos medidores seriam perdidos durante as tentativas de envio do microcontrolador para o servidor de mensagens MQTT.

Em relação ao sistema trifásico, há casos em que o objeto de estudo não se encontra no mesmo ambiente físico do servidor, a latência dos dados deve ser vista como uma limitação do sistema atual. Os ensaios realizados com o torno tiveram carácter educacional, com o maquinário ligado por até cinco minutos na mesma velocidade de rotação. Contudo, em situações cotidianas de uso, o torno é uma máquina de rápida utilização, com a latência de até meio segundo alta demais para uma aquisição de dados complexa e altamente variável.

5 CONCLUSÕES

Esse trabalho deve como objetivo o desenvolvimento de um sistema de monitoramento do consumo de energia elétrica focado na aquisição e armazenamento dos dados de indicadores elétricos. Essas métricas são pré-requisitos para empresas que ainda não implementaram um SGE. Através dessa prática, pontos de alto consumo ou ineficiência elétrica de processos podem ser identificados e passível de mitigação. Essa prática também é necessária para a adoção dos conceitos de Indústria 4.0, onde o monitoramentos de variáveis de interesse é fundamental.

Dessa forma, dois sistemas de aquisição de dados foram projetados e implementados, um com o auxílio de um medidor de energia monofásico e outro trifásico. Esses medidores disponibilizam de alguns indicadores de relevância teórica e prática. Adicionalmente, eles podem ser utilizados para validação cruzada de indicadores, como a corrente e a tensão, para a verificação da potência.

Os sistemas implementados seguem uma abordagem não invasiva, o que os torna adaptáveis entre máquinas de arquitetura monofásica e arquitetura trifásica. No caso do monitoramento de um equipamento diferente, é necessário a escolha do conector adequado ao equipamento a ser monitorado.

Três cenários de implementação foram propostos, a fim de validar os sistemas em diferentes situações. Nos estudos de casos, percebeu-se que quando o sistema de aquisição e o servidor apresentavam-se no mesmo ambiente físico, a latência dos dados era muito menor comparada quando ambos encontravam-se em ambientes separados.

Com relação aos trabalhos futuros que poderão ser realizados a partir do estado atual dos sistemas aqui desenvolvidos tem-se: resolver as limitações observadas; utilizar baterias externas ao sistema e cartões de memória para o armazenamento de dados já aumentariam a segurança na transmissão dos dados do sistema e auxiliariam na diminuição da perda de pacotes; trocar a rede sem fio pela rede com cabos para minimizar a perda de pacotes e possibilitaria uma conexão mais estável por parte do microcontrolador a rede.

Ao expandir os conceitos aqui observados um estudo com relação à caracterização da máquina analisada com base em seus dados energético poderia ser realizado, como uma curva de previsão de consumo. Com relação a máquinas de usinagem, a eficiência energética com diferentes trajetórias de ferramentas poderiam ser comparadas.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Condições Gerais de Fornecimento de Energia Elétrica**: Resolução normativa nº 414. Brasília, 2010.

ALEXANDER, C. K.; SADIKU, M. N. **Fundamentos de circuitos elétricos**. [S.l.]: AMGH Editora, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 50001:2011 - Sistemas de gestão de energia**: Requisitos com orientações para uso. Rio de Janeiro, 2011.

CHAPMAN, S. J. **Fundamentos de máquinas elétricas**. [S.l.]: AMGH editora, 2013.

CONJO, A. H. **Proposta de uma ferramenta web para assistência a modelagem de requisitos não funcionais de software**. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Software) — Campus Quixáda, Universidade Federal do Ceará, 2022.

DAS N, C.; ZIM M, D.; SARKAR M, S. Electric energy meter system integrated with machine learning and conducted by artificial intelligence of things – aiot. In: **Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Eletronic Engineering (EIConRus)**. Rússia: [s.n.], 2021.

ESPRESSIF SYSTEMS. **ESP32-WROOM-32E ESP32-WROOM-32UE**: Datasheet. Xangai, 2023. Disponível em: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-wroom-32e_esp32-wroom-32ue_datasheet_en.pdf. Acesso em: 21 Maio 2023.

FINANCE, A. Industry 4.0 challenges and solutions for the digital transformation and use of exponential technologies. **Finance, audit tax consulting corporate: Zurich, Swiss**, p. 1–12, 2015.

ARAUJO FREITAS, A. de. **A INTERNET DAS COISAS E SEUS EFEITOS NA INDÚSTRIA 4.0**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Curso de Tecnologia em Sistemas de Computação) — Universidade Federal Fluminense, 2017.

FRONZA, M. V. C. **A inserção mundial na Indústria 4.0: o caso da indústria de semicondutores**. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Ciências Econômicas) — Centro Sócio-Econômico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2022.

FROZZA, J. et al. Metodologia de implantação de um sistema de gestão de energia utilizando abnt nbr iso 50001. In: **VIII Congresso Nacional de Excelência em Gestão**. [S.l.: s.n.], 2012. p. 1–28.

GAJOWNICEK, K.; ZABKOWSKI, T. Short term electricity forecasting using individual smart meter data. **18th International Conference on Knowledge-Based and Intelligent Information Engineering Systems - KES2014**, p. 589–597, 2014.

- GUYON, I. et al. Analysis of the opportunities of industry 4.0 in the aeronautical sector. In: **10th International Multi-Conference on Complexity, Informatics and Cybernetics: IMCIC 2019**. [S.l.: s.n.], 2019.
- INFLUXDATA. **InfluxDB guides**. California, EUA, 2013. Disponível em: <https://docs.influxdata.com/influxdb/v1.8/guides/>. Acesso em: 22 Junho 2023.
- INTERNATIONAL BUSINESS MACHINES CORPORATION. **MQTT V3.1 Protocol Specification**. Armonk, Nova York, EUA, 2014. Disponível em: <https://public.dhe.ibm.com/software/dw/webservices/ws-mqtt/mqtt-v3r1.html>. Acesso em: 22 Junho 2023.
- FRENZEL JR, L. E. **Eletrônica Moderna**. [S.l.]: McGraw Hill Brasil, 2015.
- MAXIM INTEGRATED. **MAX481/MAX483/MAX485/ MAX487–MAX491/MAX1487 Low-Power, Slew-Rate-Limited RS-485/RS-422 Transceivers**: Datasheet. California, 2014. Disponível em: <https://www.makerhero.com/img/files/download/MAX485-Datasheet.pdf>. Acesso em: 26 Maio 2023.
- MINISTERIO DE MINAS E ENERGIA. **Relatório Síntese 2022 - Ano base 2021**. Brasília, 2022. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-675/topico-631/BEN_S\C3\%ADntese_2022_PT.pdf. Acesso em: 25 Maio 2018.
- MODBUS-IDA. **MODBUS Over Serial Line Specification & Implementation Guide: V1. 02**. [S.l.]: Modbus Organization, 2006.
- MODBUS-IDA. V. 1.1 b. **Hopkinton, Massachusetts (www. modbus.org/docs/Modbus Application Protocol V1 1b. pdf)**, 2006.
- ORBEN, E. W. **Identificação e análise de conformidades para implementação de um sistema de gestão de energia: Estudo de caso**. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Energia) — Campus Araranguá, Universidade Federal de Santa Catarina, 2016.
- OSSORIO, S. A. S. **Indústria 4.0: adaptação de um modelo de maturidade**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado Interdisciplinar em Mobilidade) — Centro Tecnológico de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2021.
- RÜSSMANN, M. et al. Industry 4.0: The future of productivity and growth in manufacturing industries. **Boston consulting group**, Boston, MA, USA.; v. 9, n. 1, p. 54–89, 2015.
- SAIDEL, M. A.; FAVATO, L.; MORALES, C. Indicadores energéticos e ambientais: Ferramenta importante na gestão da energia elétrica. In: **Congresso Brasileiro De Eficiência Energética**. [S.l.: s.n.], 2005.
- SENS, M. Avanços tecnológicos nos motores elétricos. In: **Weg em Revista**. Jaraguá do Sul: WEG, 2001. p. 11–13.
- SISINNI, E. et al. Industrial internet of things: Challenges, opportunities, and directions. **IEEE transactions on industrial informatics**, IEEE, v. 14, n. 11, p. 4724–4734, 2018.

SYUFRIJAL, R. et al. Iot based smart energy meter using modbus protocol as electricity saving effort. **Conference on Broad Exposure to Science and Technology 2021**, v. 210, p. 184–188, 2021.

THOMAS, G. Introduction to modbus serial and modbus tcp. **The extension: A technical Supplement to Control Network**, v. 9, n. 5, 2008.

THOMAS, G. Introduction to the modbus protocol. **The Extension**, v. 9, n. 4, p. 1–4, 2008.

APÊNDICE A - CÓDIGO FONTE GERAÇÃO DIAGRAMA AADL

```
1 package monophasesys
2 public
3
4 system AcquisitionSys
5 end AcquisitionSys;
6
7 system implementation AcquisitionSys.with_device
8 subcomponents
9     this_wattmeter: device Wattmeter;
10    this_microcontroller: device Microcontroller;
11    this_mqtt: process MQTT;
12    this_rs485: device RS485;
13    this_telegraf: process Telegraf;
14    this_influxDB : memory InfluxDB;
15    this_grafana: device Grafana;
16 connections
17    modbus_A: port this_wattmeter.A -> this_rs485.A;
18    modbus_B: port this_wattmeter.B -> this_rs485.B;
19    uc_18: port this_rs485.R0 -> this_microcontroller.PIN_18;
20    uc_15: port this_rs485.REE -> this_microcontroller.PIN_15;
21    uc_19: port this_rs485.DI -> this_microcontroller.PIN_19;
22    vcc: port this_microcontroller.VCC -> this_rs485.VCC;
23    gnd: port this_microcontroller.GND -> this_rs485.GND;
24    mqtt: port this_microcontroller.MQTT -> this_mqtt.data_in;
25    mqtt2: port this_mqtt.data_out -> this_telegraf.data_in;
26    memor: port this_telegraf.data_out -> this_influxDB.data_in;
27    grafana: port this_influxDB.data_out -> this_grafana.graf_in;
28
29 end AcquisitionSys.with_device;
30
31 device Wattmeter
32 features
33     A : out event port;
34     B : out event port;
35 end Wattmeter;
36
37 device implementation Wattmeter.impl
```

```
38 end Wattmeter.impl;
39
40 device Microcontroller
41 features
42     PIN_18 : in event port;
43     PIN_15 : in event port;
44     PIN_19 : in event port;
45     VCC : out event port;
46     GND : out event port;
47     MQTT : out event port;
48 end Microcontroller;
49
50 device implementation Microcontroller.impl
51 end Microcontroller.impl;
52
53 device RS485
54 features
55     A : in event port;
56     B : in event port;
57     DI : out event port;
58     DE : out event port;
59     REE : out event port;
60     RO : out event port;
61     VCC : in event port;
62     GND : in event port;
63 end RS485;
64
65 device implementation RS485.impl
66 end RS485.impl;
67
68 device Grafana
69     features
70         graf_in : in event port;
71 end Grafana;
72
73 device implementation Grafana.impl
74 end Grafana.impl;
75
76 process MQTT
77     features
78         data_in : in event port;
```

```
79             data_out : out event port;
80 end MQTT;
81
82 process implementation MQTT.with_threads
83 end MQTT.with_threads;
84
85 memory InfluxDB
86     features
87         data_in : in event port;
88         data_out : out event port;
89 end InfluxDB;
90
91 memory implementation InfluxDB.with_threads
92 end InfluxDB.with_threads;
93
94 process Telegraf
95     features
96         data_in : in event port;
97         data_out : out event port;
98 end Telegraf;
99
100 process implementation Telegraf.with_threads
101 end Telegraf.with_threads;
102
103
104 end monophasesys;
```

ARQUIVO DE CONFIGURAÇÃO - TELEGRAF

```
1 [[outputs.influxdb]]
2   urls = ["http://influxdb:8086"]
3   database = "telegraf"
4   username = "admin"
5   password = "admin"
6
7 [[outputs.file]]
8   files = ["stdout", "/tmp/metrics.out"]
9
10 [[inputs.mqtt_consumer]]
11   servers = ["tcp://200.135.86.217:1883"]
12   qos = 2
13   connection_timeout = "60s"
14   topics = [
15     "lab/lse",
16     "esp32/TEST",
17     "DDS6619/17/Voltage",
18     "DDS6619/17/Current",
19     "DDS6619/17/ActivePower",
20     "DDS6619/17/Frequency",
21     "DDS6619/17/PowerFactor",
22     "DDS6619/17/TotalActivePower",
23     "DTS6619/69/VoltageA",
24     "DTS6619/69/VoltageB",
25     "DTS6619/69/VoltageC",
26     "DTS6619/69/CurrentA",
27     "DTS6619/69/CurrentB",
28     "DTS6619/69/CurrentC",
29     "DTS6619/69/ActivePowerA",
30     "DTS6619/69/ActivePowerB",
31     "DTS6619/69/ActivePowerC",
32     "DTS6619/69/TotalActivePower",
33     "DTS6619/69/ReactivePowerA",
34     "DTS6619/69/ReactivePowerB",
35     "DTS6619/69/ReactivePowerC",
36     "DTS6619/69/TotalReactivePower",
37     "DTS6619/69/PowerFactorA",
```

```
38     "DTS6619/69/PowerFactorB" ,  
39     "DTS6619/69/PowerFactorC" ,  
40     "DTS6619/69/Frequency" ,  
41     "DTS6619/69/TotalActiveElectricityPower" ,  
42     "DTS6619/69/TotalReactiveElectricityPower"  
43 ]  
44 data_format = "value"  
45 data_type = "float"
```

Listing 1 – Arquivo de configuração agente Telegraf