



INSTITUTO FEDERAL DE RONDÔNIA
ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

Sistema IoT para monitoramento de corrente elétrica

Márcio Guedes Caminha

Porto Velho

2023

Márcio Guedes Caminha

Sistema IoT para monitoramento de corrente elétrica

Monografia apresentado ao curso de Engenharia de Controle e Automação do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Rondônia, para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Controle e Automação.

Orientador: Prof. Me. Rafael Pissinati de Souza

Porto Velho

2023

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema Gerador de Ficha Catalográfica do IFRO,
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

Caminha, Márcio Guedes.
Sistema IoT para monitoramento de corrente elétrica / Márcio
Guedes Caminha, Porto Velho-RO, 2023.
44 f. : il.

Orientador(a): Prof. Me. Rafael Pissinati de Souza.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de
Controle e Automação) – Instituto Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia de Rondônia - IFRO, Porto Velho-RO, 2023.

1. Monitoramento. 2. Corrente elétrica. 3. Internet das coisas. I.
Souza, Rafael Pissinati de (orient.). II. Instituto Federal de Educação,
Ciência e Tecnologia de Rondônia - IFRO. III. Título.

Bibliotecário(a) Responsável: Evandro Silva de Sousa, CRB-11-956 (Campus Porto Velho Calama)

Lista de figuras

Figura 1 - Diagrama de blocos do sistema de monitoramento.....	11
Figura 2 - Processo de evolução da IoT entre 1990 e 2020.....	12
Figura 3 - Arquitetura do MQTT.....	17
Figura 4 - Controlador ESP32.....	22
Figura 5 - Sensor de corrente SCT-013.....	23
Figura 6 - Circuito eletrônico para funcionamento do sistema.....	25
Figura 7 - Circuito interface e microcontrolador ESP32 soldados na placa.....	26
Figura 8 - Placa de circuito posicionada e colada dentro da caixa.....	26
Figura 9 - Compartimento do circuito com tampa e sensor SCT-013 não invasivo.....	26
Figura 10 - Posicionamento do sensor SCT-013 no cabo de fase.....	27
Figura 11 - Interface para monitoramento da corrente no aplicativo Blynky.....	27
Figura 12 - Bibliotecas para leitura do sensor SCT-013 e comunicação com nuvem Blynk	28
Figura 13 - Token de autorização utilizado para a aplicação.....	28
Figura 14 - Rede Wi-Fi privada de residência considerada no código.....	28
Figura 15 - Fator de calibração do sensor.....	29
Figura 16 - Inicializando os valores de leitura em millis.....	29
Figura 17 - Função para calcular os valores do sensor e exibir no monitor serial.....	29
Figura 18 - Função para enviar dados ao Blynk via pino virtual.....	29
Figura 19 - Configuração do sistema no microcontrolador para comunicação de dados	30
Figura 20 – Plaqueta do condicionador de ar utilizado para os testes.....	30
Figura 21 - Condensadora e sistema de monitoramento conectado ao cabo de fase... ..	31
Figura 22 - Sensor SCT-013 instalado em condutor junto a alicate amperímetro.....	31
Figura 23 - Comparação da leitura do alicate amperímetro e sensor SCT-013.....	32
Figura 24 - Testes realizados para encontrar o fator de calibração adequado.....	33
Figura 25 - Comparação do alicate amperímetro e sensor SCT-013 após calibração.. ..	33
Figura 26 - Monitoramento da corrente do condicionador de ar durante 15 minutos... ..	34

Figura 27 - Nova interface do sistema com a implementação da potência e consumo do equipamento.....	35
Figura 28 - Medição da tensão com um multímetro diretamente no circuito do equipamento.....	36
Figura 29 - Medição da tensão diretamente no disjuntor de alimentação do barramento geral.....	36
Figura 30 - Função para realizar o cálculo do consumo do equipamento.....	37
Figura 31 - Inicialização da leitura de corrente com novos dados de potência e consumo.....	37
Figura 32 - Monitoramento da corrente durante 15 minutos com sensor SCT-013 e alicate amperímetro.....	38
Figura 33 - Monitoramento da corrente durante 45 minutos com sensor SCT-013 e alicate amperímetro.....	39

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Comparação de leituras do sensor SCT-013 e alicate amperímetro.....	34
Tabela 2 - Comparativo de potência entre teórica, real e por monitoramento.....	38
Tabela 3 – Comparativo da potência teórica, real e por monitoramento após 15 minutos.....	38
Tabela 4 – Comparativo da potência teórica, real e por monitoramento após 45 minutos.....	39
Tabela 5 - Comparativo de consumo no minuto 15.....	40
Tabela 6 - Comparativo de consumo no minuto 45.....	40

Sumário

1 INTRODUÇÃO	9
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	10
2.1 MONITORAMENTO DE EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS INDUSTRIAIS UTILIZANDO IOT.....	10
2.2 INTERNET OF THINGS (IOT).....	11
2.3 MONITORAMENTO DE CORRENTE ELÉTRICA.....	13
2.4 REMAINDER USEFUL LIFE.....	14
2.5 MANUTENÇÃO PREDITIVA.....	15
2.6 PROTOCOLO IOT.....	17
2.6.1. MQTT (Message Queuing Telemetry Transport).....	17
2.6.2. CoAP (Constrained Application Protocol).....	18
2.6.3. HTTP/HTTPS.....	18
2.6.4. Wi-Fi.....	19
2.6.5. Bluetooth e Bluetooth Low Energy (BLE).....	20
2.6.6. LoRaWAN (Long Range Wide Area Network).....	20
2.6.7. Zigbee	21
3 PROCEDIMENTOS DO PROJETO.....	21
3.1 SISTEMA DE MONITORAMENTO.....	21
3.2 CÁLCULO DO RESISTOR DE CARGA.....	23
3.3 FUNCIONAMENTO DO SISTEMA.....	25
3.4 RESULTADOS ALCANÇADOS	30
3.5 VERSÃO FINAL DO SISTEMA.....	34
4 CONSIDERAÇÕES FINAIS	42
5 TRABALHOS FUTUROS.....	43
REFERÊNCIAS.....	44

RESUMO

Equipamentos elétricos podem sofrer com correntes elevadas em situações em que os equipamentos estejam operando acima da sua capacidade ou quando não se tem algum tipo de manutenção. Em alguns casos, esses equipamentos podem vir a sofrer alguma falha. O objetivo desse trabalho consiste em desenvolver um case de medição e monitoramento de corrente elétrica de um condicionador de ar de 30000BTUs, contando com implemento de um protocolo de comunicação IoT (Internet of Things) para realizar o compartilhamento de dados em nuvem e monitoramento por aplicativo para celular. Os procedimentos metodológicos foram embasados em pesquisas bibliográficas de projetos anteriores, analisados de forma qualitativamente. Ao final desse projeto, foram realizadas medidas reais em um condicionador de ar, as quais foram comparadas com um alicate amperímetro. Por fim, o projeto atendeu as expectativas, cumpriu os objetivos e pôde minimizar os impactos citados acima, através de uma análise em tempo real dos equipamentos.

Palavras chaves: Equipamentos elétricos; corrente elétrica; falha; monitoramento; Internet of Things;

1 INTRODUÇÃO

A IoT permite que os dados de corrente elétrica sejam acessados remotamente, o que é especialmente valioso em ambientes industriais e empresariais. Engenheiros e gerentes podem monitorar o desempenho elétrico de equipamentos e sistemas em tempo real, mesmo à distância, facilitando a tomada de decisões informadas e rápidas. Isso resulta em uma manutenção mais eficiente, minimizando tempos de parada e otimizando a produtividade.

O termo monitoramento significa que as informações são coletadas durante toda a operação e que a análise dessas informações contribui para que os usuários interessados acompanhem os resultados alcançados e verifiquem a necessidade de ajustes nas ações para que os objetivos da operação sejam alcançados (FABRÍCIO, 2018, p. 14).

De acordo com Han (2003, apud FABRÍCIO, 2018, p. 14), “o monitoramento de condições operacionais de equipamentos industriais tem por objetivos o acompanhamento do processo de produção, a avaliação da “saúde” do equipamento frente as suas especificações técnicas nominais e às condições ótimas de carregamento, e a detecção precoce de processos de deterioração física que causem desvios funcionais ou avaria grave”.

Com a digitalização e interconexão de dispositivos, a IoT revoluciona a maneira como é coletado, transmitido e processado as informações. O monitoramento de corrente elétrica, por sua vez, desempenha um papel crucial na avaliação de sistemas elétricos, desde aplicações industriais até residenciais. Este projeto visa não apenas demonstrar a viabilidade técnica do sistema proposto, mas também explorar seu potencial impacto na eficiência energética, detecção de falhas e manutenção preditiva.

No decorrer deste trabalho, serão explorados aspectos como o projeto da arquitetura do sistema, a seleção de sensores de corrente, a implementação de comunicação sem fio para coleta de dados e a análise das informações obtidas. Além disso, será discutido o desenvolvimento do software necessário para visualização e análise dos dados em tempo real. A importância do monitoramento de corrente elétrica em diversos cenários será contextualizada, demonstrando como a IoT pode potencializar a eficácia e a confiabilidade desse processo, principalmente na manutenção preditiva.

Por meio dessa pesquisa, espera-se entregar uma solução IoT para monitorar corrente elétrica, potência e consumo de um condicionador de ar, visando a manutenção preventiva desse equipamento, possibilitando verificar uma falha no seu princípio e tomar decisão baseado em dados.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

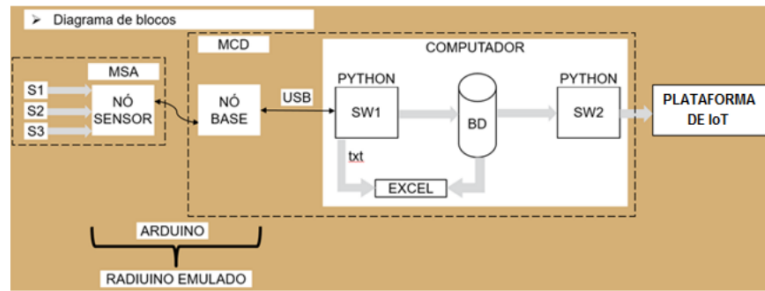
Nessa seção será abordado os autores que já trabalharam com esse tipo de sistema e apresentará conceitos fundamentais, de forma a dar embasamento a toda pesquisa para elaboração do projeto.

2.1 MONITORAMENTO DE EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS INDUSTRIAIS UTILIZANDO IOT

Fabrício (2018) desenvolveu um sistema que realiza a medição da corrente elétrica eficaz consumida pelos equipamentos monitorados, utilizando uma rede de sensores conectados a um módulo concentrador de dados, que por sua vez realiza o armazenamento intermediário, o tratamento preliminar dos dados e o posterior envio a uma plataforma de Internet da Coisas (Internet of Things - IoT). Os sensores utilizados para obter a leitura da corrente foram os sensores de corrente SCT-013, com capacidade de leituras de 0A a 100A, e um microcontrolador Arduino Uno com programação baseado em C/C++.

O sistema de medida de correntes trifásicas implementa as funções de um Módulo Sensor-Atuador (MSA) e a parte de recepção de dados de um Módulo Concentrador de Dados (MCD). Na sequência, os dados capturados são enviados, via comunicação USB, a um computador pessoal portátil, usado para implementar as funções de pré-processamento, armazenamento em banco de dados local e comunicação de dados via internet (FABRÍCIO, 2018, p. 41).

Figura 1: Diagrama de blocos do sistema de monitoramento.



Fonte: FABRÍCIO, 2018, p. 35.

Os aplicativos SW1 e SW2 mostrados na Figura 1 foram escritos em linguagem de programação Python versão 2.7.13 (KOEPEKE, 2011, apud FABRÍCIO, 2018) e destinam-se, respectivamente, a armazenar os dados coletados pelos sensores no banco de dados, e a enviá-los à plataforma de IoT. O funcionamento desses dois aplicativos ocorre de forma independente, porém, tendo como ponto de acesso comum o banco de dados local. A plataforma IoT utilizada para a aplicação foi a TAGO (FABRÍCIO, 2018, p. 41-42).

Os resultados obtidos foram consistentes e demonstram claramente que um sistema de monitoramento de condição (CM), tal como o que foi desenvolvido, provê a base para uma aplicação de gestão de operação e de manutenção de equipamentos industriais. Também confirmam a possibilidade de monitoramento da atividade de uma máquina através de aplicativos de IoT, que permitem o acesso às informações via internet, através de computadores remotos ou dispositivos móveis, aderente, portanto, ao contexto de Internet das Coisas (FABRÍCIO, 2018, p. 65).

2.2 INTERNET OF THINGS (IOT)

A IoT é uma revolucionária abordagem tecnológica que tem transformado a maneira como interagimos com o mundo digital e físico. Na essência, a IoT se refere a uma rede interconectada de dispositivos, objetos e sistemas que podem coletar, trocar e processar dados de maneira autônoma, graças à incorporação de sensores, atuadores e tecnologias de comunicação. Essa interconexão permite que objetos do cotidiano, desde eletrodomésticos e veículos até equipamentos industriais e infraestruturas urbanas, se tornem "inteligentes", ao poderem trocar informações e realizar ações em tempo real, com ou sem intervenção humana.

Para Fabrício (2018, p.21):

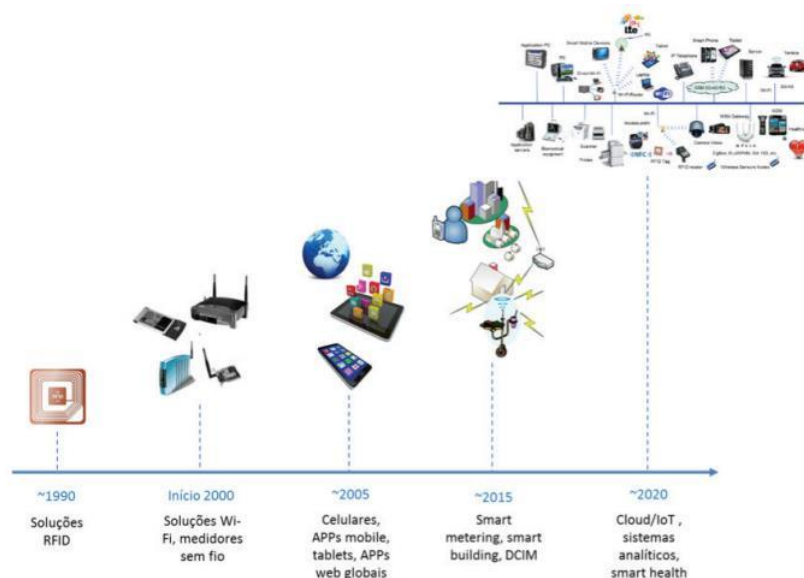
A Internet das Coisas está sendo utilizada em diversas áreas de aplicação, tal como em instalações de fabricação (automação de chão de fábrica), redes de energia, monitoramento de saúde, de segurança, monitoramento ambiental, entretenimento, sistemas de transporte etc. Essas aplicações estão sendo conectadas à Internet, e, portanto, podem ser controladas e monitoradas a partir de qualquer lugar. Essa conectividade significa uma maior quantidade de dados, recolhidos a partir de mais lugares, com muitas maneiras de aumentar a eficiência e melhorar a proteção e segurança.

A IoT tem o potencial de revolucionar diversos setores, incluindo saúde, transporte, agricultura, indústria, cidades inteligentes e muito mais. Ao permitir a coleta e análise de dados em escala massiva, a IoT oferece insights valiosos que podem levar a melhorias na eficiência, tomada de decisões mais informadas e novos modelos de negócios. No entanto, a expansão da IoT também levanta desafios significativos em relação à segurança cibernética, privacidade dos dados, padronização e integração de dispositivos heterogêneos.

FILHO (2016, p. 13):

Em 2008 acontece a primeira conferência internacional sobre o tema da internet das coisas em Zurich, Suíça: First International Conference, IOT 2008⁴. Nessa conferência, são discutidos, em sessões científicas, temas como RFID, sensoriamento, aspectos de negócios e tecnologias de conexão e conversão de protocolos, dando origem a um enorme campo de debates e evoluções técnicas, consolidando o cenário da “internet das coisas”, cuja história está resumida na ilustração da Figura 2”.

Figura 2 - Processo de evolução da IoT entre 1990 e 2020.



Fonte: FILHO, 2016, p. 13.

De acordo com Minerva, Biru e Rotondi (2015, apud FILHO, 2016, p. 20) “as mais diversas organizações estão empenhadas em criar normas para a IoT (standards), porém, algumas delas podem ser destacadas. As definições de IoT mais importantes estão sendo propostas pelas organizações:”

- IEEE – Institute of Electrical and Electronic Engineers;
- ETSI - European Telecommunications Standards Institute;
- ITU – International Telecommunications Union;
- IETF - Internet Engineering Task Force;
- NIST - National Institute of Standards and Technology;
- W3C - World Wide Web Consortium.

2.3 MONITORAMENTO DE CORRENTE ELÉTRICA

O monitoramento de corrente é o processo de observar e registrar o fluxo de corrente elétrica em um sistema elétrico. Isso é realizado usando equipamentos e dispositivos específicos, como alicate amperímetros, multímetros, sensores de corrente, entre outros, que permitem medir a intensidade da corrente que flui através de um circuito. O objetivo principal do monitoramento de corrente é obter informações sobre o comportamento elétrico de um sistema, identificando padrões, anomalias ou variações que possam indicar problemas ou fornecer informações úteis para otimização e controle.

O monitoramento de corrente desempenha um papel crítico em diversas aplicações, desde sistemas de distribuição de energia até eletrônica de consumo. Em sistemas de energia, o monitoramento contínuo da corrente em linhas de transmissão e redes de distribuição ajuda a identificar sobrecargas, curtos-circuitos e outros problemas que possam levar a falhas ou interrupções. Em eletrônica, como em dispositivos eletrônicos e circuitos integrados, o monitoramento da corrente ajuda a detectar comportamentos anormais que possam indicar falhas nos componentes ou no próprio circuito (Fabrício, 2018).

Para Cunha e Batista (2018, p. 46): “A proposta do monitoramento dos equipamentos elétricos consiste na possibilidade de o usuário visualizar o consumo energético e, de acordo com a concessionária de energia da região, determinar os valores (R\$) cobrados por equipamento elétrico”.

A análise dos dados de monitoramento de corrente também é usada para otimização de eficiência. Por exemplo, em aplicações industriais, entender os padrões de corrente em equipamentos de produção pode levar a ajustes que economizem energia e prolonguem a vida útil dos dispositivos. Além disso, o monitoramento de corrente desempenha um papel fundamental na manutenção preditiva, permitindo a detecção antecipada de problemas potenciais com base em variações nos padrões de corrente ao longo do tempo.

2.4 REMAINDER USEFUL LIFE

Remainder useful life (RUL), em português, pode ser traduzido como "vida útil restante." Essa expressão é frequentemente utilizada em contextos de manutenção preditiva e monitoramento de ativos. O RUL refere-se ao tempo estimado ou à quantidade de uso restante antes que um equipamento, componente ou sistema atinja o final de sua vida útil.

A determinação do RUL geralmente envolve o uso de dados históricos, sensores, análise de tendências e algoritmos preditivos. Isso permite que as organizações prevejam quando um equipamento pode falhar ou requerer substituição, permitindo a realização de manutenção no momento mais eficaz e evitando paradas inesperadas (Bezerra, 2016).

De acordo com Si (2011, apud BEZERRA, C. et al 2016, p. 2):

O tempo de vida útil remanescente (Remaining Useful Life – RUL) de determinado sistema, máquina ou componente é definido como a extensão do tempo atual até o final de sua vida útil. Esta medida se relaciona com diversos fatores, como o estado de degradação atual, o ambiente no qual ele se encontra, o funcionamento do sistema, dentre outros.

A ideia é antecipar a necessidade de manutenção ou substituição com base em informações em tempo real sobre o desempenho do ativo, em vez de depender apenas de cronogramas fixos de manutenção preventiva. Essa abordagem pode ser mais eficiente e econômica, uma vez que permite a otimização do uso dos ativos até o fim de sua vida útil prevista, sem realizar intervenções desnecessárias.

O cálculo do RUL pode variar dependendo do tipo de equipamento, dos dados disponíveis e dos métodos analíticos utilizados. Muitas vezes, envolve a combinação de técnicas de sensoriamento, aprendizado de máquina e análise estatística para prever o tempo restante até a falha (Bezerra, 2016).

2.5 MANUTENÇÃO PREDITIVA

Para Taranto (2022, p. 07):

A manutenção preditiva é conhecida na Engenharia de Manutenção como um método que tem a finalidade de indicar, por meio de softwares e equipamentos, as condições de funcionamento e desempenho de uma máquina em tempo real. Portanto, esse tipo de manutenção exige alguns investimentos iniciais – em sensores, softwares e computadores, por exemplo, pois somente com a tecnologia é possível monitorar remotamente os parâmetros das máquinas. Dentre as tecnologias, podemos destacar os dispositivos IoT (“Internet of Things”, internet das coisas).

Dentre os objetivos da manutenção preditiva, podemos destacar (TARANTO, 2022, p. 8):

- Determinar, antecipadamente, a necessidade de serviços de manutenção em algum estágio específico do equipamento;
- Eliminar desmontagens desnecessárias para inspeção;
- Aumentar a disponibilidade dos equipamentos;
- Reduzir as corretivas não planejadas (falhas operacionais);
- Impedir o aumento dos danos;
- Aproveitar a vida útil total dos componentes e de um equipamento;
- Aumentar o grau de confiança no desempenho de um equipamento ou linha de produção.

Segundo Prensushi (2001, apud FABRÍCIO, 2018, p. 18):

O monitoramento de condição (CM) é uma técnica que serve de suporte à estratégia de manutenção baseada nas condições (CBM – condition-based maintenance), também conhecida como manutenção preditiva. A CBM permite obter maior entendimento sobre o estado das máquinas e indica claramente quando e qual tipo de manutenção é necessário para que se possa reduzir o custo de mão-de-obra e garantir que não haja uma parada acidental logo a seguir. A estratégia CBM tem potencial para resultar num ótimo serviço de manutenção através de um sistema CM, capaz de fornecer informações corretas e úteis sobre a real condição da máquina monitorada.

Quatro componentes fundamentais devem estar presentes em um sistema CM (HAN, 2003 apud FABRÍCIO, 2018, p. 19-20):

1. Sensoriamento. Um sensor converte uma grandeza física em um sinal elétrico. Grandezas e fenômenos físicos podem ser monitorados de modo que os

valores de uma variável ou suas mudanças sejam detectáveis para revelar falhas em estágios iniciais muito antes de se tornarem catastróficas. A escolha dos sensores adequados dependerá do método de monitoramento e do grau de conhecimento sobre os possíveis mecanismos de falha da máquina. Comumente, os sensores devem ser adequados para a medição em tempo real. Sensibilidade adequada, baixo custo e a característica são requisitos chave de sensores para aplicações de CM.

2. Aquisição de dados. Um módulo de aquisição de dados é necessário para realizar a amplificação, filtragem e pré-processamento dos sinais elétricos analógicos providos pelos sensores, com posterior conversão 20 analógico-digital. Deve dispor de armazenamento em memória local de dados e alguma forma de comunicação externa, cabeada ou sem fio.
3. Detecção de falha. O objetivo principal é descobrir se há uma falha em estágio inicial aparecendo na máquina monitorada, para que alguma forma de alarme possa ser dada e a seguir uma análise mais profunda seja realizada. Existem dois métodos para detecção de falhas, o método referenciado por modelo e o método de extração de características. O primeiro detecta falhas comparando os resultados das medidas com as previsões de um modelo, que pode ser de simulação matemática ou baseado em inteligência artificial. Para a maioria dos métodos de extração de características, as tecnologias de processamento de sinal nos domínios do tempo e da frequência são usadas para se obter "assinaturas" que sejam características de um desempenho normal ou defeituoso.
4. Diagnóstico. Os sinais anormais detectados precisam ser pósprocessados de forma a resultar numa prescrição clara para a manutenção. Essa análise costumava ser feita por especialistas humanos e atualmente observa-se uma tendência para implementá-la automaticamente por computador, sem intervenção humana. As prescrições apresentadas ao usuário devem incluir nome da falha, localização, condições operacionais da máquina nas circunstâncias de falha, sugestões de ações de manutenção, dentre outras informações pertinentes.

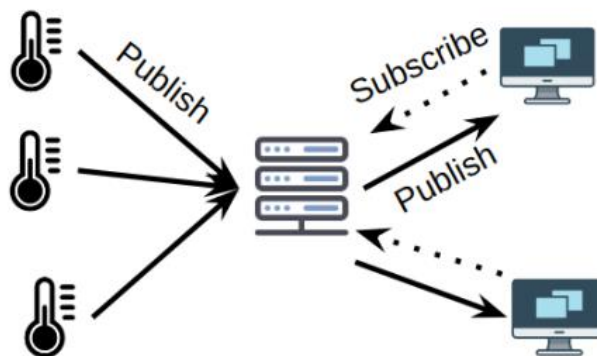
2.6 PROTOCOLO IOT

Os protocolos de Internet das Coisas (IoT) desempenham um papel fundamental na comunicação entre dispositivos conectados em redes IoT. Esses protocolos são essenciais para garantir a interoperabilidade e a eficiência das operações em ambientes IoT. Existem vários protocolos IoT, cada um com suas próprias características e casos de uso específicos. Abaixo segue alguns dos protocolos mais populares e amplamente utilizados.

2.6.1. MQTT (Message Queuing Telemetry Transport)

O MQTT é um protocolo de mensagens leves projetado para comunicação entre dispositivos IoT e servidores ou outros dispositivos. Ele é adequado para cenários onde a largura de banda e a energia são limitadas, como sensores remotos alimentados por bateria. O MQTT utiliza o modelo de publicação/assinatura, onde os dispositivos podem publicar mensagens em tópicos e outros dispositivos podem se inscrever para receber essas mensagens (Martins; Zen, 2015).

Figura 3 - Arquitetura do MQTT.



Fonte: SOARES, 2019, p. 14.

Utiliza o modelo “publish/subscribe” e necessita de um broker MQTT para gerenciar e rotacionar as mensagens dentro da rede. É descrita como um protocolo de comunicação many-to-many. Uma das grandes vantagens do MQTT é a eficiência energética do modelo ‘pub/sub’, que também escala muito bem (CHARÃO; DANTAS; ROTTA, 2017, p. 389).

Desde março de 2013, o MQTT está em processo de padronização na OASIS (um consórcio sem fins lucrativos que conduz o desenvolvimento, convergência e adoção de padrões abertos para a sociedade da informação). A última notícia do comitê técnico da OASIS8 para o MQTT dá conta de que o protocolo encontra-se em período de avaliação como um Candidate OASIS Standard (COS), porém sem atualizações mais recentes (MARTINS; ZEN, 2015, p. 74).

2.6.2. CoAP (Constrained Application Protocol)

- O CoAP é projetado especificamente para dispositivos com recursos limitados, como sensores e atuadores em redes IoT.
- Ele opera sobre o protocolo UDP (User Datagram Protocol) e fornece uma abordagem RESTful, que é um estilo de arquitetura de software que é amplamente utilizado na concepção de serviço web para comunicação, semelhante ao HTTP.
- O CoAP é eficiente em termos de uso de recursos e é adequado para cenários onde a latência é crítica.

Para Charão, Dantas e Rotta (2017, p. 390):

É Protocolo que utiliza o modelo 'cliente/servidor', o qual disponibiliza interação 'request/response' um-para-um, podendo também suportar multi-cast. Diferente do MQTT, o CoAP surgiu para suprir a necessidade em protocolos IoT, desenvolvido para interoperar com HTTP e com arquiteturas RESTful, através de simples proxies, tornando-se compatível com a Internet.

2.6.3. HTTP/HTTPS (HyperText Transfer Protocol)

- Embora não seja exclusivamente um protocolo IoT, o HTTP e sua versão segura, o HTTPS, são amplamente utilizados para comunicação entre dispositivos IoT e servidores.
- O HTTP é simples de implementar e é usado em muitas aplicações IoT baseadas na web.
- O HTTPS fornece segurança adicional por meio da criptografia das comunicações, o que é essencial em cenários de IoT onde a privacidade e a segurança são críticas.

Para Soares (2019, p. 15):

O HTTP funciona no modelo requisição-resposta utilizando uma arquitetura cliente-servidor. Quando se abre um navegador de Internet, como Google Chrome, Mozilla Firefox ou Internet Explorer e se digita uma URL qualquer, esse navegador é o cliente da nossa arquitetura e ele está fazendo uma requisição HTTP a uma aplicação hospedada em um computador em outra parte do globo, que é o servidor. Esse servidor, por sua vez, ao receber essa requisição, realiza o processamento desta e retorna uma resposta ao cliente. Essa resposta contém informações sobre este processamento e pode ou não conter o conteúdo solicitado no corpo da mensagem.

2.6.4. Wi-Fi

De acordo com Lugli e Darlan (2012, p. 4):

O protocolo Wi-Fi (Nome dado ao sistema Ethernet Wireless) é a tecnologia de interconexão para redes locais e dispositivos. Em meados da década de 1990, um consórcio internacional de especialistas em Engenharia, de muitas empresas de tecnologia, começou a trabalhar juntos por meio da IEEE para desenvolver os padrões sem fio da indústria para a forma como estes novos produtos sem fio devem interagir uns com os outros. Fora dessa cooperação, o Wi-Fi Alliance® nasceu, tomou essas normas e desenvolveram laboratórios de testes em todo o mundo para testar e certificar que os produtos atendam os padrões de interoperabilidade e segurança.

Abaixo é apresentado um padrão do protocolo WI-FI:

Padrão IEEE 802.11.b,g,n, 2.4 GHz., sinal de Rádio Frequência por difusão, médias distâncias (dezenas de metros), alta qualidade e flexibilidade. Já possui uma evolução para altas taxas (Gbps) de comunicação, chamado de WI-GIG (LEITE; MARTINS; URSINI, 2017, p. 5).

Lugli e Darlan (2012, p. 4):

Este protocolo opera em faixas de frequências de 2,4Ghz ou 5Ghz, em que não necessitam de licença para instalação e operação, e podem transmitir dados a velocidades até iguais ou superiores a 11Mbps dentro de um intervalo de 30 metros, essa velocidade é limitada pela largura de banda disponível. Este fato as torna também atrativas para aplicações em ambientes industriais. No entanto, para uso comercial, no Brasil, é necessária licença da Agência Nacional de Telecomunicações (Anatel).

2.6.5. Bluetooth e Bluetooth Low Energy (BLE)

- Esses protocolos sem fio são comuns em dispositivos IoT de curto alcance, como dispositivos vestíveis e sensores domésticos.
- O BLE é especialmente adequado para aplicações de baixo consumo de energia.

Como um dispositivo se comunicando por Bluetooth pode tanto receber quanto transmitir dados (modo full-duplex), a transmissão é alternada entre slots para transmitir e slots para receber, sendo denominado FH/TDD (Frequency Hopping/Time-Division Duplex). Esses slots são canais divididos em períodos de 625 μ s (microssegundos). Cada salto de frequência deve ser ocupado por um slot, logo, em 1 segundo, tem-se 1600 saltos (LUGLI; DARLAN, 2012, p. 4-5).

O Bluetooth é capaz de transmitir sinais de dados e voz. O dispositivo possui dois tipos de conexão: SCO (Synchronous Connection-Oriented) e ACL (Asynchronous ConnectionLess). O primeiro estabelece um link sincronizado entre o dispositivo mestre e o dispositivo escravo, onde é feita uma reserva de slots para cada um. Assim, o SCO acaba sendo utilizado em aplicações de envio contínuo de dados, como voz (LUGLI; DARLAN, 2012, p. 4).

2.6.6. LoRaWAN (Long Range Wide Area Network)

O LoRaWAN é um protocolo de comunicação de longo alcance usado em redes IoT de baixa potência. Ele é ideal para cenários em que dispositivos IoT precisam de uma cobertura de rede ampla e podem enviar pequenas quantidades de dados de forma intermitente (Teixeira; Almeida, 2017).

LoRa (do inglês - Long Range: Longo alcance), é uma nova tecnologia de rede de comunicação sem fio criada pela Semtech Corporation e promovida através da LoRa Alliance. Uma associação aberta e sem fins lucrativos, onde fazem parte grandes companhias ao redor do mundo, nas quais possuem algum interesse no desenvolvimento e na aplicação da rede LoRa na Internet das Coisas (IoT - Internet of Things) (TEIXEIRA; ALMEIDA, 2017, p. 25).

2.6.7. Zigbee

- O Zigbee é um protocolo de comunicação de baixa potência e curto alcance comumente usado em redes de dispositivos IoT domésticos, como sistemas de automação residencial.

Padrão IEEE 802.15.4, usa em sua base uma Rede AdHoc (Hop to Hop). O Zigbee é responsável pelas funções : Network Routing, Address Translation, Packet Segmentation and Profiles (LEITE; MARTINS; URSINI, 2017, p. 4).

A escolha do protocolo IoT depende das necessidades específicas de cada aplicação, como requisitos de largura de banda, consumo de energia, alcance e segurança. Muitas vezes, as redes IoT utilizam uma combinação de vários protocolos para atender a diferentes requisitos dentro da mesma infraestrutura IoT.

3 PROCEDIMENTOS DO PROJETO

Este capítulo pretende mostrar a implementação do sistema IoT para monitoramento de corrente elétrica, de forma a expor todos os processos envolvidos na elaboração do projeto. Esse sistema foi elaborado com base em outros projetos com características semelhantes, o qual embasaram o desenvolvimento do projeto.

O processo adotado será a construção de um dispositivo capaz de medir corrente elétrica e enviar essa medição através do protocolo Wi-Fi para um aplicativo. O projeto será desenvolvido e testado em uma residência de Porto Velho – RO.

3.1 SISTEMA DE MONITORAMENTO

O sistema foi desenvolvido utilizando o microcontrolador de baixo custo ESP32. Segundo o datasheet (ESP32), o dispositivo tem suporte Wi-Fi e Bluetooth, desenvolvido pela Espressif Systems. Ele é amplamente utilizado em projetos de Internet das Coisas (IoT), automação residencial, prototipagem e muitas outras aplicações. O controlador contém um processador dual-core Tensilica LX6, que opera em frequências de até 240 MHz. Ele também possui 520 KB de memória RAM e 4 MB de Flash embutida.

Figura 4 - Controlador ESP32.



Fonte: Autor.

O microcontrolador foi programado em linguagem C++ utilizando a IDE (Integrated Development Environment) do Arduino. A lógica permite que o microcontrolador receba um sinal de entrada analógica, processe esses dados e envie através de protocolos IoT.

Para medir a corrente foi utilizado um sensor de corrente não invasivo, com capacidade de medição de 100A. O SCT-013 é um transformador de corrente TC utilizado para medir correntes elétricas em um circuito. Ele é especialmente útil para monitorar correntes em sistemas de energia, controle de motores e outras aplicações que necessitam de medição precisa de corrente. O SCT-013 é amplamente utilizado em projetos de automação, monitoramento de energia e eletrônica em geral. Ele envolve um núcleo dividido no qual um condutor passa a corrente que se deseja medir, quando uma corrente elétrica flui através do condutor, ela gera um campo magnético proporcional à corrente no primário, que terá uma corrente reduzida pelo efeito do transformador TC no secundário (SCT-013). Por meio de um circuito interface, converte-o em uma saída de tensão proporcional à corrente.

Figura 5 - Sensor de corrente SCT-013.



Fonte: Autor.

O sensor SCT-013 é projetado para medir corrente alternada de 0 a 100 A e produzir uma saída de corrente proporcional entre 0 e 50 mA. Ele funciona em temperaturas de -25 a $+70^{\circ}$ C. As entradas analógicas do microcontrolador lidam com variações de tensão, não corrente. Para converter o sinal de corrente em um sinal de tensão, é necessário um circuito de interface. Esse circuito inclui um resistor de carga em paralelo com o sensor, que converte a corrente em tensão. Além disso, um divisor de tensão composto por dois resistores de $10\text{ k}\Omega$ conectados em série é usado para adicionar uma mudança de tensão. Um capacitor de $10\text{ }\mu\text{F}$ é usado para filtrar ruídos do sinal. Isso permite que o microcontrolador intérprete a medição de corrente como uma variação de tensão (Fabrício, 2018).

3.2 CÁLCULO DO RESISTOR DE CARGA

Como descrito no tópico anterior, o sensor SCT-013 foi projetado para fazer leitura de corrente alternada, sendo um sensor não invasivo. O microcontrolador ESP32 não trabalha com leitura de corrente, portanto, precisa de um circuito interface para converter esse sinal de corrente em um sinal de tensão. Primeiramente, foi adicionado uma fonte de tensão de 3,3V, vinda do próprio microcontrolador que alimenta todo o circuito.

O circuito contém mais dois resistores de $10\text{ k}\Omega$ responsáveis por gerar uma divisão de tensão (V) de 1,65V, também é adicionado um capacitor de $10\text{ }\mu\text{F}$ para filtrar ruídos no circuito, proporcionando uma leitura mais precisa. Para finalizar, é

adicionado um resistor de carga (R_c) em paralelo com o sensor, proporcionando uma conversão de corrente em tensão. O cálculo para obter o resistor de carga (R_c) é apresentado abaixo:

Passo 1: Primeiramente é preciso obter a corrente no primário (I_p) que será medida. Nesse caso será $I_p = 14,6A$.

Passo 2: Obter a corrente no secundário (I_s) do sensor SCT-013. Para esse passo é preciso calcular a relação de transformação entre o primário e o secundário. De acordo com o datasheet do sensor, a relação de transformação das espiras do primário (N_1) e do secundário (N_2) é 1:2000. Portanto:

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{I_s}{I_p} \quad (3.2.1)$$

$$\frac{1}{2000} = \frac{I_s}{14,6A}$$

$$200I_s = 14,6A$$

$$I_s = \frac{14,6A}{2000} = 0,0073A$$

Passo 3: Obter a corrente de pico no secundário (I_{ps}). Para isso, é preciso utilizar a fórmula abaixo:

$$I_{ps} = \sqrt{2} * I_s \quad (3.2.2)$$

$$I_{ps} = \sqrt{2} * 0,0073A = 0,0103A$$

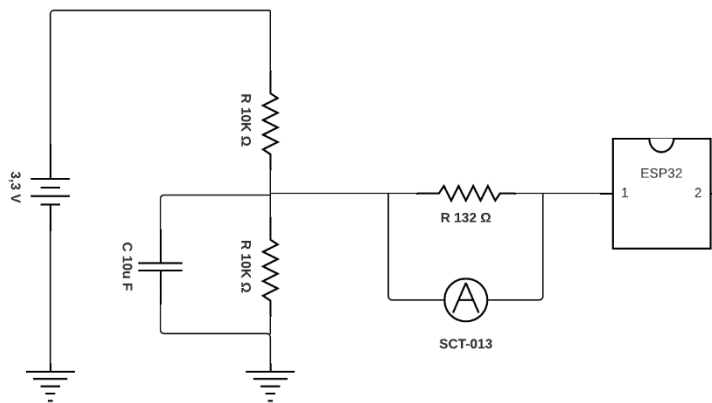
Passo 4: Encontrar o resistor de carga (R_c). Para obter esse valor será utilizado a Lei de Ohm, de acordo com a equação 3. O valor da tensão será 1,65V obtido pelo divisor de tensão do circuito.

$$V = I_{ps} * R_c \quad (3.2.3)$$

$$R_c = \frac{V}{I_{ps}} = \frac{1,65V}{0,0103A} = 159,8\Omega$$

Portanto, a recomendação é utilizar um R_c de 159Ω em paralelo com o sensor SCT-013. Para esse projeto foi considerado um resistor de 132Ω . A figura abaixo apresenta o circuito eletrônico para essa aplicação.

Figura 6 - Circuito eletrônico para funcionamento do sistema.



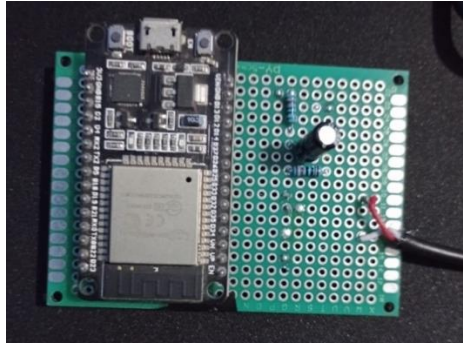
Fonte: Autor.

Considerando que está sendo medido corrente alternada, o divisor de tensão serve para ajustar a amplitude da tensão para no máximo 3,3V. Quando se fala em corrente alternada, tem-se corrente e tensão em forma de onda, ficando negativa em alguns instantes. Como o ESP32 só lê tensão positiva, o divisor de tensão e o capacitor fazem um offset, deslocando a tensão para 1,65V e fluando entre 0 e 3,3V. Se não for utilizado o divisor de tensão, a amplitude da corrente vai para 6,6V e com isso vai queimar a porta analógica do microcontrolador.

3.3 FUNCIONAMENTO DO SISTEMA

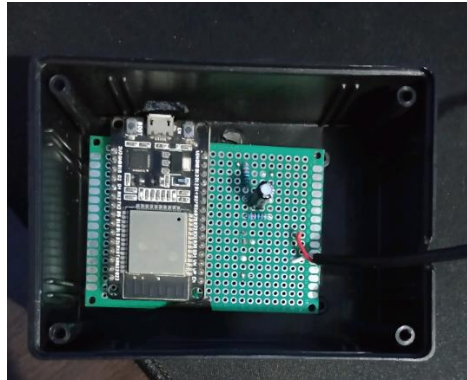
O sistema foi armazenado em um invólucro de material plástico, com as seguintes dimensões, 10cm de comprimento, 7,5cm de largura e 4cm de altura. Como apresentado acima, os componentes foram soldados em uma placa de circuito universal, ficando exposto apenas o sensor SCT-013. As figuras 7, 8 e 9 ilustram como foi desenvolvido a placa de circuito e o case.

Figura 7 - Circuito interface e microcontrolador ESP32 soldados na placa.



Fonte: Autor.

Figura 8 - Placa de circuito posicionada e colada dentro da caixa.



Fonte: Autor.

Figura 9 - Compartimento do circuito com tampa e sensor SCT-013 não invasivo.



Fonte: Autor.

O compartimento contém dois furos nas laterais com diâmetro de 10mm para saída do cabo do sensor e entrada da alimentação/dados do microcontrolador ESP32. O compartimento possibilita a instalação do sistema em ambientes externos com condições desfavoráveis, como, chuva, sol ou poeiras, desde que tenha uma alimentação por bateria e acesso à internet com frequência de 240 MHz.

Com o sistema instalado em campo, é preciso que o cabo de fase seja passado pelo sensor SCT-013 de forma que o cabo fique dentro do núcleo de ferrite. É necessário que seja o cabo de fase, pois em caso de fuga de corrente, o sensor será capaz de detectar antes que a corrente tenha um outro trajeto que não seja pelo cabo de neutro.

Figura 10 - Posicionamento do sensor SCT-013 no cabo de fase.



Fonte: Autor.

Dessa forma, o sensor começara ter leituras de corrente, e através do ESP32 conectado ao WiFi, consegue-se transmitir os dados em nuvem e compartilhá-lo com o aplicativo Blynk IoT. A figura 11 apresenta o layout da tela do aplicativo.

Figura 11 - Interface para monitoramento da corrente no aplicativo Blynky.



Fonte: Autor.

Foi elaborado uma interface de controle simples com um gráfico de linhas e um outro de rosca. O gráfico de linhas possui a possibilidade de visualização de um longo

histórico de medições, dentro de um período de 1 hora, 6 horas, 1 dia e 1 ano, além de ser possível acompanhar em tempo real. O gráfico de rosca contém a medição em tempo real, sem histórico, contendo a leitura do sensor de corrente com uma barra variando de 0A a 100A. Na criação dessa interface, é definido a porta analógica em que o sensor está conectado no ESP32, possibilitando a leitura do sensor no Blynk Cloud. A porta analógica/digital utilizada no projeto foi a 34.

Para a comunicação entre os dispositivos, é preciso instalar a biblioteca do Blynk na IDE Arduino, e considerá-la no código fonte para que o microcontrolador seja capaz de encontrar o Cloud do Blynk.

Figura 12 - Bibliotecas para leitura do sensor SCT-013 e comunicação com nuvem Blynk.

```
#include "EmonLib.h"
#include <BlynkSimpleEsp32.h>
```

Fonte: Autor.

A biblioteca EmonLib é utilizada para medir energia elétrica, ela é capaz de monitorar continuamente duas grandezas elétricas, sendo elas, tensão e corrente, dentro de um timer de 5 ou 10 segundos.

É preciso inserir no código o token de autorização para controle do hardware. Esse token é gerado no momento da criação do projeto dentro do aplicativo Blynk e encaminhado pelo e-mail.

Figura 13 - Token de autorização utilizado para a aplicação.

```
char auth[] = "LKxy_M6MERIH9u3RK0pm-drUqZbWZtBT";
```

Fonte: Autor.

O próximo passo é considerar uma rede Wi-Fi dentro do código para que o ESP32 seja conectado no momento da sua inicialização. Com isso, tem-se o ESP32 conectado ao Blynk Cloud pronto para monitorar os dados lidos pelo sensor SCT-013.

Figura 14 - Rede Wi-Fi privada de residência considerada no código.

```
char ssid[] = "IGUACU 2G";
char pass[] = "caminha@4288";
```

Fonte: Autor.

Abaixo é apresentando todo o processo para a leitura do sensor e envio dos dados para a nuvem do Blynk. O fator de calibração precisa ser definido dentro do código, e após isso a função BlynkTimer é definida para controlar o envio dos dados para a nuvem do Blynk.

Figura 15 - Fator de calibração do sensor.

```
EnergyMonitor emon;
#define currCalibration 3.98
BlynkTimer timer;
```

Fonte: Autor.

A figura 16 apresenta a inicialização da leitura em miliamperes.

Figura 16 - Inicializando os valores de leitura em millis.

```
unsigned long lastmillis = millis();
```

Fonte: Autor.

Em seguida, os valores do sensor precisam ser calculado e são apresentado via monitor serial, conforme mostra a figura 17.

Figura 17 - Função para calcular os valores do sensor e exibir no monitor serial.

```
void myTimerEvent() {

    emon.calcVI(20, 2000);
    Irms_primario = emon.Irms;
    Serial.print("Corrente: ");
    Serial.print(Irms_primario, 2);
    Serial.print("A");
}
```

Fonte: Autor.

É preciso enviar os dados para a nuvem do Blynk através do pino virtual, no caso definido o pino 34, como ilustra a figura 18.

Figura 18 - Função para enviar dados ao Blynk via pino virtual.

```
Blynk.virtualWrite(V34, Irms_primario);
```

Fonte: Autor.

Por fim, é preciso inicializar a taxa de transmissão serial e definir o pino analógico em que o sensor de corrente será conectado no ESP32. Para essa aplicação foi definida a porta 34 para realizar a leitura da corrente do sensor. Em seguida, foi ajustado o cronômetro para um intervalo de atualização de leitura de 5 segundos.

Figura 19 - Configuração do sistema no microcontrolador para comunicação de dados.

```
void setup() {
  Serial.begin(9600);
  emon.current(34, currCalibration); // C1
  Blynk.begin(auth, ssid, pass);
  timer.setInterval(5000L, myTimerEvent);
}
```

Fonte: Autor.

O case do sistema deve ser instalado em campo junto ao sensor, com a utilização de uma bateria ou uma alimentação externa para que o microcontrolador fique energizado e mantenha-se conectado à internet. Em caso de perda de sinal, o ESP32 irá parar de enviar dados a nuvem e tentará nova conexão com a rede, e continuará nesse ciclo até conseguir se conectar novamente.

3.4 RESULTADOS ALCANÇADOS PARA CORRENTE

O teste foi realizado em um ar-condicionado de uma residência na cidade de Porto Velho. A figura 20 mostra as especificações do equipamento.

Figura 20 - Plaqueta do condicionador de ar utilizado para os testes.

MODELO	HI FE3082NA
CAPACIDADE DE REFRIGERAÇÃO	8790 W (30000 Btu/h)
ALIMENTAÇÃO ELÉTRICA	220 V~
FREQUÊNCIA	60 Hz
CORRENTE MÁXIMA	14,6 A
MASSA DE REFRIGERANTE	1880 g
REFRIGERANTE	R-410A
MASSA	54,3 kg
GRAU DE PROTEÇÃO	IPX4
DISPOSITIVO DE EXPANSÃO	CAPILAR
DIMENSÕES (A x L x P) mm	705 x 855 x 325
PRESSÃO MÁXIMA (MPa)	3,79 (Descarga) 1,72 (Sucção)
USE DISJUNTORES DE 20 A	
COMPRESSOR PROTEGIDO TERMICAMENTE	

Fonte: Autor.

A figura 21 apresenta a condensadora do equipamento, junto ao sistema de monitoramento conectado ao cabo de fase próximo ao disjuntor do equipamento.

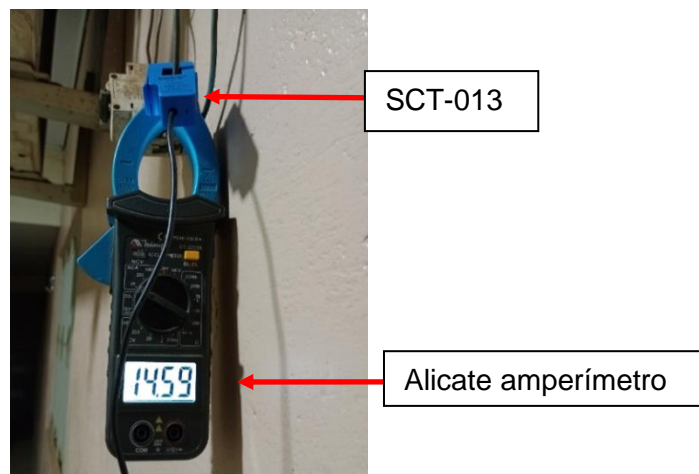
Figura 21 - Condensadora e sistema de monitoramento conectado ao cabo de fase.



Fonte: Autor.

Para fim de comparação dos resultados, foi utilizado um alicate amperímetro para confrontar os valores obtidos pelo sensor, conforme mostra a figura 22. Dessa forma, é apresentado os resultados com comparação de uma ferramenta profissional utilizada para esse fim.

Figura 22 - Sensor SCT-013 instalado em condutor junto a alicate amperímetro.



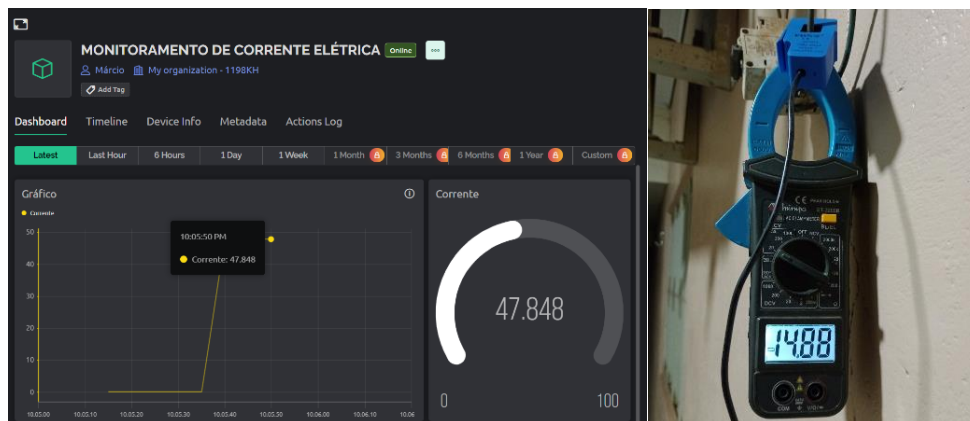
Fonte: Autor.

O primeiro passo foi realizar a calibração do sensor, para isso é utilizado o número de espiras (N_e) do sensor e o valor do resistor de carga (R_c) encontrado. Portanto, o valor obtido foi:

$$\text{Fator de calibração} = \frac{N_e}{R_c} = \frac{2000}{159,8} = 12,51 \quad (3.4.1)$$

Com o fator de calibração teórico calculado, o primeiro teste foi realizado e verificado uma diferença bem grande em relação ao alicate amperímetro, conforme mostra a figura 23, um resultado esperado por conta de o resistor de carga não ter sido o mesmo recomentado no cálculo, 159Ω . Foi utilizado um resistor próximo do desejado, sendo de 132Ω .

Figura 23 - Comparação da leitura do alicate amperímetro e sensor SCT-013.



Fonte: Autor.

Para solucionar o problema foi realizado ajuste manual no fator de calibração do sensor diretamente no código fonte. Para chegar no mesmo valor de corrente medida no aparelho, foi sendo feito diminuição no fator de calibração até chegar o mais próximo possível do desejado. Pela figura 24 é possível perceber essa diminuição do valor, até chegar a um valor aceitável.

Figura 24 - Testes realizados para encontrar o fator de calibração adequado.



Fonte: Autor.

Com isso, o novo fator de calibração ficou em 3,98, então foi realizado um novo teste e observado que os valores eram bem próximos em relação ao alicate amperímetro, conforme mostra a figura 25.

Figura 25 - Comparação do alicate amperímetro e sensor SCT-013 após calibração.



Fonte: Autor.

A figura 25 apresenta o resultado obtido após a calibração do sensor. Pode-se perceber que o sensor se comportou muito bem, não apresentando variações muito grande, mantendo-se bastante próximo ao dispositivo profissional de medição. Abaixo é apresentando a tabela de comparação entre os dois dispositivos ao longo de 15 minutos.

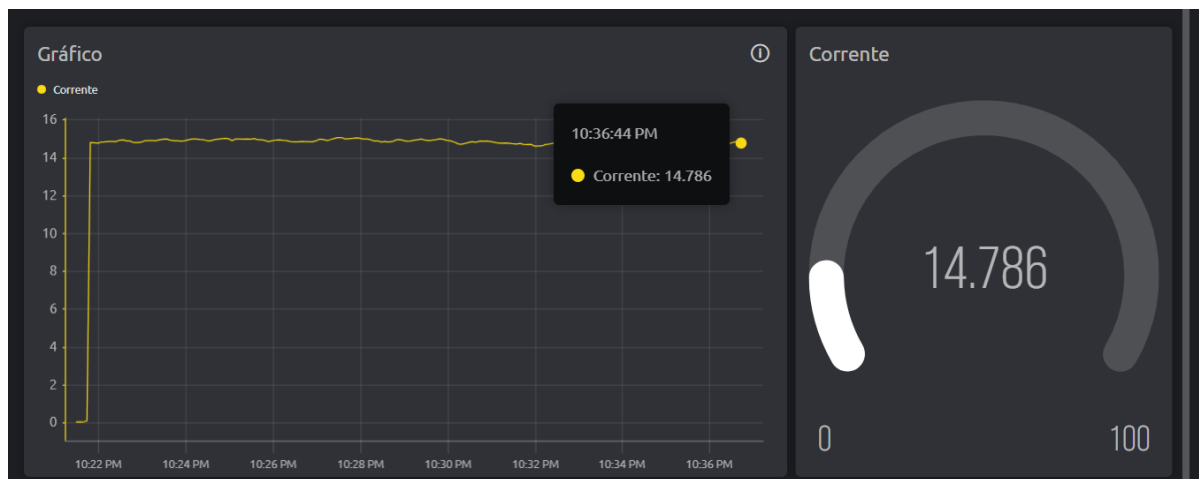
Tabela 1 - Comparação de leituras do sensor SCT-013 e alicate amperímetro.

Minutos (min)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
SCT-013 (A)	14,97	14,93	14,90	14,88	14,91	14,88	14,93	14,71	14,70	14,82	14,85	14,94	14,90	14,80	14,78
Alicate amperímetro (A)	14,94	14,88	14,87	14,85	14,93	14,86	14,92	14,68	14,72	14,79	14,83	14,90	14,88	14,79	14,75

Através dos resultados foram obtidos os seguintes valores, o desvio médio encontrado foi de 0,03 A e o percentual médio de erro ficou em 0,13%.

Também se observou uma resposta muito rápida da leitura em nuvem, sendo comparada nos dois gráficos. Foi realizado uma leitura por cerca de 15 minutos e em nenhum momento o servidor Blynk mostrou instabilidade ou falha de conexão. A figura abaixo ilustra esse monitoramento mais longo.

Figura 26 - Monitoramento da corrente do condicionador de ar durante 15 minutos.



Fonte: Autor.

3.5 VERSÃO FINAL DO SISTEMA

Visando explorar mais a análise da corrente do equipamento, foi implementado no sistema de monitoramento a potência em watts e o consumo do equipamento em kWh. A figura 27 mostra como ficou a nova interface do sistema.

Figura 27: Nova interface do sistema com a implementação da potência e consumo do equipamento.



Fonte: Autor.

O monitoramento da potência se deu a partir da leitura da corrente e considerou-se uma tensão constante. Para que a medição da potência fosse mais assertiva, era preciso utilizar um sensor de tensão invasivo, porém, o objetivo do projeto não era utilizar esse tipo de sensor, e sim um que tivesse a possibilidade de fazer a leitura de forma indireta, como é o caso dos dispositivos não invasivo.

Inicialmente foi debatido os problemas que poderiam ocasionar em utilizar uma tensão constante, sem que haja um monitoramento da mesma. Porém, as concessionárias de energia possuem dispositivos capazes de reduzir quedas de tensão nas redes de distribuição, então isso foi levado em consideração e visto que em dias comuns não é apresentado uma grande variação, entretanto, em dias incomuns, que não são frequentes, o sistema pode sofrer uma oscilação, podendo causar medições não muito precisas.

Como explicado acima, para implementar essa leitura no sistema foi utilizado o valor de tensão constante e a corrente capturada pelo sensor SCT-013. Foi realizado uma medição da tensão no disjuntor geral da residência e no disjuntor do equipamento e observado uma queda de tensão considerável. A figura 28 e 29 apresenta essa medição com um multímetro.

Figura 28: Medição da tensão com um multímetro diretamente no circuito do equipamento.



Fonte: Autor.

Figura 29: Medição da tensão diretamente no disjuntor de alimentação do barramento geral.



Fonte: Autor.

Como pode-se ver na figura 29, a tensão que vem do medidor já possui uma queda de 5V. Para o circuito do equipamento, percebe-se também uma queda de tensão em relação ao medidor, a princípio essa perda foi causada por um mal dimensionamento do circuito. Ao longo dos testes foi realizado novas medições de tensão e observado que se manteve constante em 215V para o medidor e 208,3V para o equipamento. Para fim de cálculo, foi considerado uma tensão de 220V com uma queda de tensão de 4%, chegando a 211,2V. Diante dos novos valores, foi utilizado a fórmula de potência aparente dada em VA, em seguida transformada para potência ativa em W.

$$S = V \times I \text{ (VA)} \quad (3.5.1)$$

$$P = S \times fp \text{ (W)} \quad (3.5.2)$$

P = Potência ativa

V = Tensão aplicada

I = Corrente elétrica

S = Potência aparente

fp = Fator de potência = 0,85

Para implementar a leitura do consumo, que é a integral da potência no tempo, foi utilizado a biblioteca Emonlib, conforme mostra a figura 12, a mesma foi desenvolvida para realizar o monitoramento de energia, capaz de monitorar corrente, tensão, potência e consumo. Dentro do código fonte possui a função `emon.calc`, conforme figura 30, que calcula a potência ativa, potência aparente e o fator de potência, e em sequência o consumo é calculado.

Figura 30: Função para realizar o cálculo do consumo do equipamento.

```
emon.calcVI(20, 2000);
kWh = kWh + emon.apparentPower * (millis() - lastmillis) / 3600000000.0;
```

Fonte: Autor.

No aplicativo Blynky foi criado mais duas variáveis virtuais, sendo V35 para a potência e V36 para o consumo do equipamento. A potência está apresentada em um gráfico de linhas enquanto o consumo está em um gráfico de rosca, conforme mostra a figura 27.

Figura 31: Inicialização da leitura de corrente com novos dados de potência e consumo.



Fonte: Autor.

Tabela 2: Comparativo de potência entre teórica, real e por monitoramento.

	$S = V \times I \parallel P = S \times fp$	Potência
Potência teórica	$S = 220V \times 12,98A \parallel P = 2855,6 \times 0,85$	2427,2W
Potência real	$S = 208,3V \times 12,98A \parallel P = 2703,7 \times 0,85$	2298,1W
Potência por monitoramento	$S = 211,2V \times 12,98A \parallel P = 2741,3 \times 0,85$	2330,1W

Conforme a tabela 2, é possível perceber uma pequena diferença entre o valor real e por monitoramento, chegando a um percentual de erro de 1,39%. O valor seria mais preciso se fosse realizado a medição da tensão constantemente, possibilitando identificar também quedas ou elevação de tensão na rede. Entretanto, o valor é considerado muito bom pelo fato de não conter um sensor de tensão no sistema, um resultado esperado dentro daquilo que foi projetado para o projeto.

Figura 32: Monitoramento da corrente durante 15 minutos com sensor SCT-013 e alicate amperímetro.



Fonte: Autor.

A figura 32 mostra o monitoramento durante 15 minutos, e observado que houve pequenas flutuações na corrente, o que também impactou na potência do equipamento. Neste momento a tensão teve uma pequena oscilação, subindo para 208,4V. A tabela 3 ilustra os novos valores obtidos para a potência.

Tabela 3: Comparativo da potência teórica, real e por monitoramento após 15 minutos.

	$P_s = V \times I \parallel P_a = P_s \times fp$	Potência
Potência teórica	$S = 220V \times 13,09A \parallel P = 2879,8 \times 0,85$	2447,8W
Potência real	$S = 208,4V \times 13,09A \parallel P = 2727,9 \times 0,85$	2318,7W
Potência por monitoramento	$S = 211,2V \times 13,12A \parallel P = 2770,9 \times 0,85$	2355,2W

Os novos valores obtidos resultaram em um percentual de erro de 1,57%, maior que o anterior devido ao aumento da corrente.

Figura 33: Monitoramento da corrente durante 45 minutos com sensor SCT-013 e alicate amperímetro.



Fonte: Autor.

A figura 33 mostra o monitoramento durante 45 minutos, já com bastante oscilações, sendo notório no gráfico, conseqüentemente a potência também sofreu variações. A tensão manteve seu valor de 208,4V. A tabela 4 ilustra os novos valores obtidos para a potência.

Tabela 4: Comparativo da potência teórica, real e por monitoramento após 45 minutos.

	$S = V \times I \parallel P = S \times fp$	Potência
Potência teórica	$S = 220V \times 13,32A \parallel P = 2930,4 \times 0,85$	2490,8W
Potência real	$S = 208,4V \times 13,32A \parallel P = 2775,8 \times 0,85$	2359,4W
Potência por monitoramento	$S = 211,2V \times 13,36A \parallel P = 2821,6 \times 0,85$	2398,3W

Como houve aumento na corrente e o sensor teve uma diferença de 0,04A para a corrente real, o percentual de erro aumentou para 1,64%, equivalente a 0,07% a mais em relação ao medido no minuto 15.

Diante de todos os monitoramentos realizados ao longo dos 45 minutos, foram registrados o consumo do equipamento em todos os instantes. Para fim de comparação, a tabela 5 e 6 mostra o consumo do equipamento no minuto 15 e no minuto 45.

Tabela 5: Comparativo de consumo no minuto 15.

	$Consumo = (potência \times horas \ de \ uso) \div 1000$	Consumo
Consumo teórico	$C = (2879,8W \times 0,25H) \div 1000$	0,71kWh
Consumo real	$C = (2727,9W \times 0,25H) \div 1000$	0,68kWh
Consumo por monitoramento	$C = (2764,6W \times 0,25H) \div 1000$	0,69kWh

Tabela 6: Comparativo de consumo no minuto 45.

	$Consumo = (potência \times horas \ de \ uso) \div 1000$	Consumo
Consumo teórico	$C = (2930,4W \times 0,75H) \div 1000$	2,19kWh
Consumo real	$C = (2775,8W \times 0,75H) \div 1000$	2,08kWh
Consumo por monitoramento	$C = (2813,1W \times 0,75H) \div 1000$	2,11kWh

Diante desses valores de consumo, pode-se perceber que o valor real e por monitoramento estão bem próximos, para o minuto 15 foi obtido um percentual de erro de 1,47% e para o minuto 45 um erro de 1,44%.

Considerando todos os testes realizados com o sistema, o monitoramento da potência de um equipamento é uma prática importante para garantir seu funcionamento eficiente, identificando potenciais problemas e otimizar o consumo de energia através da troca do equipamento, manutenções periódicas ou configurações de uso diferente. Através da medição do consumo em tempo real fica mais simples de identificar onde está o maior gargalo das faturas de energia. Isso possibilita identificar e tomar medidas que possam sanar tal problema.

O projeto possibilita o registro de dados, e com isso consegue registrar dados de potência ao longo do tempo, consegue-se fazer uma análise de padrões de consumo, identificação de tendência e comparação de dados em diferentes períodos. Isso permite fornecer percepções imediatas sobre o desempenho e detectar variações que possam indicar problemas.

Outrossim, a previsão de desgaste do equipamento à medida que a corrente aumenta dependerá do tipo específico de equipamento em questão e de como a corrente afeta seus componentes. Podemos citar alguns problemas ocasionados pela corrente, como, aquecimento de componentes, efeitos eletromagnéticos, estresses mecânicos, desgaste de contatos elétricos, aquecimento de cabos, entre outros.

O projeto tem o viés da manutenção preditiva, onde é possível realizar uma previsão do desgaste do equipamento através do monitoramento e visualização de aumento a longo prazo da corrente. Com isso, identificar e tomar decisões no princípio

da falha, agendar manutenções preventivas ou até mesmo corretivas planejadas, é um dos benefícios do dispositivo. Conforme apresentado no referencial teórico, a manutenção preditiva possui quatro principais pontos, sensoramento, que para esse projeto foi utilizado um sensor de corrente não invasivo, em segundo tem-se a aquisição dos dados, utilizado um microcontrolador para realizar a filtragem e processamento dos dados lidos pelo sensor e posteriormente enviar os valores para uma nuvem IoT para que seja monitorado remotamente. Em terceiro tem a detecção da falha, que para esse equipamento precisaria de mais tempo de monitoramento para poder identificar alguma anomalia no mesmo. O quarto passo seria o diagnóstico dessa falha, esse passo seria realizado por uma pessoa com capacidade de identificar e processar esses dados ou implementar o aprendizado de máquina no sistema e gerar alertas com relatórios.

O comportamento da corrente se dará através de uma média constante ao longo do tempo e será preciso identificar padrões anormais de leitura, como picos de corrente, flutuações ou correntes harmônicas. Algum desses sinais vai indicar que o equipamento começou a sofrer algum tipo de desgaste. O ideal é ter um sistema capaz de identificar essas anomalias e gerar relatórios junto a alertas personalizados para que o responsável pelo ativo seja notificado dessas ocasiões.

Esse projeto visou o monitoramento da corrente em tempo real e com a implementação do registro de potência e consumo do equipamento. Não foi possível realizar um estudo do tempo de vida útil remanescente do equipamento monitorado devido à falta de dados e tempo hábil para finalização, ficando como trabalho futuro. Para elaborar o estudo seria preciso fazer a coleta de dados do equipamento, como, data de fabricação, a data da primeira falha do equipamento, coletas das leituras de corrente e potência. Após isso, seria realizado um tratamento dos dados, como a estatística descritiva dos dados: média, desvio, máximos e mínimos. O próximo passo seria a verificação dos dados, identificar inconsistências nos dados, ou valores discrepantes. Por último, seria realizado a inferência estatística, que é a identificação do modelo de vida útil do equipamento medido, ou seja, é a probabilidade de o equipamento falhar em determinado tempo (Ferrari; Sanches, 2017).

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O projeto de monitoramento de corrente elétrica baseado em IoT foi uma contribuição valiosa para a gestão eficiente de energia e a segurança elétrica. Esse sistema se baseou no projeto do Fabrício, citado na revisão bibliográfica, Monitoramento de equipamentos elétricos industriais utilizando iot. A ideia central era o monitoramento da corrente, porém, visando expandir mais a análise dos resultados, foi incluído a potência e o consumo do condicionador de ar. Essas variáveis não foram abordadas no projeto do Fabrício, porém, para esse sistema, foi observado e concluído que monitorar a potência e o consumo do equipamento geraria dados valiosos para uma gestão eficiente de energia.

Outro comparativo entre esse sistema e ao de Fabrício, é a relação de entrega de dados. Para esse sistema foi implementado uma conexão direta entre o microcontrolador e a nuvem do Blynky. Já para o de Fabrício, percebe-se que o caminho dos dados é feito por conexão USB que são enviados para um banco de dados em um computador, e após isso, um aplicativo coleta esses valores no banco de dados e faz o envio das leituras para um sistema IoT. Considerando uma falha entre esses sistemas, pode acarretar um dado não confiável ou a não entrega do mesmo. Portanto, esse sistema possui um caminho mais simples e rápido, por utilizar uma conexão direta na rede.

No entanto, é importante ressaltar que o monitoramento de corrente elétrica de dados não se limita apenas a coleta. As informações coletadas devem ser usadas de maneira inteligente para melhorar a eficiência energética, identificar problemas elétricos em tempo real e evitar desperdício de recursos.

Em resumo, um projeto de monitoramento de corrente elétrica IoT é uma excelente maneira de utilizar a tecnologia para melhorar a gestão de energia e a segurança elétrica. O protótipo se mostrou muito eficiente e bastante confiável em relação a entrega de dados, podendo ser utilizado em ambiente de fábrica onde se tem motores elétricos, entre outros equipamentos de alto valor que podem apresentar algum tipo de defeito vindos de correntes elevadas, como é o caso de uma sobrecarga em um determinado motor elétrico, quando é submetido a uma corrente nominal acima do esperado, pode gerar superaquecimento e reduzir sua vida útil.

O sistema pode se encaixar como uma técnica preditiva, a qual pode antecipar uma eventual falha do equipamento ainda na sua origem, isso tudo proporcionado

pela utilização do sistema IoT, que possibilita visualizar correntes elétricas de um determinado equipamento em tempo real e poder tomar decisões com base em históricos de medições.

O monitoramento contínuo da corrente elétrica pode identificar padrões de consumo e ineficiências. Com base nesses dados, gestores de uma planta podem otimizar o uso de energia, identificando equipamentos que consomem mais do que o necessário e tomando medidas para reduzir o desperdício.

5 TRABALHOS FUTUROS

Para o futuro, pode se considerar expandir o projeto, incorporando aprendizado de máquina para prever problemas elétricos antes que eles ocorram, criar alertas personalizados e automatizar ações corretivas. Além disso, a integração com sistemas de gerenciamento de energia, automação residencial e industrial pode fornecer um ambiente mais eficiente e seguro.

A criação de alertas personalizados via e-mail, ou mensagens de texto pode ser uma aplicação muito vantajosa, tendo em vista que muitos não possuem o hábito de abrir sistemas mais complexos com leitura de gráficos. Hoje é comum a utilização de celulares em todos os ambientes industriais, o que pode ser benéfico para a implementação do sistema. Com alertas definidos, é possível criar um fluxo de decisão dentro da empresa, podendo reduzir tempo e custo.

Além disso, o projeto pode ser implementado junto a algum sistema ERP (Enterprise Resource Planning), com geração de ordens de serviço para atuação direta por equipe qualificada, quando identificado alguma anormalidade pelo sistema de monitoramento.

Próximo passo será o teste do sensor SCT-013 em motores elétricos com uma corrente nominal bem elevada para que seja testado a confiabilidade do sistema quando submetido a correntes próximas ao seu limite. Também será implementado uma bateria no circuito para que o sistema seja alocado em campo, sem a necessidade de uma alimentação externa.

Também será avaliado a possibilidade da implementação do sensor de tensão no projeto para que seja possível acompanhar a tensão aplicada no sistema e as informações de potência e consumo sejam muito mais precisas. Juntamente a isso,

será realizado um estudo do tempo de vida útil remanescente do equipamento monitorado.

6 REFERÊNCIAS

FABRÍCIO, Marcos Aurélio. **Monitoramento de equipamentos elétricos industriais utilizando IoT**. 2018. Dissertação (Mestrado em Gestão de Redes de Telecomunicação) – Universidade Católica de Campinas.

FILHO, Mauro Faccioni. Internet das coisas. Unisul Virtual, 2016.

CUNHA, Caio Henrique Oliveira; BATISTA, Lêda Sandriny Correia. Aplicação de Internet of Things no desenvolvimento de um sistema de monitoramento e gerenciamento de energia elétrica. Revista de Informática Aplicada, v. 14, n. 2, 2018.

TARANTO, Thales Correa. **Implantação de um sistema de monitoramento de temperatura baseado em IoT visando manutenção preditiva de equipamentos de processamento histológico**. 2022. (Bacharel em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Fluminense.

SOARES, Raphael F. R. Duarte. **Comparação entre protocolos da camada de aplicação para IoT**. 2019. Monografia (Bacharel em Sistemas de Informação) – Universidade Federal Rural de Pernambuco.

ROTTA, Giovanni; CHARÃO, Andrea; DANTAS, Mario. Um estudo sobre protocolos de comunicação para ambientes de internet das coisas. In: Anais da XVII Escola Regional de Alto Desempenho do Estado do Rio Grande do Sul. SBC, 2017.

LEITE, JR Emiliano; MARTINS, Paulo S.; URSINI, E. A Internet das Coisas (IoT): Tecnologias e Aplicações. In: Brazilian Technology Symposium. 2017.

BEZERRA, C. et al. REMAINING USEFUL LIFE PREDICTION VIA SUPPORT VECTOR MACHINE Palavras-chave: Remaining Useful Life, Support Vector Machine, Prognostic Health and Management XXXVI ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO. [s.l: s.n.]. Disponível em: <https://abepro.org.br/biblioteca/TN_WIC_231_350_29756.pdf>. Acesso em: 8 dez. 2023.7.

MARTINS, Ismael Rodrigues; ZEM, José Luís. Estudo dos protocolos de comunicação MQTT e COaP para aplicações machine-to-machine e Internet das coisas. 2015.

LUGLI, Alexandre Baratella; SOBRINHO, Darlan Guilherme. Tecnologias Wireless para automação Industrial: Wireless_Hart, Bluetooth, Wisa, Wi-fi, ZigBee e Sp-100. Instituto Nacional de Telecomunicações Inatel, 2012.

TEIXEIRA, Grazielle Bonaldi; ALMEIDA, João Víctor Peroni de. **Rede LoRa® e protocolo LoRaWAN® aplicados na agricultura de precisão no Brasil**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná

ESPRESSIF. **Ficha técnica da série ESP32 incluindo.** [s.l.: s.n.]. Disponível em: <https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf> Acesso: 16 dez. 2023.

FERRARI, Amanda Q. Avoleta; SANCHES, Lars. PROPOSIÇÃO DE MODELO DO CÁLCULO DE VIDA ÚTIL PARA EMPRESAS DE PAGAMENTOS POR CARTÃO.

SCT-013.Split-Core Current Transformer. Disponível em: <https://nicegear.co.nz/obj/pdf/SCT-013-datasheet.pdf>. Acesso: 17 dez. 2023.