INSTITUTO FEDERAL DE SANTA CATARINA

MARCONE AUGUSTO DE PAULA LOUZADA

PLATAFORMA PARA MONITORAMENTO DE TRANSFORMADORES DE DISTRIBUIÇÃO UTILIZANDO A TECNOLOGIA LORAWAN

São José - SC

Setembro/2021

PLATAFORMA PARA MONITORAMENTO DE TRANSFORMADORES DE DISTRIBUIÇÃO UTILIZANDO A TECNOLOGIA LORAWAN

Trabalho de conclusão de curso apresentado à Coordenadoria do Curso de Engenharia de Telecomunicações do campus São José do Instituto Federal de Santa Catarina para a aprovação do tema perante banca na disciplina de TCC.

Orientador: Mario de Noronha Neto

Coorientador: Roberto Alexandre Dias

São José - SC

Setembro/2021

Marcone Augusto de Paula Louzada
PLATAFORMA PARA MONITORAMENTO DE TRANSFORMADORES DE DISTRIBUIÇÃO UTILIZANDO A TECNOLOGIA LORAWAN/ Marcone Augusto de Paula Louzada. – São José - SC, Setembro/2021-
76 p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Orientador: Mario de Noronha Neto

Monografia (Graduação) – Instituto Federal de Santa Catarina – IFSC
Campus São José
Engenharia de Telecomunicações, Setembro/2021.

1. Transformadores de distribuição. 2. Monitoramento on-line. 2. IoT. 3. LoRaWan. I. Mario de Noronha Neto. II. Instituto Federal de Santa Catarina. III. Campus São José. IV. Plataforma para monitoramento de transformadores de distribuição utilizando a tecnologia LoRaWAN

MARCONE AUGUSTO DE PAULA LOUZADA

PLATAFORMA PARA MONITORAMENTO DE TRANSFORMADORES DE DISTRIBUIÇÃO UTILIZANDO A TECNOLOGIA LORAWAN

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do título de Engenheiro de Telecomunicações, pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, e aprovado na sua forma final pela comissão avaliadora abaixo indicada.

São José - SC, 15 de Setembro de 2021:

Mario de Noronha Neto, Dr.
Orientador
Instituto Federal de Santa Catarina

Arliones Stevert Hoeller Junior, Dr.
Instituto Federal de Santa Catarina

Pedro Armando da Silva Jr, Dr.
Instituto Federal de Santa Catarina

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus familiares, em especial aos meus pais, que mesmo de longe nunca deixaram de me apoiar, incentivar, torcendo sempre pelo meu sucesso. Sou e serei eternamente grato por tudo que vocês fizeram e continuam fazendo por mim.

Agradeço também a minha companheira Tamires, pelo incentivo constante, me auxiliando a passar por todos os percalços ocorridos neste intervalo. Aos meus amigos e colegas, pelas conversas, copos de chope e momentos de descontração.

Agradeço ao Instituto Federal de Santa Catarina, seus funcionários e seu corpo docente, pela oportunidade concedida, por toda dedicação e ensinamentos. Aos meus orientadores e professores que participaram direta ou indiretamente do meu desenvolvimento. Sobretudo ao professor Noronha, por todo apoio concedido na execução desse projeto, pelos conselhos e conversas.

Por fim, agradeço a todas as pessoas que de alguma forma contribuíram para essa caminhada. Muito obrigado!

“Viva como se fosse morrer amanhã.
Aprenda como se você fosse viver para sempre.”
(Mahatma Gandhi)

RESUMO

O mercado de produção e distribuição de energia vem enfrentando, ao longo dos anos, um aumento de demanda constante pelos seus clientes. Além disso, as empresas desse mercado são submetidas a rigorosos parâmetros de qualidade pelos órgãos regulamentadores. Para suprir essa demanda e atender aos requisitos necessários, as empresas devem extrair o máximo de seu sistema instalado, operando dentro dos parâmetros de qualidade requeridos. Conhecer as características de operação dos transformadores de distribuição em tempo real, se torna fundamental e pode possibilitar um melhor direcionamento das intervenções necessárias no equipamento. Desta forma, neste trabalho, desenvolveu-se uma plataforma para o monitoramento *on-line* de transformadores de distribuição de energia e avaliar os custos relacionados a sua produção. Adotou-se o conceito de desenvolvimento de um *Minimum Viable Product* (MVP), onde confeccionou-se um *endpoint* capaz de mensurar a tensão, corrente e temperatura dos equipamentos e, posteriormente, enviá-los utilizando a rede *Internet of Things* (IoT) provida pela *The Things Network* (TTN), através do protocolo LoRaWAN. Os dados foram integrados à plataforma Ubidots para apresentá-los graficamente ao usuário. A fim de validar o funcionamento da plataforma, realizou-se dois testes em quadros de distribuição de energia elétrica no IFSC, câmpus São José. No primeiro teste, realizou-se a coleta dos dados, comparando-os ao medidor de energia CW240. Obteve-se resultados satisfatórios para todos os parâmetros, com exceção da corrente elétrica, que apresentou discrepância de até 6,9 %. No segundo teste, a diferença foi mitigada através do *software*, realizando ajustes nas variáveis de calibração dos sensores. Com a realização dos testes, foi possível constatar o funcionamento da plataforma, estimando o seu funcionamento junto a um transformador de distribuição. Já em relação ao mercado e aos custos envolvidos, foram encontradas soluções similares, porém, observando as suas características, pode-se afirmar que elas são voltadas a transformadores de alta potência.

Palavras-chave: Transformadores de distribuição, Monitoramento *on-line*, IoT, LoRaWAN.

ABSTRACT

Over the years, the energy production and distribution market has faced a constant increase in demand from its customers. In addition, companies in this market are subject to strict quality parameters by regulatory bodies. To meet this demand and meet the necessary requirements, companies must extract the most from their installed system, operating within the required quality parameters. Knowing the operational characteristics of distribution transformers in real time becomes essential and can enable a better targeting of the necessary interventions in the equipment. Thus, in this work, a platform for online monitoring of power distribution transformers and for the evaluation of costs related to their production was developed. The concept of developing a Minimum Viable Product (MVP) was adopted, where an endpoint capable of measuring the voltage, current and temperature of the equipment was created and, subsequently, sending them through the Internet of Things (IoT) network provided. by The Things Network (TTN), through the LoRaWAN protocol. Data were integrated into the Ubidots platform to graphically present them to the user. To validate the platform's operation, two tests were carried out on electrical energy distribution boards at the IFSC, São José campus. In the first test, data were collected, comparing them to the CW240 energy meter. Satisfactory results were obtained for all parameters, with the exception of electrical current, which presented a discrepancy of up to 6.9 %. In the second test, the difference was mitigated through the software, making adjustments to the sensor calibration variables. With the tests carried out, it was possible to verify the platform's operation, estimating its operation in conjunction with a distribution transformer. In relation to the market and the costs involved, similar solutions were found, however, observing their characteristics, it can be said that they are aimed at high power transformers.

Keywords: Distribution transformers, Online monitoring, IoT, LoRaWAN.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Produção energética no Brasil. 19
Figura 2 – Tensão induzida em um condutor. 21
Figura 3 – Tensão induzida em um condutor com núcleo magnético. 22
Figura 4 – Funcionamento resumido de um transformador. 22
Figura 5 – Transformador de distribuição. 23
Figura 6 – Bobina e núcleo de um transformador. 24
Figura 7 – Componentes externos de um transformador de potência. 25
Figura 8 – Arquitetura da rede *Long Range* (LoRa). 32
Figura 9 – Funcionalidade do *gateway*. 33
Figura 10 – Ciclo de *feedback*, construir, medir e aprender. 35
Figura 11 – Arquitetura da rede *The Things Network* (TTN). 37
Figura 12 – Exemplo de *dashboard* Ubidots. 38
Figura 13 – Sensor de temperatura DS18B20. 41
Figura 14 – Sensor de temperatura DS18B20 resitente à água. 42
Figura 15 – Circuito montado para coleta de temperatura com o sensor DS18B20. 42
Figura 16 – Módulo ZMPT101B. 43
Figura 17 – Esquema de ligação do sensor de tensão ZMPT101B. 43
Figura 18 – Sensor de corrente SCT-013-00. 44
Figura 19 – Instalação correta do sensor de corrente SCT-013-00. 44
Figura 20 – Princípio de funcionamento do sensor de corrente SCT-013-00. 45
Figura 21 – Circuito para o sensor de corrente SCT-013-00. 46
Figura 22 – *Endpoint* com *transceiver Long Range Wide Area Networking* (LoRaWAN). 47
Figura 23 – Conexões entre Arduino Mega e módulo LoRaWAN. 47
Figura 24 – *Gateway* ITG 200 *Indoor*. 48
Figura 25 – *Gateway* ITG 200 montado em caixa hermética. 48
Figura 26 – Menu Console na TTN. 49
Figura 27 – *Gateway* registrado na TTN. 50
Figura 28 – *Application* registrada na TTN. 51
Figura 29 – *Payload Formats* na TTN. 52
Figura 30 – Dados recebidos na plataforma Ubidots. 52
Figura 31 – Eventos para monitoramento da qualidade dos níveis de tensão. 53
Figura 32 – *Dashboard* completo no Ubidots. 53
Figura 33 – Caixa hermética com o dispositivo e os componentes utilizados para coleta dos dados. 54
Figura 34 – Esquemático de ligação entre a placa de conexão dos sensores e o Arduino Mega. . . . 55
Figura 35 – Máquina de estados de funcionamento do código embarcado no Arduino. 55
Figura 36 – Diagrama completo da plataforma de monitoramento. 56
Figura 37 – Esquemático do circuito otimizado. 57
Figura 38 – *Printed Circuit Board* (PCB) desenvolvida. 58
Figura 39 – PCB renderizada em 3D. 59
Figura 40 – Sugestão de instalação. 61
Figura 41 – Protótipo instalado no Laboratório de Condicionamento de Ar e Eletricidade. 63
Figura 42 – Alertas enviados por e-mail pela plataforma Ubidots. 63
Figura 43 – Medição realizada com o CW240. 64

Figura 44 – Dados mensurados exibidos na plataforma Ubidots. 65
Figura 45 – Plataforma instalada para monitorar consumo do *chiller* de refigeração. 66
Figura 46 – *Dashboard* do monitoramento do *datacenter*. 68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Distribuição das fontes de falhas e defeitos em transformadores de distribuição. 26
Tabela 2 – Principais parâmetros de um transformador divididos por subsistemas. 26
Tabela 2 – Principais parâmetros de um transformador divididos por subsistemas. 27
Tabela 3 – Valores de classificação de tensão. 30
Tabela 4 – Comparativo de tecnologias de comunicação nas faixas de frequências não licenciadas. 31
Tabela 5 – Estruturas de programação de *endpoints*. 33
Tabela 6 – Comparativo entre placas de desenvolvimento Arduino. 36
Tabela 7 – Levantamento com alguns trabalhos que abordam o monitoramento em transformadores de distribuição. 40
Tabela 8 – Componentes utilizados para confecção do circuito. 58
Tabela 9 – Potência aparente mensurada por fase. 64
Tabela 10 – Comparativo dos valores mensurados e erros correspondentes. 66
Tabela 11 – Componentes e custos do protótipo. 68

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ADC *Analog to Digital Converter* . . . 42
ANEEL Agência Nacional de Energia Elétrica . . . 19
BOLA *Better Operations & Life by Analytics* . . . 70
CA Corrente Alternada . . . 27
CDC Comutador de Derivação em Carga . . . 26
CDST Comutador de Derivação sem Tensão . . . 26
CMP Corrente Máxima no Primário . . . 45
CMS Corrente Máxima no Secundário . . . 45
CSS *Chirp Spread Spectrum* . . . 31
DSL *Digital Subscriber Line* . . . 33
DTMS *Distribution Transformer Monitoring System* . . . 69
EUI *Extended Unique Identifier* . . . 48
IDE *Integrated Development Environment* . . . 35
IFSC Instituto Federal de Santa Catarina . . . 46
I/O *Input/Output* . . . 35
IoT *Internet of Things* . . . 18
ISM *Industrial, Scientific and Medical* . . . 30
ITU *International Telecommunication Union* . . . 30
LAN *Local Area Networks* . . . 33
LoRa *Long Range* . . . 13
LoRaWAN *Long Range Wide Area Networking* . . . 13
LPWAN *Low Power Wide Area Network* . . . 30
LTE *Long Term Evolution* . . . 33
MVP *Minimum Viable Product* . . . 18
NB-IoT *Narrowband-IoT* . . . 30
NERsD Grupo de Sistemas Embarcados e Distribuídos . . . 46
PCB *Printed Circuit Board* . . . 13
PRODIST Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional . . . 29
PSTN *Public Switched Telephone Network* . . . 33
RMS *Root Mean Square* . . . 27
TTN *The Things Network* . . . 13

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO . . . 19
1.1 Objetivo Geral . . . 20
1.1.1 Objetivos Específicos . . . 20
1.2 Organização do Texto . . . 20

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA . . . 21
2.1 Transformadores . . . 21
2.1.1 Transformadores de Distribuição . . . 23
2.1.2 Principais Defeitos em Transformadores de Distribuição . . . 25
2.1.3 Grandezas Monitoradas . . . 26
2.2 Monitoramento de Transformadores de Distribuição . . . 28
2.2.1 *Internet of Things* (IoT) . . . 29
2.3 Tecnologia de Comunicação . . . 30
2.3.1 LoRaWAN . . . 31
2.3.2 *Endpoint* . . . 32
2.3.3 *Gateway* . . . 33
2.4 *Minimum Viable Product* (MVP) . . . 34
2.4.1 Arduino . . . 35
2.4.2 *The Things Network* (TTN) . . . 36
2.4.3 Ubidots . . . 37

3 DESENVOLVIMENTO . . . 39
3.1 MVP . . . 41
3.1.1 Temperatura . . . 41
3.1.2 Tensão . . . 42
3.1.3 Corrente . . . 43
3.1.4 Módulo de Comunicação . . . 46
3.1.5 Gateway . . . 47
3.1.6 TTN . . . 48
3.1.7 *Dashboard* . . . 50
3.1.8 Protótipo Completo . . . 54
3.2 Otimização de *Hardware* . . . 57

4 TESTES COM MVP . . . 61
4.1 Testes de Campo e Mercado . . . 62
4.1.1 Testes . . . 62
4.1.2 Mercado e Custos . . . 67

5 CONCLUSÕES . . . 71
5.1 Trabalhos Futuros . . . 71

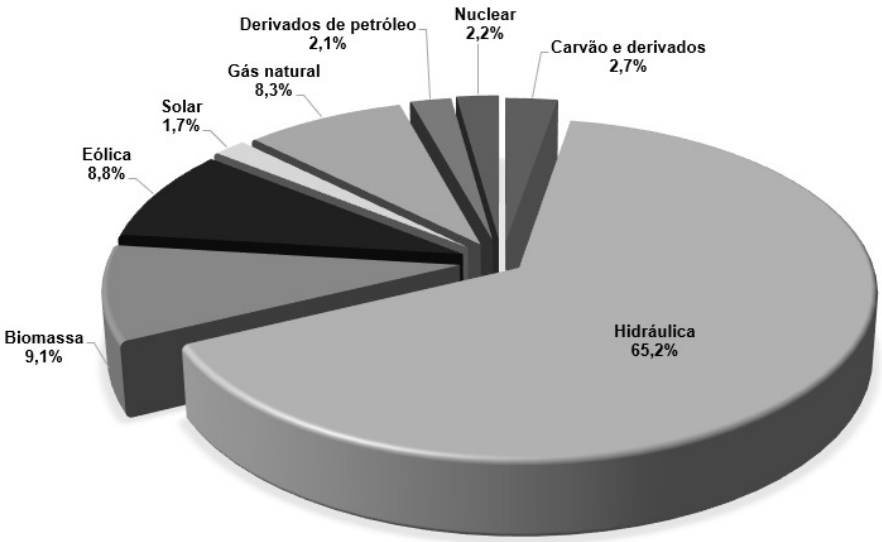
REFERÊNCIAS . . . 73

1 INTRODUÇÃO

Matriz elétrica é o nome dado ao conjunto de fontes utilizadas para geração, transmissão e distribuição de energia elétrica de uma determinada localidade ou país (EPE, 2021). Normalmente essa matriz é dividida em três etapas, sendo elas produção, transmissão e distribuição.

No Brasil, a produção está distribuída conforme a Figura 1, sendo predominante a produção por usinas hidroelétricas. As grandes usinas hidroelétricas brasileiras operam na faixa nominal de 60 Hz, gerando uma tensão de saída que varia entre 6 e 25 kV.

Figura 1 – Produção energética no Brasil.



Fonte: Adaptado de (EPE, 2021).

Para o transporte da energia gerada até as subestações de energia elétrica, que ocorre na etapa de transmissão, a tensão de saída deve ser elevada a níveis mais altos para viabilizar a transmissão em médias e longas distâncias, devido aos fatores econômicos envolvidos. A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), define que para transmissão ou subtransmissão devem ser utilizados níveis de tensão que variam de 13,8 a 750 kV (ANEEL, 2011).

A etapa de distribuição compreende a rede que interliga as subestações aos pontos de consumo, sendo dividida em duas etapas, primária e secundária. Para a distribuição primária, utilizada na fase de distribuição urbana de energia, deve ser adotado um nível de tensão de 13,8 ou 34,5 kV, enquanto na distribuição secundária, que é destinada aos consumidores finais, devem ser adotados níveis de tensão entre 127 e 440 V (ANEEL, 2011).

Todas as transformações necessárias durante a produção, transmissão e distribuição de energia, seja para o aumento ou redução da tensão, são realizadas através de transformadores. Estes equipamentos são definidos como dispositivos estáticos, utilizados para transferir energia por indução eletromagnética entre circuitos de mesma frequência de operação, geralmente com valores de corrente e tensão alterados (WINDERS, 2002).

Transformadores de distribuição são o ponto de conexão entre a concessionária e o cliente de baixa tensão, fazendo parte da distribuição secundária. A manutenção preventiva desses equipamentos

é, geralmente, realizada através de inspeções e ações periódicas, em intervalos de tempo sugeridos pelo fabricante, a fim de evitar uma possível falha de operação (CIGRE, 2013).

As ações periódicas resultam em desligamentos desses equipamentos, que podem ser desnecessários. Visando um maior período ininterrupto de funcionamento, este trabalho visa desenvolver um sistema capaz de monitorar, em tempo real, o funcionamento de um transformador de distribuição, proporcionando assim, um melhor conhecimento das suas características de operação e possíveis anomalias.

1.1 Objetivo Geral

Desenvolver uma plataforma capaz de monitorar, em tempo real, a operação de um transformador de distribuição, sendo capaz de descrever as suas características de funcionamento, principalmente a qualidade da tensão entregue, e assim auxiliar e direcionar as intervenções necessárias para sua manutenção. A solução busca custos acessíveis que possibilitem o seu desenvolvimento e aplicação. Entretanto, para atingir esse objetivo, os objetivos específicos a seguir devem ser alcançados.

1.1.1 Objetivos Específicos

- Definir os parâmetros que representam as características de funcionamento de um transformador, considerando os custos para aquisição de dados;
- Desenvolvimento de um *hardware* capaz de coletar as condições e variáveis de operação de um transformador de distribuição;
- Desenvolvimento do *firmware*, que será o *software* embarcado no *hardware* possibilitando o seu controle e envio das informações coletadas;
- Apresentar os dados através de um *front-end*;
- Realizar uma análise de mercado com relação ao custo e soluções similares à plataforma.

1.2 Organização do Texto

Este documento está estruturado em 5 capítulos. O Capítulo 1 inclui esta seção introdutória, onde apresenta-se o objetivo geral e específicos propostos nesta pesquisa.

No Capítulo 2 apresenta-se os principais fundamentos teóricos desejáveis para proporcionar um melhor entendimento do trabalho, como uma breve explicação sobre transformadores e seu princípio de funcionamento, transformadores de distribuição e seus principais defeitos e grandezas que podem ser monitoradas para proporcionar um melhor entendimento da sua vida útil. Modelos de manutenção empregados em transformadores de distribuição, a tecnologia de comunicação utilizada e as ferramentas de desenvolvimento utilizadas no trabalho.

O Capítulo 3 aborda as etapas de desenvolvimento, com os sensores adotados, os circuitos desenvolvidos para coleta dos dados desejados, as configurações realizadas nas ferramentas de desenvolvimento, além do recebimento e apresentação dos dados ao usuário.

O Capítulo 4 trata dos testes realizados com o protótipo desenvolvido, os custos necessários para a implementação do protótipo e dispositivos disponíveis no mercado.

Por fim, o Capítulo 5 refere-se as conclusões do trabalho e sugestões de trabalhos futuros, sugerindo continuidade do trabalho ou outra abordagem com mesmo tema do projeto.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

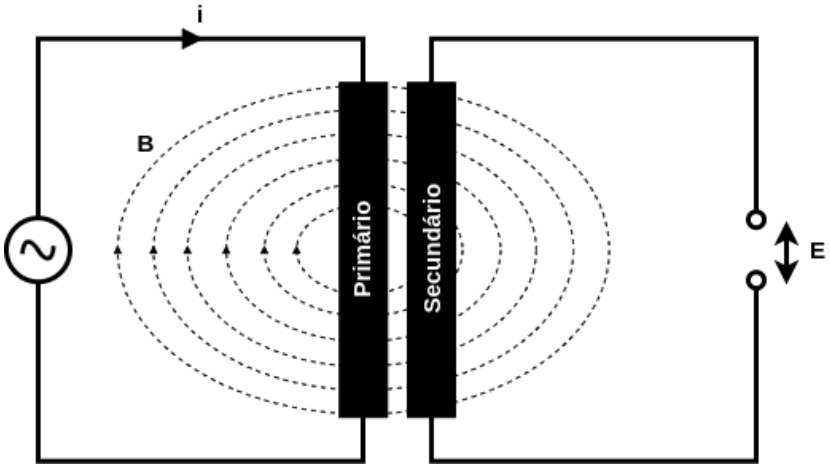
2.1 Transformadores

Transformadores são definidos como dispositivos estáticos, possuindo um ou mais enrolamentos acoplados, podendo ou não haver núcleo magnético para realizar o acoplamento mútuo entre os circuitos. São exclusivamente utilizados para transferir energia por indução eletromagnética entre circuitos de mesma frequência de operação, geralmente com valores de tensão e corrente alterados (WINDERS, 2002).

O princípio de funcionamento básico de todos os transformadores, independente do material de construção do núcleo, é o eletromagnetismo. Isso significa que, se aproximar um condutor transportando corrente variável de um segundo condutor, o fluxo magnético variável presente no primeiro, será transferido para o segundo induzindo a ele uma tensão (WINDERS, 2002).

A Figura 2 apresenta o princípio básico de funcionamento de um transformador, onde uma tensão alternada é conectada ao condutor primário, implicando no surgimento de uma corrente alternada, assim tem-se um campo magnético variável sendo gerado no entorno do condutor. O condutor secundário, localizado a uma distância que permite a conexão ao fluxo magnético gerado no primário, sofrerá indução e assim haverá uma tensão induzida (WINDERS, 2002).

Figura 2 – Tensão induzida em um condutor.

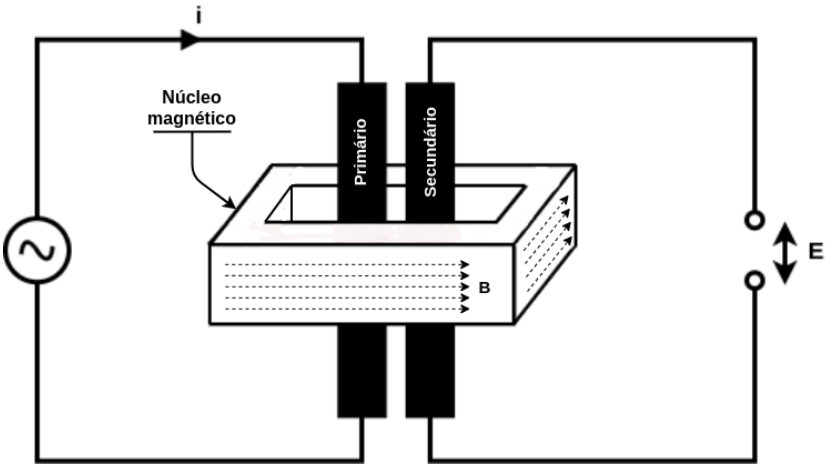


i = Corrente; B = Campo magnético; E = Tensão induzida.
Fonte: Adaptado de Winders (2002).

O sistema apresentado na Figura 2 não apresenta eficiência satisfatória, pois apenas uma parte do fluxo magnético será conectado ao secundário. A fim de alcançar uma melhor eficiência, o campo magnético deve ser direcionado, acrescentando um material que apresente afinidade ao fluxo magnético. Esta modificação pode ser observada na Figura 3, onde o fluxo magnético produzido no condutor primário será acoplado ao condutor secundário, elevando a sua eficiência (WINDERS, 2002).

Pode-se exemplificar, matematicamente, o funcionamento de um transformador ideal, como demonstra a Figura 4. Aplicando uma tensão alternada U_1, tem-se a corrente I_1 circulando pelo enrolamento primário, gerando o fluxo magnético ϕ_1. Grande parte do fluxo ficará confinado no núcleo, gerando as forças eletromotriz E_1 e E_2, que são proporcionais ao número de espiras contidos nos enrolamentos, representados por N_1 e N_2.

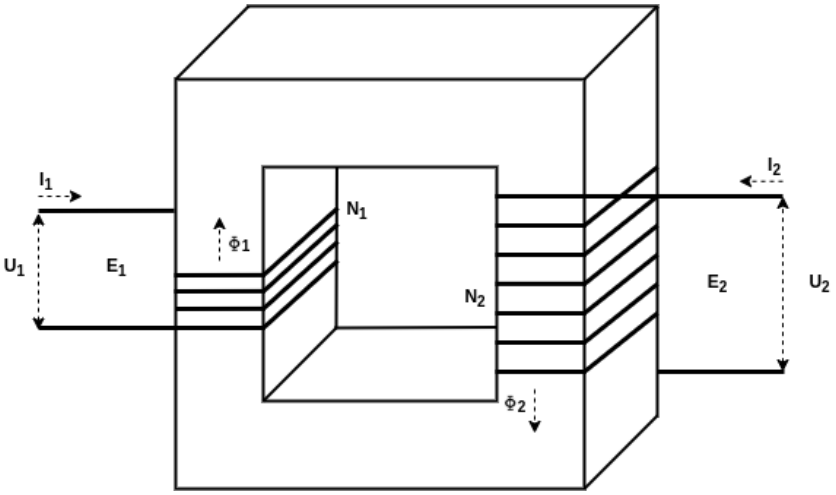
Figura 3 – Tensão induzida em um condutor com núcleo magnético.



i = Corrente; B = Campo magnético; E = Tensão induzida.
Fonte: Adaptado de Winders (2002).

Sendo assim, a Equação (2.1), representa a relação de transformação que pode ser obtida em um transformador. Considerando que as tensões U_1 e U_2 são praticamente equivalentes as forças eletromotrizes induzidas E_1 e E_2, respectivamente, pode-se obter a relação de transformação através da Equação (2.2) (CIGRE, 2013).

Figura 4 – Funcionamento resumido de um transformador.



Fonte: Adaptado de Cigre (2013).

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} \tag{2.1}$$

$$U_1 = \frac{N_1}{N_2} \times U_2 \tag{2.2}$$

Vale ressaltar que a eficiência de um transformador real nunca será máxima pois, mesmo com a presença do núcleo para diminuir as correntes parasitas e aumentar a eficiência do acoplamento entre o primário e o secundário, uma parte deste fluxo será perdida. Além disso, outra perda inevitável de um transformador é a perda térmica, provocada pelo aquecimento dos condutores primários e secundários.

Porém, com o avanço da tecnologia de fabricação os transformadores modernos são construidos para alcançar uma elevada eficiência, entre 96 e 99 % (AMALFA, 2007).

Os transformadores são utilizados em diversas aplicações como (i) transmissão de energia elétrica, aumentando ou diminuindo a tensão e corrente em um circuito alternado; (ii) transmissão de sinais com correspondência de impedância para máxima transferência de potência; e também (iii) na eletrônica de potência, na conversão e controle de energia (HURLEY; WOLFLE, 2013). Neste trabalho em especial, serão abordados transformadores de distribuição, também conhecidos por transformadores de potência. Este tipo de equipamento é amplamente utilizado pelas concessionárias de energia elétrica para promover a distribuição de energia elétrica.

2.1.1 Transformadores de Distribuição

No final do século XIX e início do século XX ocorreu uma grande transformação no conhecimento sobre energia elétrica, especialmente quando Thomas Alva Edison inventou a lâmpada e Nicola Tesla apresentou o desenvolvimento de sistemas elétricos polifásicos. Estas descobertas e invenções deram início ao manuseio e utilização da energia elétrica dos dias atuais (SOUZA, 2008).

Inicialmente o uso da energia elétrica era limitado a poucos consumidores, pois a eletricidade era distribuída em baixa tensão e corrente contínua, o que implicava diretamente na limitação pelas perdas e quedas de tensão proporcionadas pelos condutores elétricos (SOUZA, 2008). Os primeiros relatos de uso de transformadores de potência ocorreram em 1890, com a primeira instalação de linha de transmissão em Budapeste na Hungria, onde foi implementado um transformador monofásico de 15 kVA. O primeiro transformador trifásico foi construído e patenteado em 1891, por Mikhail Dolivo-Dobrovolsky (M.LóPEZ-FERNáNDEZ; ERTAN; TUROWSKI, 2013).

Os primeiros transformadores utilizados apresentavam baixo rendimento e perdas elevadas. Porém, ao longo dos anos, a construção e a tecnologia dos transformadores evoluíram, proporcionando, principalmente, um melhor rendimento durante a sua utilização (SOUZA, 2008). Na Figura 5, apresenta-se um exemplo de transformador de distribuição moderno, de modelo nacional, produzido pela empresa WEG.

Figura 5 – Transformador de distribuição.

Fonte: WEG (2020).

Este tipo de transformador é conhecido como transformador de distribuição imerso em óleo, sendo o modelo mais utilizado na distribuição de energia. O óleo tem papel fundamental na construção do

transformador, atuando como dielétrico e na refrigeração do sistema (SOUZA, 2008).

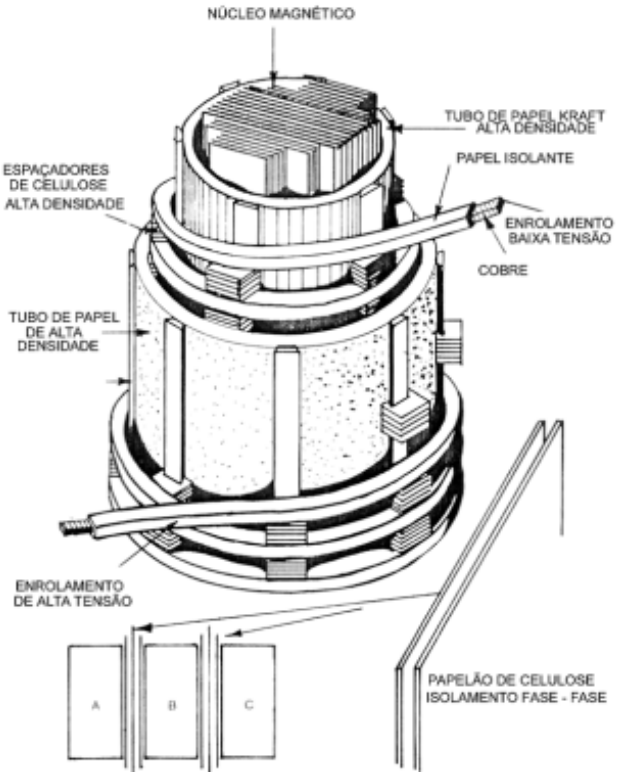
Os transformadores utilizados pelas maiores empresas do mercado de energia brasileiro como CELESC (2020), CELG (2020), COPEL (2020) e ENERGISA (2020) são:

- **Monofásicos:** 10, 15, 25 e 37,5 kVA;
- **Trifásicos:** 30, 45, 75, 112.5, 150, 225 e 300 kVA.

A expectativa da vida útil de um transformador é avaliada a partir do seu isolamento sólido, que é o componente mais suscetível ao envelhecimento. A isolação sólida não pode ser reparada ou substituída, sem que seja necessário desmontar, completamente, o equipamento para troca de todos os enrolamentos, o que representa custos significativos (CIGRE, 2013).

O papel isolante empregado em transformadores geralmente é produzido a partir da madeira, em um processo denominado Kraft, sendo seu principal componente a celulose. Na Figura 6 pode-se observar o esquema de uma bobina de um transformador e os enrolamentos A, B e C, separados por papelão de celulose (CIGRE, 2013). Geralmente, o fim da vida útil é considerado quando a resistência à tração mecânica do papel isolante atinge 50 % do valor da resistência quando comparado a um equipamento novo (GAUTERIO, 2006).

Figura 6 – Bobina e núcleo de um transformador.



Fonte: Cigre (2013).

Os transformadores possuem uma expectativa de vida útil mínima de 180.000 horas, ou seja, acima de 20 anos de operação (IEEE STD C57.12.00^{TM}, 2015). Além disso, estão entre os equipamentos mais caros e críticos nas plantas de distribuição de energia elétrica (ALMEIDA et al., 2007).

A manutenção realizada nos transformadores tem papel fundamental para alcançar, e até mesmo superar, a sua expectativa de vida útil. As concessionárias brasileiras são remuneradas de acordo com

a disponibilidade dos equipamentos e linhas de transmissão, e são penalizadas pelas indisponibilidades destes (CIGRE, 2013). A busca pela otimização dos processos de manutenção e diagnóstico são necessárias devido ao apelo econômico de aquisição, reparo e substituição dos equipamentos, podendo chegar a milhões de dólares (SOUZA, 2008). Os principais modelos de manutenção empregados nos transformadores são (CIGRE, 2013):

- **Manutenção preventiva ou baseada no tempo:** a intervenção é executada em intervalos de tempos pré-definidos, é uma política muito utilizada devido a sua baixa complexidade;
- **Manutenção preventiva ou baseada na condição:** subentende a possibilidade de identificar um motivo ou necessidade de haver uma intervenção de manutenção;
- **Manutenção corretiva:** quando alguma intervenção se faz necessária para a continuidade da operação do equipamento;
- **Manutenção preditiva ou monitoramento *on-line* contínuo:** utilização de algum sistema para monitoramento *on-line* e contínuo de um transformador.

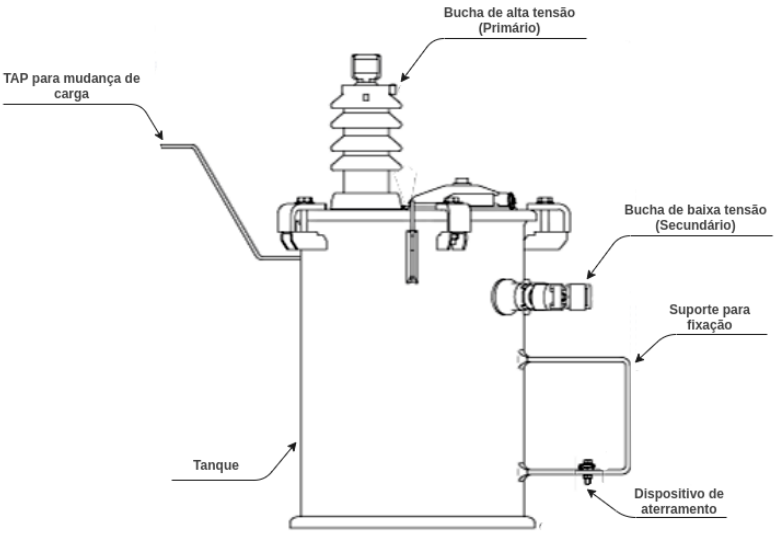
2.1.2 Principais Defeitos em Transformadores de Distribuição

Com a evolução das tecnologias para desenvolvimento de sensores, os parâmetros de operação de um transformador podem ser mensurados em, praticamente, sua totalidade (ALMEIDA et al., 2007). Com isso, os principais defeitos e suas possíveis causas também passaram a ser melhor conhecidas.

Por se tratarem de equipamentos de grande porte e elevada importância, uma falha em um transformador geralmente representa uma interrupção imediata no sistema elétrico (LIMA, 2014). Sendo assim, são considerados defeitos eventos que deixem o transformador temporariamente ou permanentemente com funcionamento irregular ou abaixo da sua capacidade nominal (SOUZA, 2008).

Na Figura 7, estão apresentados os principais componentes externos presentes em um transformador de distribuição. Somados aos componentes internos (núcleo, isolamento, enrolamento de alta e baixa tensão) essas são as principais fontes de falhas ou defeitos em um transformador (ALMEIDA et al., 2007).

Figura 7 – Componentes externos de um transformador de potência.



Fonte: Adaptado de ITAM (2020).

Os componentes de um transformador podem ser agrupados da seguinte forma:

- **Parte ativa:** enrolamentos, núcleo e isolamento;
- **Buchas ou terminais:** primário e secundário;
- **Sistema de refrigeração:** radiadores e óleo;
- **Comutadores:** Comutador de Derivação em Carga (CDC) e Comutador de Derivação sem Tensão (CDST);
- **tanque e acessórios:** Tanque, válvulas, registros, aterramento e tubulações;
- **Sistema de proteção:** válvulas de alívio, relé de pressão entre outras proteções.

De acordo com essa divisão, na Tabela 1, estão representados percentualmente as fontes de ocorrências de falhas.

Tabela 1 – Distribuição das fontes de falhas e defeitos em transformadores de distribuição.

Componentes	**Distribuição (%)**
Comutadores	41
Parte ativa	21
Buchas e terminais	12
Tanque e fluido	13
Acessórios	12

Fonte: Adaptado de Almeida et al. (2007).

2.1.3 Grandezas Monitoradas

Com o aumento da concorrência e os parâmetros de qualidade de serviço, nos quais as empresas responsáveis pela distribuição de energia elétrica estão submetidas, torna-se cada vez mais necessário a extração do máximo que a planta energética pode fornecer, tanto em capacidade quanto na vida útil de seus equipamentos, como os transformadores de distribuição (SILVA, 2019).

Uma das formas de alcançar esse objetivo é conhecer os parâmetros e características de operação dos transformadores. Estes parâmetros podem ser utilizados para nortear as intervenções feitas nestes equipamentos, aumentando ou reduzindo a frequência de manutenções periódicas. Além disso, as características podem ser observadas para detectar uma sobre ou subutilização do sistema, sendo possível também se resguardar de possíveis falhas (ALMEIDA et al., 2007).

Cada subsistema de um transformador possui requisitos de operação e pode apresentar falhas distintas (SAMIMI; ILKHECHI, 2019). Na Tabela 2, estão apresentados os subsistemas com os principais parâmetros de medição.

Tabela 2 – Principais parâmetros de um transformador divididos por subsistemas.

Subsistema	**Parâmetros de medição**
Parte ativa	gases dissolvidos em óleo
	corrente de carga do transformador
	corrente de curto-circuito do transformador

Tabela 2 – Principais parâmetros de um transformador divididos por subsistemas.

Subsistema	Parâmetros de medição
	tensão de pico da sobretensão do transformador
	tensões primária / secundária / terciária
	temperatura do enrolamento
	temperatura máxima do óleo
	umidade e temperatura no tanque de óleo
Buchas e terminais	capacitância
	corrente de fuga
	tensão da bucha do acoplador capacitivo
Sistema de refrigeração	corrente do motor das bombas de óleo
	tensão de alimentação Corrente Alternada (CA) do sistema
	status das bombas de óleo (liga / desliga)
	corrente de carga do transformador
	corrente do motor de ventiladores
	temperatura ambiente
	temperatura do enrolamento (imagem térmica)
	temperatura máxima do óleo
	temperatura do óleo inferior
Comutadores	corrente de condução do motor
	tensão de alimentação em corrente alternada
	tensão *Root Mean Square* (RMS) do transformador fase-terra
	nível de óleo do comutador
	temperatura do óleo do comutador
	teor de gás no óleo isolante
	teor de umidade no óleo do comutador
Tanque	nível de óleo no tanque
	umidade e temperatura no óleo
	umidade ambiente

Fonte: Adaptado de Samimi e Ilkhechi (2019).

Os subsistemas e suas principais características são:

- **Parte ativa:** a temperatura do enrolamento é diretamente proporcional ao fluxo de corrente que passa por ele. Além disso, a corrente determina a quantidade de fluxo de energia que junto ao monitoramento das tensões, auxilia na estimativa da tensão elétrica no transformador. A corrente de curto circuito auxilia na proteção do transformador, além de definir as tensões eletromecânicas nos enrolamentos (WANG et al., 2016).

  Para verificar a incidência de descargas parciais, que são falhas localizadas no isolamento de alta tensão sem unir completamente os enrolamentos (MA et al., 2018), é indicado a análise do óleo, pois a sua incidência gera decomposição do óleo, gerando alguns gases como Hidrogênio (H_2), Metano (CH_4), Acetileno (C_2H_2), Etileno (C_2H_4), Etano (C_2H_6), Monóxido de Carbono (CO) e Dióxido de Carbono (CO_2). O monitoramento da temperatura do óleo e enrolamentos é necessário para o

conhecimento do estado térmico do transformador e prioritário para uso no controle em tempo real (SAMIMI; ILKHECHI, 2019);

- **Buchas e terminais:** existem diversos tipos de buchas, porém todas seguem a mesma forma de construção capacitiva, para equilibrar a distribuição do campo elétrico no seu interior. Sendo assim, a capacitância equivalente do sistema e seu fator de dissipação, determina a característica do seu interior, enquanto o monitoramento da tensão permite conhecer as tensões elétricas aplicadas a elas (ROSOLEM et al., 2015). A incidência de poluição sob a superfície das buchas, pode alterar o seu dielétrico, assim o monitoramento da corrente de fuga da bucha, pode indicar a necessidade ou não de limpeza (SAMIMI; ILKHECHI, 2019);
- **Sistema de refrigeração:** o conhecimento das características de operação do sistema de refrigeração, como status, corrente e tensão das bombas e ventiladores, permite garantir o seu funcionamento ou não. Além disso a tomada de temperaturas em pontos diversos, é essencial para conhecer o seu desempenho (SAMIMI; ILKHECHI, 2019). Existem normas e guias que abordam o monitoramento das temperaturas de um transformador (POWER, 2005);
- **Tanque:** o tanque de óleo é a parte do transformador de maior proximidade com o ar, assim pode ser a porta de entrada de umidade no sistema, portanto deve ser monitorado. O nível do óleo também deve ser monitorado, pois as variações de temperatura fazem com que o volume de óleo sofra alteração. O monitoramento do nível de óleo permite conhecer se a quantidade disponível atende aos requisitos mínimos de operação (MAHANTA; LASKAR, 2015);
- **Comutadores:** operam alternando entre os contatos. Devido a natureza indutiva do enrolamento ocorrem arcos elétricos durante a transição de contato, por isso, geralmente existe um tanque de óleo separado para eles, consequentemente, os testes mencionados anteriormente para o tanque e óleo, também são aplicados a esse subsistema (SAMIMI; ILKHECHI, 2019);

  O desgaste dos contatos é proporcional ao nível de corrente, tensão e a quantidade de comutações. Os movimentos mecânicos são geralmente proporcionados por motores elétricos, assim as suas características elétricas também podem ser monitoradas (SCHELLHASE et al., 2002).

Vale ressaltar que essas características são gerais para transformadores de potência, sendo assim, podem existir modelos que compreendam todas essas características ou não, como por exemplo refrigeração forçada e tanque auxiliar de óleo, que geralmente são aplicados à transformadores de alta potência.

2.2 Monitoramento de Transformadores de Distribuição

Uma das formas mais conhecidas e adotadas de manutenção é a manutenção baseada em tempo, ou seja, preventiva, baseando-se em intervenções periódicas de acordo com um cronograma ou horário de funcionamento. Apesar da eficiência garantida com este modelo, ele causa intervenções e desligamentos desnecessários, o que implica no desperdício de recursos, principalmente humanos e financeiro (HAN; SONG, 2003).

Com os estudos e aprimoramentos dos modelos de manutenção surgiu o conceito de manutenção preditiva, ou seja, antecipar alguma ocorrência ou prever alguma falha (SOUZA, 2008). Vale ressaltar que este tipo de manutenção não veio para substituir as manutenções corretiva e preventiva, mas sim complementar. Isso pode ser alcançado por meio de monitoramento de parâmetros específicos durante a operação com a mínima interferência possível (FARIA; COSTA; OLIVAS, 2015).

A coleta de dados empregados em uma análise probabilística, permite a execução de intervenções em momentos oportunos, proporcionando maior precisão (LIMA, 2014). Este sistema de manutenção deve

ser capaz de indicar claramente as necessidades de manutenção, possibilitando principalmente a redução de gastos e recursos desnecessários (HAN; SONG, 2003). O monitoramento contínuo permite conhecer e definir os limites de operação e identificar quando eles estão próximos de serem alcançados, por meio de análises históricas e tendências. Várias grandezas podem ser monitoradas como vazão, pressão, vibração, temperatura, tensão, corrente, resistência, entre outras (FARIA; COSTA; OLIVAS, 2015).

Para diversos equipamentos, dentre eles os transformadores de distribuição, a manutenção preditiva empregada é conhecida como manutenção baseada em condição (HAN; SONG, 2003). Para ser efetivo esse sistema deve conter, no mínimo, quatro partes:

1. **Sensores:** são capazes de converter uma grandeza em um sinal elétrico. A escolha dos sensores deve basear-se no método de monitoramento empregado, geralmente em sistemas com monitoramento *on-line*. Algumas das características são primordiais para o sensoriamento, como sensibilidade, baixo custo e não ser invasivo;
2. **Aquisição de dados:** parte do sistema responsável pela aquisição e pré-processamento dos dados como amplificação, conversão quando necessária e comunicação;
3. **Detecção de falhas e diagnósticos:** tem como principal objetivo detectar previamente uma possível falha ou anomalia de funcionamento, além de gerar alertas. Os alertas gerados devem ser pós processados a fim de indicar a falha ou a anomalia, com o intuito de direcionar as correções e manutenção necessárias.

Com o advento da indústria 4.0, que tem como diferencial das demais revoluções industriais a capacidade de operação em tempo real, torna-se possível a aquisição e tratamento de dados de forma instantânea. Um dos maiores benefícios dessa nova era é o emprego do *Internet of Things* (IoT), permitindo a comunicação entre máquinas (*machine-to-machine*), sem intervenção humana (BORLIDO, 2017).

Um dos motivos para monitorar continuamente um transformador de distribuição é a qualidade da energia elétrica, como definido pela ANEEL, no módulo 8 dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST). A norma define as seguintes características para os regimes permanentes (ANEEL, 2021):

- Tensão em regime permanente;
- Fator de potência;
- Distorções harmônicas;
- Desequilíbrio de tensão;
- Flutuação da tensão;
- Variação da frequência.

Este trabalho foca na tensão em regime permanente, onde são estabelecidos os limites críticos, precários e adequados para os níveis de tensão de leitura (TL) no secundário do transformador, como apresentados na Tabela 3.

2.2.1 *Internet of Things* (IoT)

O conceito de IoT é conectar múltiplos dispositivos, utilizados no dia a dia, à rede mundial de computadores. Em constante crescimento, esta tecnologia tem alcançado os mais variados dispositivos e

Tabela 3 – Valores de classificação de tensão.

Tensão nominal (V)	Valor Adequado (V)	Valor Precário (V)	Valor Crítico (V)
127	$117 \leq TL \leq 133$	$110 \leq TL < 117$ $133 < \text{TL} \leq 135$	$\text{TL} < 110$ $\text{TL} > 125$
220	$202 \leq TL \leq 231$	$191 \leq TL < 202$ $231 < \text{TL} \leq 233$	$\text{TL} < 191$ $\text{TL} > 233$

Fonte: Adaptado de ANEEL (2021).

aplicações como meios de transportes, roupas, tênis, eletrodomésticos entre outros dispositivos, sejam eles eletrônicos, analógicos ou digitais (CHAUDHARY et al., 2019).

Geralmente um sistema IoT, visa fornecer serviços inteligentes através de sensoriamento e aquisição de dados para os usuários ou sistemas finais (TANGANELLI; VALLATI; MINGOZZI, 2019). Em pequena escala, a arquitetura do sistema IoT pode ser dividida em três principais componentes (VANGELISTA; ZANELLA; ZORZI, 2015):

- **Dispositivos finais (*Endpoints*):** geralmente responsáveis pela coleta e envio de informações, normalmente são alimentados por baterias;
- ***Gateways:*** parte do sistema responsável em concentrar os dados recebidos dos dispositivos finais e encaminhá-los ao servidor de rede;
- **Tecnologia de comunicação:** parte responsável em prover a comunicação entre os *endpoints* e os *gateways*.

2.3 Tecnologia de Comunicação

Em paralelo ao avanço e crescimento da demanda de dispositivos IoT, surgiram as redes *Low Power Wide Area Network* (LPWAN), que são comumente empregadas à comunicações de longa distância e baixa potência. Dentre elas estão as tecnologias Sigfox, *Narrowband-IoT* (NB-IoT), LoRaWAN, Weightless, entre outras. Estas tecnologias demandam comunicações sem fio de longo alcance, baixas taxas de transmissão, baixo consumo energético, além de baixo custo para implantação (Hoeller et al., 2018).

Geralmente as tecnologias que operam na rede LPWAN, são classificadas de acordo com a faixa de frequência em que operam. Entre as tecnologias que operam em faixas de frequência não licenciadas estão o SigFox, Weightless e LoRaWAN, enquanto as tecnologias 5G e LTE Rel.13, operam em faixas licenciadas (SARAIVA, 2017).

A maioria das tecnologias LPWAN que utilizam as faixas não licenciadas, operam na parte reservada pela *International Telecommunication Union* (ITU) no espectro de rádio, que é denominada *Industrial, Scientific and Medical* (ISM). As frequências centrais geralmente são 169 MHz, 433 MHz, 868 MHz, 915 MHz e 2,4 GHz, variando de acordo com a região de operação. Essas tecnologias alcançam distâncias entre 2 e 5 km em áreas urbanas e de 10 a 15 km em áreas rurais, cujas antenas apresentam grande sensibilidade de recepção, na ordem de -150 dBm (CENTENARO et al., 2016).

As tecnologias que operam nas faixas de frequências não licenciadas apresentam um menor custo de implantação, tornando-as mais atraentes, o que impulsiona o desenvolvimento de soluções empregando-as. A Tabela 4, apresenta um breve comparativo entre algumas das principais características dessas tecnologias.

Tabela 4 – Comparativo de tecnologias de comunicação nas faixas de frequências não licenciadas.

Tecnologia	**SigFox**	**LoRaWAN**	**Weightless-N**
Modulação	UNB DBPSK	CSS	UNB DBPSK
Taxa de transmissão	100 bps	0.3 - 37.5 kbps (LoRa)	30 - 100 kbps
MAC	ALOHA	ALOHA	*Sloted* ALOHA
Topologia	Estrela	Estrela	Estrela
Payload	12 bytes	até 250 bytes	20 bytes
Criptografia	Sem criptografia	AES 128 bits	AES 128 bits

Fonte: Adaptado de Raza, Kulkarni e Sooriyabandara (2017).

Conforme apresentado na Tabela 4, as tecnologias SigFox e Weightless, apresentam limitações no *payload*, ou seja, nos tamanhos das mensagens que podem ser transmitidas. Isso pode ser incoveniente para usá-las em aplicações destinadas ao monitoramento de uma quantidade considerável de variáveis, ou grandezas. Para esse tipo de aplicação, a tecnologia LoRaWAN se torna mais indicada, por oferecer uma carga útil de até 250 bytes e uma taxa de transmissão de até 37,5 kbps, sem limitar a quantidade de mensagens que podem ser enviadas. Além disso, apresenta baixo consumo de energia e não depende de um operador de rede comercial (RAZA; KULKARNI; SOORIYABANDARA, 2017).

Para realização deste trabalho optou-se por utilizar a rede LoRaWAN por: (i) possuir o *hardware* necessário para implementação, evitando aquisições (ii) possuir uma plataforma aberta para o desenvolvimento de aplicações (TTN, 2020) e (iii) longo alcance de transmissão, possibilitando o monitoramento de transformadores em locais remotos.

2.3.1 LoRaWAN

LoRa pode ser definida como uma tecnologia de modulação patenteada pela empresa Semtech, baseada na modulação *Chirp Spread Spectrum* (CSS), fornecendo uma transmissão segura de dados com baixa taxa de transmissão e consumo de energia para transmissões de longo alcance. Pode ser utilizada em redes privadas, públicas ou híbridas, ou ser integrada a redes já existentes (SENEVIRATNE, 2019).

Os dispositivos finais dedicados ao LoRaWAN são divididos em três diferentes classes para atender as necessidades das aplicações (LORA ALLIANCE, 2020):

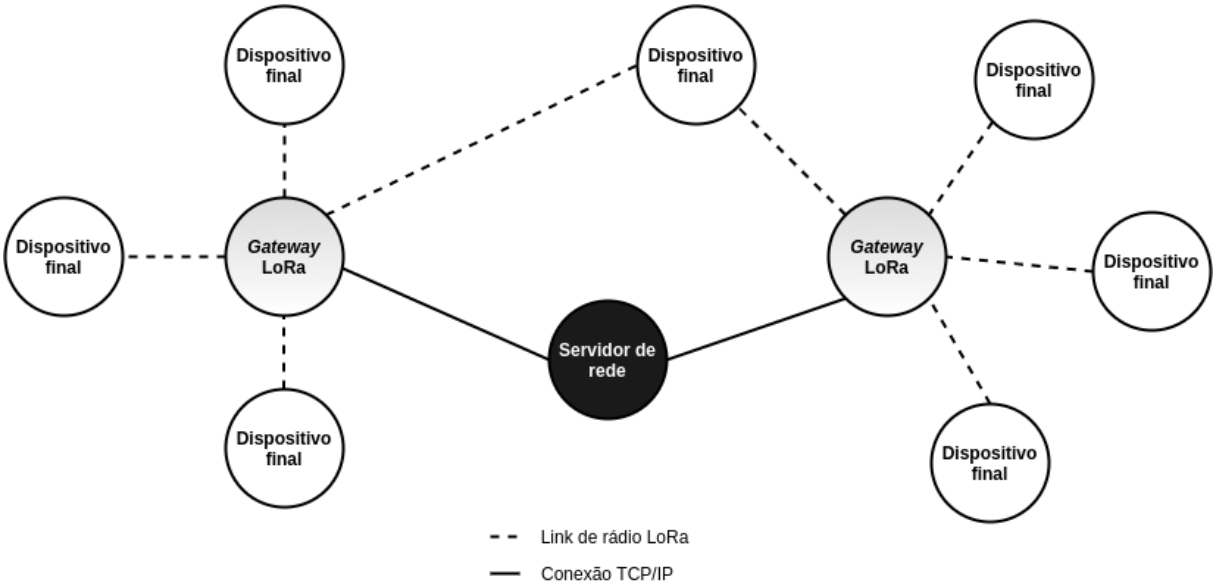
- **Classe A - Bidirecionais de baixa potência:** essa classe é considerada padrão, onde a comunicação é sempre assíncrona e iniciada pelo dispositivo final. As transmissões de *uplink* podem ser enviadas a qualquer momento sendo seguidas por duas janelas curtas de *downlink*, que podem ser utilizadas para controle ou comandos. Assim as aplicações que necessitam de *downlink*, devem ser capazes de armazená-las em *buffer* no servidor de rede, aguardando até o próximo evento de *uplink*. O dispositivo final pode entrar em modo de suspensão para economia de energia de acordo com o tempo definido pela sua aplicação. A rede não possui requisitos para despertar o dispositivo, tornando a classe A, o modo operacional de menor consumo de potência;
- **Classe B - Bidirecionais com latência determinística para *downlink*:** nessa classe, além das janelas de *downlink* contidas na classe A, os dispositivos da classe B são sincronizados com a rede usando sinais periódicos, abrindo as janelas para *downlink* em intervalos de tempo programados. Essa característica fornece à rede a oportunidade de comunicações em *downlink* com uma latência

determinística, gerando um consumo energético adicional, porém baixo o suficiente para aplicações que fazem o uso de alimentação por baterias;

- **Classe C - Bidirecionais de baixa latência:** os dispositivos da classe C além de apresentar as características de funcionamento da classe A, são capazes de reduzir a latência do *downlink*, mantendo o receptor do dispositivo final apto a receber dados durante todo o tempo em que o dispositivo não está enviando dados. Nesse modelo de funcionamento o servidor pode iniciar a transmissão a qualquer momento. Esse modo apresenta um maior consumo energético sendo indicado para aplicações que não sejam alimentadas por bateria. A alternância temporária entre as classes A e C, pode ser útil para tarefas esporádicas, como atualizações remotas.

A camada física do LoRa permite links de longo alcance, enquanto o LoRaWAN é o protocolo de comunicação e arquitetura do sistema. O LoRaWAN é capaz de fornecer segurança, qualidade de serviço, capacidade de rede e grande vida útil de bateria para um dispositivo final. A Figura 8 apresenta a arquitetura de rede utilizada pelo LoRaWAN. A comunicação entre dispositivos finais e *gateways* é realizada através de links de rádio com tecnologia LoRa, onde uma mensagem pode ser recebida por vários *gateways*. Os *gateways* emcaminham os dados recebidos para um servidor de rede, através de conexões TCP/IP (SENEVIRATNE, 2019).

Figura 8 – Arquitetura da rede LoRa.



Fonte: Adaptado de Centenaro et al. (2016).

2.3.2 *Endpoint*

Endpoints são os dispositivos utilizados na construção de redes IoT. Geralmente compostos por sensores, atuadores e uma unidade microcontroladora. No microcontrolador é executado o código que faz a interação entre os sensores e atuadores, o processamento quando necessário, além do envio dos dados ao *gateway* (CHEN; JIA; LI, 2011). A Tabela 5 apresenta a visão geral das principais estruturas de programação utilizadas para os diversos *endpoints* existentes.

Por possuir um ambiente de programação simples e uma grande quantidade de placas compatíveis e disponíveis para desenvolvimento, o *framework* Arduino, é o mais utilizado para confecção de *endpoints* (HACKSTER, 2021). Porém, a falta de um ambiente de multiprogramação pode limitar a execução de atividades simultâneas nos *endpoints*.

Tabela 5 – Estruturas de programação de *endpoints*.

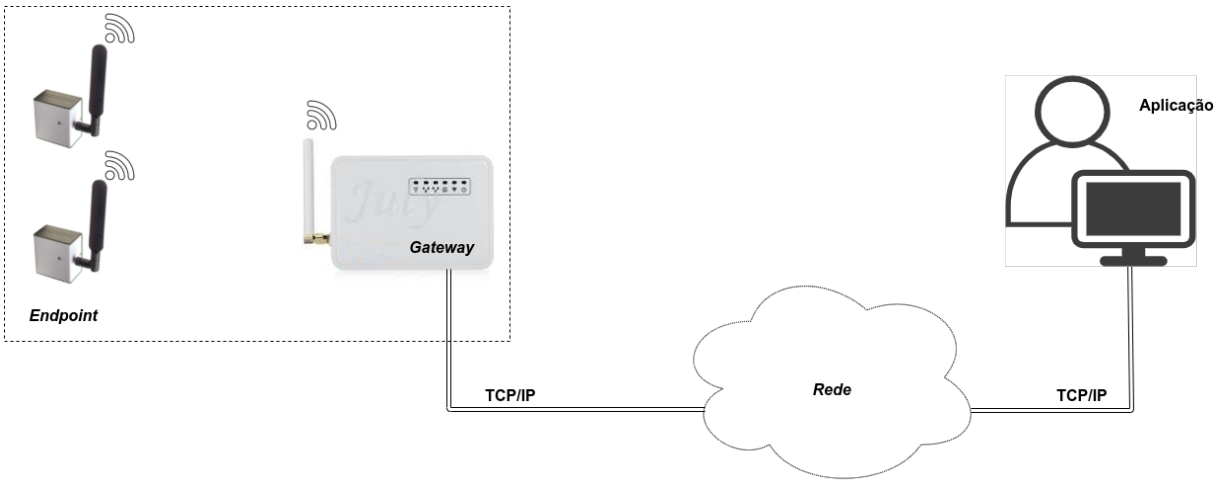
Framework	**Linguagem**	**Multiprogramação**	**Placas com suporte**	**Ambiente**
Arduino	C-like	Não	> 1000	IDE Dedicada
FreeRTOS	C	*Tasks*	> 100	Makefile
mbedOS	C++	*Threads*	> 100	*Online*
Zephyr	C	*Threads*	> 100	CMake
Contik OS	C	*Protothreads*	apróx. 20	Makefile
RIOT OS	C/C++	*Threads*	> 100	Makefile
Micropython	Python	*Coroutines*	apróx. 20	*Online*
Zerynth	Python	*Threads*	apróx. 30	IDE Dedicada

Fonte: Adaptado de Tanganelli, Vallati e Mingozzi (2019).

2.3.3 *Gateway*

O principal objetivo ou funcionalidade de um *gateway* é fazer a ponte entre o domínio utilizado pelos *endpoints* para o domínio de rede, conforme apresentado na Figura 9. Os *gateways* IoT, são responsáveis também pelo gerenciamento de todos os *endpoints* conectados, sendo o componente mais importante da rede IoT (CHEN; JIA; LI, 2011).

Figura 9 – Funcionalidade do *gateway*.



Fonte: Autor (2021).

Portanto, os *gateways* acabam atuando como um *proxy* de rede, ou seja, age como um intermediário de requisições, entre os *endpoints* e a internet. Podem ser diferentes para cada tipo de aplicação, as seguintes características são comuns *gateways* IoT (CHEN; JIA; LI, 2011).

- **Múltiplas interfaces:** os *endpoints* podem ser conectados aos *gateways* através de várias tecnologias de comunicação como Zigbee, Bluetooth, LoRaWAN, etc. Além disso, os *gateways* podem ter diversas formas de conexão com a rede pública, como por exemplo 3G/4G, *Public Switched Telephone Network* (PSTN), *Long Term Evolution* (LTE), *Local Area Networks* (LAN), *Digital Subscriber Line* (DSL), etc. A quantidade de interfaces ou a tecnologia empregada é dependente da estratégia desejada para aplicação;

- **Conversão de protocolos:** as conversões podem ocorrer em duas situações diferentes, a primeira delas quando o *gateway* for utilizado com mais de uma tecnologia de comunicação, como por exemplo LoRaWAN e Zigbee. A outra ocorre quando o *gateway* encaminha os dados recebidos pelos *endpoints* IoT para a rede pública (Internet), como por exemplo LoRaWAN para LTE;

- **Capacidade de gerenciamento:** através do *gateway* IoT, deve ser possível gerenciar os *endpoints* associados a ele. Além disso, deve ser possível configurar, controlar, diagnosticar, identificar e manter os *endpoints* associados.

2.4 *Minimum Viable Product* (MVP)

O conceito de MVP é o processo interativo que é baseado no recebimento contínuo de feedbacks por parte dos primeiros usuários. O termo MVP foi inicialmente definido por Frank Robinson em 2001, e aprimorado em 2011 por Eric Ries, sendo definido como "uma versão de um novo produto, que permite a uma equipe coletar o máximo de aprendizado validado sobre os clientes com o mínimo esforço".[1] (LEAN STARTUP CO., 2021).

Esse conceito se funde a definição de Startup Enxuta, que também foi proposto por Eric Ries, onde produtos devem ser criados de forma interativa, com base nas necessidades dos clientes. A metodologia de Startup Enxuta é baseada em (LENARDUZZI; TAIBI, 2016):

- Empreendedorismo é gestão;
- Contabilidade de inovação;
- Os empreendedores estão em toda parte;
- Aprendizagem validada;
- Construir, medir e aprender.

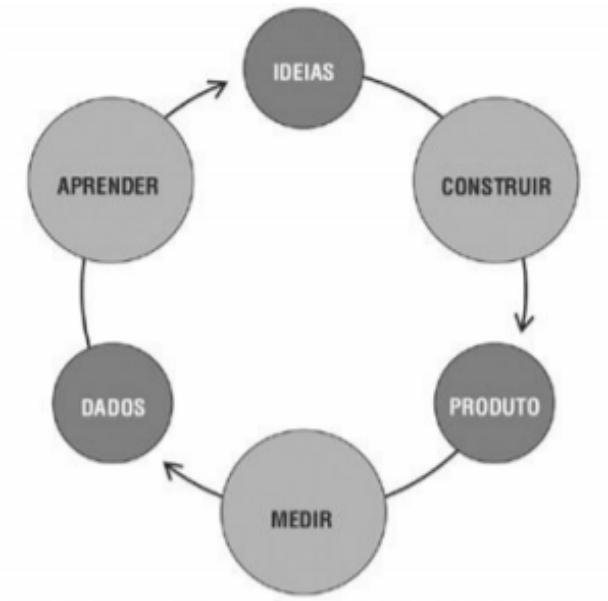
A Figura 10 apresenta o ciclo construir, medir e aprender como o modelo fundamental para o empreendedor transformar as suas ideias em produtos e, depois, sentir com os seus clientes as necessidades e atendimento de expectativas, a fim de tomar decisões sobre a continuidade do desenvolvimento ou não. Esse modelo vai de encontro ao conceito de MVP, buscando conhecer as fragilidades, seja do produto ou serviço, custo benefício e até mesmo do modelo de negócio (SIGNORI et al., 2014).

A concepção de um protótipo de produto pode exigir a construção de um *hardware*. Quando o desenvolvimento utiliza o conceito de MVP, buscando a redução de custos e a validação da ideia, podem ser adotadas diversas plataformas de desenvolvimento destinadas à prototipagem, considerando as características e limitações envolvidas no projeto. Nos dispositivos IoT, busca-se o uso de soluções de baixo consumo energético, de fácil implementação e adaptação, além de custo acessível (SANTOS et al., 2016). As principais plataformas destinadas a esse desenvolvimento são:

- ESP32 (ESPRESSIF, 2021);
- Raspbery PI (RASPBERY PI, 2021);
- Arduino (ARDUINO, 2020).

[1] Tradução do autor. Frase original: "A version of a new product, which allows a team to collect the maximum amount of validated learning about customers with the least effort".

Figura 10 – Ciclo de *feedback*, construir, medir e aprender.



Fonte: Ries (2012).

2.4.1 Arduino

Criado no ano de 2005 no *Ivrea Interaction Design Institute*, o Arduino surgiu como uma plataforma eletrônica de código aberto, integrada com *software* e *hardware* fáceis de utilizar. O objetivo era a confecção de um dispositivo de prototipagem rápida de baixo custo, funcional e fácil de programar, que deu início a uma placa de desenvolvimento composta por um microcontrolador Atmel de 8 bits e circuitos de *Input/Output* (I/O) (ARDUINO, 2021).

O conceito de *hardware* livre, que permite ao usuário montar, personalizar e adaptar o Arduino partindo do mesmo *hardware* básico, fez com que o Arduino alcançasse uma ampla comunidade de usuários. Com isso, a placa começou a adaptar-se a novos desafios e necessidades, incluindo produtos e aplicações IoT (ARDUINO, 2021).

Existem diversas plataformas com microcontroladores disponíveis para desenvolvimento, com a mesma finalidade de simplificar os trabalhos de programação e desenvolvimento com o uso de microcontroladores. Dentre as principais estão a Parallax Basic Stamp (PARALLAX, 2021), Phidgets (PHIDGETS, 2021), MIT's Handyboard (MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY, 2021), além do próprio Arduino, que comparado aos demais apresenta as seguintes vantagens:

- **Baixo custo:** existem versões de valor inferior a $50 dólares;
- **Plataforma cruzada:** a *Integrated Development Environment* (IDE) pode ser executada nos principais sistemas operacionais do mercado (Windows, Macintosh OSX e Linux);
- **Ambiente de programação simples:** a IDE apresenta o conceito de programação baseada em processamento, da mesma forma em que o microprocessador opera, facilitando o entendimento;
- **Software de código aberto e extensível:** o *software* é publicado como ferramenta de código aberto, o que disponibiliza a sua modificação e extensão por programadores. Além disso, a linguagem pode ser utilizada com bibliotecas na linguagem C++;

- **Hardware extensível e de código aberto:** por ser de código aberto, o *hadware* do Arduino pode ser modificado e adaptado de acordo com a necessidade do projeto.

A Tabela 6 apresenta os principais modelos de placas de desenvolvimento do Arduino, suas principais características e diferenças, principalmente quanto ao poder de processamento, capacidade de armazenamento e pinagem disponível.

Tabela 6 – Comparativo entre placas de desenvolvimento Arduino.

Modelo	**Uno**	**Leonardo**	**Mega**	**Nano**	**Due**
Microcontrolador	ATmega328	ATmega32u	ATmega2560	ATmega328	AT91SAM3X8E
Velocidade (MHz)	16	16	16	16	84
Armazenamento (kB)	32	32	256	32	512
Memória de execução (kB)	2	2,5	8	2	96
I/O Digital	14	20	54	14	54
Entradas Analógicas	6	12	16	6	12
Alimentação (VDC)	$7 \sim 12$	$7 \sim 12$	$7 \sim 12$	$7 \sim 12$	$7 \sim 12$

Fonte: Arduino (2021).

2.4.2 *The Things Network* (TTN)

A TTN foi uma das primeiras plataformas desenvolvida para trabalhar com a tecnologia de comunicação sem fio de longo alcance, baixa potência e largura de banda LoRaWAN. Fundada em 2015 por Wienke, teve o seu início quando percebeu-se que com apenas 10 *gateways* LoRaWAN, seria possível cobrir toda a cidade de Amsterdã - Holanda. Assim começou a criação de uma infraestrutura de rede comunitária, onde os desenvolvedores poderiam usar de forma aberta e gratuita (TTN, 2020).

A TTN é uma rede constituída de servidores em nuvem que fazem a conexão de todos os *gateways* LoRaWAN do planeta. Sendo assim, cada *gateway* adquirido e adicionado a TTN tem sua cobertura expandida gratuitamente a todos usuários da rede (EMBARCADOS, 2021).

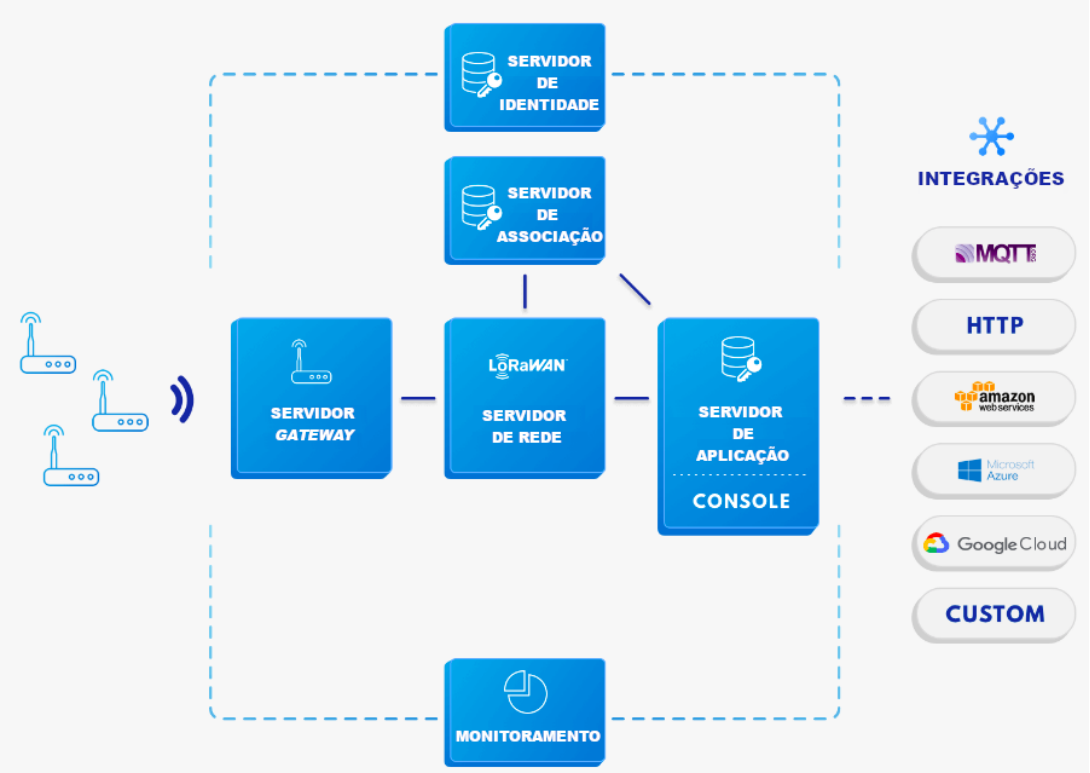
Construir uma rede descentralizada, pertencente e operada por seus usuários e independente de tecnologia é a principal missão da rede TTN. Essa rede visa garantir que nenhuma entidade isolada possa dominar o IoT, com os seguintes princípios (TTN, 2020):

- **Segurança de dados:** dados criptografados de ponta a ponta;
- **Rede neutra:** dados tratados de forma igualitária;
- **Código aberto:** a tecnologia desenvolvida é de código aberto.

A Figura 11 apresenta a arquitetura de funcionamento da rede TTN, composta pelos *endpoints*, *gateways* e os servidores de rede, autenticação (dividida entre identidade e associação) e servidor de aplicação. Toda pilha, que contempla os servidores, opera em nuvem, permitindo a interconexão com toda rede mundial TTN (TTN, 2020).

Além disso, o servidor de aplicação permite a integração da aplicação adicionada à TTN com diversas plataformas de IoT disponíveis no mercado, utilizadas para sincronizar o registro do dispositivo e

Figura 11 – Arquitetura da rede TTN.



Fonte: Adaptado de TTN (2020).

os seus dados de *downlink* e *uplink*, agilizando o desenvolvimento e validação de conceito. Algumas das plataformas disponíveis para integração são (TTN, 2020):

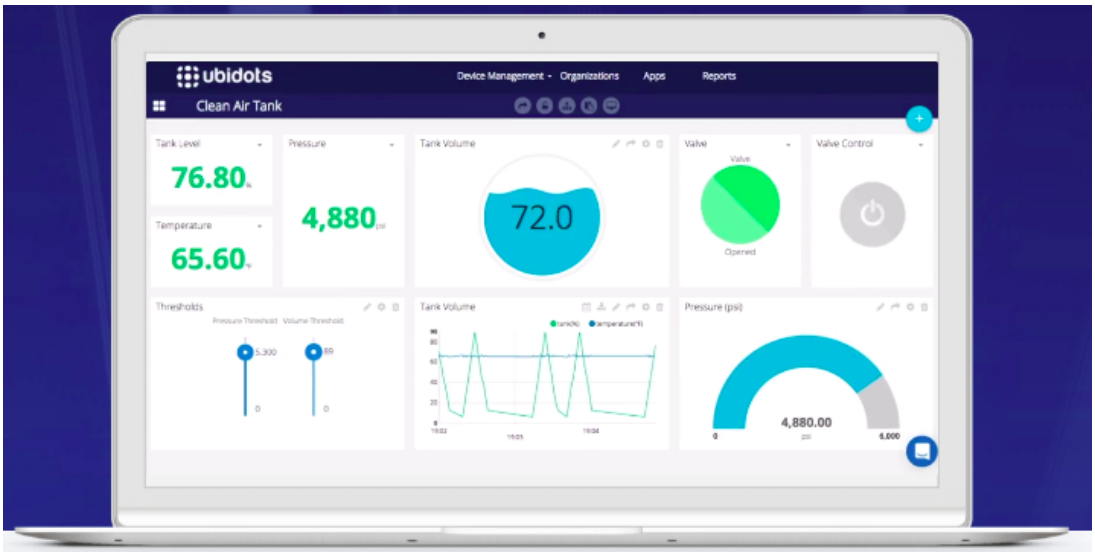
- Azure IoT Hub;
- AWS IoT;
- IBM Watson IoT;
- MyDevices;
- TagoIO;
- Ubidots.

2.4.3 Ubidots

Fundada em 2012 em conjunto com a empresa Netux, a Ubidots entregava soluções para monitorar, controlar e automatizar de forma remota os processos para clientes da área da saúde. Entre os anos de 2012 e 2014 a empresa focou no desenvolvimento de projetos destinados à saúde, energia, serviços públicos, manufatura, varejo e transporte, o que proporcionou um aumento na sua expertise em serviços em nuvem e IoT (UBIDOTS, 2021).

Ainda no ano de 2013, a Ubidots juntou-se ao *Boston MassChallenge Accelerator*, sendo alçado a uma *startup* global de tecnologia, alcançando novos mercados. Com isso, a Ubidots passou a ser conhecida em *hardware*, *software* e engenharia integrada, criando uma plataforma acessível, confiável e de simples utilização no ecossistema IoT (UBIDOTS, 2021). A Figura 12 apresenta um exemplo de *dashboard* na plataforma Ubidots.

Figura 12 – Exemplo de *dashboard* Ubidots.



Fonte: Ubidots (2021).

A Ubidots aposta o seu sucesso em três pilares, sendo eles:

- **Apoio:** partindo do pressuposto de que tecnologias emergentes e soluções conectadas a internet são fáceis de serem entendidas e implementadas, a Ubidots concentra-se em fornecer as ferramentas certas em tempo hábil para auxiliar na confecção da solução;
- **Justiça:** a equipe do Ubidots trabalha em função do cliente na busca de soluções mutuamente benéficas;
- **Facilidade de uso:** proporciona valor agregado com a redução do tempo de desenvolvimento, focando no usuário e na eficiência de dados, o que permite a construção e implementação de aplicativos IoT em nuvem com facilidade.

3 DESENVOLVIMENTO

Nesta seção descreve-se o desenvolvimento de uma plataforma de monitoramento em tempo real para transformadores de distribuição, com o intuito de mensurar suas principais características de operação.

Para definir as grandezas monitoradas neste projeto, foi efetuado um levantamento com trabalhos que abordam o monitoramento em transformadores, observando as grandezas mencionadas por eles. Após o levantamento, apresentado na Tabela 7, foi observado que temperatura, corrente, tensão e análise do óleo, estão presentes na maioria dos trabalhos relacionados.

Com base nesse levantamento, foi ponderado o custo dos sensores necessários para realizar o monitoramento de cada uma dessas grandezas, observando-se a dificuldade de instalação e manutenção dos sensores. Assim, os sensores de baixo custo que possibilitam a medição de grandezas de forma não intrusiva, tendem a proporcionar menor custo de instalação e manutenção.

A análise do óleo é um dos monitoramentos mais utilizados para antecipar possíveis falhas e análise de vida útil do transformador. Contudo, os sensores que possibilitam esse monitoramento de forma contínua e *on-line* apresentam custos elevados, tanto de aquisição quanto de manutenção.

Por outro lado, os sensores de corrente, tensão e temperatura proporcionam o conhecimento dos níveis de operação do transformador, possibilitando o monitoramento dos níveis de tensão na baixa tensão do transformador, definidos pelos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST). Além disso, existem diversos modelos de sensores disponíveis para leitura de cada uma dessas grandezas, possibilitando a escolha de sensores de baixo custo e com boa precisão.

Com isso, para execução do projeto, as grandezas escolhidas foram tensão, temperatura e corrente. Para tensão e corrente, foram adotados três sensores de cada, proporcionando o monitoramento de transformadores com até três fases na baixa tensão. Para mensurar a temperatura, foram adotados dois sensores, que podem ser instalados de acordo com a necessidade desejada.

Para o envio dos dados mensurados pelos sensores a tecnologia escolhida levou em consideração o cenário de instalação dos transformadores de distribuição, que podem ser instalados em distâncias relativamente pequenas, dependendo da densidade populacional e o consumo energético de determinada região, como também em grandes distâncias, em especial nas zonas periféricas ou rurais. Assim, dentre as principais características necessárias para estabelecer a comunicação estão a forma de comunicação, sendo mais indicada a sem fio para facilitar a instalação, e a distância alcançada pela comunicação.

Esse foi um dos motivos da escolha da tecnologia LoRaWAN, outro motivo levado em consideração foi o fato da instituição já possuir o material necessário para estabelecer a comunicação, reduzindo os custos para implementação do projeto.

Tabela 7 – Levantamento com alguns trabalhos que abordam o monitoramento em transformadores de distribuição.

Trabalho	**Grandezas Monitoradas**
Design and Implementation of Vibration On-line Monitoring System of Power Transformer	Vibração, tensão e corrente
Condition Monitoring and Diagnosis of Power Transformers	Temperatura e fator de potência
Monitoramento e Diagnóstico de um Transformador de Potência: Análise de Gases Dissolvidos no Óleo e Análise Térmica	Análise dos gases dissolvidos no óleo e temperatura
Remote Condition Monitoring System for Distribution Transformer	Temperatura, tensão, corrente e nível do óleo
Online Monitoring of Power Transformers Using Impulse Frequency Response Analysis	Resposta em frequência
Research on Intelligent Online Monitoring and Evaluation of Power Transformer	Resposta em frequência
Studies to Utilize Loading Guides and ANN for Oil-Immersed Distribution Transformer Condition Monitoring	Corrente, temperatura ambiente e topo do óleo
Transformer Life Extension by Continuous On-Line Oil Conditioning	Análise do óleo
Temperature Control and Monitoring System for Power Transformer Windings Using Fiber Optic Sensors	Temperatura
Research on on-line monitoring and fault recognition technology of intelligent power transformer based on the Internet	Temperatura, tensão, corrente, nível de óleo e descargas
A Proposed Wireless System to Real Time Monitoring in Power Transformer	Tensão, corrente e potência
Development of Online Monitoring and Controlling System for the 630 kVA Three-phase High Temperature Superconducting Transformer	Tensão e corrente, nível de óleo
Diagnosis of transformers based on vibration data	Vibração
Correlation analysis of hotspot temperatures in power transformer – a case study	Temperatura
Health Index Based Condition Monitoring of Distribution Transformer	Nível de óleo, corrente e tensão
Online monitoring and fault diagnosis system of Power Transformer	Análise do óleo
Online monitoring system for power transformers	Análise do óleo
Online monitoring research of transformer vibration based on labview	Vibração
Remote Fault Diagnosis System for Power Transformer Insulation Based on RIA Model	Descargas parciais
Study on The Influence of Oil Temperature on Power Transformer Vibration	Temperatura e vibração
Vibration Monitoring of Converter Transformer by Simplified Permutation Entropy	Vibração

Fonte: Autor (2021).

3.1 MVP

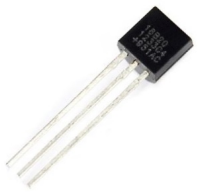
Para confeccionar a plataforma foi utilizado o conceito de MVP, com o intuito de validar a ideia e sua implementação de forma mais acelerada. A plataforma consiste em um *endpoint* que será utilizado para o sensoriamento do transformador. Para isso, este dispositivo deve ficar acoplado ao equipamento, sendo responsável pela coleta dos dados de temperatura, tensão e corrente. Os dados coletados são enviados através da tecnologia LoRaWAN para um *gateway* LoRa. Do *gateway*, o *payload* é encaminhado a plataforma TTN, onde os dados são coletados e posteriormente exibidos ao usuário através da plataforma Ubidots.

Os processos utilizados para o desenvolvimento do projeto estão descritas nas subseções a seguir.

3.1.1 Temperatura

Para coleta de temperatura o sensor escolhido foi o DS18B20, apresentado na Figura 13. Além do baixo custo, quando comparado a outros modelos de sensores de temperatura associados ao Arduino, o sensor DS18B20 apresenta uma melhor precisão (MARTINAZZO; ORLANDO; URI, 2016).

Figura 13 – Sensor de temperatura DS18B20.



Fonte: FilipeFlop (2021).

O Sensor DS18B20 é da classe dos termistores, ou seja, a sua resistência elétrica é alterada de acordo com a variação da temperatura. A sua principal característica é a leitura de temperatura no formato digital. A resolução da conversão pode ser definida pelo usuário, entre 9, e 12 bits, o que corresponde a incrementos de 0,5 °C, 0,25 °C, 0,125 °C e 0,0625 °C. A resolução padrão é 12 bits (MAXIM INTEGRATED, 2019).

A comunicação do sensor DS18B20 é feita através do protocolo *1-Wire*, desenvolvido pela empresa Maxim. Ou seja, toda comunicação é feita através de uma única via utilizando sinais de controle. Nesse sistema, o microcontrolador é o dispositivo mestre, enquanto o sensor é o escravo (MAXIM INTEGRATED, 2019).

Cada sensor é identificado por um endereço de 64 bits único, permitindo assim o uso de diversos sensores no mesmo barramento de controle. A temperatura de operação do DS18B20 é de -55 °C a +125 °C, com uma precisão de ±0,5 °C na faixa de temperatura entre -55 °C a +85 °C (MAXIM INTEGRATED, 2019).

Para a confecção do projeto foram adotados dois sensores com o encapsulamento em aço inoxidável e resistente à água, conforme o apresentado na Figura 14 . Um dos sensores pode ser destinado à coleta da temperatura ambiente, enquanto o segundo pode ser fixado à carcaça do transformador.

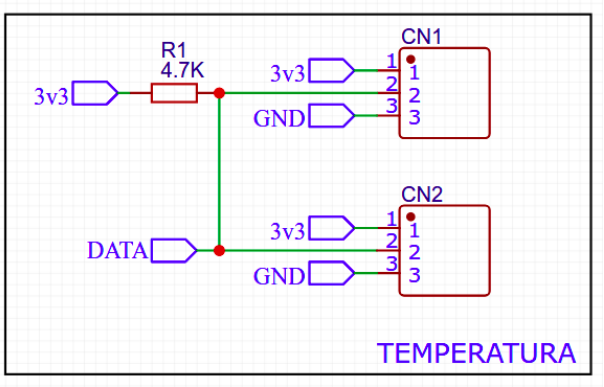
O circuito construído para o sensor utiliza alimentação externa de 3.3 VCC e foi baseado no

Figura 14 – Sensor de temperatura DS18B20 resitente à água.

Fonte: FilipeFlop (2021).

circuito sugerido no *datasheet* do componente. Apresentado na Figura 15, o circuito dispõe de um resistor de *Pull-up* de 4.7 kΩ, necessário para evitar a flutuação de níveis de tensão no barramento de comunicação.

Figura 15 – Circuito montado para coleta de temperatura com o sensor DS18B20.



Fonte: Autor (2021).

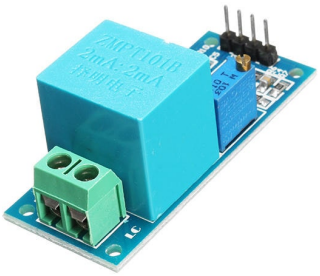
3.1.2 Tensão

Para mensurar os níveis de tensão no secundário do transformador, foram adotados três módulos ZMPT101B (FILIPEFLOP, 2021). Este dispositivo, apresentado na Figura 16, permite identificar a presença de tensão alternada no circuito. Cada módulo é construído com um transformador de tensão ZMPT101B e um potenciômetro trim multivoltas. O potenciômetro é utilizado para realizar o ajuste da saída *Analog to Digital Converter* (ADC).

O esquema de ligação do sensor de tensão ZMPT101B está apresentado na Figura 17. Suas principais especificações técnicas são (FILIPEFLOP, 2021):

- **Transformador:** ZMPT101B;
- **Tensão de alimentação:** 5 a 30 VCC;
- **Tensão de entrada:** 0 a 250 VCA;
- **Corrente de entrada nominal:** 2 mA;

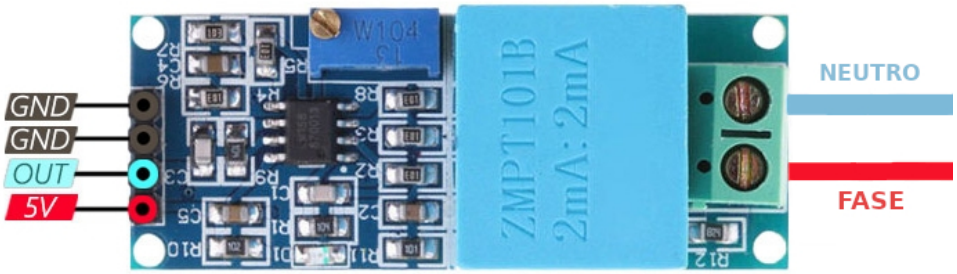
Figura 16 – Módulo ZMPT101B.



Fonte: FilipeFlop (2021).

- **Corrente de saída nominal:** 2 mA;
- **Isolamento de tensão:** 4000 V;
- **Precisão:** ±1%.

Figura 17 – Esquema de ligação do sensor de tensão ZMPT101B.



Fonte: Adaptado de ElectroPeak (2021).

Para os módulos do sensor de tensão junto ao Arduino, foi utilizada a biblioteca *Energy Monitoring Library*, disponível no site do Arduino com o nome EmonLib. Esta biblioteca permite o cálculo da tensão eficaz, conhecida como RMS. Para isso existe uma variável de calibração, utilizada para realizar a compensação de leitura, que deve ser ajustada comparando a tensão medida pelo módulo, com um medidor de tensão confiável. A variável a seguir foi adotada na execução deste projeto:

```
//Valor de ajuste, calibrado de acordo com um medidor de tensão
#define VOLT_CAL 179.5
```

3.1.3 Corrente

Para coleta da corrente no secundário do transformador, foram adotados três sensores de corrente do modelo SCT-013-00, apresentado na Figura 18. Esse sensor possui a capacidade de medir corrente alternada na faixa de 0 a 100 A. O sensor SCT-013-00 é do tipo transformador de corrente e funciona por indução eletromagnética. Suas principais especificações técnicas são (FILIPEFLOP, 2021):

- **Corrente de entrada:** 0 a 100 A;
- **Sinal de saída:** 0 a 50 mA;

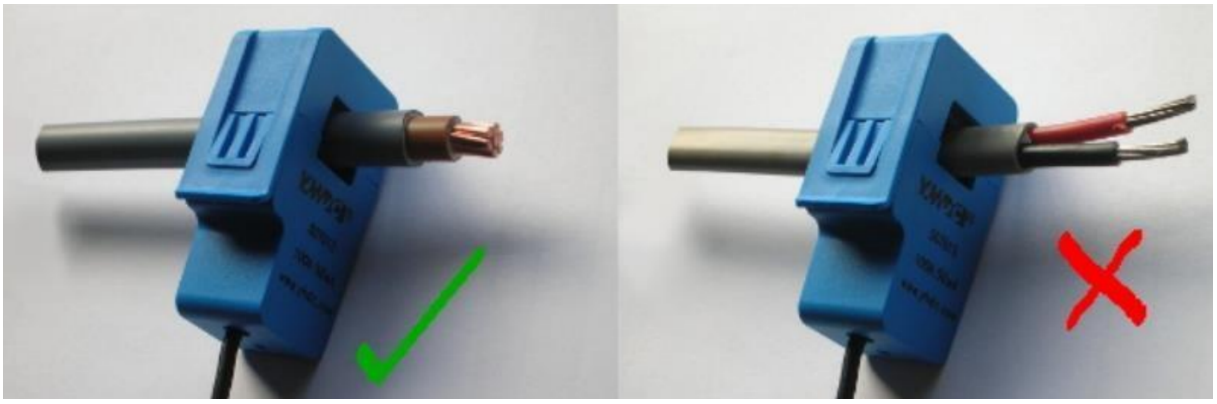
- **Material do núcleo:** Ferrite;
- **Abertura para o condutor:** 13 x 13 mm;
- **Temperatura de trabalho:** -25 a +70 °C.

Figura 18 – Sensor de corrente SCT-013-00.

Fonte: FilipeFlop (2021).

Um dos principais motivos para escolha deste modelo é a sua facilidade de instalação, por se tratar de um sensor com o núcleo bipartido, permitindo que ele seja um sensor não invasivo, ou seja, não exige a interrupção do circuito para instalação. Sua montagem deve ser efetuada conforme a Figura 19.

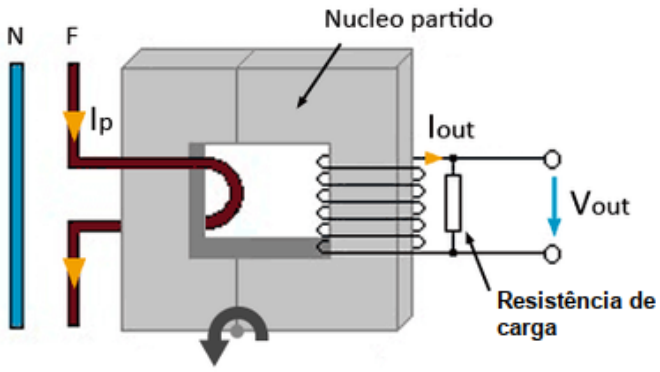
Figura 19 – Instalação correta do sensor de corrente SCT-013-00.



Fonte: OpenEnergyMonitor (2021).

Como pode ser observado nas especificações do sensor adotado, o seu sinal de saída varia de 0 a 50 mA, porém, o Arduino só é capaz de realizar a leitura da variação de tensão através dos seus pinos analógicos. Para gerar essa variação deve ser adicionado um resistor de carga conforme apresentado na Figura 20.

Figura 20 – Princípio de funcionamento do sensor de corrente SCT-013-00.



Fonte: Adaptado de YHDC (2021).

O cálculo do resistor de carga foi efetuado levando em consideração a corrente máxima que pode ser mensurada com o sensor. Assim a Corrente Máxima no Primário (CMP) do sensor pode ser obtida com a Equação (3.1). Como I_{RMS} é igual a 100 A, o valor obtido para o CMP é de 141.42 A.

$$CMP = I_{RMS} \times \sqrt{2} \tag{3.1}$$

Para determinar a Corrente Máxima no Secundário (CMS) foi utilizada a Equação (3.2), onde o valor CMP é dividido pelo número de voltas da bobina do secundário do sensor, que no modelo adotado é 2000 voltas. Assim, o CMS é igual a 70.71 mA.

$$CMS = CMP \div N_{Voltas} \tag{3.2}$$

A determinação do resistor de carga leva em consideração a tensão de referência do microcontrolador adotado, que para esse projeto foi o Arduino Mega. O Arduino Mega possui 5 V de tensão de referência, sendo assim, para uma melhor resolução de medição, a tensão no resistor de carga deve ser a metade da tensão de referência do Arduino, ou seja, 2.5 V.

Em cada sensor foi montado um circuito divisor de tensão, para garantir os 2.5 V no resistor de carga. Por fim, o resistor de carga ideal foi calculado através da Equação (3.3), obtendo o valor de 35.35 Ω.

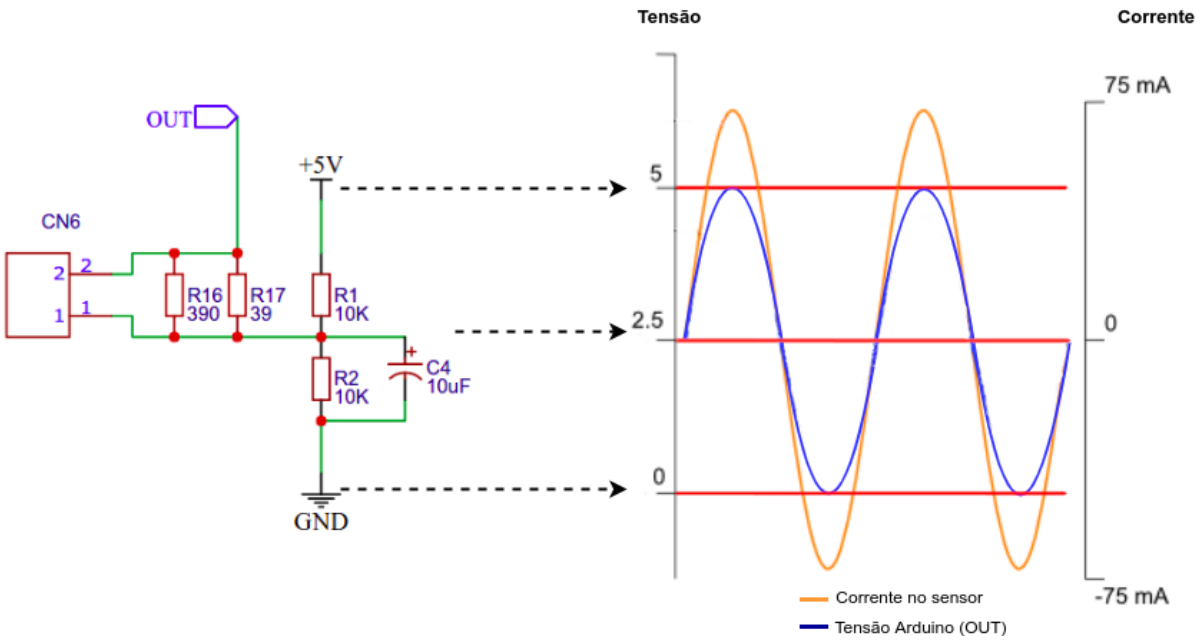
$$R_{CARGA} = \frac{V_{REF}}{2} \div CMS \tag{3.3}$$

Não é possível encontrar comercialmente um resistor para o valor obtido no cálculo. Então, na tentativa de aproximar ao máximo, foi utilizada uma associação de resistores em paralelo, descrito pela Equação (3.4). Com isso, foi obtido o valor de 35.45 Ω, associando um resistor de 390 Ω com um resistor de 39 Ω.

$$\frac{1}{R_{Equivalente}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \tag{3.4}$$

A Figura 21 apresenta o circuito utilizado para cada sensor de corrente, contando com o divisor de tensão e a associação de resistores de carga. Para facilitar a conexão com o sensor, foi utilizado um conector do tipo borne de 2 vias, representado na imagem pelo identificador CN6.

Figura 21 – Circuito para o sensor de corrente SCT-013-00.



Fonte: Autor (2021).

O pino OUT foi conectado a uma porta analógica do Arduino. Para leitura dos sensores através do Arduino a biblioteca EmonLib, utilizada pelos sensores de tensão, também foi utilizada, sendo definido também o valor de calibração, obtido dividindo o número voltas da bobina do secundário, pelo valor adotado para o resistor de carga. Portanto, na execução do projeto a variável a seguir foi utilizada:

```
1    // Ajuste do sensor de corrente
2    float const_sensor_curr = 56.4175;
```

3.1.4 Módulo de Comunicação

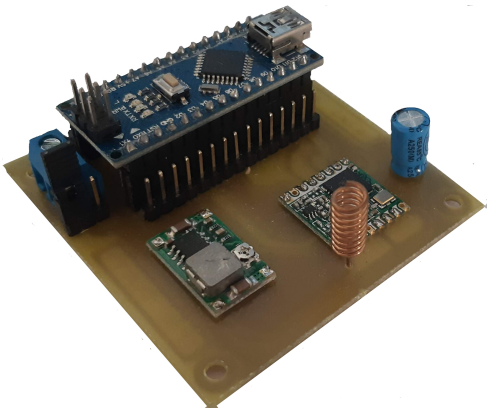
Conforme mencionado anteriormente, a tecnologia de comunicação adotada no projeto foi a LoRaWAN. Sendo assim, o *endpoint* deve possuir um módulo de comunicação, a fim de proporcionar o envio dos dados coletados pelos sensores. Aproveitou-se o módulo desenvolvido em projetos anteriores pelo Grupo de Sistemas Embarcados e Distribuídos (NERsD) do Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC), apresentado na Figura 22.

O módulo é constituído por um Arduino Nano, que possui o microcontrolador ATmega328, um *transceiver* RFM95W, da *Hoperf Eletronic* que pode atingir uma sensibilidade de recepção maior que -148 dBm, transmissão constante em 20 dBm e taxa de bits programável em até 300 kbps. Outro componente importante do módulo é o regulador de tensão utilizado para alimentar o sistema, fornecendo maior potência do que quando alimentado com a porta USB do Arduino.

Para utilização do *endpoint* com a tecnologia de comunicação LoRaWAN, a biblioteca utilizada foi a lmic[1]. Após a confecção de todo o código embarcado no Arduino do *endpoint*, foi constatado que ele possui aproximadamente 34 kBytes, enquanto as variáveis necessitam de aproximadamente 2.9 kBytes de memória dinâmica. Esses valores impossibilitam a utilização do Arduino Nano, sendo assim, optou-se pelo Arduino Mega, que tem uma capacidade mais indicada para essa aplicação.

[1] https://github.com/mcci-catena/arduino-lmic

Figura 22 – *Endpoint* com *transceiver* LoRaWAN.

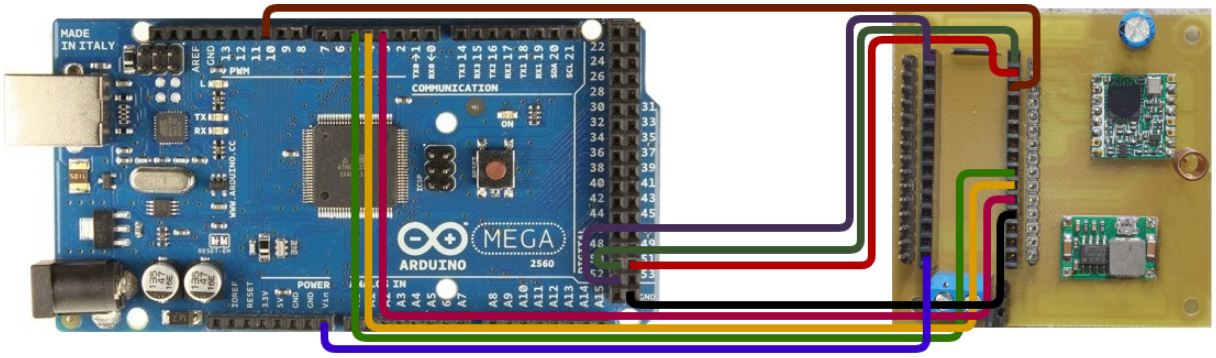


Fonte: Autor (2021).

Para possibilitar essa substituição, foram realizadas as conexões das portas do Arduino Mega com as portas necessárias para a comunicação com o módulo RFM95W, do módulo confeccionado pelo NERsD, capresentadas na Figura 23. Posteriormente, realizou-se o mapeamento dos pinos no código conforme o trecho de código a seguir:

```
1   // Pin mapping ARDUINO MEGA
2   const lmic_pinmap lmic_pins = {
3     .nss = 10,
4     .rxtx = LMIC_UNUSED_PIN,
5     .rst = 5,
6     .dio = {3, 4, LMIC_UNUSED_PIN},
7   };
```

Figura 23 – Conexões entre Arduino Mega e módulo LoRaWAN.



Fonte: Autor (2021).

3.1.5 Gateway

A tecnologia LoRaWAN exige para comunicação, através do link de rádio, ao menos um *gateway* no raio de alcance do *endpoint*. Sendo assim, para estabelecer a comunicação necessária no projeto utilizando essa tecnologia, foi adotado o *gateway* ITG 200 (KHOMP, 2020), apresentado na Figura 24.

Esse gateway foi desenvolvido para soluções IoT, sendo capaz de realizar o gerenciamento das informações recebidas pelos links de rádio ou pelas duas portas *1-Wire* destinadas à conexões de sensores. Estas informações são enviadas para servidores externos através dos protocolos de integração HTTPS ou

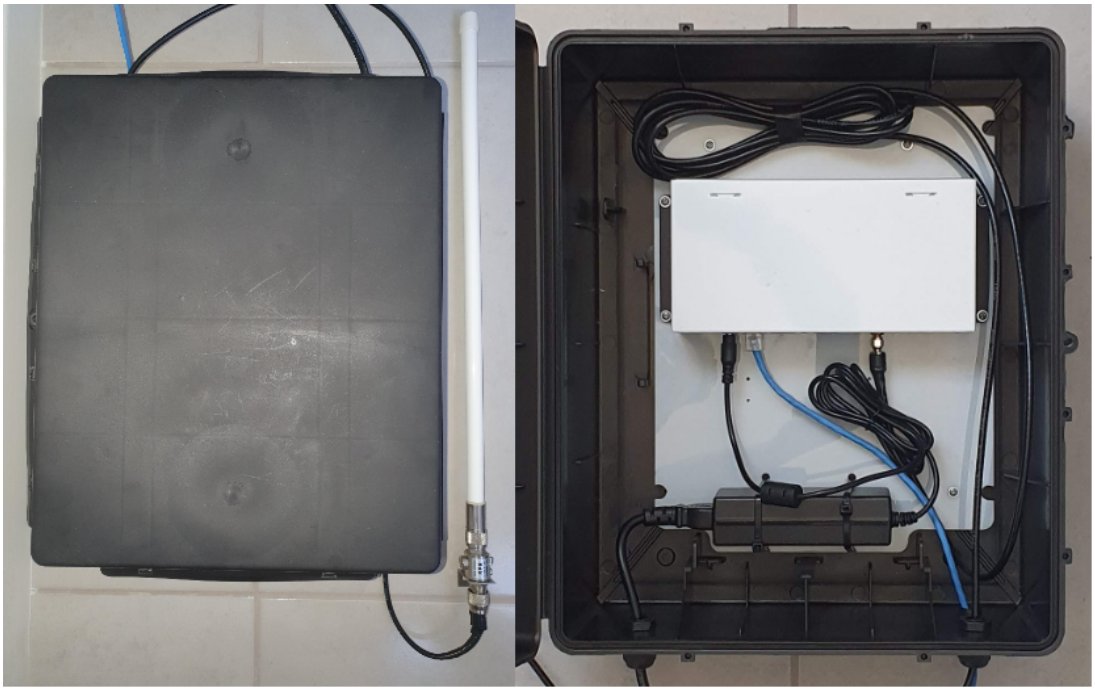
Figura 24 – *Gateway* ITG 200 *Indoor*.

Fonte: KHOMP (2020).

MQTT. Além disso, ele está equipado com o módulo LoRa, utilizando o protocolo LoRaWAN na versão 1.0.3, com a frequência de 915 MHz, possuindo até +28 dBm de potência.

Para facilitar a sua utilização, o *gateway* foi instalado em uma caixa hermética (Figura 25). Acompanha o ITG 200 na caixa hermética, uma fonte 12 VCC, uma antena externa de 5 dBi e 50 Ω com um supressor de surto SP6 e um cabo UTP utilizado para conectar o *gateway* à rede.

Figura 25 – *Gateway* ITG 200 montado em caixa hermética.



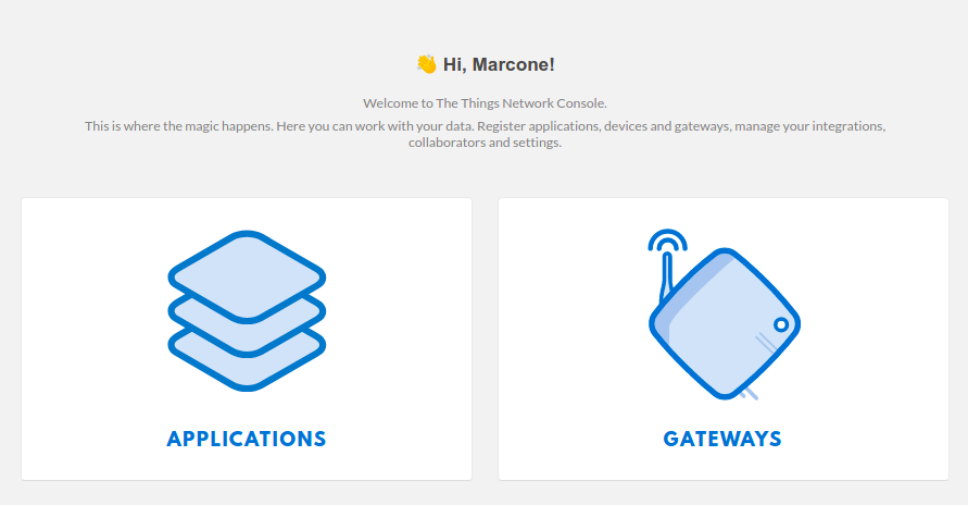
Fonte: Autor (2021).

3.1.6 TTN

Para utilizar o *endpoint* e o *gateway* na rede da TTN, é necessário registrar ambos ao sistema. Para isso, foi criada uma conta gratuita na plataforma e acessado menu **Console**, que é a parte destinada ao gerenciamento e registro de aplicações e *gateways*, conforme apresentado na Figura 26.

- ***Gateway*:** para adicionar um novo *gateway*, as seguintes informações são necessárias:
  - ***Gateway Extended Unique Identifier (EUI)*:** o EUI é um código numérico, representado na forma hexadecimal de 16 dígitos que identifica exclusivamente um *gateway* na rede LoRaWAN;
  - ***Description*:** uma breve descrição para o *gateway*;

Figura 26 – Menu Console na TTN.



Fonte: TTN (2020).

- ***Frequency Plan*:** frequência utilizada pelo *gateway*;
- ***Router*:** roteador ao qual o *gateway* irá se conectar;
- ***Antena Placement*:** local onde a antena está instalada (*indoor* ou *outdoor*);
- ***Location*:** localização global do *gateway*.

Após as configurações realizadas, o gateway está registrado na TTN com o status *connected*, conforme apresentado na Figura 27.

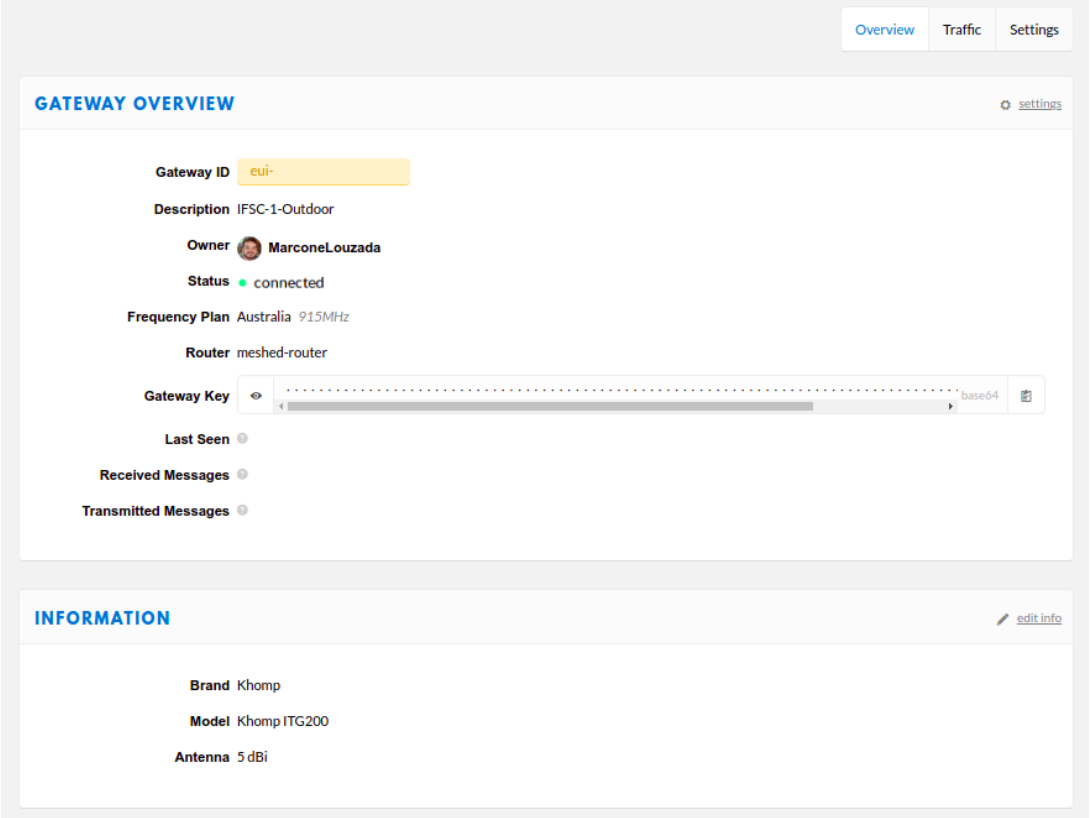
- ***Applications*:** para adicionar um novo *endpoint*, deve-se criar uma aplicação na TTN. As seguintes informações são necessárias:
  - ***Application ID*:** identificação única para a aplicação;
  - ***Description*:** uma breve descrição para a aplicação;
  - ***Handler registration*:** *cluster* de rede, para minimizar a latência da rede é necessário escolher um cluster mais próximo ao *gateway*.

Após criar a aplicação, deve-se adicionar um dispositivo. O dispositivo deve conter também, um ID único e um EUI, que foi gerado automaticamente pela TTN. A Figura 28 apresenta o *device* adicionado à rede TTN.

Para associar o dispositivo e a aplicação ao *endpoint*, as informações *Device EUI*, *Application EUI* e *APP Key*, presentes na Figura 28, foram adicionadas ao código embarcado no Arduino, conforme trecho de código a seguir:

```
static const u1_t PROGMEM APPEUI[8] = { 0x41, 0x25, 0x04, 0xD0, 0x7E, 0xD5, 0xB3, 0x70 };
void os_getArtEui (u1_t* buf) {
memcpy_P(buf, APPEUI, 8);
}
static const u1_t PROGMEM DEVEUI[8] = { 0x1D, 0x21, 0x1E, 0xD2, 0xB8, 0x21, 0x9B, 0x00 };
void os_getDevEui (u1_t* buf) {
memcpy_P(buf, DEVEUI, 8);
}
static const u1_t PROGMEM APPKEY[16] = { 0x70, 0xB7, 0x26, 0x03, 0xCB, 0xC8, 0x53, 0xFA, 0xD3, 0
    xCF, 0x1E, 0x9B, 0xAC, 0xB4, 0x0E, 0x78 };
void os_getDevKey (u1_t* buf) {
```

Figura 27 – *Gateway* registrado na TTN.



Fonte: TTN (2020).

```
memcpy_P(buf, APPKEY, 16);
}
```

3.1.7 *Dashboard*

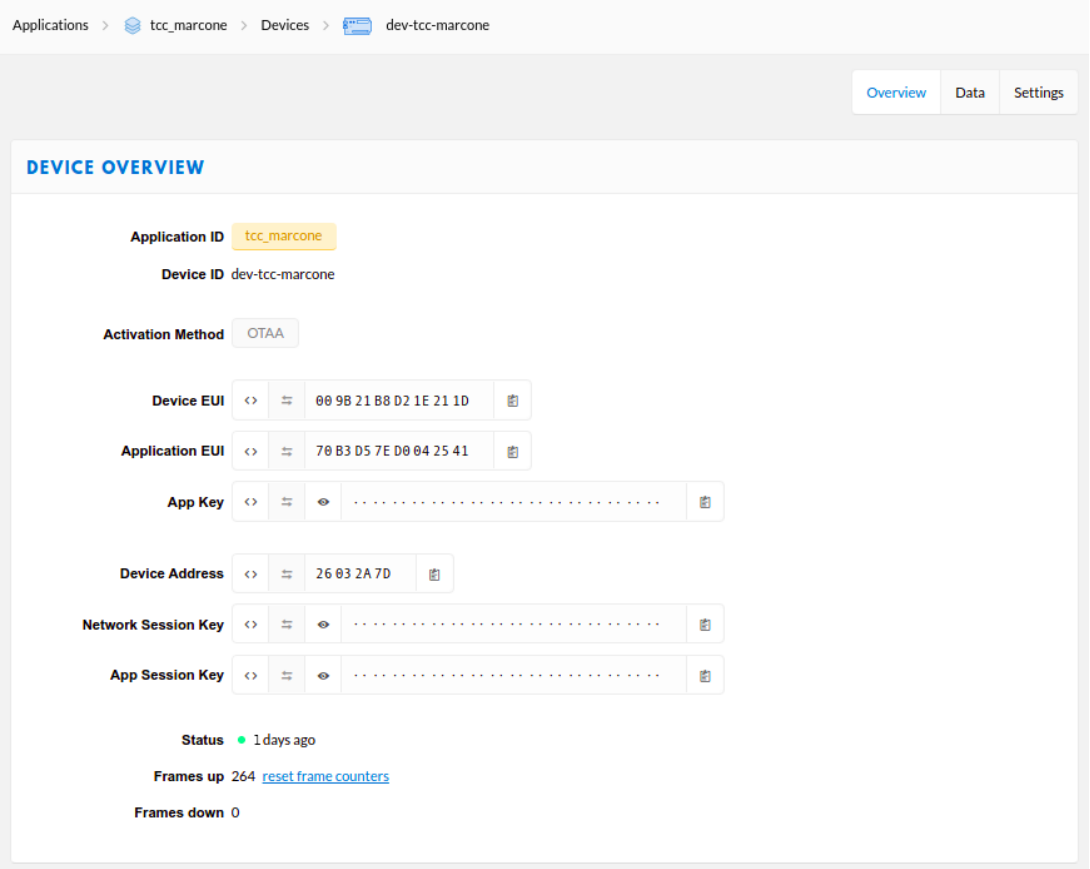
A parte final da plataforma de monitoramento é o painel de visualização da aplicação. Como o objetivo é o desenvolvimento de um MVP, foi adotada uma plataforma de aplicações IoT. Para escolha da plataforma, foram observados as integrações disponíveis com a TTN, mencionadas na seção 2.4.2. Assim, a plataforma escolhida foi a Ubidots, que visa facilitar o desenvolvimento e visualização dos dados. Então, foi criada uma conta gratuita na plataforma.

Aplicações IoT que utilizam a tecnologia LoRaWAN geralmente transmitem na sua carga útil, dados binários em bytes. Para construir a integração e trabalhar com os dados coletados nos sensores do *endpoint*, o primeiro passo realizado foi a decodificação dos dados enviados à TTN. A função de decodificação foi inserida na aplicação, conforme apresentado na Figura 29.

Os dados são enviados em 16 Bytes pelo *endpoint*. São necessários dois Bytes para o envio de cada unidade mensurada, pois no momento da aquisição no *software* os valores são multiplicados por 100, para que sejam preservadas 2 casas decimais. Na função *Decoder*, os bytes recebidos são agrupados na variável correspondente, depois os valores são divididos por 100.00, para obter o *float* mensurado por cada um dos sensores. A função *Decoder* utilizada foi:

```
function Decoder(bytes, port) {
  var t   =(bytes[0] << 8)+ bytes[1];
  var t_1 =(bytes[2] << 8)+ bytes[3];
```

Figura 28 – *Application* registrada na TTN.



Fonte: TTN (2020).

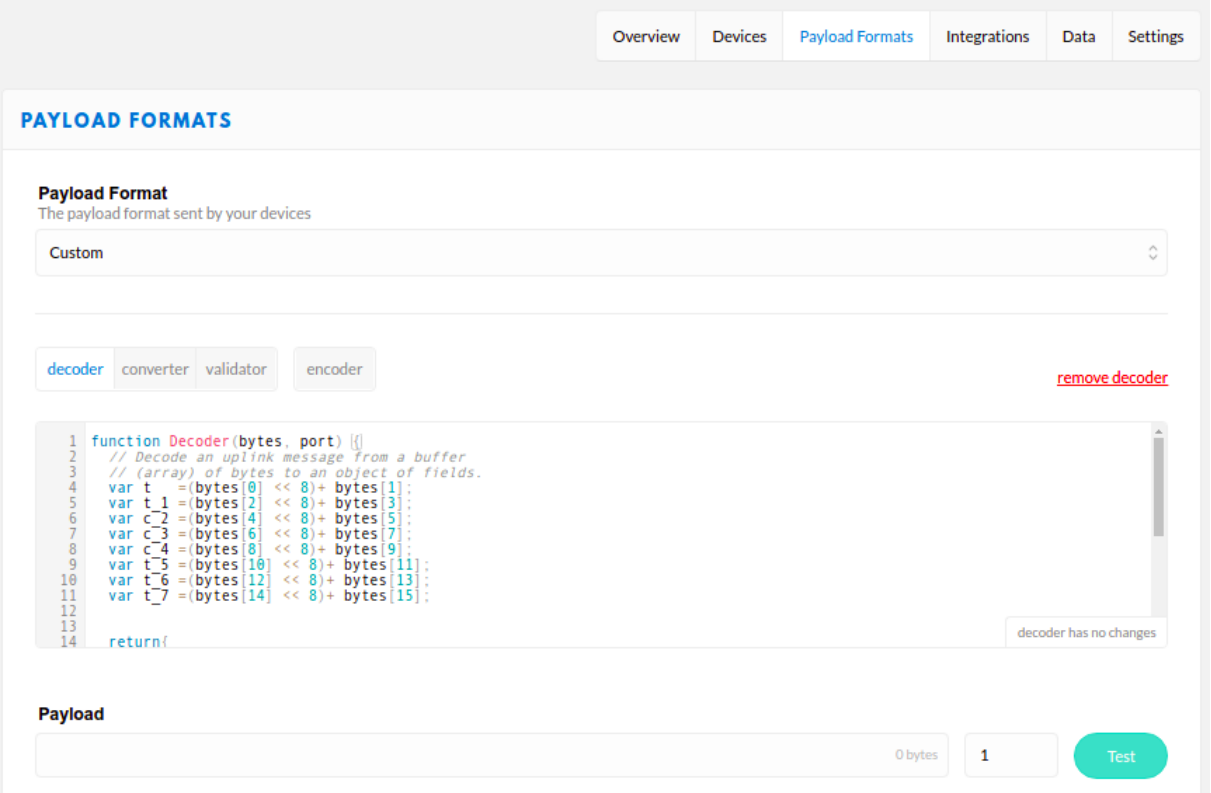
```
  var c_2 =(bytes[4] << 8)+ bytes[5];
  var c_3 =(bytes[6] << 8)+ bytes[7];
  var c_4 =(bytes[8] << 8)+ bytes[9];
  var t_5 =(bytes[10] << 8)+ bytes[11];
  var t_6 =(bytes[12] << 8)+ bytes[13];
  var t_7 =(bytes[14] << 8)+ bytes[15];

  return{
    Temperatura_1 : t/100.00,
    Temperatura_2 : t_1/100.00,
    Corrente_1 : c_2/100.00,
    Corrente_2 : c_3/100.00,
    Corrente_3 : c_4/100.00,
    Tensao_1 : t_5/100.00,
    Tensao_2 : t_6/100.00,
    Tensao_3 : t_7/100.00,
  };
}
```

Após decodificar a mensagem recebida na TTN o passo seguinte foi adicionar a integração. Para isso, acessou-se o menu *Applications* -> *Integrations* -> *Add Integration* -> Ubidots. Para configurar a integração foi necessário adicionar um nome no *Process ID*, adicionada à chave *default*, que permite o acesso aos dispositivos e as mensagens. O último passo necessário para configurar a integração na plataforma da foi adicionar o *token*, que é disponibilizado pela plataforma Ubidots.

Assim, os dados coletados pelos sensores no *endpoint* passaram a ser recebidos na plataforma

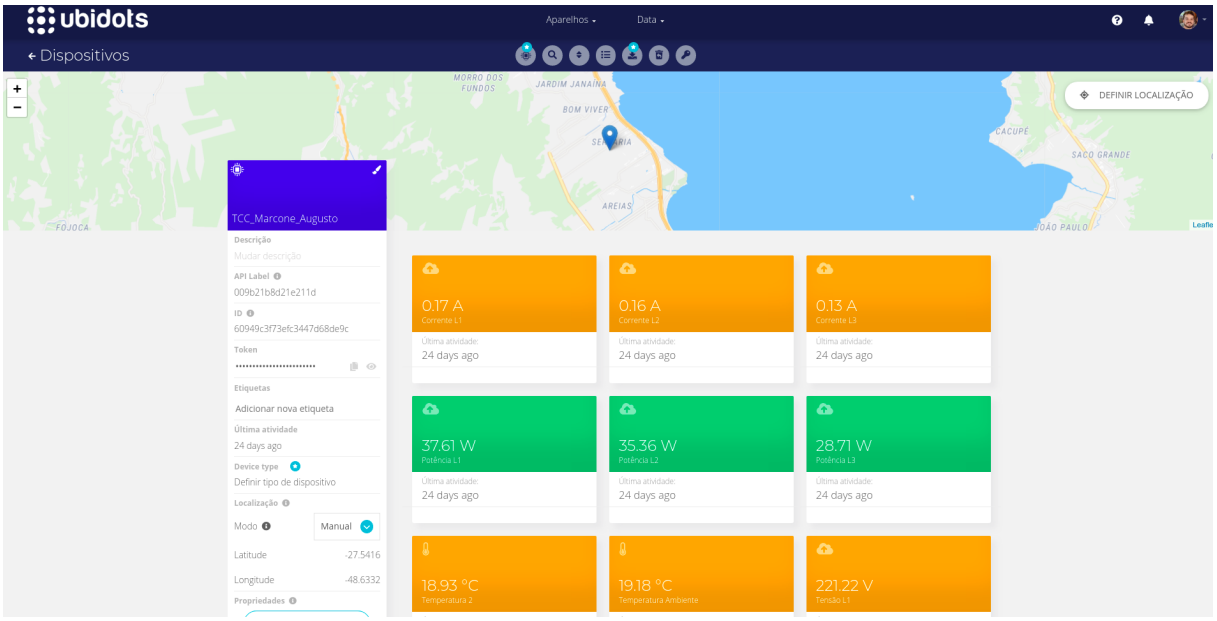
Figura 29 – *Payload Formats* na TTN.



Fonte: TTN (2020).

Ubidots, conforme apresentado na Figura 30. Para complementar os dados, foram criadas algumas variáveis no Ubidots, como por exemplo, três variáveis para mensurar a potência aparente obtida multiplicando a tensão e a corrente de cada fase do transformador, além de variáveis indicativas para os níveis de tensão crítico e precário, em cada fase, conforme definidos na PRODIST.

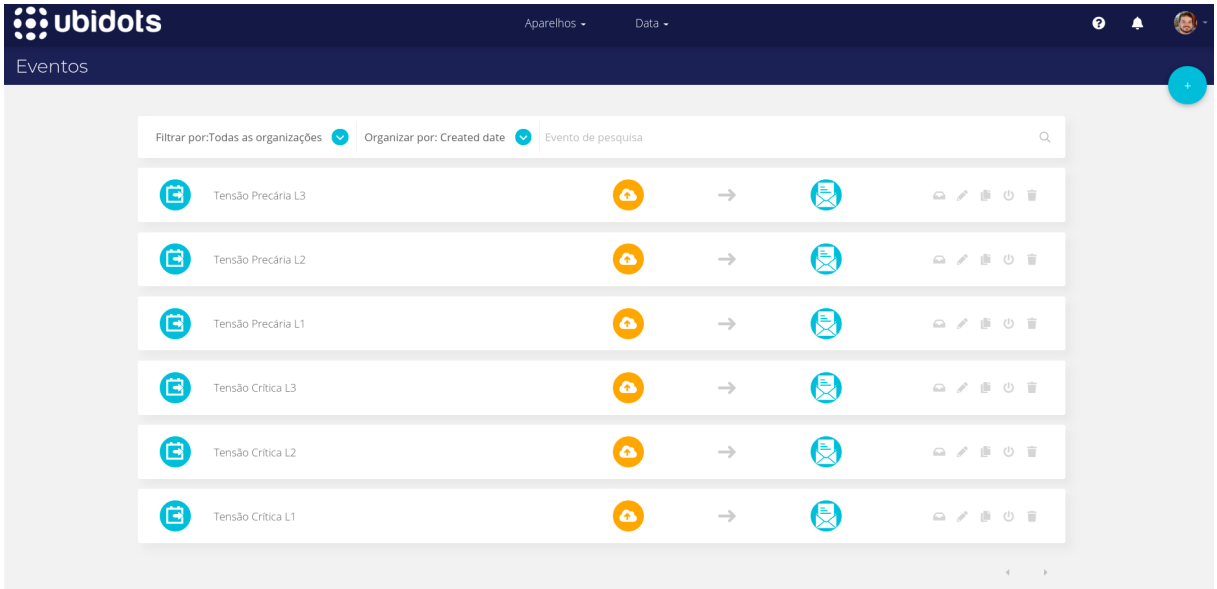
Figura 30 – Dados recebidos na plataforma Ubidots.



Fonte: Ubidots (2021).

Além das variáveis indicativas de níveis de tensão estabelecidas na PRODIST, foram adicionados alertas para que quando uma das condições de níveis de tensão indesejada fosse atingida, em cada fase, seria disparada mensagem via e-mail, para alertar sobre o fato ocorrido. Os eventos adicionados para monitoramento da qualidade em níveis de tensão podem ser observados na Figura 31.

Figura 31 – Eventos para monitoramento da qualidade dos níveis de tensão.



Fonte: Ubidots (2021).

Com isso, o *dashboard* completo para apresentação das unidades mensuradas em tempo real (apresentado na Figura 32), contempla todas as informações coletadas pelos sensores que devem ser acoplados ao transformador, além das variáveis adicionais e indicadores de atingimento indesejado de níveis de tensão.

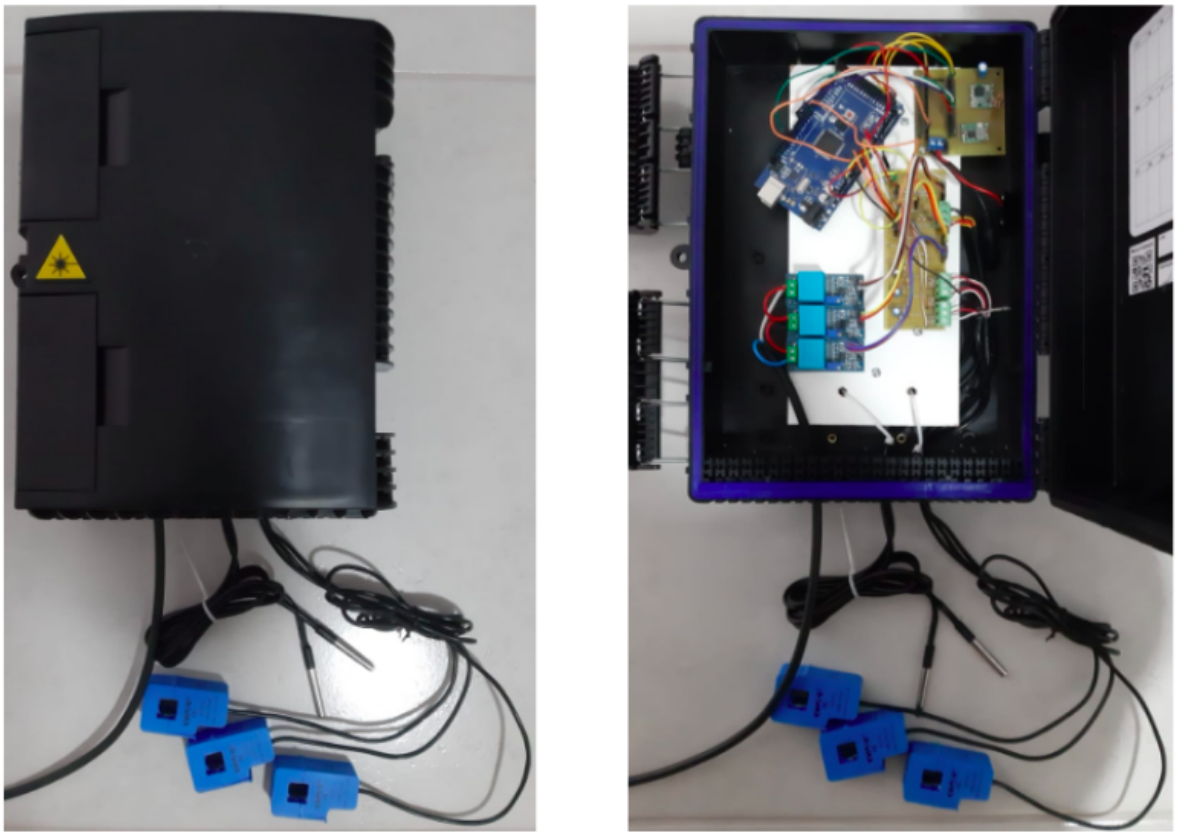
Figura 32 – *Dashboard* completo no Ubidots.

Fonte: Ubidots (2021).

3.1.8 Protótipo Completo

Com a conclusão das etapas iniciais, o sistema pôde ser montado de forma completa, utilizando uma caixa hermética, apresentada na Figura 33(a), necessária para proteger os componentes sensíveis da ação dos raios ultravioleta e também da chuva. A disposição dos componentes utilizados no protótipo, instalados no interior da caixa hermética, pode ser visualizada na Figura 33(b).

Figura 33 – Caixa hermética com o dispositivo e os componentes utilizados para coleta dos dados.



(a) (b)

Fonte: Autor (2021).

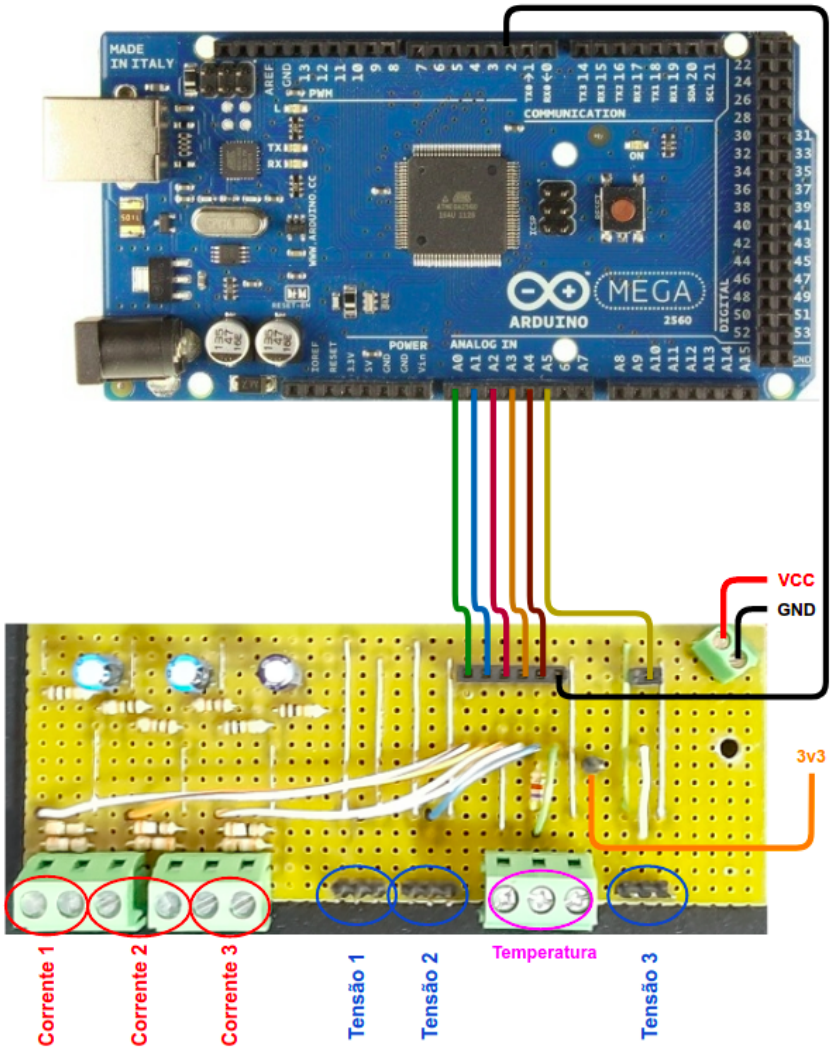
Na Figura 33(b), pode-se observar também a utilização do Arduino Mega junto aos periféricos necessários para o desenvolvimento do projeto. A ligação entre o Arduino e o módulo de comunicação é feita de forma direta, com o auxílio de *jumpers*, conforme apresentado na seção 3.1.4.

Os circuitos eletrônicos necessários para utilizar os sensores de tensão, corrente e temperatura, foram montados em uma única placa de prototipagem. A conexão entre a prototipagem e os pinos do Arduino Mega, utilizados para leitura dos sensores, também é realizada com o uso de *jumpers*, apresentada na Figura 34.

Para realizar a coleta dos dados mensurados pelos sensores, o código desenvolvido e embarcado no Arduino, tem o seu funcionamento baseado na máquina de estados apresentada na Figura 35. Quando iniciado, o código executa as instruções contidas na função *setup()*, onde são configuradas as variáveis e os parâmetros de leitura dos sensores.

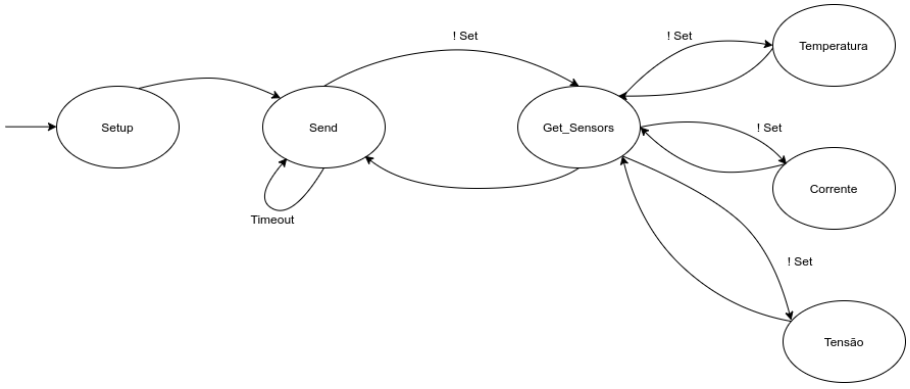
A biblioteca lmic controla a execução do código. Sempre que o tempo configurado é atingido, a função *Send()* é invocada e a partir dela a função *Get_Sensors()*, onde é solicitada a leitura de todos os sensores. A variável TX_INTERVAL, apresentada a seguir, define o *timeout* para coleta e envio dos

Figura 34 – Esquemático de ligação entre a placa de conexão dos sensores e o Arduino Mega.



Fonte: Autor (2021).

Figura 35 – Máquina de estados de funcionamento do código embarcado no Arduino.



Fonte: Autor (2021).

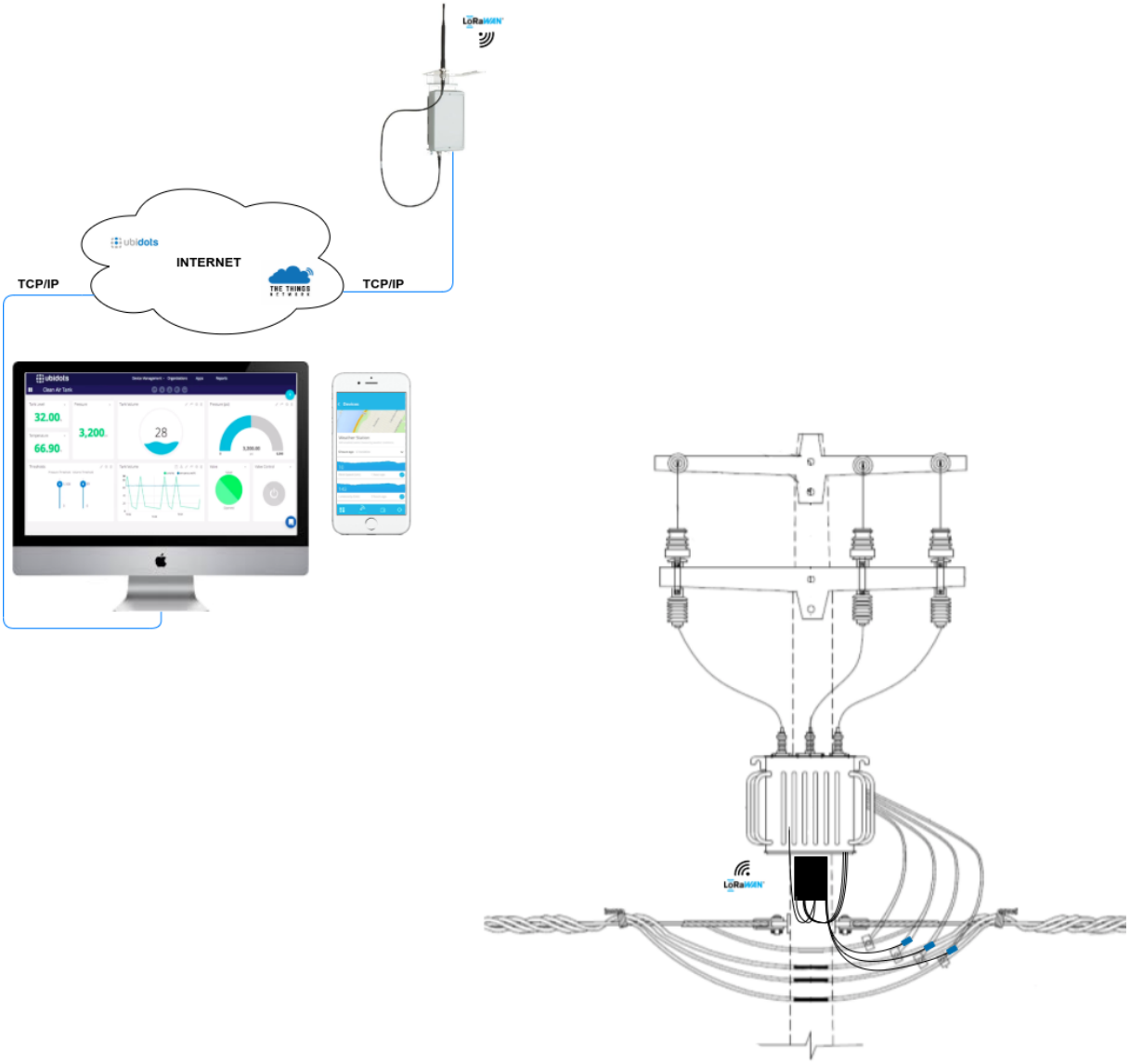
dados (em segundos), que de acordo com a PRODIST deve ser igual a 10 minutos.

```
const unsigned TX_INTERVAL = 600;
```

A transição de estados não é realizada com o tradicional *Request/Reply*, pois as unidades mensuradas são salvas nas variáveis globais correspondentes a cada uma delas, ao invés de serem retornos das funções.

Por fim, o diagrama completo de funcionamento do projeto pode ser visualizado na Figura 36. Os dados são coletados no transformador de distribuição e enviados com a tecnologia sem fio LoRaWAN para o *gateway*. O *gateway* direciona os dados para a TTN, que os trata, separando o *payload* recebido nas variáveis correspondentes. Então os dados são enviados pela integração da TTN com a Ubidots e apresentados no *Dashboard*, destinado ao usuário final.

Figura 36 – Diagrama completo da plataforma de monitoramento.



Fonte: Autor (2021).

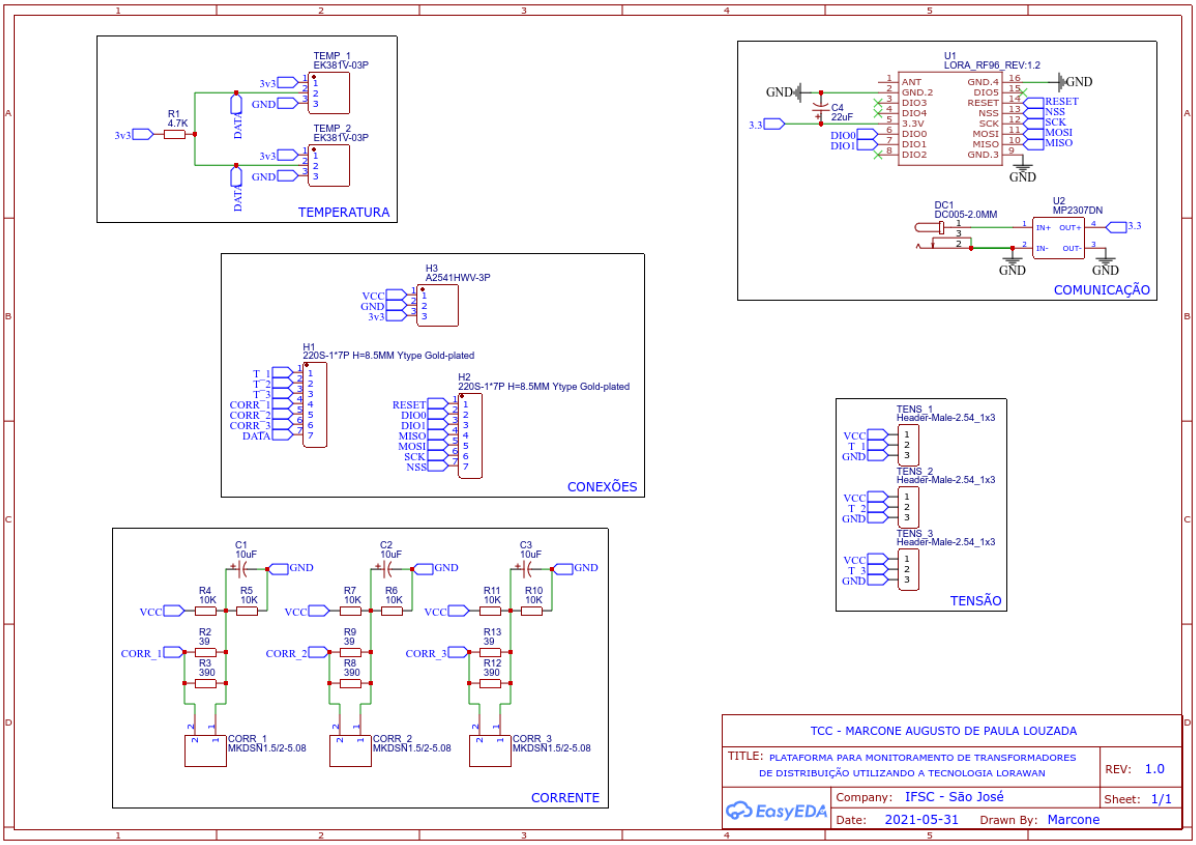
3.2 Otimização de *Hardware*

Após a prototipagem do projeto, foi avaliada uma forma de otimizar o *hardware* utilizado, visando facilitar a utilização do protótipo. Com isso, duas possibilidades foram analisadas, sendo a primeira delas desenvolver um *hardware* único, e a segunda desenvolver apenas o *hardware* necessário para monitoramento e envio dos dados através da tecnologia LoRaWAN.

O *hardware* unificado deve possuir o microcontrolador, o gravador e toda a parte necessária para instalar os periféricos apresentada na seção 3.1.8. Já o *hardware* destinado ao projeto, deve possuir apenas a parte necessária para coleta e envio dos dados, podendo ser utilizado com qualquer microcontrolador disponível no mercado.

Sendo assim, foi escolhida a segunda opção de desenvolvimento e com a ajuda do *software* EasyEDA[2], foi realizado o projeto de um *hardware* integrando toda parte necessária para a realização do projeto. O esquemático para o desenvolvimento está apresentado na Figura 37, contemplando todos os circuitos apresentados na seção 3.1.8.

Figura 37 – Esquemático do circuito otimizado.



Fonte: Autor (2021).

A Tabela 8 apresenta os componentes utilizados para confecção do circuito, junto às suas respectivas posições de instalação e quantidade.

[2] Ferramenta de design de PCB *On-line* - https://easyeda.com/

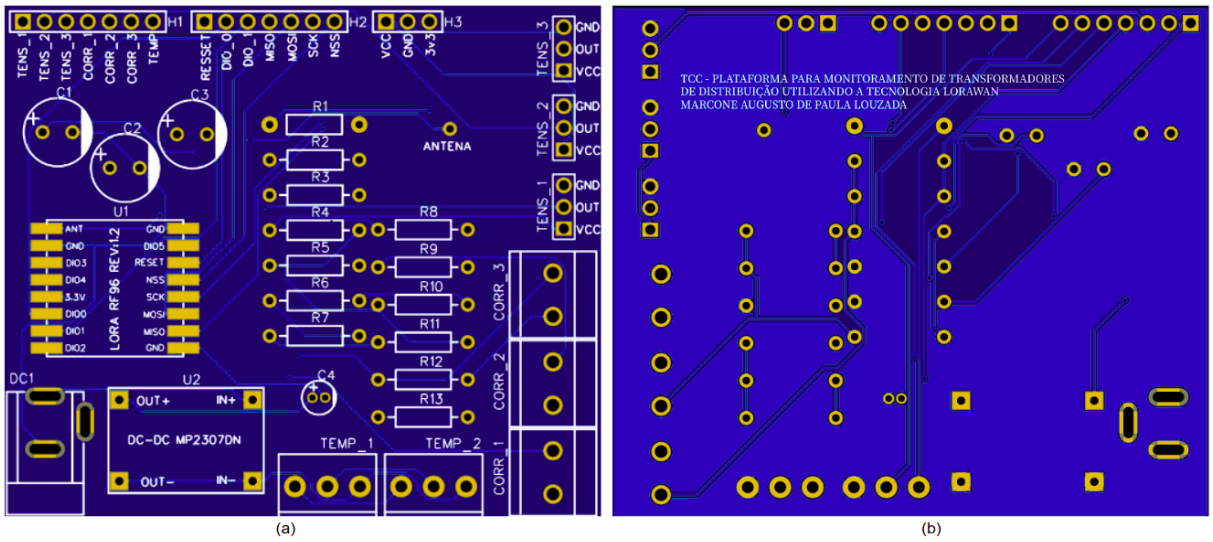
Tabela 8 – Componentes utilizados para confecção do circuito.

Nome	Posição	Quantidade
Capacitor 22 µF	C4	1
DC005-2.0MM	DC1	1
220S-1*7P H=8.5MM *Ytype*	H2, H1	2
LORA_RF96_REV:1.2	U1	1
MP2307DN	U2	1
Capacitor 10 µF	C1, C2 e C3	3
MKDSN1.5/2-5.08	CORR_1, CORR_2 e CORR_3	3
A2541HWV-3P	H3	1
Resistor 4.7 kΩ	R1	1
Resistor 39 Ω	R2, R9 e R13	3
Resistor 390 Ω	R3, R8 e R12	3
Resistor 10 kΩ	R4, R5, R6, R7, R10 e R11	6
EK381V-03P	TEMP_1 e TEMP_2	2
Header-Male 2.54_1x3	TENS_1, TENS_2 e TENS_3	3

Fonte: Autor (2021).

O *software* EasyEDA permite realizar a conversão do esquemático em uma *Printed Circuit Board* (PCB). Sendo assim, foi projetada uma PCB de duas camadas com as dimensões 70 mm x 60 mm, que pode ser visualizada na Figura 38. A Figura 38(a) apresenta a camada superior da PCB, enquanto a Figura 38(b) apresenta a camada inferior.

Figura 38 – PCB desenvolvida.



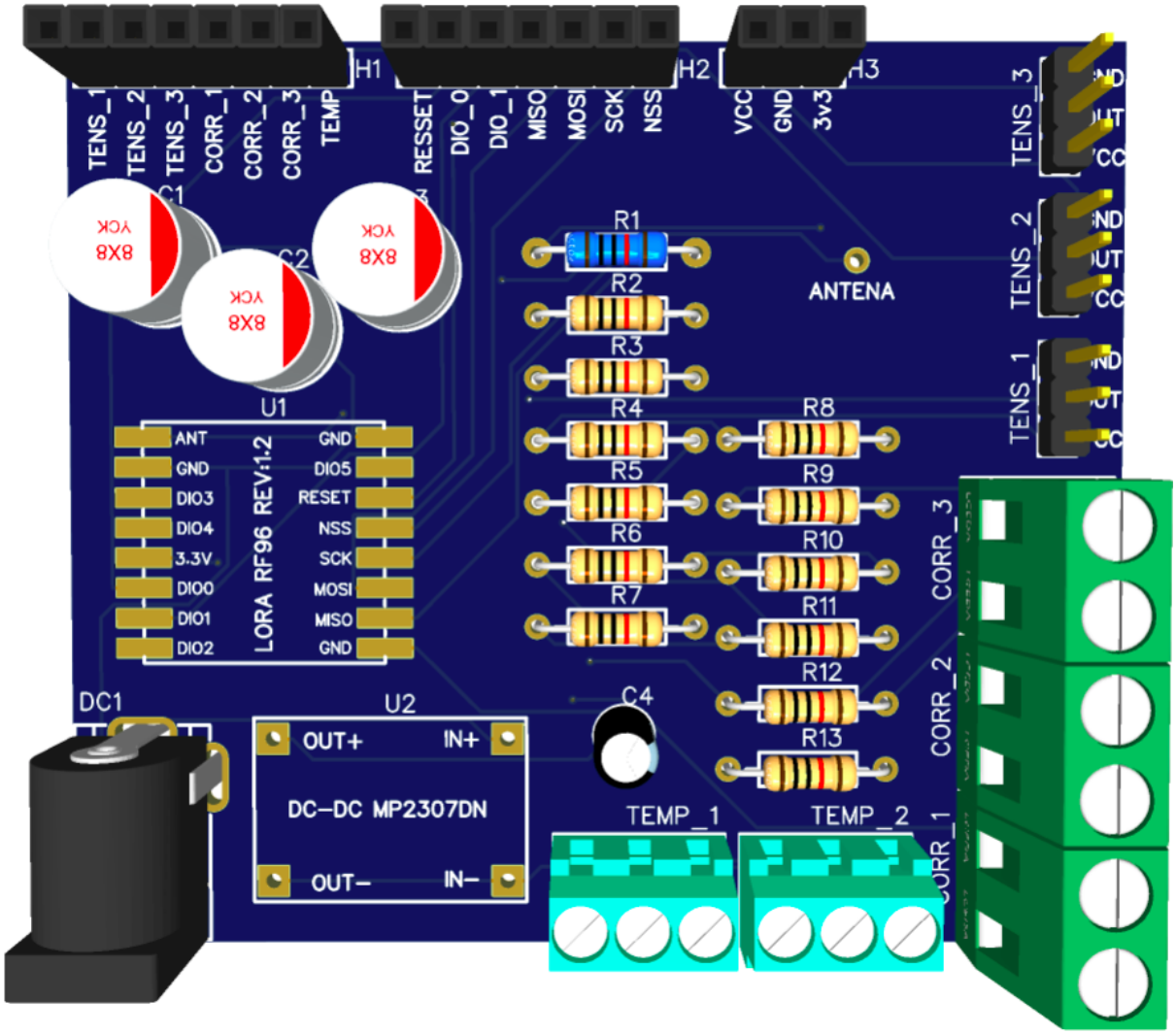
Fonte: Autor (2021).

Todas as conexões utilizadas na PCB estão na camada superior. São elas:

- **DC1:** conector destinado à alimentação da PCB, que deve ser de 9 a 12 VDC;
- **TEMP_1** e **TEMP_2:** conectores para instalação dos sensores de temperatura;
- **CORR_1**, **CORR_2** e **CORR_1:** conectores para instalação dos sensores de corrente;
- **TENS_1**, **TENS_2** e **TENS_3:** conectores para interligação entre a PCB e os sensores de tensão ZMPT101B;
- **H1:**- conectores para leitura dos sensores;
- **H2:**- conectores destinados para utilização do módulo de comunicação RF96 LoRaWAN;
- **H3:**- conectores para alimentação necessária dos sensores.

Para uma melhor visualização, o EasyEDA permite a criação da PCB projetada em três dimensões, conforme apresentado na Figura 39. Apenas três componentes não são renderizados, sendo a antena de comunicação, o módulo RF96 e o regulador de tensão MP2307DN.

Figura 39 – PCB renderizada em 3D.



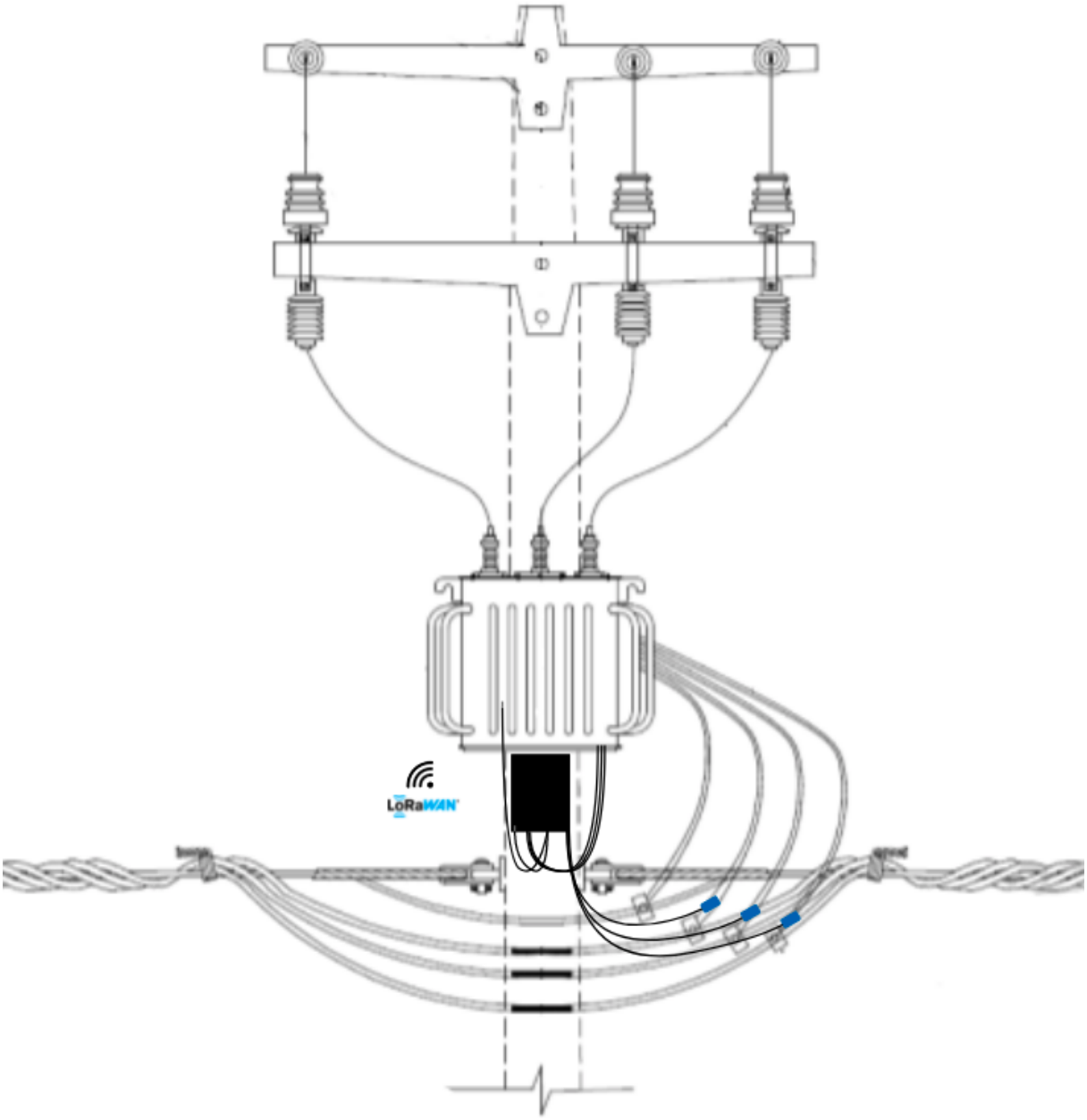
Fonte: Autor (2021).

A PCB apresentada nesta seção trata-se de uma proposta de otimização de *hardware*. Porém, não foi confeccionada para realização de testes, sendo assim, o protótipo utilizado para os testes é o apresentado na seção 3.1.8.

4 TESTES COM MVP

A instalação sugerida para o dispositivo de monitoramento do transformador está apresentada na Figura 40, onde os sensores de corrente devem ser acoplados nas três fases de baixa tensão do transformador, cada um na sua correspondente. Os cabos de baixa tensão devem ser derivados e conectados aos sensores de tensão correspondentes. Um dos sensores de temperatura deve ser acoplado ao encapsulamento do transformador, enquanto o segundo deve ser instalado em uma localização que permita a coleta da temperatura ambiente.

Figura 40 – Sugestão de instalação.



Fonte: Autor (2021).

4.1 Testes de Campo e Mercado

Durante o desenvolvimento, foram realizados testes para avaliar o funcionamento de cada sensor. Para validar a plataforma como um todo, o protótipo foi levado ao câmpus de São José do IFSC, para realização de testes. Além disso, foi realizado um levantamento de custo para implementação da plataforma e uma pesquisa sobre soluções disponíveis no mercado.

4.1.1 Testes

A seção 3, aborda o desenvolvimento completo da plataforma, dividindo o desenvolvimento em seus principais componentes. Sendo assim, a implementação de cada sensor foi explanada de forma individual antes de serem unificados em um protótipo.

A sequência do processo de desenvolvimento adotado foi realizar o teste funcional a cada etapa, iniciando pelos sensores de temperatura. Após a confecção do *hardware* necessário para o seu funcionamento, foi desenvolvido um código para validar apenas as grandezas medidas por esses sensores, direcionando os valores coletados para interface serial e comparando o valor obtido com um termômetro.

Para os sensores de tensão, que não dependiam da confecção de um *hardware* específico para possibilitar a leitura dos dados, foi desenvolvido um código embarcado no Arduino para coleta das informações, o valor foi exibido via interface serial e comparado aos dados mensurados com a ajuda de um multímetro.

A coleta dos dados através dos sensores de corrente, foi testada de forma individual. Após o desenvolvimento do *hardware* e do *software* para essa finalidade, os dados também foram coletados e exibidos na interface serial e posteriormente comparados com os dados coletados como o auxílio de um alicate amperímetro. Além dos testes individuais de cada sensor, a comunicação foi validada enviando uma sequência de dados pré definida e comparando com os dados recebidos na TTN.

Por fim, a plataforma foi testada de forma completa. Para isso, o *hardware* destinado à coleta dos dados foi levado ao IFSC, mas por questões de segurança, o protótipo não foi instalado em um transformador de distribuição. A alternativa encontrada foi realizar o monitoramento do quadro de distribuição elétrico do Laboratório de Condicionamento de Ar e Eletricidade.

O local foi escolhido por possuir um quadro elétrico com um circuito trifásico, que possibilitaria a leitura das três fases com os sensores de tensão, além de dispor de bancadas de ensino que possibilitam a instalação de cargas para variar a corrente elétrica no circuito como motores e lâmpadas. Então, o protótipo foi montado no quadro elétrico, apresentado na Figura 41.

Para uma maior segurança na realização dos testes, o protótipo foi instalado após um interruptor diferencial residual, que permite a detecção de pequenas fugas de corrente no circuito elétrico, e caso detectada, o disjuntor aciona o desligamento automático, interrompendo a alimentação (WEG, 2020). Além disso, pelo disjuntor passam as três fases e o neutro do circuito que são necessários para realizar a medição da tensão, facilitando a instalação.

Vale ressaltar que apenas o protótipo desenvolvido foi levado ao IFSC para realizar os testes, portanto, o funcionamento da comunicação dependia do *endpoint* se associar ao *gateway* instalado na instituição. Assim, conforme esperado, quando o protótipo entrou em funcionamento a comunicação foi estabelecida e verificada através da TTN.

Durante a instalação do protótipo para realização dos testes foi possível observar o recebimento das notificações enviadas via e-mail, disparadas quando os níveis de tensão atingem os valores apresentados na seção 2.2. Assim, durante a montagem do *setup* para realização dos testes, notificações como as

Figura 41 – Protótipo instalado no Laboratório de Condicionamento de Ar e Eletricidade.

Fonte: Autor (2021).

apresentadas na Figura 42 foram recebidas.

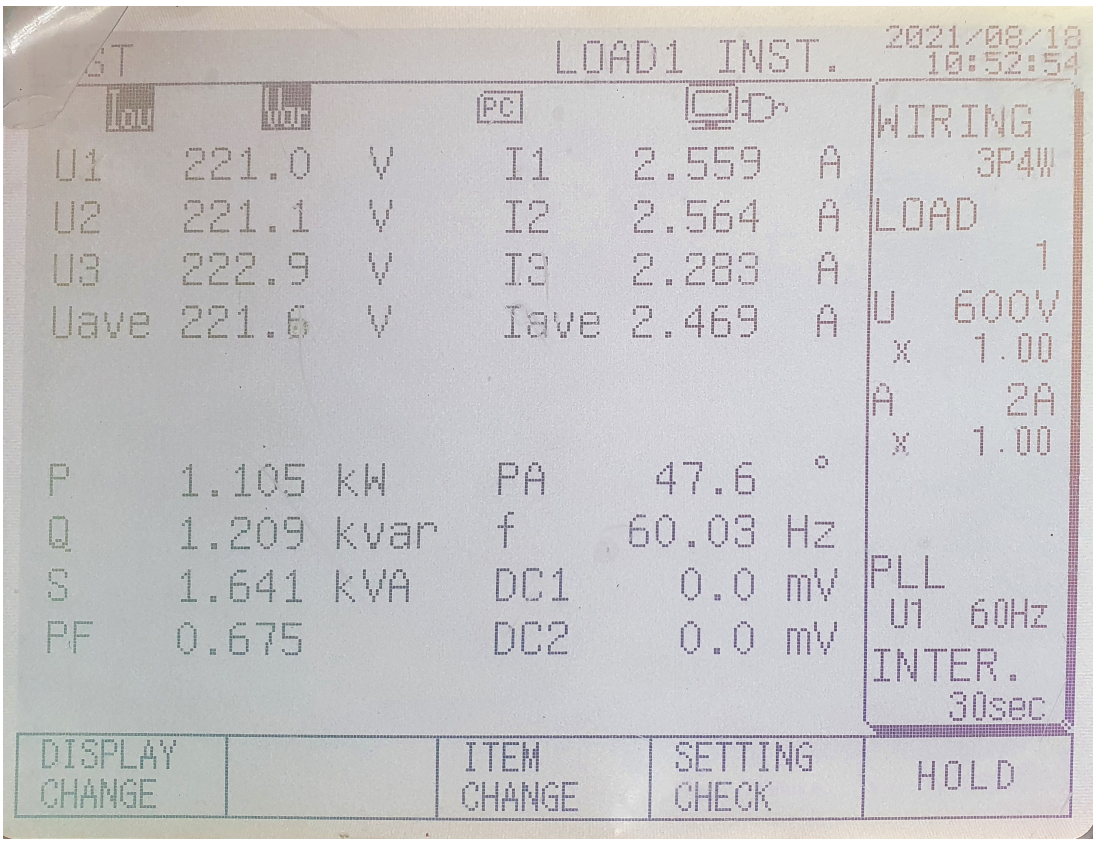
Figura 42 – Alertas enviados por e-mail pela plataforma Ubidots.

Fonte: Autor (2021).

Para validar os dados coletados pela plataforma foi utilizado o medidor de energia CW240, fabricado pela empresa YOKOGAWA, que permite realizar a medição de valores instantâneos, medições de qualidade, harmônicos, forma de onda e flutuação de tensão (YOKOGAWA, 2021). Ou seja, o CW240 se trata de um medidor completo e confiável. Sendo assim, foi instalado junto ao protótipo para que as medidas fossem comparadas.

Com os dispositivos devidamente instalados e a comunicação estabelecida, o circuito foi ligado e algumas cargas foram adicionadas na bancada de testes, utilizando as três fases. O resultado gerado pode ser observado na Figura 43. A potência aparente (S) representa a soma das três potências aparentes mensuradas.

Figura 43 – Medição realizada com o CW240.



Fonte: Autor (2021).

Para obter o valor individual da potência aparente de cada fase a Equação (4.1) foi utilizada.

$$S = U_{RMS} \times I_{RMS} \tag{4.1}$$

Os valores de potência aparente individual mensuradas pelo CW240 podem ser observados na Tabela 9.

Tabela 9 – Potência aparente mensurada por fase.

Fase	**U (V)**	**I (A)**	**S (VA)**
1	221.0	2.559	565.539
2	221.1	2.564	566.90
3	222.9	2.283	508.88
		S	1641.32

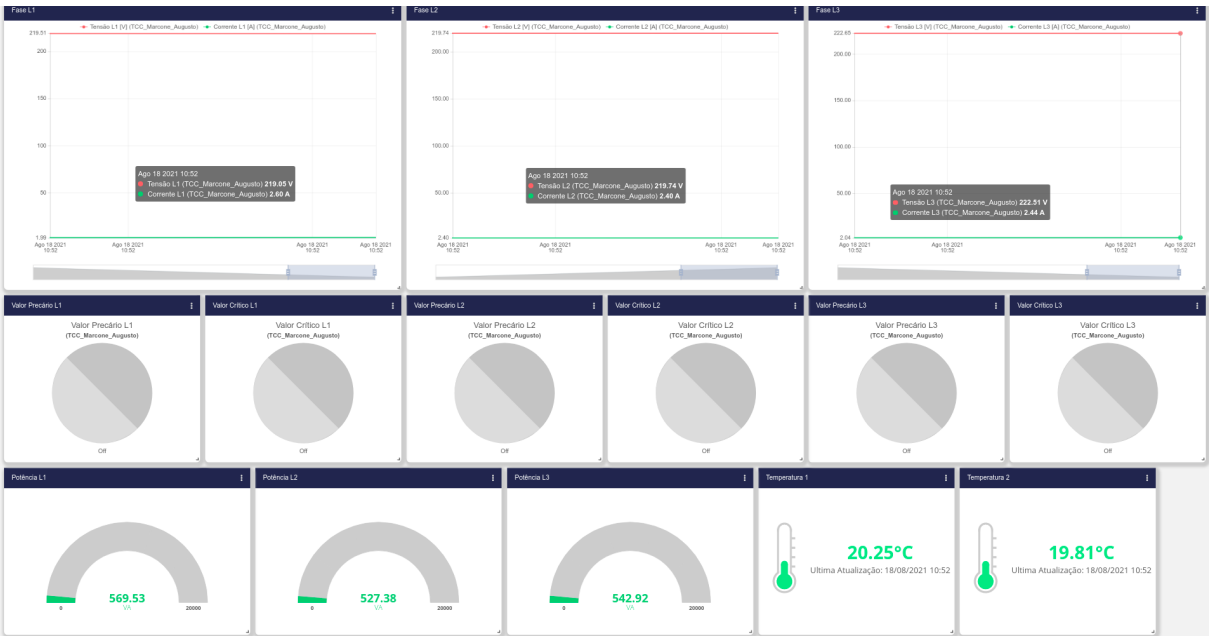
Fonte: Autor (2021).

As leituras obtidas pela plataforma foram observadas de duas formas, a primeira delas através da interface serial do Arduino. Os valores mensurados pelo protótipo foram os seguintes:

```
10:52:48.326 -> ////////////////////////////////
10:52:48.326 -> Temperatura 1 - 20.25
10:52:48.326 -> Temperatura 2 - 19.81
10:52:48.326 -> ////////////////////////////////
10:52:49.917 -> ////////////////////////////////
10:52:49.917 -> Corrente 1 - 2.60
10:52:49.917 -> Corrente 2 - 2.40
10:52:49.917 -> Corrente 3 - 2.44
10:52:49.917 -> ////////////////////////////////
10:52:50.349 -> ////////////////////////////////
10:52:50.349 -> Tensão 1 - 219.05
10:52:50.382 -> Tensão 2 - 219.75
10:52:50.382 -> Tensão 3 - 222.52
10:52:50.382 -> ////////////////////////////////
```

Por fim, os valores foram conferidos na plataforma Ubidots, para verificar o funcionamento completo da plataforma. Os dados recebidos podem ser observados na Figura 44.

Figura 44 – Dados mensurados exibidos na plataforma Ubidots.



Fonte: Autor (2021).

A Tabela 10 apresenta as unidades mensuradas pelos dois equipamentos. Considerando o CW240 como referência, foi calculado o erro de cada medida obtida através da plataforma. O erro de medição foi obtido a partir da Equação 4.2, onde "E" representa o erro, "I" representa o valor mensurado pelo sistema em teste (plataforma de monitoramento) e "VR", que representa o valor de referência.

$$E = I - VR \tag{4.2}$$

Com os resultados obtidos, foi observado que os sensores de tensão apresentaram um erro inferior a 1 %, porém os sensores de corrente da fase dois e três chegaram a apresentar 6,88 % de erro. Esse valor foi obtido devido a constante de calibração ter sido calculada com base na associação de resistores da fase um. Se considerada a média de todas as medidas o erro não excedeu 1 %.

Tabela 10 – Comparativo dos valores mensurados e erros correspondentes.

	Tensão (V)			**Corrente (A)**			**Potência (VA)**		
Fase	**CW240**	**Plataforma**	**Erro (%)**	**CW240**	**Plataforma**	**Erro (%)**	**CW240**	**Plataforma**	**Erro (%)**
L1	221,0	219,05	0,88	2,559	2,60	1,60	565,53	569,53	0,71
L2	221,1	219,75	0,61	2,564	2,40	6,40	566,90	527,38	6,97
L3	222,9	222,52	0,17	2,283	2,44	6,88	508,88	542,92	6,69
Média	221,6	220,44	0,45	2,469	2,48	0,011	547,10	546,61	0,09

Pelo fato de ter validado o funcionamento da plataforma em um quadro elétrico situado dentro de um laboratório, não foi possível submeter os sensores de temperatura a um local onde ela representasse alguma variação considerável. Assim, as temperaturas obtidas representam a temperatura ambiente da sala no momento da realização dos testes.

Após a realização do teste funcional da plataforma, o equipamento foi instalado no *datacenter* do câmpus, para mensurar os níveis de operação de um quadro elétrico, onde recentemente, foi instalado um condicionador de ar para controlar a temperatura do ambiente. A Figura 45, apresenta o dispositivo instalado no quadro elétrico. Os sensores de tensão foram instalados em um disjuntor trifásico com a saída em aberto, enquanto os sensores de corrente foram instalados nas três fases de entrada do quadro, tendo em vista que o quadro não possuía nenhum outro equipamento instalado, apenas o condicionador de ar.

Figura 45 – Plataforma instalada para monitorar consumo do *chiller* de refigeração.

Fonte: Autor (2021).

Novamente os sensores de temperatura não foram acoplados a nenhuma superfície, sendo assim, os dados coletados por eles correspondem à temperatura ambiente do *datacenter*. O equipamento condicionador de ar, é configurado para manter a temperatura do ambiente em determinado valor, portanto, quando esse valor é excedido, o compressor responsável pela refrigeração é acionado, junto aos ventiladores responsáveis por realizar a troca de calor. Os dados a seguir foram obtidos nesse intervalo de tempo através da interface serial do protótipo.

```
16:59:48.354 -> ////////////////////////////////
16:59:48.354 -> Temperatura 1 - 19.22
16:59:48.354 -> Temperatura 2 - 19.12
16:59:48.354 -> ////////////////////////////////
16:59:49.936 -> ////////////////////////////////
16:59:49.936 -> Corrente 1 - 11.79
16:59:49.936 -> Corrente 2 - 11.91
16:59:49.936 -> Corrente 3 - 12.12
16:59:49.936 -> ////////////////////////////////
16:59:50.349 -> ////////////////////////////////
16:59:50.349 -> Tensão 1 - 220.05
16:59:50.382 -> Tensão 2 - 221.31
16:59:50.382 -> Tensão 3 - 222.27
16:59:50.382 -> ////////////////////////////////
```

Quando a temperatura desejada é atingida, o compressor é automaticamente desligado e apenas os ventiladores continuam em operação. Nesse intervalo os dados a seguir foram coletados pelo protótipo

```
17:28:33.224 -> ////////////////////////////////
17:28:33.224 -> Temperatura 1 - 18.53
17:28:33.224 -> Temperatura 2 - 18.85
17:28:33.224 -> ////////////////////////////////
17:28:34.817 -> ////////////////////////////////
17:28:34.867 -> Corrente 1 - 2.34
17:28:34.867 -> Corrente 2 - 2.30
17:28:34.867 -> Corrente 3 - 2.37
17:28:34.867 -> ////////////////////////////////
17:28:34.327 -> ////////////////////////////////
17:28:35.327 -> Tensão 1 - 220.55
17:28:35.342 -> Tensão 2 - 221.39
17:28:35.342 -> Tensão 3 - 222.83
17:28:35.342 -> ////////////////////////////////
```

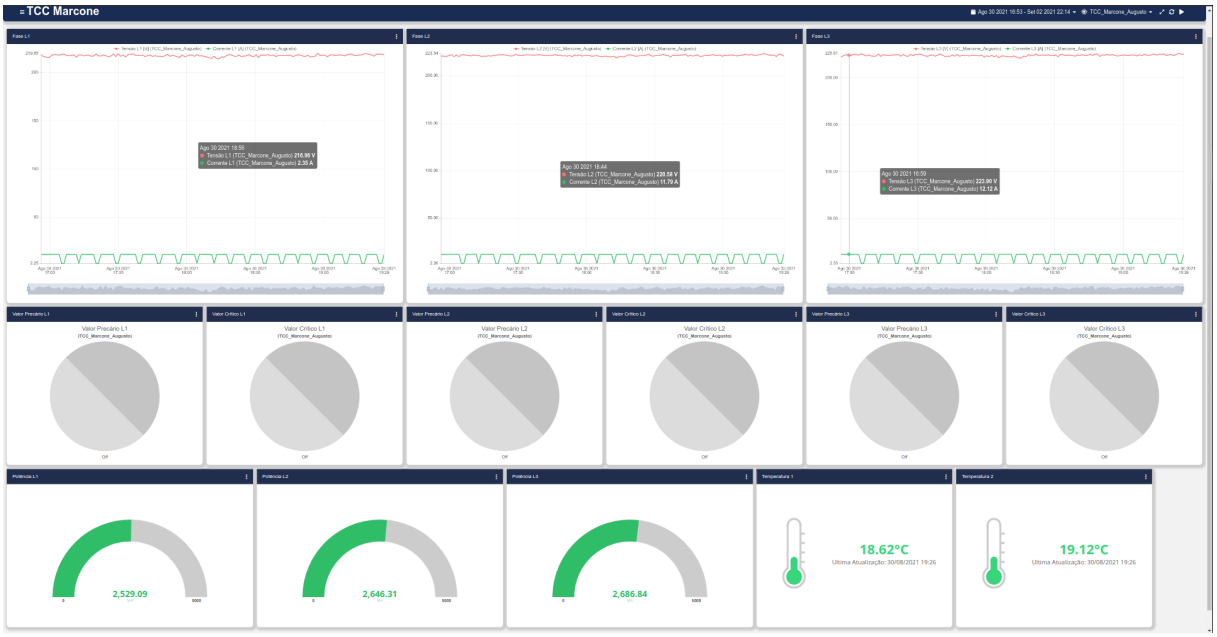
A Figura 46 apresenta um intervalo de observação das características de operação do condicionador de ar do *datacenter*, nela é possível observar os ciclos de operação do compressor. Além disso, é possível observar a potência aparente consumida pelo equipamento, analisando o histórico dos dados. O valor de pico obtido, somando o consumo nas três fases, foi de 8.02 kVA.

4.1.2 Mercado e Custos

O mercado de produção, transmissão e distribuição de energia se trata de um mercado global, em plena evolução e crescimento. No Brasil, atualmente, existem aproximadamente 89.952 milhões de unidades consumidoras de energia, abrangendo cerca de 208.489 milhões de pessoas, atendidas por 105 distribuidoras (ONS, 2021). Isso representa uma carga média de 69.940 MW, com previsão de crescimento de 4,6 % ao ano, alcançando cerca de 79.963 MW médios de carga no ano de 2025 (ONS, 2021).

O fato da distribuição de energia no Brasil ser dividido entre diversas empresas, sejam designadas, permissionárias ou concessionárias, não existe um levantamento para unificar o quantitativo de

Figura 46 – *Dashboard* do monitoramento do *datacenter*.



Fonte: Autor (2021).

transformadores de distribuição instalados. Porém, pode-se afirmar que para suprir toda essa demanda, o conhecimento dos parâmetros de funcionamento do sistema é primordial. Conforme abordado na seção 2.1.1, transformadores de distribuição estão entre os equipamentos com maior custo e criticidade das plantas de distribuição.

Com isso, o desenvolvimento de uma plataforma capaz de monitorar, em tempo real, os transformadores de distribuição, descrevendo as suas principais características de operação. Conforme proposta apresentada neste trabalho, foi realizado um levantamento do custo unitário para produção do protótipo apresentado na Tabela 11.

Tabela 11 – Componentes e custos do protótipo.

ID	Nome	Quantidade	Preço Unitário	Preço
1	Capacitor 22 µF	1	$ 0,011	$ 0,011
2	DC005-2.0MM	1	$ 0,134	$ 0,134
3	220S-1*7P H=8.5MM *Ytype*	2	$ 0,114	$ 0,228
4	LORA_RF96_REV:1.2	1	$ 7,300	$ 7,300
5	MP2307DN	1	$ 2,470	$ 2,470
6	Capacitor 10 µF	3	$ 0,079	$ 0,237
7	MKDSN1.5/2-5.08	3	$ 0,566	$ 1,698
8	A2541HWV-3P	1	$ 0,077	$ 0,077
9	Resistor 4.7 kΩ	1	$ 0,004	$ 0,004
10	Resistor 39 Ω	3	$ 0,005	$ 0,015
11	Resistor 390 Ω	3	$ 0,006	$ 0,018

12	Resistor 10 kΩ	6	$ 0,007	$ 0,042
13	EK381V-03P	2	$ 0,360	$ 0,720
14	*Header-Male* 2.54_1x3	3	$ 0,016	$ 0,048
15	PCB	1	$ 1,806	$ 1,806
16	Antena	1	$ 1,575	$ 1,575
17	Arduino Mega 2560	1	$ 18,00	$ 18,00
18	SCT-013	3	$ 3,800	$ 11,40
19	DS18B20	2	$ 0,760	$ 1,520
20	ZMPT101B	3	$ 1,490	$ 4,470
21	Caixa Hermética	1	$ 2,500	$ 2,500
22	Jumper macho-macho	1	$ 0,950	$ 0,950
			Total	$ 55,223

Fonte: Autor (2021).

O custo para confeccionar cada protótipo é de $ 55,223, sendo, aproximadamente, 30 % relacionado ao microcontrolador (Arduino Mega 2560). Portanto, esse valor pode ser reduzido de forma considerável na produção de um *hardware* para fins comerciais, trabalhando na especificação e substituição do microcontrolador utilizado. Considerando que o custo aproximado de um transformador de distribuição monofásico de 10 kVA é de R$ 3.000,00, a plataforma, em sua configuração atual, corresponde a aproximadamente 10% do custo do transformador.

Existem empresas ao redor do mundo que desenvolvem dispositivos e soluções destinadas ao monitoramento de transformadores de distribuição. A seguir estão detalhadas alguns produtos e suas características principais:

- ***Distribution Transformer Monitoring System* (DTMS)** (HIOTRON, 2021): sistema de monitoramento de transformadores de distribuição, fabricado pela empresa indiana hIoTron. O sistema é construído com sensores para leitura de nível e temperatura do óleo, temperatura e umidade ambiente, além de um medidor de energia que utiliza a comunicação Modbus-RTU.

  O Protocolo de comunicação Modbus-RTU é um protocolo desenvolvido nos anos 70 pela empresa Modicon, que posteriormente foi adquirida pela Schneider. A Schneider é uma empresa com grande presença na automação industrial. Por isso, o Modbus-RTU é amplamente utilizado nesse segmento.

  O medidor de energia é capaz de mensurar a potência ativa (kW), potência aparente (kVA), potência reativa (kVAr), fator de potência, harmônicas, além de tensão e corrente. Para a comunicação com o servidor da aplicação podem ser utilizadas as tecnologias GSM 3G/4G e Wi-fi.

  A empresa não fornece o custo unitário do sistema de monitoramento, porém, na seção de perguntas frequentes do site, a empresa sugere que o sistema custe menos de $ 4720,46.

- **Hydran M2** (GENERAL ELECTRIC COMPANY, 2021): equipamento fabricado pela empresa General Electric, destinado ao monitoramento do óleo interno do transformador, sendo capaz de monitorar em tempo real a umidade e os gases dissolvidos. Os dados são apresentados no *display* do próprio equipamento ou através das interfaces seriais RS-232 ou RS-485.

A empresa não fornece o custo do equipamento, podendo ser encontrado na condição de usado por mais de $ 800,00.

- **SEL-2414** (SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES, 2021): módulo de monitoramento e controle de transformadores, produzido pela empresa Schweitzer Engineering Laboratories. O equipamento é destinado ao monitoramento da temperatura de operação, sendo capaz de controlar o sistema de refrigeração. Além disso, o módulo é capaz de atuar nos comutadores CDC e realizar leituras de tensão e corrente.

  As informações podem ser visualizadas e controladas através do *display* localizado no módulo ou acessadas através de diversas tecnologias de comunicação, dentre elas estão Modbus, Telnet e FTP.

  O custo de aquisição do equipamento, fornecido pela empresa, é a partir de $ 1.200,00.

- ***Better Operations & Life by Analytics* (BOLA)** (KRYFS, 2021): sistema para monitoramento de transformadores produzido pela empresa indiana KRYFS. O sistema é capaz de monitorar remotamente a corrente, tensão, temperatura do óleo, temperatura ambiente, localização GPS, frequência, potência ativa e potência aparente.

  Apesar da empresa não mencionar em seus materiais qual a tecnologia de comunicação é adotada para transmissão dos dados coletados nos transformadores, em seu diagrama de funcionamento fica claro que se trata de uma tecnologia dependente de *gateways* IoT.

  Não foi encontrada nenhuma referência de custo para essa ferramenta.

- **MSENSE®** (REINHAUSEN, 2021): a empresa alemã Maschinenfabrik Reinhausen GmbH, produz na linha MSENSE® os seguintes equipamentos destinados ao monitoramento contínuo dos transformadores:

  - **MSENSE® BM**: equipamento destinado ao monitoramento das buchas do transformador, seja de alta ou baixa tensão.
  - **MSENSE® VAM**: equipamento destinado à detecção de anomalias mecânicas, através do sensoriamento vibroacústico.
  - **MSENSE® DGA**: equipamento destinado ao monitoramento contínuo dos gases dissolvidos no óleo do transformador.
  - **MSENSE® FO**: equipamento destinado ao monitoramento *on-line* da temperatura do enrolamento do transformador, com sensores de fibra óptica.

  Os equipamentos são capazes de monitorar e transmitir os dados através das interfaces de comunicação Ethernet ou Serial. Também não foram encontrados os valores dos equipamentos fornecidos por essa empresa.

5 CONCLUSÕES

Com o objetivo o desenvolver de uma plataforma de monitoramento de transformadores de distribuição, fazendo o uso da tecnologia de comunicação LoRaWAN, adotou-se o conceito de desenvolvimento de um MVP, desenvolvendo um protótipo funcional para sua validação.

As etapas de execução do projeto foram elaboradas a partir da plataforma de prototipagem e desenvolvimento Arduino, adicionando os sensores não intrusivos de corrente e temperatura, além do sensor de tensão, que apesar da derivação necessária para sua instalação, não exige a interrupção do cicuito, para mensurar as características de operação do transformador. Além disso, foi adicionado o módulo de comunicação LoRa para proporcionar a transmissão dos valores aferidos.

Os testes foram realizados nos quadros de distribuição de energia elétrica do IFSC. Os primeiros testes realizados foram oportunos para validar o funcionamento e coleta de resultados.

Observando os resultados iniciais, fica evidente que sensores de baixo custo não apresentam grande precisão quando comparados a equipamentos profissionais, além disso, na faixa de corrente utilizada nos testes iniciais, as leituras dos sensores de corrente apresentaram grande discrepância com as leituras utilizadas como referência, chegando a 6,88 % nas fases dois e três. Este resultado pode ser relacionado, a faixa de corrente utilizada para realização dos testes relacionada a capacidade sensor adotado, e também, ao circuito necessário que permite a leitura dos sensores de corrente, uma vez que os resistores utilizados para montar o circuito são de baixa precisão. Essa característica foi observada mensurando a resistência equivalente na associação de resistores, apos apresentar três valores diferentes.

Para realizar o segundo teste, monitorando o consumo do condicionador de ar, a diferença foi minimizada pela variável de calibração referente aos sensores de corrente, utilizando uma constante para cada sensor ao invés de uma única variável. Foi observada uma melhora no momento da instalação, comparando os dados obtidos com outro medidor, porém todos os dados não puderam ser compilados até a conclusão desse documento, pois a plataforma ainda está instalada realizando o monitoramento. Todavia, com a realização dos testes, foi possível estimar a aplicabilidade da plataforma para o monitoramento de transformadores de distribuição de energia elétrica.

Com a realização do estudo de mercado, foi observado a inexistência de produtos disponíveis no mercado com o mesmo intuito da plataforma proposta, ou seja, capaz de monitorar transformadores de distribuição de forma remota e com baixo custo, mesmo considerando que a produção de um produto demande outros custos não pesquisados neste trabalho. Sendo assim, para continuidade desse projeto são sugeridas oportunidades de trabalhos futuros, apresentadas na seção a seguir.

5.1 Trabalhos Futuros

Para continuidade deste projeto, sugere-se:

- **Construir um *hardware* único para toda plataforma:** visa unificar todo *hardware* necessário para que o *endpoint* seja capaz de coletar os dados dos sensores e realizar a sua transmissão, trabalhando na especificação e implementação de um microcontrolador, aumentando a qualidade do *hardware* mitigando possíveis problemas com o uso de *jumpers*, reduzindo custos com a retirada de componentes desnecessários e possibilitando a redução das dimensões do protótipo, além de permitir a confecção do *firmware*.

- **Confeccionar um *backend* para plataforma:** com esse desenvolvimento, ao invés de utilizar a integração da TTN com a plataforma Ubidots, o desenvolvimento de um *backend* para aplicação, pode permitir a realização de uma análise dos dados com técnicas de *Machine Learning*.
- **Desenvolver um *endpoint* que utilize a comunicação Modbus:** ao utilizar a comunicação Modbus para comunicação com sensores, pode-se facilitar a integração com dispositivos amplamente empregados em sistemas de automação industrial, permitindo o uso de sensores com maior qualidade e precisão.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, O. et al. Monitoramento e diagnóstico de um transformador de potência: Análise de gases dissolvidos no Óleo e análise térmica. In: *Anais do IV CITENEL-Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica 2007*. [S.l.: s.n.], 2007. Citado 3 vezes nas páginas 24, 25 e 26.

AMALFA, S. *Transformadores fundamentos y construcción*. [S.l.]: Editorial Hispano Americana S.A. - H.A.S.A, 2007. Citado na página 23.

ANEEL. *Nota Técnica n° 0075/2011-SRD/ANEEL*. [S.l.]: Agência Nacional de Energia Elétrica, 2011. Citado na página 19.

ANEEL. *PRODIST*. 2021. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/modulo-8>. Acesso em: 27 jul. 2021. Citado 2 vezes nas páginas 29 e 30.

ARDUINO. *ARDUINO MEGA 2560 REV3*. 2020. Disponível em: <https://store.arduino.cc/usa/mega-2560-r3>. Acesso em: 03 ago. 2020. Citado na página 34.

ARDUINO. *About Arduino*. 2021. Disponível em: <https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction>. Acesso em: 06 jun. 2021. Citado 2 vezes nas páginas 35 e 36.

BORLIDO, D. J. A. Indústria 4.0: Aplicação a sistemas de manutenção. 2017. Citado na página 29.

CELESC. *SUBSISTEMA NORMAS E ESTUDOS DE MATERIAIS E EQUIPAMENTOS DE DISTRIBUIÇÃO*. 2020. Disponível em: <https://www.celesc.com.br/arquivos/normas-tecnicas/especificacao-tecnica/e3130019.pdf>. Acesso em: 02 ago. 2020. Citado na página 24.

CELG. *Transformadores para Redes Aéreas de Distribuição - Classes 15 e 36,2 kV Especificação e Padronização*. 2020. Disponível em: <https://www.enel.com.br/content>. Acesso em: 02 ago. 2020. Citado na página 24.

CENTENARO, M. et al. Long-range communications in unlicensed bands: The rising stars in the iot and smart city scenarios. *IEEE Wireless Communications*, IEEE, v. 23, n. 5, p. 60–67, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 30 e 32.

CHAUDHARY, S. et al. Craiot: Concept, review and application(s) of iot. In: *2019 4th International Conference on Internet of Things: Smart Innovation and Usages (IoT-SIU)*. [S.l.: s.n.], 2019. p. 1–4. Citado na página 30.

CHEN, H.; JIA, X.; LI, H. A brief introduction to iot gateway. In: IET. *IET international conference on communication technology and application (ICCTA 2011)*. [S.l.], 2011. p. 610–613. Citado 2 vezes nas páginas 32 e 33.

CIGRE. *Guia de Manutenção para Transformadores de Potência*. [S.l.]: Comitê nacional brasileiro de transmissão de energia elétrica, 2013. Citado 4 vezes nas páginas 20, 22, 24 e 25.

COPEL. *MATERIAIS DE DISTRIBUIÇÃO - ESPECIFICAÇÃO TRANSFORMADORES DE DISTRIBUIÇÃO*. 2020. Disponível em: <https://www.copel.com/hpcopel/normas>. Acesso em: 02 ago. 2020. Citado na página 24.

ELECTROPEAK. *ElectroPeak*. 2021. Disponível em: <https://electropeak.com/learn/>. Acesso em: 27 jun. 2021. Citado na página 43.

EMBARCADOS. *Embarcados*. 2021. Disponível em: <https://www.embarcados.com.br/the-things-network-rede-iot/>. Acesso em: 13 jun. 2021. Citado na página 36.

ENERGISA. *NORMA DE DISTRIBUIÇÃO UNIFICADA – NDU-008 TRANSFORMADORES PARA REDES AÉREAS DE DISTRIBUIÇÃO*. 2020. Disponível em: <https://www.energisa.com.br/Documents/pdfs/ndu/ndu008.pdf>. Acesso em: 02 ago. 2020. Citado na página 24.

EPE. *Balanço Energético Nacional 2021*. 2021. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-ben>. Acesso em: 20 jul. 2021. Citado na página 19.

ESPRESSIF. *ESP32*. 2021. Disponível em: <https://www.espressif.com/en/products/socs/esp32>. Acesso em: 14 jun. 2021. Citado na página 34.

FARIA, H. de; COSTA, J. G. S.; OLIVAS, J. L. M. A review of monitoring methods for predictive maintenance of electric power transformers based on dissolved gas analysis. *Renewable and sustainable energy reviews*, Elsevier, v. 46, p. 201–209, 2015. Citado 2 vezes nas páginas 28 e 29.

FILIPEFLOP. *FilipeFlop*. 2021. Disponível em: <https://www.filipeflop.com/>. Acesso em: 18 jun. 2021. Citado 4 vezes nas páginas 41, 42, 43 e 44.

GAUTERIO, Z. W. B. *Impacto do gerenciamento pelo lado da demanda em transformadores de potência*. 2006. Citado na página 24.

GENERAL ELECTRIC COMPANY. *Hydran M2*. 2021. Disponível em: <https://www.gegridsolutions.com/md/catalog/hydranm2.htm>. Acesso em: 23 ago. 2021. Citado na página 69.

HACKSTER. *Hackster.io*. 2021. Disponível em: <https://www.hackster.io/survey>. Acesso em: 06 jun. 2021. Citado na página 32.

HAN, Y.; SONG, Y. Condition monitoring techniques for electrical equipment-a literature survey. *IEEE Transactions on Power delivery*, IEEE, v. 18, n. 1, p. 4–13, 2003. Citado 2 vezes nas páginas 28 e 29.

HIOTRON. *Distribution Transformer Monitoring System*. 2021. Disponível em: <https://www.hiotron.com/dtms/>. Acesso em: 23 ago. 2021. Citado na página 69.

Hoeller, A. et al. Analysis and performance optimization of lora networks with time and antenna diversity. *IEEE Access*, v. 6, p. 32820–32829, 2018. Citado na página 30.

HURLEY, W.; WOLFLE, W. *Transformers and inductors for power electronics: theory, design and applications*. [S.l.]: John Wiley Sons Ltd, 2013. Citado na página 23.

IEEE STD C57.12.00^{TM}. *IEEE Standard for General Requirements for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers*. [S.l.], 2015. Citado na página 24.

ITAM. *Componentes do transformador de distribuição a óleo*. 2020. Disponível em: <http://www.itam.com.br/portfolio-items/transformador-de-distribuicao/>. Acesso em: 18 mai. 2020. Citado na página 25.

KHOMP. *KHOMP IoT*. 2020. Disponível em: <https://www.khomp.com/pt/categoria-de-produto/linha-iot-khomp/>. Acesso em: 02 set. 2020. Citado 2 vezes nas páginas 47 e 48.

KRYFS. *BOLA*. 2021. Disponível em: <https://kryfs.com/bola-iot-based-distribution-transformer-monitoring-solution/>. Acesso em: 23 ago. 2021. Citado na página 70.

LEAN STARTUP CO. *Lean Startup*. 2021. Disponível em: <https://leanstartup.co/what-is-an-mvp/>. Acesso em: 23 ago. 2021. Citado na página 34.

LENARDUZZI, V.; TAIBI, D. Mvp explained: A systematic mapping study on the definitions of minimal viable product. In: *2016 42th Euromicro Conference on Software Engineering and Advanced Applications (SEAA)*. [S.l.: s.n.], 2016. p. 112–119. Citado na página 34.

LIMA, R. C. d. *Análise de falhas e defeitos nos transformadores de potência e seus dispositivos*. Dissertação (B.S. thesis) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2014. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 28.

LORA ALLIANCE. *Classificação dos dispositivos LoRaWAN*. 2020. Disponível em: <https://lora-alliance.org/about-lorawan>. Acesso em: 20 jul. 2020. Citado na página 31.

MA, G.-M. et al. Distributed partial discharge detection in a power transformer based on phase-shifted fbg. *IEEE Sensors Journal*, IEEE, v. 18, n. 7, p. 2788–2795, 2018. Citado na página 27.

MAHANTA, D. K.; LASKAR, S. Power transformer oil-level measurement using multiple fiber optic sensors. In: IEEE. *2015 International Conference on Smart Sensors and Application (ICSSA)*. [S.l.], 2015. p. 102–105. Citado na página 28.

MARTINAZZO, C. A.; ORLANDO, T.; URI, E. da. *Comparação entre três tipos de sensores de temperatura em associação com Arduíno*. [S.l.]: PERSPECTIVA, Erechim, 2016. Citado na página 41.

MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY. *MIT's Handyboard*. 2021. Disponível em: <http://web.mit.edu/16.070/www/indexhb.html>. Acesso em: 06 jun. 2021. Citado na página 35.

MAXIM INTEGRATED. *DS18B20 - Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer*. [S.l.], 2019. Citado na página 41.

M.LóPEZ-FERNáNDEZ, X.; ERTAN, H. B.; TUROWSKI, J. *TRANSFORMERS ANALYSIS, DESIGN, AND MEASUREMENT*. [S.l.]: CRC Press, 2013. Citado na página 23.

ONS. *Operador Nacional do Sistema Elétrico*. 2021. Disponível em: <http://www.ons.org.br/>. Acesso em: 22 ago. 2021. Citado na página 67.

OPENENERGYMONITOR. *OpenEnergyMonitor*. 2021. Disponível em: <https://openenergymonitor.org/>. Acesso em: 27 jun. 2021. Citado na página 44.

PARALLAX. *Parallax Basic Stamp*. 2021. Disponível em: <https://www.parallax.com/product-category/basic-stamp/>. Acesso em: 06 jun. 2021. Citado na página 35.

PHIDGETS. *Phidgets I/O Boards*. 2021. Disponível em: <https://www.phidgets.com/?tier=1&catid=2&pcid=1>. Acesso em: 06 jun. 2021. Citado na página 35.

POWER, T. Part 7: loading guide for oil-immersed power transformers. *IEC standard*, v. 60076, n. 7, 2005. Citado na página 28.

RASPBERY PI. *Raspbery PI*. 2021. Disponível em: <https://www.raspberrypi.org/>. Acesso em: 14 jun. 2021. Citado na página 34.

RAZA, U.; KULKARNI, P.; SOORIYABANDARA, M. Low power wide area networks: An overview. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, IEEE, v. 19, n. 2, p. 855–873, 2017. Citado na página 31.

REINHAUSEN. *MSENSE*. 2021. Disponível em: <https://msense.reinhausen.com/>. Acesso em: 23 ago. 2021. Citado na página 70.

RIES, E. *A startup enxuta: como os empreendedores atuais utilizam a inovação contínua para criar empresas extremamente bem-sucedidas*. [S.l.]: Lua de Papel, 2012. Citado na página 35.

ROSOLEM, J. B. et al. A fiber optic powered sensor designed for partial discharges monitoring on high voltage bushings. In: IEEE. *2015 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC)*. [S.l.], 2015. p. 1–5. Citado na página 28.

SAMIMI, M. H.; ILKHECHI, H. D. Survey of different sensors employed for the power transformer monitoring. *IET Science, Measurement & Technology*, IET, 2019. Citado 3 vezes nas páginas 26, 27 e 28.

SANTOS, B. P. et al. Internet das coisas: da teoria à prática. *Minicursos SBRC-Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos*, v. 31, 2016. Citado na página 34.

SARAIVA, L. da S. *Projeto de hardware e software para dispositivos finais em uma rede LoRaWAN*. 2017. Citado na página 30.

SCHELLHASE, H.-U. et al. Load tap changers: investigations of contacts, contact wear and contact coking. In: IEEE. *Proceedings of the Forty-Eighth IEEE Holm Conference on Electrical Contacts*. [S.l.], 2002. p. 259–272. Citado na página 28.

SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES. *SEL-2414*. 2021. Disponível em: <https://selinc.com/pt/products/2414/>. Acesso em: 23 ago. 2021. Citado na página 70.

SENEVIRATNE, P. *Beginning LoRa Radio Networks with Arduino: Build Long Range, Low Power Wireless IoT Networks*. [S.l.]: Apress, 2019. Citado 2 vezes nas páginas 31 e 32.

SIGNORI, G. G. et al. Startup e inovação: inovando na forma de pensar e decretando o fim das velhas ideias. In: SN. *XXII Workshop Anprotec, Belém/Pará*. [S.l.], 2014. Citado na página 34.

SILVA, D. S. d. Redes neurais aplicadas a estimativa das perdas de transformadores trifásicos de distribuição. Universidade do Estado do Amazonas, 2019. Citado na página 26.

SOUZA, D. C. P. *Falhas e defeitos ocorridos em transformadores de potência do sistema elétrico da Celg, nos últimos 28 anos: um estudo de caso*. 2008. Citado 4 vezes nas páginas 23, 24, 25 e 28.

TANGANELLI, G.; VALLATI, C.; MINGOZZI, E. Rapid prototyping of iot solutions: A developer's perspective. *IEEE Internet Computing*, v. 23, n. 4, p. 43–52, 2019. Citado 2 vezes nas páginas 30 e 33.

TTN. *The Things Network*. 2020. Disponível em: <https://www.thethingsnetwork.org/>. Acesso em: 02 set. 2020. Citado 7 vezes nas páginas 31, 36, 37, 49, 50, 51 e 52.

UBIDOTS. *Ubidots | IoT Platform*. 2021. Disponível em: <https://ubidots.com/>. Acesso em: 13 jun. 2021. Citado 4 vezes nas páginas 37, 38, 52 e 53.

VANGELISTA, L.; ZANELLA, A.; ZORZI, M. Long-range iot technologies: The dawn of lora™. In: SPRINGER. *Future access enablers of ubiquitous and intelligent infrastructures*. [S.l.], 2015. p. 51–58. Citado na página 30.

WANG, T. et al. Capacitive voltage sensor array for detecting transient voltage distribution in transformer windings. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, IEEE, v. 23, n. 5, p. 3182–3189, 2016. Citado na página 27.

WEG. *WEG S.A.* 2020. Disponível em: <https://www.weg.net/institutional/BR/pt/>. Acesso em: 17 mai. 2020. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 62.

WINDERS, J. *Power Transformers. Principles and Applications*. [S.l.]: CRC Press, 2002. Citado 3 vezes nas páginas 19, 21 e 22.

YHDC. *YHDC*. 2021. Disponível em: <https://www.poweruc.pl/>. Acesso em: 27 jun. 2021. Citado na página 45.

YOKOGAWA. *CW240*. 2021. Disponível em: <https://tmi.yokogawa.com/solutions/discontinued/model-cw240-clamp-on-power-meters/>. Acesso em: 22 ago. 2021. Citado na página 63.