INSTITUTO FEDERAL DE SANTA CATARINA

MARCONE AUGUSTO DE PAULA LOUZADA

PLATAFORMA INTELIGENTE PARA MONITORAMENTO DE TRANSFORMADORES DE DISTRIBUIÇÃO UTILIZANDO A TECNOLOGIA LORAWAN

São José - SC

outubro/2020

PLATAFORMA INTELIGENTE PARA MONITORAMENTO DE TRANSFORMADORES DE DISTRIBUIÇÃO UTILIZANDO A TECNOLOGIA LORAWAN

Pré-Projeto de 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 TCC1.

Orientador: Mario de Noronha Neto

Coorientador: Roberto Alexandre Dias

São José - SC

outubro/2020

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 através dos órgãos regulamentadores. Para suprir essa demanda, e atender os requisitos necessários, as empresas devem extrair o máximo de seu sistema instalado operando, maior parte do tempo, com equipamentos próximos a capacidade máxima. Dessa maneira, é de suma importância evitar transtornos e perdas com a falha de um transformador, ou até mesmo o seu desligamento para uma manutenção sem conhecer a real necessidade. Sendo assim, conhecer as características de operação dos transformadores de distribuição em tempo real se torna fundamental, possibilitando um melhor direcionamento nas intervenções para manutenção, implicando diretamente no aumento da durabilidade, preservação do equipamento e redução do consumo de recursos humanos e financeiros. O surgimento de conceitos como a Internet of Things (IoT) vai de encontro com essas necessidades, possibilitando o desenvolvimento de dispositivos inteligentes que possam ser utilizados no monitoramento de equipamentos. Esse trabalho tem como foco principal o desenvolvimento de uma plataforma de monitoramento on-line para transformadores de distribuição de energia.

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

ABSTRACT

The energy production and distribution market has, over the years, faced a steady increase in demand from its customers. In addition, companies in this market are subject to strict quality parameters through regulatory bodies. To meet this demand, and to meet the necessary requirements, companies must make the most of their installed system by operating, in most cases, with equipment close to maximum capacity. Thus, it is extremely important to avoid inconvenience and losses due to the failure of a transformer, or even its shutdown for maintenance without knowing the real need. Therefore, knowing the operating characteristics of distribution transformers in real time is essential, enabling a better targeting of maintenance interventions, directly implying in increasing durability, preserving equipment and reducing the consumption of human and financial resources. The emergence of concepts such as the Internet of Things (IoT) meets these needs, enabling the development of intelligent devices that can be used to monitor equipment. This work has as main focus the development of an online monitoring platform for power distribution transformers.

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

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Produção energética no Brasil 9
Figura 2 – Tensão induzida em um condutor 11
Figura 3 – Tensão induzida em um condutor com núcleo magnético 12
Figura 4 – Funcionamento resumido de um transformador 12
Figura 5 – Transformador de distribuição 13
Figura 6 – Bobina e núcleo de um transformador 14
Figura 7 – Componentes externos de um transformador de potência 16
Figura 8 – Métodos empregados no aprendizado de máquina 20
Figura 9 – Arquitetura da rede *Long Range* (LoRa) 22
Figura 10 – Diagrama para o sistema proposto 25
Figura 11 – Arduino Mega 26
Figura 12 – *Transceiver* confeccionado pelo Grupo NERsD 26

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Distribuição das fontes de falhas e defeitos em transformadores de distribuição 16
Tabela 2 – Principais parâmetros de um transformador divididos por subsistemas 17
Tabela 3 – Características e técnicas no processo de monitoramento baseado em condição 20
Tabela 4 – Comparativo de tecnologias de comunicação nas faixas de frequências não licenciadas 22
Tabela 5 – Cronograma para realização das atividades 28

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL Agência Nacional de Energia Elétrica . . . 9
AWS *Amazon Web Services* . . . 25
CA Corrente Alternada . . . 17
CDC Comutador de Derivação em Carga . . . 15
CDST Comutador de Derivação sem Tensão . . . 15
CIoT *Cognitive-IoT* . . . 21
CSS *Chirp Spread Spectrum* . . . 22
IDE *Integrated Development Environment* . . . 27
IoT *Internet of Things* . . . 21
IP *Internet Protocol*
ISM *Industrial, Scientific and Medical* . . . 21
ITU *International Telecommunication Union* . . . 21
LoRa *Long Range* . . . 5
LoRaWAN *Long Range Wide Area Networking* . . . 21
LPWAN *Low Power Wide Area Network* . . . 21
ML *Machine Learning* . . . 10
MVP *Minimum Viable Product* . . . 27
NB-IoT *Narrowband-IoT* . . . 21
NERsD Grupo de Pesquisa em Sistemas Embarcados e Distribuídos do IFSC . . . 26
RMS *Root Mean Square* . . . 17
TCP *Transfer Control Protocol*

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO . . . 9
1.1 Objetivo Geral . . . 10
1.1.1 Objetivos Específicos . . . 10
1.2 Organização do Texto . . . 10

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA . . . 11
2.1 Transformadores . . . 11
2.1.1 Transformadores de Distribuição . . . 13
2.1.2 Principais defeitos em Transformadores de Distribuição . . . 15
2.1.3 Grandezas monitoradas . . . 16
2.2 Manutenção preditiva para Transformadores de Distribuição . . . 18
2.3 Aprendizado de Máquina . . . 19
2.4 Tecnologia de comunicação . . . 21
2.4.1 LoRaWAN . . . 22

3 PROPOSTA . . . 25
3.1 Definição das grandezas monitoradas . . . 25
3.2 Delimitação de capacidade . . . 26
3.3 Confecção do *hardware* . . . 26
3.4 Confecção do *software* embarcado . . . 27
3.5 Confecção dos *softwares* para *back-end* e *front-end* . . . 27
3.6 Integração e testes . . . 27
3.7 Análise de mercado . . . 27
3.8 Elaboração do documento final . . . 27

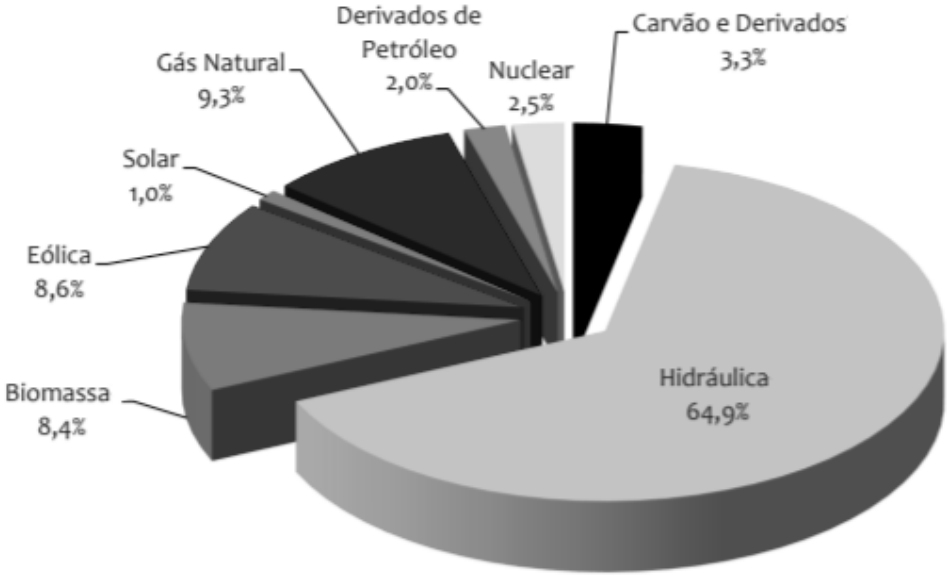
REFERÊNCIAS . . . 29

1 INTRODUÇÃO

Matriz elétrica é o nome dado ao conjunto de fontes utilizadas para geração de energia elétrica de uma determinada localidade ou país (EPE, 2020). 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, 2020)

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 a secundária, que é destinada aos consumidores finais, deve 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. Esses 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.

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 para 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;
- Desenvolvimento de um *software* para o *back-end*, sendo responsável pelo recebimento, armazenamento e tratamento dos dados com a ajuda de um algoritmo de *Machine Learning* (ML);
- Desenvolvimento de um *software* para o *front-end*, onde os dados serão apresentados graficamente através de uma interface Web. Além disso, a interface deve permitir a gerência dos *endpoints*;
- Realizar uma análise de mercado com relação ao custo e aplicabilidade da plataforma junto às empresas que atuam no setor.

1.2 Organização do Texto

Este documento está estruturado em 3 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, além do conceito sobre aprendizado de máquina e a tecnologia de comunicação utilizada no desenvolvimento do trabalho.

O Capítulo 3 aborda as etapas de desenvolvimento que devem ser seguidas para proporcionar o atendimento dos objetivos específicos e consequentemente o objetivo principal, assim como o cronograma com a previsão de conclusão das etapas de desenvolvimento propostas.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

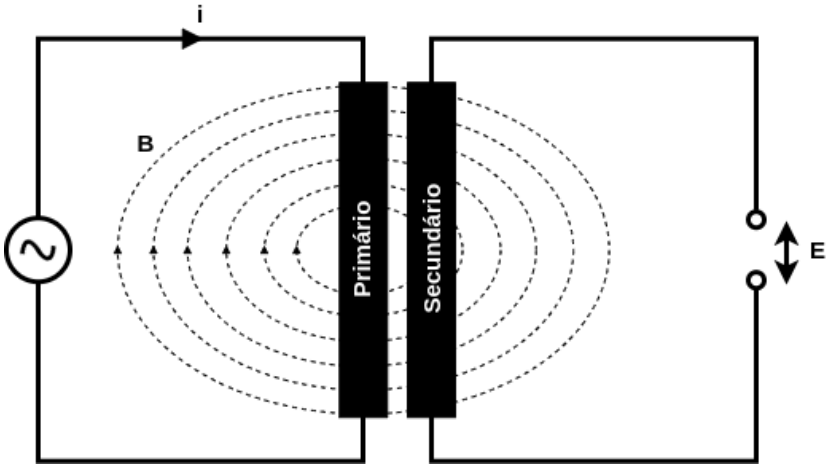
2.1 Transformadores

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

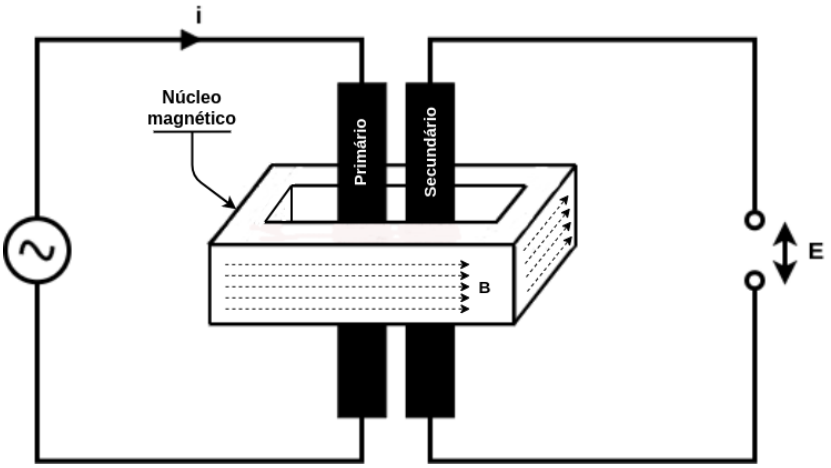


i = Corrente; B = Campo magnético; E = Tensão induzida.
Fonte: Adaptado de (WINDERS, 2002).

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 uma material que apresente afinidade ao fluxo magnético. Essa modificação pode ser observada na Figura 3, onde o fluxo magnético produzido no condutor primário será vinculado 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.

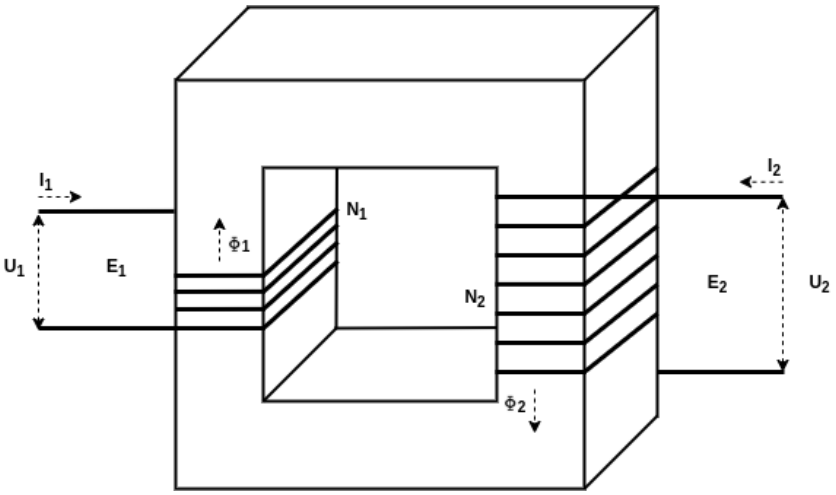
Figura 3 – Tensão induzida em um condutor com núcleo magnético



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, podemos obter a relação de transformação através da Equação (2.2) (CIGRE, 2013).

Figura 4 – Funcionamento resumido de um transformador



Fonte: Adaptado de (CIGRE, 2013)

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

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

Vale ressaltar que a eficiência de um transformador real nunca será máxima pois, mesmo com a presença do núcleo para direcionar o fluxo magnético, 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. Sendo assim, os transformadores modernos podem atingir um rendimento máximo na ordem de 90% (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. Esse 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 elétrica e Nicola Tesla apresentou o desenvolvimento de sistemas elétricos polifásicos. Essas 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 1883, 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 1981, por Michal Doliwo-Dobrowolski (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).

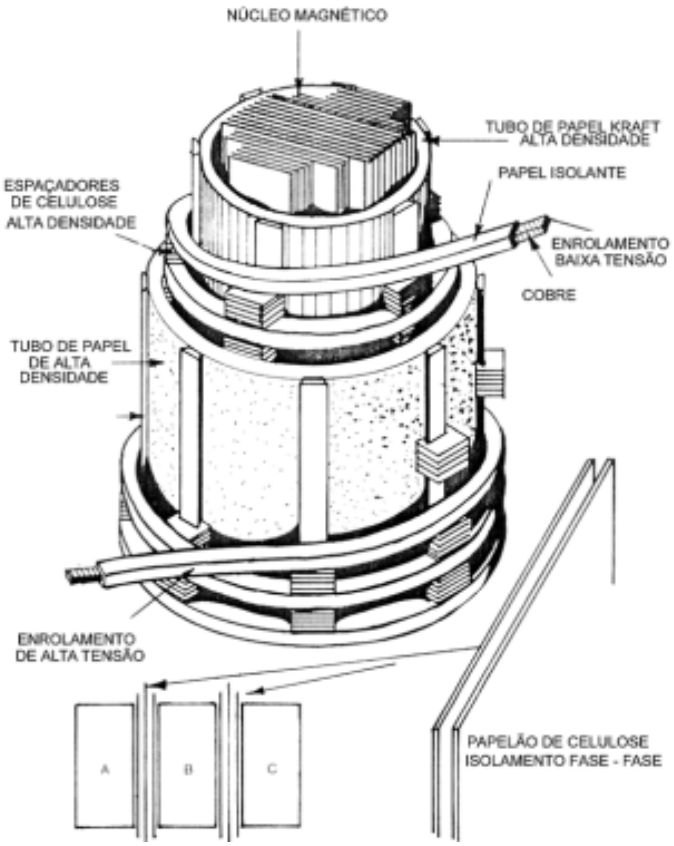
Os transformadores utilizados pelas maiores empresas do mercado de energia brasileiro como Celesc, Celg, Cope e Energisa são (CELESC, 2020), (CELG, 2020), (COPEL, 2020), (ENERGISA, 2020):

- **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, assim, o seu principal componente é 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 para 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 (JÚNIOR, 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).

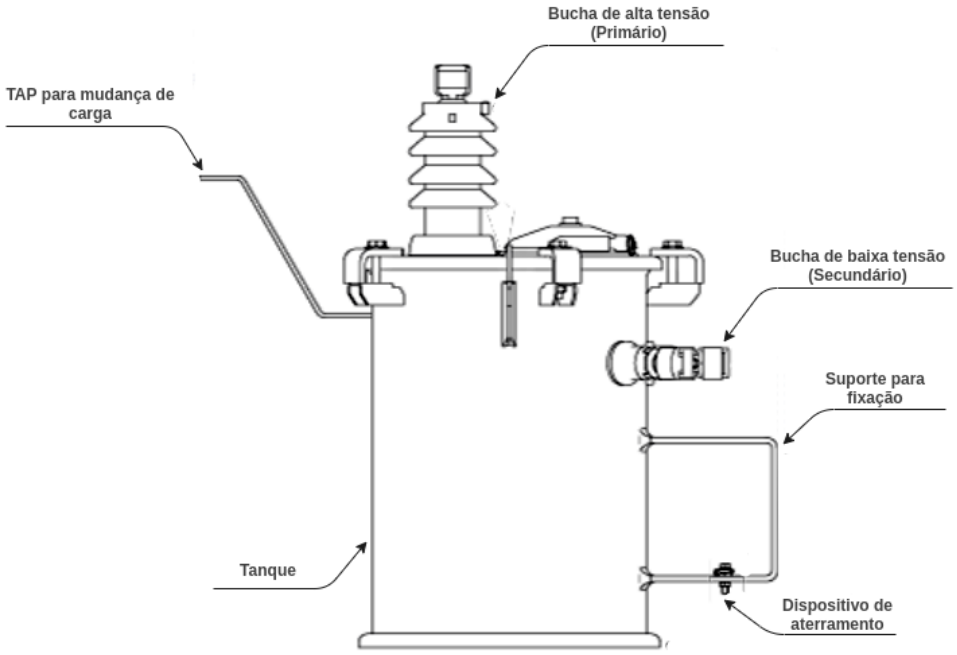
Na Figura 7, estão apresentados os principais componentes externos presentes em um transformador de distribuição. Somados aos componentes internos (núcleo, isolamento, isolamento de alta tensão e enrolamento de baixa tensão) essas são as principais fontes de falhas ou defeitos em um transformador (ALMEIDA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

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:

Figura 7 – Componentes externos de um transformador de potência



Fonte: Adaptado de (ITAM, 2020)

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. Esses parâmetros podem ser utilizados para nortear as intervenções feitas nesses 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
	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 e tan-delta
	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 de refrigeração
	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; ILKHECHI, 2019)

- **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 que é a 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 a sua performance (SAMIMI; ILKHECHI, 2019). Existem normas e guias que abordam o monitoramento das temperaturas de um transformador (POWER, 2005).

- **Comutadores:** os comutadores operam alternando entre os contatos. Devido a natureza indutiva do enrolamento, ocorrem arcos elétricos durante a transição de contato. Com 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).

- **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 a sua umidade deve ser monitorada. O nível do óleo também deve ser monitorado, pois as alterações de temperatura fazem com que o volume de óleo sofra alteração. Assim, o monitoramento do nível de óleo permite conhecer se a quantidade disponível atende aos requisitos mínimos de operação (MAHANTA; LASKAR, 2015).

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 a transformadores de alta potência.

2.2 Manutenção preditiva para 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 (JUNIOR; COSTA; OLIVAS, 2015).

A coleta destes dados, empregados em uma análise probabilística, permite a execução de intervenções em momentos oportunos, proporcionando maior precisão (JÚNIOR, 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 (JUNIOR; 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:** tem como principal objetivo, detectar previamente uma possível falha ou anomalia de funcionamento, além de gerar alertas.

4. **Diagnóstico:** 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.

O sistema deve ser capaz de ter alta sensibilidade, antecipando os alertas antes do acontecimento das falhas e anomalias. Deve também apresentar alta seletividade, descartando assim os falso positivos, indicando claramente o defeito. Além disso, o teste deve ser prático, não exigindo equipamentos muito sofisticados que possam até superar os custos de um transformador de distribuição novo e, primordialmente, o teste deve ser não destrutivo, servindo assim como monitoramento contínuo (WINDERS, 2002).

Analisando um cenário de monitoramento baseado em condição, percebe-se que o uso de métodos avançados para processamento de sinais e inteligência artificial tornam-se interessantes, principalmente pela sua capacidade na análise de dados (HAN; SONG, 2003). Na Tabela 3, são apresentados os processos envolvidos, juntamente com as técnicas principais e suas características, além da saída esperada de cada processo.

Este trabalho tem como foco a manutenção preditiva de um transformador de distribuição e para isso será utilizada a técnica de *Machine Learning* (ML) para auxiliar nas etapas de detecção de falhas e diagnóstico.

2.3 Aprendizado de Máquina

Para o conceito de aprendizado existem diversas definições, geralmente dependente do contexto e entidades que estão envolvidos no processo de aprendizado. A necessidade de adaptação por parte das máquinas às mudanças ocorridas ao seu redor, deram início ao conceito de *Machine Learning* (ML), ou Aprendizado de Máquina (SHI; IYENGAR, 2020). Aprendizado de máquina é considerado um ramo da inteligência artificial, utilizado para criar modelos computacionais analiticos, capaz de aprender com um determinado conjunto de dados reconhecendo seus padrões (VO et al., 2019).

Tabela 3 – Características e técnicas no processo de monitoramento baseado em condição

Processo	Técnica principal	Característica	Saída
Aquisição de dados	Sensoriamento e comunicação	Monitoramento on-line e contínuo	Dados pré-processados (pode haver ruído)
Detecção de anomalias	Processamento de sinais e redes neurais	Preditiva	Atenção e dados trabalhados
Reconhecimento de padrões e classificação	Técnicas computacionais, redes neurais, análise digital, lógica difusa, etc..	On-line e automático	Reconhecimento de anomalias, sugestões de manutenção e maiores detalhes para diagnóstico
Avaliação e tomada de decisão			

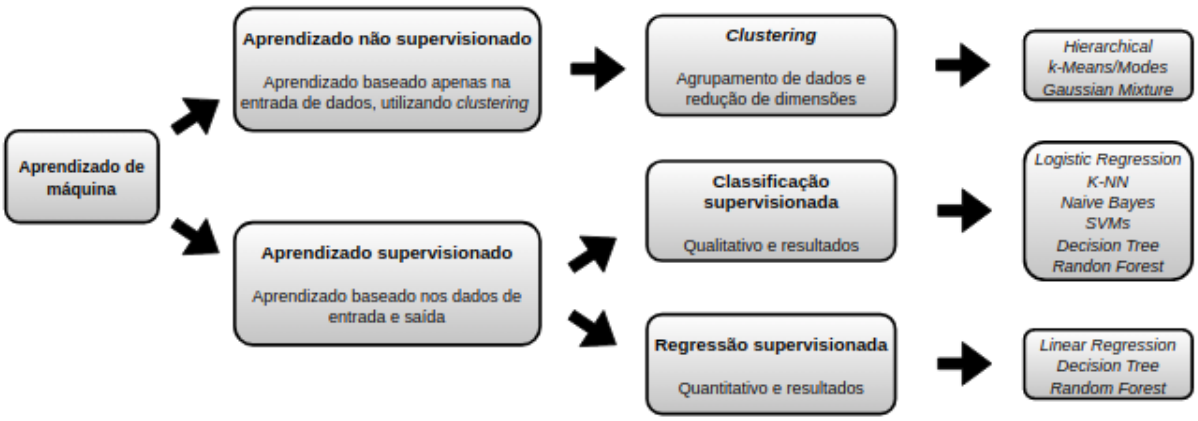
Fonte: Adaptado de (HAN; SONG, 2003)

Desta forma, é esperado que uma máquina possa aprender e prever os resultados futuros, baseando-se na entrada de dados que necessitam de uma resposta do programa ou função em execução. O conceito de ML é a base para os sistemas baseados em Inteligência Artificial (IA) e sistemas com grande recurso computacional, sendo ideal para diagnóstico de dados, reconhecimento de padrões, controle de sistemas e ambientes, atividades de planejamento, etc. (SHI; IYENGAR, 2020).

O cientista da computação Tom M. Mitchel conceituou que o aprendizado de uma máquina ocorre quando ela é capaz de otimizar o seu desempenho futuro com as suas experiências do passado. Apesar de intuitivo, pode-se observar que esse conceito não elucida o processo de aprendizado em sí. Ao contrário do cérebro humano que é naturalmente capaz de aprender, o processo de aprendizado de uma máquina deve ter as suas condições explícitas (LANTZ, 2015).

Existem diversas algoritmos de aprendizado de máquina que são classificadas de acordo com a técnica empregada. Os tipos mais comuns são: (i) aprendizado supervisionado, (ii) aprendizado não supervisionado, (iii) aprendizado por reforço, (iv) transdução e (v) aprendendo a aprender (ZHANG, 2010). Para o contexto de manutenção preditiva, geralmente são empregados algoritmos com as técnicas de aprendizado supervisionado ou não supervisionado (SUSTO et al., 2014). A Figura 8, apresenta as técnicas e os principais algoritmos utilizados.

Figura 8 – Métodos empregados no aprendizado de máquina



Fonte: Adaptado de (VO et al., 2019)

O modelo supervisionado geralmente é utilizado para predição de dados. O termo supervisão

não implica em intervenção humana e sim ao fato de receber instruções claras sobre o que é necessário aprender e como deve proceder esse aprendizado. Nesta técnica o aprendizado consiste em gerar uma função capaz de mapear as entradas e saídas desejadas, enquanto o treinamento é realizado com um conjunto de dados que possui uma ou mais entradas (variáveis independentes), e uma ou mais saídas (variáveis dependentes) (LANTZ, 2015).

Para descrição de modelos são empregadas as técnicas de aprendizado não supervisionado, que não fornecem variáveis de saída. Para isso, os dados de entrada são resumidos ou agrupados de novas maneiras com o intuito de detectar padrões. Essa técnica é frequentemente utilizada em situações onde são necessárias descobertas de padrões nas entradas envolvidas (LANTZ, 2015).

Este trabalho tem como objetivo a utilização de técnicas de ML, que serão definidas durante a confecção do *back-end* da aplicação.

2.4 Tecnologia de comunicação

Em paralelo ao avanço e crescimento da demanda de dispositivos *Internet of Things* (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), *Long Range Wide Area Networking* (LoRaWAN), Weightless, entre outras. Essas 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 *Cognitive-IoT* (CIoT), 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.

Conforme apresentado na Tabela 4, as tecnologias SigFox e Weightless, apresentam limitações no *payload*, ou seja, no tamanho da mensagem que pode 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. O LoRaWAN apresenta baixo consumo de energia e não depende um operador de rede comercial (RAZA; KULKARNI; SOORIYABANDARA, 2017).

Para realização deste trabalho optou-se por utilizar a rede LoRaWAN pelos seguintes motivos: (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

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	*Star of stars*	Estrela
Payload	12 bytes	até 250 bytes	20 bytes
Criptografia	Sem criptografia	AES 128 bits	AES 128 bits

Fonte: Adaptado de (RAZA; KULKARNI; SOORIYABANDARA, 2017).

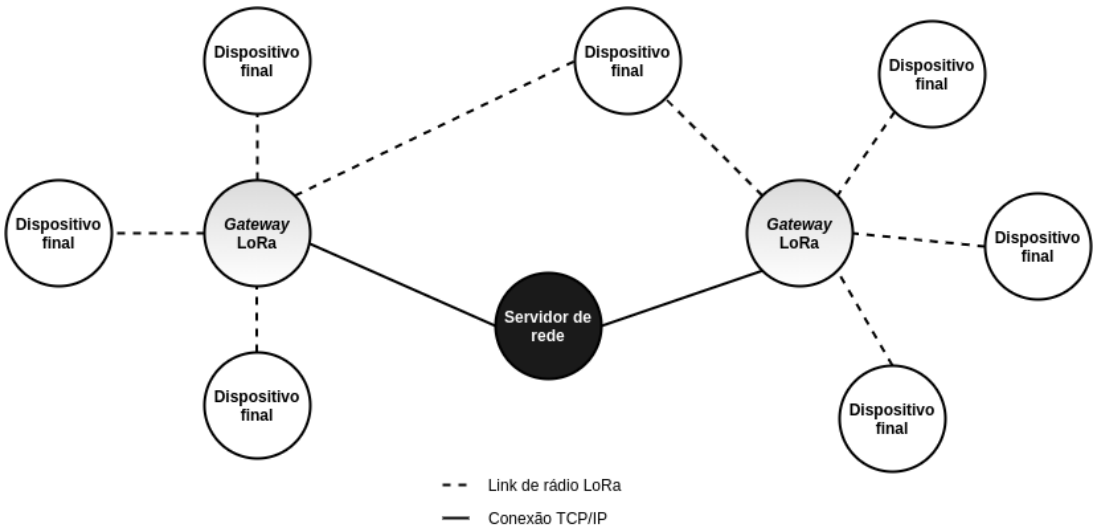
monitoramento de transformadores em locais remotos.

2.4.1 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).

A camada física da 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 9 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* são responsáveis por encaminhar os dados recebidos para um servidor de rede, através de conexões TCP/IP (SENEVIRATNE, 2019).

Figura 9 – Arquitetura da rede LoRa



Fonte: Adaptado de (CENTENARO et al., 2016)

Geralmente a arquitetura do sistema é dividida em três principais componentes, que são (VANGELISTA; ZANELLA; ZORZI, 2015):

- **Servidor de rede:** são responsáveis pelo gerenciamento e controle dos recursos de toda a rede;
- ***Gateways:*** parte do sistema responsável em concentrar os dados recebidos dos dispositivos finais e encaminhá-los ao servidor de rede;
- **Dispositivos finais:** geralmente responsáveis pela coleta e envio de informações, normalmente são alimentados por baterias.

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 a 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.

3 PROPOSTA

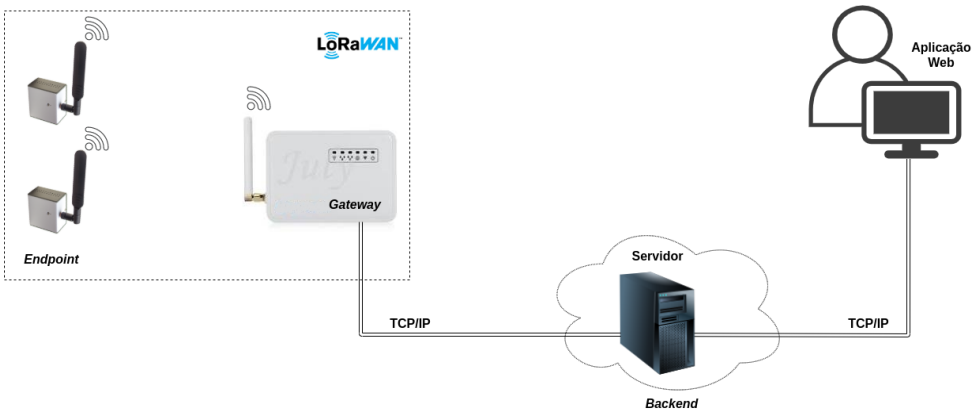
O presente trabalho visa o desenvolvimento de uma plataforma de monitoramento para transformadores de distribuição. O intuito principal é auxiliar na manutenção preditiva desses equipamentos. A plataforma consiste em um *endpoint* que será utilizado para o sensoriamento do transformador, para isso, esse dispositivo deve ficar acoplado ao equipamento. Os dados coletados serão enviados através da tecnologia LoRaWAN para um *gateway* LoRa.

Posteriormente os dados serão enviados ao *back-end*, hospedado na *Amazon Web Services* (AWS), através da rede TCP/IP. O *back-end* funcionará como servidor da aplicação, sendo responsável pelo armazenamento dos dados em um banco de dados e o seu tratamento com o algoritmo de *Machine Learning* (ML). O tratamento dos dados será utilizado para proporcionar a detecção de comportamentos anômalos.

Finalmente, com a confecção de um *front-end*, os dados serão apresentados graficamente ao usuário através de uma interface Web. Onde será possível, além de visualizar, executar configurações nos *endpoits*.

A Figura 10, apresenta o diagrama de funcionamento para o sistema proposto. Uma das principais premissas para o desenvolvimento do sistema é que ele seja de baixo custo de implementação, sendo assim, optou-se por utilizar *hardwares* acessíveis, e *softwares* livres.

Figura 10 – Diagrama para o sistema proposto



Fonte: (AUTOR, 2020)

As etapas para o desenvolvimento do trabalho serão divididas e detalhadas da seguinte forma:

3.1 Definição das grandezas monitoradas

Essa etapa consiste na definição das grandezas que devem ser monitoradas em um transformador de distribuição. A seção 2.1.3, aborda os principais subsistemas de um transformador e as grandezas que podem ser monitoradas para conhecimento da sua condição de operação, porém, muitas delas exigem testes muito específicos ou sensores com elevado custo de aquisição e calibração. Sendo assim, a escolha deve se basear em sensores que apresentem condições de mensurar bem as características de operação, com o menor custo possível.

3.2 Delimitação de capacidade

Existem diversos tipos de transformadores de distribuição e com isso várias características de operação. A variação dessas características implicam diretamente no custo empregado aos sensores para o seu monitoramento. Assim, nesta etapa será definido o intervalo de transformadores que a plataforma será capaz de monitorar, visando possibilitar o monitoramento da maior parcela possível de transformadores utilizados comercialmente, com o menor custo possível.

3.3 Confecção do *hardware*

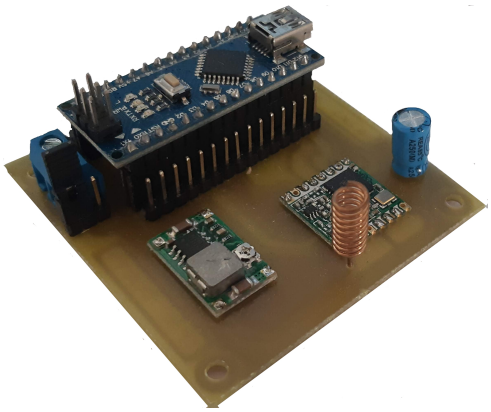
Após a definição das grandezas que serão monitoradas nos transformadores de distribuição e com a definição do limite das características de operação mensuradas, o próximo passo da execução do projeto será a confecção do *hardware*, responsável pela aquisição dos dados. O *endpoint* será constituído por um Arduino Mega, apresentado na Figura 11, para o envio das informações será utilizado um módulo confeccionado pelo Grupo de Pesquisa em Sistemas Embarcados e Distribuídos do IFSC (NERsD) (IFSC NERSD, 2020), conforme Figura 12 que é constituído por um Arduino Nano, um regulador de tensão e o *Transceiver* RF96.

O *hardware* poderá ser substituído, para validação do sistema, por um *endpoint* confeccionado pela empresa Khomp (KHOMP, 2020), que é uma empresa da região de Florianópolis-SC, especialista no desenvolvimento de *endpoints* e *gateways* voltados para o conceito de *Internet of Things* (IoT).

Figura 11 – Arduino Mega

Fonte: (ARDUINO, 2020)

Figura 12 – *Transceiver* confeccionado pelo Grupo NERsD



Fonte: (AUTOR, 2020)

3.4 Confecção do *software* embarcado

Para confecção do *software* responsável pela gerência dos intervalos de aquisição e transmissão dos dados, que será embarcado no *endpoint*, será utilizada a *Integrated Development Environment* (IDE) Arduino 1.8.13 (ARDUINO, 2020). Além de se tratar de uma plataforma de *software* livre, a IDE irá proporcionar uma velocidade maior nessa etapa de desenvolvimento. Atendendo a necessidade para confecção de um *Minimum Viable Product* (MVP).

3.5 Confecção dos *softwares* para *back-end* e *front-end*

Desenvolver o suporte no *back-end* e, se necessário, o pré processamento dos dados, para que eles possam ser disponibilizados para aplicações de registro distribuído, proporcionando rastreabilidade com o uso de tecnologias como a *Blockchain*.

Os dados serão enviados via TCP/IP para o *back-end* da aplicação hospedado na AWS. O *back-end* será desenvolvido para proporcionar o tratamento e manipulação, com a ajuda de algoritmos de ML e posteriormente armazenar as informações em um banco de dados relacional.

A configuração e gerência do sistema será efetuada através de uma interface *front-end*, apresentando graficamente as características de operação dos transformadores monitorados e possibilitando a configuração de intervalos de aquisição de dados.

3.6 Integração e testes

Após a conclusão das etapas 3.3, 3.4 e 3.5 o sistema será colocado em funcionamento com todos os seus componentes para verificar o seu funcionamento e possíveis ajustes de operação. Para isso, o *endpoint* deve ser instalado em um transformador na subestação do IFSC no câmpus do centro de Florianópolis-SC.

3.7 Análise de mercado

Nesta etapa serão analisados aspectos de mercado para a solução proposta, levando em consideração empresas que atuam com transformadores de distribuição. Também será analisado os custos envolvidos para fabricação de um protótipo, considerando escalas de vendas e demais fatores que impactam na determinação de preço de produto.

3.8 Elaboração do documento final

A elaboração do documento final, será feita durante toda realização do projeto. O desenvolvimento e o resultado das etapas necessárias para o desenvolvimento serão detalhadas para proporcionar um melhor entendimento do trabalho.

Para alcançar o objetivo do projeto, foi realizado um cronograma para realização das atividade que pode ser observado na Tabela 5.

Tabela 5 – Cronograma para realização das atividades

Etapa	Mês						
	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr
Definição das grandezas monitoradas	√						
Delimitação de capacidade	√						
Confecção do *hardware*	√	√					
Confecção do *software* embarcado		√	√				
Confecção dos *softwares* para *back-end* e *front-end*			√	√	√		
Integração e testes						√	
Análise de mercado							√
Elaboração do documento final	√	√	√	√	√	√	√

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 14, 15 e 16.

AMALFA, S. *Transformadores fundamentos y construcción*. [S.l.]: Editorial Hispano Americana S.A. - H.A.S.A, 2007. Citado na página 12.

ANEEL. *Nota Técnica n 0075/2011-SRD/ANEEL*. [S.l.]: Agência Nacional de Energia Elétrica, 2011. Citado na página 9.

ARDUINO. *ARDUINO MEGA 2560 REV3*. 2020. Disponível em: <https://store.arduino.cc/usa/mega-2560-r3>. Acesso em: 03 ago. 2020. Citado 2 vezes nas páginas 26 e 27.

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 14.

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 14.

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 21 e 22.

CIGRE. *Guia de Manutenção para Transformadores de Potência*. [S.l.]: Comitê nacional brasileiro de transmissão de energia elétrica, 2013. Citado 3 vezes nas páginas 12, 14 e 15.

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 14.

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 14.

EPE. *Balanço Energético Nacional 2020*. 2020. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2020>. Acesso em: 20 out. 2020. Citado na página 9.

GAUTERIO, Z. W. B. *Impacto do gerenciamento pelo lado da demanda em transformadores de potência*. 2006. Citado na página 14.

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 3 vezes nas páginas 18, 19 e 20.

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 21.

HURLEY, W.; WOLFLE, W. *Transformers and inductors for power electronics: theory, design and applications*. [S.l.]: John Wiley Sons Ltd, 2013. Citado na página 13.

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 14.

IFSC NERSD. *Grupo de Pesquisa em Sistemas Embarcados e Distribuídos do IFSC*. 2020. Disponível em: <https://www.nersd.ifsc.edu.br/>. Acesso em: 03 ago. 2020. Citado na página 26.

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 16.

JUNIOR, H. de F.; 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 18 e 19.

JÚNIOR, R. C. d. L. *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 15 e 19.

KHOMP. *KHOMP IoT*. 2020. Disponível em: <https://www.khomp.com/pt/categoria-de-produto/linha-iot-khomp/>. Acesso em: 02 set. 2020. Citado na página 26.

LANTZ, B. *Machine learning with R*. [S.l.]: Packt Publishing Ltd, 2015. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 21.

LORA ALLIANCE. *Classificação dos dispositivos LoRaWAN*. 2020. Disponível em: <https://lora-alliance.org/about-lorawan>. Acesso em: 20 jul. 2020. Citado na página 23.

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 17.

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 18.

M.LóPEZ-FERNáNDEZ, X.; ERTAN, H. B.; TUROWSKI, J. *TRANSFORMERS ANALYSIS, DESIGN, AND MEASUREMENT*. [S.l.]: CRC Press, 2013. Citado na página 13.

POWER, T. Part 7: loading guide for oil-immersed power transformers. *IEC standard*, v. 60076, n. 7, 2005. Citado na página 18.

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 2 vezes nas páginas 21 e 22.

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 18.

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 16, 17 e 18.

SARAIVA, L. da S. *Projeto de hardware e software para dispositivos finais em uma rede LoRaWAN*. 2017. Citado na página 21.

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 18.

SENEVIRATNE, P. *Beginning LoRa Radio Networks with Arduino: Build Long Range, Low Power Wireless IoT Networks*. [S.l.]: Apress, 2019. Citado na página 22.

SHI, B.; IYENGAR, S. S. *Mathematical Theories of Machine Learning-Theory and Applications*. [S.l.]: Springer, 2020. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 20.

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 16.

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 3 vezes nas páginas 13, 15 e 18.

SUSTO, G. A. et al. Machine learning for predictive maintenance: A multiple classifier approach. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, IEEE, v. 11, n. 3, p. 812–820, 2014. Citado na página 20.

TTN. *The Things Network*. 2020. Disponível em: <https://www.thethingsnetwork.org/>. Acesso em: 02 set. 2020. Citado na página 21.

VANGELISTA, L.; ZANELLA, A.; ZORZI, M. Long-range iot technologies: The dawn of lora^{TM}. In: SPRINGER. *Future access enablers of ubiquitous and intelligent infrastructures*. [S.l.], 2015. p. 51–58. Citado na página 22.

VO, A. H. et al. An overview of machine learning and big data for drug toxicity evaluation. *Chemical Research in Toxicology*, ACS Publications, 2019. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 20.

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 17.

WEG. *Transformadores de Distribuição a Óleo*. 2020. Disponível em: <https://www.weg.net/institutional/BR/pt/>. Acesso em: 17 mai. 2020. Citado na página 13.

WINDERS, J. *Power Transformers. Principles and Applications*. [S.l.]: CRC Press, 2002. Citado 4 vezes nas páginas 9, 11, 12 e 19.

ZHANG, Y. *New Advances in Machine Learning*. [S.l.]: BoD–Books on Demand, 2010. Citado na página 20.