



UFPA

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA E BIOMÉDICA

GIOVANNA DE MELO MIRANDA

**ANÁLISE DA UTILIZAÇÃO DE TÉCNICAS DE MANUTENÇÃO PREDITIVA EM
TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA**

BELÉM
2025

GIOVANNA DE MELO MIRANDA

**ANÁLISE DA UTILIZAÇÃO DE TÉCNICAS DE MANUTENÇÃO PREDITIVA EM
TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA**

Trabalho Conclusão do Curso de Graduação
em Engenharia Elétrica do Instituto de
Tecnologia da Universidade Federal do Pará
como requisito para a obtenção do Título de
bacharelado.

Orientador: Prof. Dr. Reinaldo Corrêa Leite

Coorientador: Prof. Dr. Petrônio Vieira Júnior

BELÉM

2025

RESUMO

A energia elétrica é essencial para o desenvolvimento e qualidade de vida. Os Sistemas Elétricos de Potência garantem sua geração, transmissão e distribuição, com os transformadores sendo fundamentais. Para assegurar sua eficiência, aplica-se manutenção corretiva, preventiva ou preditiva, sendo esta última a mais avançada, reduzindo falhas e custos. Tem-se a seguinte pergunta-problema para o norteamento desta pesquisa: quais são os impactos da utilização da Manutenção Preditiva e seus recursos tecnológicos em transformadores de potência? O objetivo geral é: investigar quais são os impactos da utilização da Manutenção Preditiva e seus recursos tecnológicos em transformadores de potência. Os objetivos específicos são: discorrer sobre as principais características dos transformadores de potência, incluindo seu conceito e funcionamento, principais componentes, falhas mais usuais, e outras características relevantes a este estudo; discorrer sobre as principais características da Manutenção e suas três principais tipologias; analisar as vantagens da utilização da Manutenção Preditiva em relação à corretiva e preventiva, no que se refere aos custos e recursos tecnológicos empregados; apresentar as principais técnicas utilizadas para a predição de falhas em transformadores; analisar estudos correlatos ao tema para identificação dos impactos da Manutenção Preditiva em transformadores. Como resultado, o estudo analisou os impactos da Manutenção Preditiva (MPR) em transformadores de potência por meio de revisão bibliográfica. Confirmou-se que a MPR reduz custos, aumenta a vida útil e melhora a confiabilidade dos equipamentos. O uso de inteligência artificial aprimora a detecção de falhas e avanços tecnológicos impulsionam metodologias preditivas.

Palavras chave: Energia. Manutenção Preditiva. Transformadores.

ABSTRACT

Electricity is essential for development and quality of life. Electrical Power Systems ensure its generation, transmission and distribution, with transformers being fundamental. To ensure its efficiency, corrective, preventive or predictive maintenance is applied, the latter being the most advanced, reducing failures and costs. The following problem-question guides this research: what are the impacts of using Predictive Maintenance and its technological resources in power transformers? The general objective is: to investigate what are the impacts of using Predictive Maintenance and its technological resources in power transformers. The specific objectives are: to discuss the main characteristics of power transformers, including their concept and operation, main components, most common failures, and other characteristics relevant to this study; to discuss the main characteristics of Maintenance and its three main typologies; to analyze the advantages of using Predictive Maintenance in relation to corrective and preventive Maintenance, with regard to costs and technological resources employed; to present the main techniques used to predict failures in transformers; to analyze studies related to the topic to identify the impacts of Predictive Maintenance on transformers. As a result, the study analyzed the impacts of Predictive Maintenance (PRM) on power transformers through a literature review. It was confirmed that PRM reduces costs, increases service life and improves equipment reliability. The use of artificial intelligence improves fault detection and technological advances drive predictive methodologies.

Keywords: Energy. Predictive Maintenance. Transformers.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema geral de um transformador de potência.....	16
Figura 2 – Transformador de potência.....	17
Figura 3 – Tanque de expansão.....	19
Figura 4 – Comutador.....	20
Figura 5 – Buchas.....	21
Figura 6 – Principais tipos de transformadores.....	21
Figura 7a – Transformador de potência.....	22
Figura 7b – Transformador de distribuição.....	23
Figura 8 – Concepção da construção dos transformadores de alta potência em (A) do tipo <i>shell</i> e (B) do tipo <i>core</i>	23
Figura 9 – Índice percentual de ocorrência de falhas nos componentes de um transformador.....	25
Figura 10 – Curva de falha potencial para a Manutenção Preditiva com destaque das principais tecnologias utilizadas e comparação com as tipologias de Manutenção Corretiva e Manutenção Preventiva.....	29
Figura 11 – Análise comparativa dos custos com manutenção, entre a corretiva a preventiva e a preditiva.....	30
Figura 12 – Circuito elaborado por Oliveira (2022) utilizando o hardware de sensoamento TCS230-DB.....	34
Figura 13 – Diagrama de cromaticidade CIE com a emissão de cor analisada no estudo de Oliveira (2022).....	35
Figura 14 – Software Perception Desktop utilizado para a análise massiva de dados no estudo de Medeiros (2021) quanto ao triângulo de Duval e a análise de gases em transformadores.....	36
Figura 15 – Resultados da análise de Medeiros (2021) por origem de falha nos transformadores estudados para a técnica DGA.....	37
Figura 16 – Esquema geral do sistema proposto no estudo de Noronha (2012).....	38
Figura 17 – Processo do estudo proposto por Noronha (2012).....	39

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Principais técnicas preditivas aplicadas aos transformadores.....	31
--	----

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	11
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO.....	11
1.2 PROBLEMA DE PESQUISA.....	12
1.3 OBJETIVOS.....	12
1.3.1 Objetivo geral.....	12
1.3.2 Objetivos específicos.....	12
1.4 JUSTIFICATIVA.....	13
1.5 HIPÓTESES.....	14
1.6 METODOLOGIA.....	14
1.7 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	15
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	16
2.1 TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA.....	16
2.1.1 Conceitos gerais e funcionamento.....	16
2.1.2 Componentes principais.....	19
2.1.2.1 Núcleo.....	20
2.1.2.2 Enrolamentos.....	20
2.1.2.3 Tanque principal.....	20
2.1.2.4 Radiador.....	21
2.1.2.5 Tanque de expansão.....	21
2.1.2.6 Comutador.....	22
2.1.2.7 Bucha.....	22
2.1.3 Tipos de transformadores.....	23
2.1.3.1 Considerações gerais.....	23
2.1.3.2 Transformadores de potência e de distribuição.....	24
2.1.3.3 Construção do tipo core e do tipo shell.....	25
2.1.4 Falhas comuns em transformadores.....	26

2.1.5 Normas técnicas aplicadas aos transformadores.....	28
2.2 MANUTENÇÃO.....	29
2.2.1 Considerações gerais.....	29
2.2.2 Tipos de manutenção.....	29
2.2.2.1 <i>Manutenção corretiva.....</i>	<i>30</i>
2.2.2.2 <i>Manutenção preventiva.....</i>	<i>30</i>
2.2.2.3 <i>Manutenção preditiva (MPR).....</i>	<i>31</i>
2.3 TECNOLOGIAS EMERGENTES EM MANUTENÇÃO PREDITIVA EM TRANSFORMADORES.....	33
2.3.1 Manutenção em transformadores.....	33
2.3.2 Inteligência Artificial e Machine Learning.....	36
2.3.3 Internet das coisas, Big Data e análise de dados.....	37
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	38
3.1 PRIMEIRO ESTUDO ANALISADO.....	38
3.2 SEGUNDO ESTUDO ANALISADO.....	40
3.3 TERCEIRO ESTUDO ANALISADO.....	42
4 CONCLUSÕES.....	44
REFERÊNCIAS.....	46
ANEXO A – PRINCIPAIS FALHAS EM UM TRANSFORMADOR POR COMPONENTE E NATUREZA DA OCORRÊNCIA.....	52
ANEXO B – PRINCIPAIS NORMAS TÉCNICAS APLICADAS A TRANSFORMADORES.....	53

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

Na conjuntura social e econômica da contemporaneidade entende-se que a energia elétrica é de fundamental relevância para o progresso da sociedade e da qualidade de vida da comunidade. De fato, segundo é destacado por Mariani e Silva (2017), a eletricidade configura-se como um dos principais fatores de desenvolvimento humano, de maneira que é de suma importância assegurar a sua disponibilidade para a população em geral.

Desta forma, inserem-se neste âmbito, os Sistemas Elétricos de Potência como sendo a conjunção de estruturas e arranjos para a geração, transmissão e distribuição da energia elétrica, interconectando as unidades produtoras aos clientes finais, sejam estes residenciais, industriais ou de outro tipo (Silva, 2019; CNI, 2021). Outrossim, um dos principais dispositivos que são utilizados para garantir o bom funcionamento dos Sistemas Elétricos de Potência são os transformadores, utilizados para garantir os parâmetros de tensão, corrente e outras características mais no conjunto como um todo em níveis adequados às funções de geração, transmissão e distribuição.

No entanto, apesar da grande relevância preconizada para os transformadores no âmbito dos Sistemas Elétricos de Potência, Mamede (2020) expõe que estas máquinas frequentemente encontram-se sujeitas a possibilidade de falhas de diversos tipos, de modo que é essencial assegurar sua operação segura e eficiente. Por conseguinte, segundo é destacado por Frontim (2013), as consequências destas falhas podem ser de variadas naturezas, tanto em se tratando de sobrecargas locais, quanto outros impactos em algum ponto mais longínquo do Sistema Elétrico de Potência.

Em decorrência disto, insere-se, neste cenário, então, a Manutenção, como sendo a conjunção de todas as técnicas, diretrizes e recursos que são destinados a assegurar a conservação do desempenho de um determinado equipamento, ou, ainda, a sua recolocação neste estado, em caso de uma ocorrência emergencial. Sendo assim, é, em geral, aplicada mediante três principais tipologias, a saber: Manutenção Corretiva, Manutenção Preventiva e Manutenção Preditiva (Teles, 2019; Kardec e Nascif, 2009).

Neste sentido, tem-se que a Manutenção Corretiva é a mais antiga metodologia, empregada, usualmente, após a ocorrência de uma falha emergencial em um determinado equipamento ou de forma planejada, após a detecção de anomalia durante inspeções preventivas ou preditivas; já a manutenção preventiva emprega processos antecipados a uma quebra, como troca de peças, normalmente em intervalos regulares, de modo a garantir a menor possibilidade de falha; por fim, a Manutenção Preditiva utiliza recursos tecnológicos avançados e emergentes para garantir não somente a estimativa da probabilidade de uma falha, mas, também, a determinação do melhor momento para intervir, maximizando a produtividade e o lucro, por meio da redução de custos (Teles, 2019).

1.2 PROBLEMA DE PESQUISA

No que concerne ao tema proposto para a investigação neste estudo, tem-se a seguinte pergunta-problema para o norteamento desta pesquisa: quais são os impactos da utilização da Manutenção Preditiva e seus recursos tecnológicos em transformadores de potência? Esse questionamento é de grande relevância, uma vez que visa a análise da redução de custos, diminuição da probabilidade de falha, aumento da confiabilidade e consequente elevação da disponibilidade

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo geral

Investigar quais são os impactos da utilização da Manutenção Preditiva e seus recursos tecnológicos em transformadores de potência.

1.3.2 Objetivos específicos

- a) Discorrer sobre as principais características dos transformadores de potência, incluindo seu conceito e funcionamento, principais componentes, falhas mais usuais, e outras características relevantes a este estudo.
- b) Discorrer sobre as principais características da Manutenção e suas três principais tipologias.

- c) Analisar as vantagens da utilização da Manutenção Preditiva em relação à corretiva e preventiva, no que se refere aos custos e recursos tecnológicos empregados.
- d) Apresentar as principais técnicas utilizadas para a predição de falhas em transformadores.
- e) Analisar estudos correlatos ao tema para identificação dos impactos da Manutenção Preditiva em transformadores.

1.4 JUSTIFICATIVA

A justificativa para a realização do presente estudo baseia-se em três principais fatores, a saber: a importância dos transformadores para os Sistemas Elétricos de Potência, a relevância da Manutenção Preditiva quanto avanço tecnológico em recursos de manutenção; e, por fim, a possibilidade de contribuição para o conhecimento técnico disponível nesta área.

Sendo assim, no que concerne ao primeiro fator, sabe-se que os transformadores de potência são indispensáveis para garantir a transmissão eficaz da energia elétrica por longas distâncias, com qualidade e eficiência. Desta forma, estudos que promovam a garantia de sua disponibilidade operacional podem contribuir para o desenvolvimento nacional, de modo que tem a sua relevância justificada.

Do mesmo modo, quanto ao segundo aspecto elencado, a Manutenção Preditiva é a que mais utiliza recursos tecnológicos para a determinação do melhor momento de intervenção. Isto significa que se maximiza a qualidade, a produtividade, a eficiência e eficácia, ao mesmo tempo em que se reduz os custos e a ociosidade. Sendo assim, considerando-se que a mesma é um avanço tecnológico em relação a corretiva e a preventiva, estudos que promovam a sua utilização também tem a relevância justificada.

Por fim, uma investigação que aborde, de maneira concomitante, a garantia da qualidade dos transformadores de potência e o impacto da manutenção preditiva nestes dispositivos pode enriquecer os acervos acadêmico e técnico disponíveis sobre o assunto. Desta forma, favorece-se o processo de tomada de decisão, a

formulação de políticas públicas, e a continuidade de estudos neste segmento de conhecimento no geral.

1.5 HIPÓTESES

No que concerne às hipóteses formuladas neste estudo, tem-se:

- a) **Hipótese 01:** A aplicação da manutenção preditiva em transformadores de potência reduz significativamente os custos operacionais em comparação com a manutenção corretiva e preventiva.
- b) **Hipótese 02:** A utilização de técnicas de manutenção preditiva aumenta a vida útil dos transformadores de potência.
- c) **Hipótese 03:** A implementação de um programa de manutenção preditiva reduz a frequência de falhas e melhora a confiabilidade do transformador como um todo.
- d) **Hipótese 04:** O uso de inteligência artificial e IoT na manutenção preditiva de transformadores de potência melhora a precisão na detecção de falhas em comparação com métodos tradicionais.

1.6 METODOLOGIA

A metodologia utilizada neste estudo focou-se em uma Revisão Bibliográfica, que, de acordo com Almeida (2021), refere-se à utilização de material que foi previamente disponibilizado por outros autores, à fim de haver o devido embasamento teórico.

Sendo assim, buscaram-se os seguintes materiais: Livros; Sites; Trabalhos de Conclusão de Curso; Dissertações; Teses; Artigos; Monografias de especialização. Em suma a isso, os bancos de dados utilizados foram: Google Acadêmico, OASIS, Scielo, e o Portal de Periódicos da Capes. Os critérios de aceitação foram: textos disponibilizados em português e inglês; período de datação entre os anos de 2000 e 2025; correlação direta com os objetivos específicos deste estudo. As palavras

chave utilizadas na busca foram: manutenção preditiva, transformadores, técnicas preditivas e inteligência artificial.

1.7 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho estrutura-se da seguinte forma:

O **capítulo 1** apresentou a introdução do projeto, abrangendo a contextualização, o problema de pesquisa, a justificativa, as hipóteses e objetivos.

O **capítulo 2** contém a fundamentação teórica, abrangendo os conceitos de transformadores de potência, manutenção e técnicas preditivas.

O **capítulo 3** descreve todos os procedimentos metodológicos que foram utilizados.

O **capítulo 4** apresenta a análise de alguns casos correlatos ao tema em questão.

O **capítulo 5** contém as considerações finais.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A seção de fundamentação teórica foi estruturada com base em uma organização lógica de assuntos. Sendo assim, primeiramente expõe-se as principais informações a respeito dos transformadores de potência, abrangendo os conceitos primordiais, como o funcionamento, os componentes, os tipos e as falhas mais comuns. Em seguida, aborda-se o conceito de manutenção, demonstrando sua importância e evolução ao longo do tempo, discutindo as estratégias tradicionais das estratégias corretiva e preventiva, para, então, destacar a importância, o cunho tecnológico e as vantagens da estratégia preditiva. Por conseguinte, apresenta-se a aplicação da manutenção preditiva em transformadores, bem como as suas vantagens e principais técnicas que são utilizados. Após isto, discute-se sobre as normas técnicas aplicadas aos dispositivos em questão.

2.1 TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA

2.1.1 Conceitos gerais e funcionamento

Na conjuntura social e econômica da contemporaneidade observa-se a necessidade de energia elétrica para as mais variadas atividades humanas, que vão desde o lazer a até o desenvolvimento econômico e financeiro. Em virtude disto, é destacado por Mariani e Silva (2017) que a eletricidade se configura como indispensável para a sociedade, de maneira que o nível de consumo e de disponibilidade para a comunidade são fatores críticos para a determinação do progresso como um todo, bem como para a qualidade de vida das pessoas.

Desta forma, à fim de assegurar que toda a população tenha acesso a energia elétrica, concebeu-se uma estrutura de grande porte para a garantir a produção e a entrega do fornecimento de eletricidade. Esta, por sua vez, segundo é ressaltado por Silva (2019), refere-se aos Sistemas Elétricos de Potência (SEP), e visa garantir a conexão entre as unidades de geração de eletricidade e os consumidores finais, sejam estes de cunho residencial, comercial, industrial ou outros.

Além disto, em complemento às informações destacadas pelo autor supramencionado, a Confederação Nacional da Indústria (CNI) destaca que os

Sistemas Elétricos de Potência são subdivididos em quatro principais unidades, que são (CNI, 2021):

- a) **Unidade de geração:** refere-se ao conjunto de instalações que são destinadas à produção de energia elétrica e sua subsequente injeção na rede de veiculação.
- b) **Unidade de transmissão:** consiste no segmento responsável por transmitir um montante considerável de energia elétrica proveniente das unidades de geração.
- c) **Unidade de distribuição:** são as unidades que recebem dos sistemas de transmissão e asseguram a entrega ao consumidor final.
- d) **Unidade de consumo:** são os componentes finais da cadeia, como residências, indústrias, e outros mais.

Em suma, às considerações observadas pela Confederação Nacional da Indústria quanto aos Sistemas Elétricos de Potência, destaca-se uma grande problemática referente a estas instalações, a saber: a possibilidade de perda da eficiência da energia conduzida. Esse desafio impacta sumariamente a qualidade de vida da população, dificultando a execução das atividades anteriormente elencadas com eficiência, eficácia e satisfação. Quanto a isso, Ribeiro (2020) destaca que, à fim de se combater essa questão empregam-se os dispositivos conhecidos como Transformadores (TMR).

Ribeiro (2020) ainda esclarece que nos primórdios da utilização dos Sistemas Elétricos de Potência a transmissão era realizada unicamente em Corrente Contínua (CC) e em baixas tensões. Em virtude disto a queda de tensão ao longo do sistema de distribuição era acentuada, de maneira que a utilização de eletricidade se limitava aos zoneamentos urbanos, e, mesmo assim, por uma área diminuta de veiculação.

Sendo assim, em decorrência de uma invenção advinda do século XIX, no cenário italiano, desenvolveu-se o Transformador, como sendo o dispositivo que visava a alteração dos níveis de tensão e de corrente entre dois circuitos elétricos que estão ligados por um circuito magnético. Dessa forma, por meio da transferência de energia entre os dois pontos em comum, foi possível reduzir os níveis de queda de tensão e as perdas diretamente associadas a isto (Ribeiro, 2020).

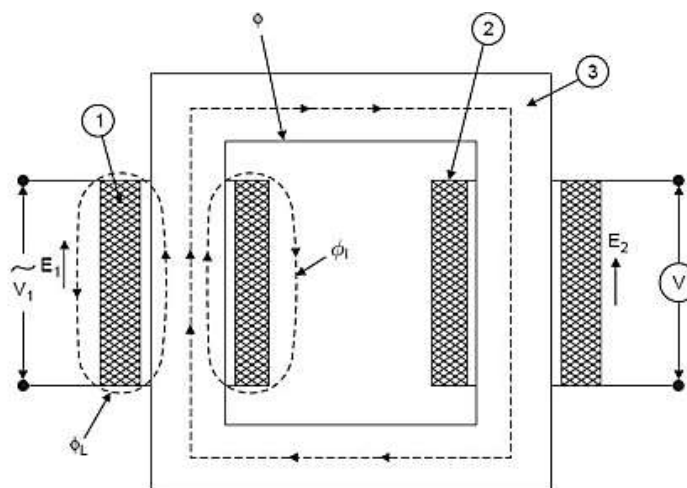
Em corroboração para com as informações supracitadas, é destacado por Frontim (2013) que a utilização da corrente alternada, advinda da implementação dos transformadores, possibilitou vantagens significativas, dentre as quais citam-se: a obtenção de níveis de tensão elevados e a redução das perdas para valorações próximas do nulo. Ademais, para fins de maior explicação quanto a aplicação desta máquina, Frontim (2013, pg. 188) destaca:

Por questões de segurança humana, são utilizados baixos níveis de tensão na entrega ao consumidor [...] em razão de limitações impostas pela espessura da isolação [...] é mais conveniente a tensão de até 25 kV, com alguns em níveis ligeiramente superiores. Por outro lado, de forma a possibilitar alta capacidade de potência com perdas relativamente baixas, é conveniente que o transporte da energia elétrica a grandes distâncias desde o gerador até o consumidor seja efetuado em níveis de tensão elevados, de até 1.000 kV.

Neste sentido, em se tratando das ideias destacadas pelo autor supracitado, compreende-se que um transformador é uma máquina que visa a transformação da tensão, ou da corrente, em níveis estabelecidos anteriormente. Para isto, seu funcionamento básico, de acordo com o entendimento de Jorge (2015), refere-se a dois conjuntos de enrolamentos, um dito primário e outro secundário, também considerados o de alta tensão e o de baixa tensão, que partilham um fluxo magnético, por onde, em decorrência do processo de indução, tem-se a variação dos valores de tensão.

Para fins de maior conhecimento quanto a este processo, tem-se a Figura 1 com uma exemplificação.

Figura 1 – Esquema geral de um transformador de potência



Fonte: Mota (2017)

No que se refere à Figura 1, esta apresenta um esquema demonstrativo de um transformador, onde, de acordo com Mota (2017), tem-se os seguintes componentes: os enrolamentos (1) e (2), que se encontram separados um do outro, um núcleo de chapas de aço empilhadas (3). Em vista disto, essa configuração assegura baixa perda, conforme anteriormente destacado, em vista da permeabilidade magnética dos materiais, considerando que, em geral, o aço apresenta uma valorização 800 a 1000 vezes superior à do ar, o que faz com que quase toda a totalidade da energia seja transmitida pelo núcleo.

Dessa forma, tem-se que os transformadores são dispositivos regidos pela Lei de Indução de Faraday, que, de acordo com o entendimento de D'lavanenko (2019) e de Graça (2021), consiste no fato de que se um determinado condutor estiver conduzindo uma corrente elétrica, simultaneamente afetado por um determinado campo magnético, irá produzir uma força eletromotriz que é diretamente proporcional à variação do fluxo considerado.

2.1.2 Componentes principais

No que concerne ao estudo dos transformadores, de acordo com o entendimento de Barth (2020), é de grande importância conhecer os principais componentes que integram a máquina em questão. Sendo assim, tem-se na Figura 2 um esquema ilustrativo com as informações quanto a estes materiais.

Figura 2 – Transformador de potência



Fonte: Barth (2020)

A Figura 2 apresenta os indicadores dos principais elementos que compõem o transformador de potência, que, segundo Barth (2020), são: (1) o núcleo, (2) enrolamentos, (3) tanque principal, (4) radiador, (5) tanque de expansão, (6) comutador e (7) buchas.

2.1.2.1 Núcleo

O núcleo do transformador apresenta uma função primordial em seu funcionamento. De acordo com o entendimento de Carraro (2017), este elemento construtivo visa a condução do fluxo magnético entre os enrolamentos, com baixa relutância, concomitantemente à elevação da resistência elétrica para haver a minimização das correntes de *Foucault*. Além disto, o autor ainda destaca que os materiais que constituem o núcleo são: chapas ferromagnéticas, armaduras, culatras, tirantes e sapatas.

2.1.2.2 Enrolamentos

Os enrolamentos são outro elemento que constitui a parte ativa do transformador de potência, sendo igualmente de grande relevância para seu funcionamento. Sendo assim, segundo é destacado por Graça (2021), este elemento refere-se às bobinas que recebem a corrente elétrica da fonte de alimentação, em Corrente Alternada (CA), e, também, de uma bobina que transporte a eletricidade transformada para os cabos da rede de distribuição dos Sistemas Elétricos de Potência. Ademais, além do cobre condutor, também têm espaçadores, para um melhor desempenho do transformador.

2.1.2.3 Tanque principal

A estrutura do transformador de potência, segundo é destacado por Ribeiro (2020), é formada por um tanque, também denominado de cuba, que consiste em uma estrutura totalmente fechada, constituída de aço, cuja finalidade é resistir aos esforços solicitantes, tanto de natureza mecânica quanto térmica e eletromagnética. De igual modo, em complemento a esta informação, segundo é destacado por Jorge (2015), este elemento construtivo também é o invólucro que contém a parte ativa do transformador, bem como o fluido dielétrico utilizado, de maneira a assegurar a

proteção destes componentes e, também, dos trabalhadores e dispositivos ao redor do TMR.

2.1.2.4 Radiador

Os radiadores são componentes indispensáveis no que concerne ao funcionamento dos transformadores de potência. Neste sentido, Barth (2020) destaca que estes componentes são responsáveis pela troca de calor da máquina, de modo a assegurar a eficiência do sistema. Em alguns casos, estes componentes também podem estar associados a ventiladores, de modo a reforçar o desempenho térmico. Em corroboração para com esta informação, Maurício (2019) destaca que a composição do sistema de resfriamento visa garantir a troca de calor do isolante líquido com um fluido exterior, que, em geral, é o próprio ar.

2.1.2.5 Tanque de expansão

O transformador é uma máquina de grande complexidade, que, quando devidamente energizado para encontrar-se em operação, as perdas elétricas, ainda que diminutas, implicam no aquecimento do óleo em seu interior, o que promove a expansão volumétrica deste material. Por consequência, uma vez que este processo se inicia, novos esforços solicitantes são adicionados ao TMR, de modo que é necessária a utilização de uma estrutura auxiliar para garantir o alívio destas tensões. Por conseguinte, este elemento construtivo é o tanque de expansão (Barth, 2020). Dessa forma, a Figura 3 apresenta a ilustração de um tanque de expansão.

Figura 3 – Tanque de expansão

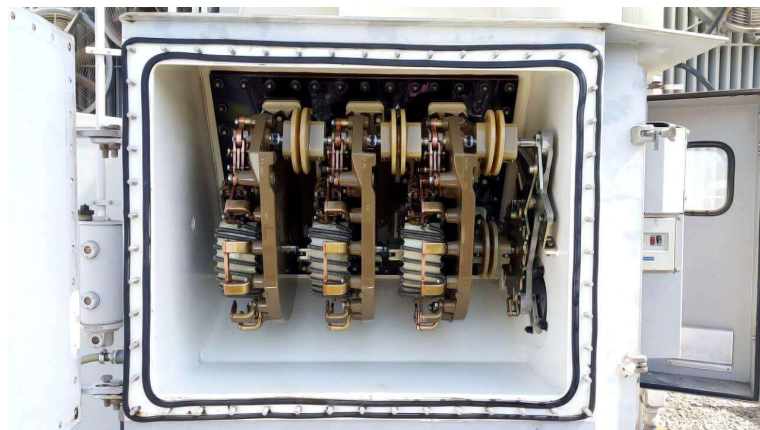


Fonte: Weg (2021)

2.1.2.6 Comutador

O comutador é um elemento construtivo do transformador de potência de grande importância para a eficácia e eficiência energética do mesmo. De acordo com o entendimento de Ribeiro (2016) e Barth (2020), este dispositivo é empregado para regular o nível de tensão no que tange às espiras dos enrolamentos, adicionando ou as removendo, em vista da utilização de chaves automatizadas. Com isto, o TMR torna-se capaz de adaptar-se às variações de consumo energético em qualquer instante de solicitação. Outrossim, devido à sua função no sistema em questão, o mesmo encontra-se submetido a grandes esforços solicitantes; no entanto, apesar disto, sua substituição não implica em grandes problemáticas ou desafios para o todo (Barth, 2020). A figura 4 para fins ilustrativos, demonstra um comutador.

Figura 4 – Comutador



Fonte: Potencial (2015)

2.1.2.7 Bucha

As buchas também se configuram como componentes de grande relevância para a operação dos transformadores de potência, com qualidade e eficiência. De acordo com o entendimento de Barth (2020), estes componentes são os responsáveis por assegurar a interface de conexão dos barramentos, tanto os de alta tensão, quanto os de baixa tensão. Além disto, também assegura o devido isolamento entre as fases do TMR, de maneira que não haja um curto circuito na estrutura do mesmo. A figura 5 abaixo mostra buchas comumente utilizadas em TMRs.

Figura 5 – Buchas



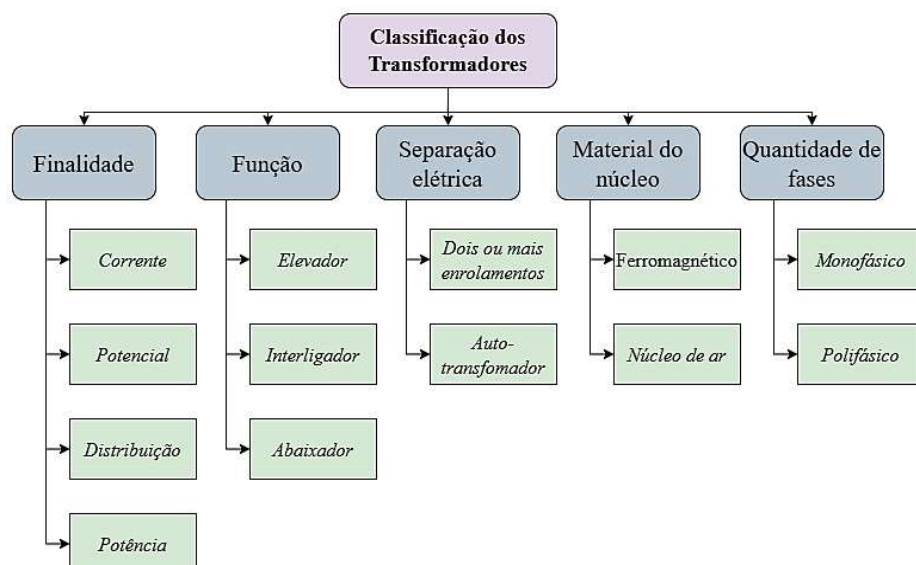
Fonte: AdNormas (2022)

2.1.3 Tipos de transformadores

2.1.3.1 Considerações gerais

Os transformadores, de acordo com o entendimento de Graça (2021), apesar de sua finalidade ser orientada à transformação da energia em um determinado circuito, ou sistema, existem particularidades em relação a cada tipologia desenvolvida. Desta forma, de acordo com o entendimento de Mota (2017), os TMR podem ser classificados mediante finalidade, função, quantidade de fases, e outros critérios mais. Sendo assim, segundo Frontim (2013), tem-se no fluxograma da figura 6 as principais classificações e elementos que constituem as mesmas.

Figura 6 – Principais tipos de transformadores



Fonte: Adaptado de Frontim (2013)

2.1.3.2 Transformadores de potência e de distribuição

Conforme anteriormente analisado, existem, atualmente, inúmeras classificações para os transformadores. Neste âmbito, de acordo com o entendimento de Graça (2021), dentre as principais tipologias existentes, os que apresentam maior premência são, precisamente, os de potência e os de distribuição. Quanto a isso, então, segundo Frontim (2013), tem-se o detalhamento operacional destes elementos:

- a) **Transformador de potência:** são os transformadores empregados para a transmissão de energia elétrica, em faixas 5MVA até 300 MVA; sendo que operam em tensão de até 765 kV.
- b) **Transformador de distribuição:** são os elementos empregados nos sistemas elétricos de potência cuja finalidade é assegurar o rebaixamento da tensão para que os clientes finais possam utilizar. Usualmente são instalados em postes, porém podem também ser postos em câmaras subterrâneas. A sua potência é de 30 KVA a 300 KVA, sendo que, quando operam em alta tensão apresentam tensão de operação entre 15KV a até 24,2 KV, enquanto em baixa tensão tem uma tensão de 380/220V ou, ainda, 220/127V.

Em complemento às informações supramencionadas, tem-se nas Figuras 7a e 7b um exemplo de cada um destes transformadores, respectivamente para o de potência e de distribuição.

Figura 7a – Transformador de potência



Fonte: WEG (2025)

Figura 7b – Transformador de distribuição



Fonte: WEG (2025)

2.1.3.3 Construção do tipo core e do tipo shell

O funcionamento geral e o conceito por detrás da elaboração e sistematização de um transformador, de acordo com o entendimento de Pinheiro (2015), é o mesmo para as variadas tipologias existentes. No entanto, no que concerne ao aspecto construtivo, isto varia em dois modelos principais, em se tratando dos transformadores de alta potência. Neste sentido, tem-se que existem os do tipo *core* e os do tipo *shell*, conforme observa-se na Figura 8.

Figura 8 – Concepção da construção dos transformadores de alta potência em (A) do tipo *shell* e (B) do tipo *core*



Fonte: Adaptado de Viana (2015)

A Figura 8 apresenta um esquema ilustrativo da montagem dos transformadores que empregam os recursos *core* e *shell*. Neste sentido, de acordo com o entendimento de Viana (2015), quando se classifica um TMR na primeira categorização como *Tipo Core*, tem-se que os enrolamentos são dispostos ao redor de cada seção do núcleo, conforme evidencia-se na Figura 8. Com isto, tem-se que, em geral, as bobinas são dispostas concêntricamente, com as bobinas de alta tensão envolvendo as de baixa tensão.

Já no que é concernente aos transformadores do tipo *shell*, segundo é ressaltado por Ribeiro (2019), o circuito magnético encontra-se ao redor dos enrolamentos, de maneira que as bobinas apresentam uma configuração retangular, com uma pequena espessura e uma grande superfície. Ademais, as mesmas encontram-se isoladas entre si. Outro fator importante, destacado pelo autor, é que as chapas constituintes do núcleo tem a mesma dimensão, apresentando uma seção retangular.

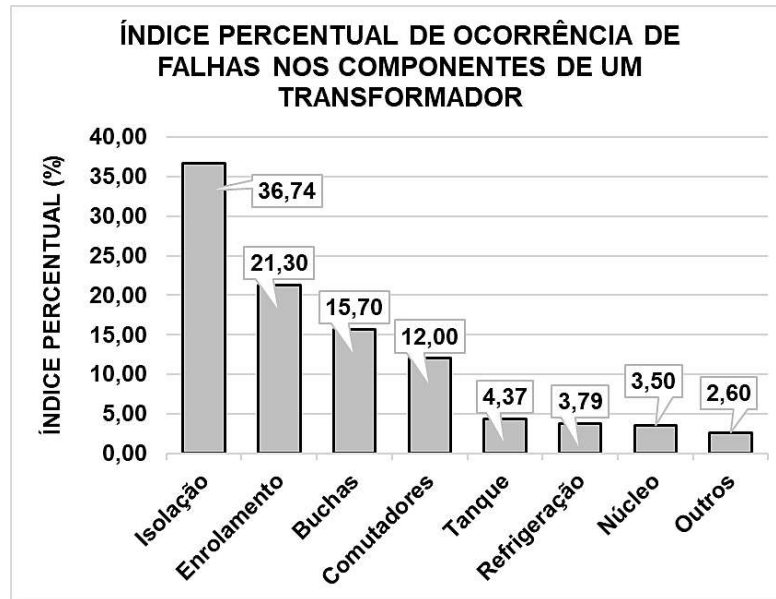
Em complemento às informações destacadas pelos autores supracitados, segundo é exposto por Ribeiro (2020), a escolha entre as configurações elencadas depende, em grande parte, da função que o transformador irá exercer e do custo alocado para isto. Sendo assim, no que concerne aos de distribuição, tem-se que o tipo *core* é mais usual, enquanto nos de potência emprega-se o tipo *shell*, devido à necessidade de maior segurança no que concerne a ocorrência de curtos-circuitos, de maneira que é um projeto que demanda por maiores aportes.

2.1.4 Falhas comuns em transformadores

No âmbito operacional de um transformador, tem-se que estes dispositivos encontram-se sujeitos a uma série de esforços solicitantes que podem, com o passar do tempo, apresentar riscos expressivos em relação à confiabilidade e disponibilidade destas máquinas. Em virtude disto, Nascimento e Brandão (2016) destacam que os TMR estão sujeitos aos variados distúrbios do sistema em que se encontram instalados, o que pode comprometer a sua operação imediata, ou, ainda, diminuir a sua vida útil mediante a ocorrência de falhas.

Sendo assim, tem-se na Figura 9 o índice percentual de falhas por componente do transformador.

Figura 9 – Índice percentual de ocorrência de falhas nos componentes de um transformador



Fonte: Adaptado de Bittencourt (2025)

Conforme pode ser observado na Figura 9, tem-se que os componentes: Isolação, Enrolamento, Buchas, Comutadores, Tanque, Refrigeração, Núcleo e Outros mais, apresentam, respectivamente, um índice percentual de falhas de 36,74%, 21,30%, 15,70%, 12,00%, 4,37%, 3,79%, 3,50% e 2,60. Desta forma, segundo é destacado por Viana (2015), tem-se que a maior probabilidade é associada com os sistemas de isolamento do transformador, que pode ocorrer devido à deterioração do sistema de isolação, ou, ainda, por falhas na instalação do TMR, ou desgaste acentuado. Tendo também os enrolamentos como o segundo componente do transformador que mais apresenta falhas, é relevante observar que esta anomalia também pode estar associada à degradação do sistema de isolação do enrolamento, que combina a isolação sólida, composta majoritariamente por celulose, e a isolação líquida, constituída pelo óleo isolante. Outrossim, o autor ainda destaca que falhas dos materiais, erros de projeto e de operação, dentre outras questões, são causas mais contundentes para a manifestação de falhas nos componentes diversos observados no Figura 9.

Embora o detalhamento aprofundado da relação entre esses mecanismos ultrapasse o escopo deste trabalho, recomenda-se que pesquisas futuras explorem de forma mais específica a correlação entre a degradação do sistema de isolação com os demais modos de falha citados, em especial as falhas nos enrolamentos, visando aprimorar diagnósticos e estratégias de manutenção preditiva.

Ainda com relação à manifestação das falhas, Frontim (2013) destaca que quando há uma taxa de falhas anual superior a 0,7% a probabilidade de uma quebra do transformador em 30 anos é de 20%; porém, quando a taxa sobe para apenas 2,5% o potencial de quebra é de 53%. Em vista disto, os impactos das falhas nos TMR são, ainda de acordo com Frontim (2013): sobretensões, tanto no local de instalação, quanto fora dele, sendo de origem atmosférica ou de manobras; correntes induzidas; esforços solicitantes adicionais de origem térmica; contaminação dos componentes do transformador por partículas diversas; aumento expressivo das solicitações mecânicas. Ademais, o Anexo A detalha em maior profundidade as falhas que ocorrem em um transformador.

2.1.5 Normas técnicas aplicadas aos transformadores

Os transformadores são elementos, conforme exposto por Mamede (2020), que frequentemente encontram-se sujeitos aos riscos de falhas, conforme previamente discutido. Neste sentido, segundo é entendido por Viana (2015), erros de projeto e de instalação encontram-se entre as principais causas de falhas, de maneira que é de suma relevância conhecer as normas técnicas que são aplicadas a estes dispositivos, de modo a se mitigar estas ocorrências.

Neste sentido, as normas técnicas configuram-se como elementos de indispensável relevância no que concerne a projetos de sistemas desta categoria, uma vez que são o meio pelo qual se pode assegurar as características desejadas para a operação futura do conjunto de componentes. Em vista disto, as principais entidades formuladoras de Normas Técnicas referentes a Sistemas Elétricos de Potência são: a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) , a *International Electrotechnical Commission* (IEC), o *American National Standards Institute* (ANSI), e o *Institute of Electric and Electronic Engineers* (IEEE) e (Frontim, 2013; Anschau, 2020). Sendo assim, tem-se no Anexo C as principais normativas destas entidades para transformadores.

2.2 MANUTENÇÃO

2.2.1 Considerações gerais

Na conjuntura social e econômica da contemporaneidade, uma Organização pode ser compreendida como uma entidade cujo principal objetivo é alcançar, e assegurar, uma vantagem estratégica perante a concorrência, de modo a manter-se competitiva e efetivar a finalidade para a qual foi concebida, como a prestação de serviços ou a manufatura de um determinado produto. Neste cenário, em decorrência da elevada complexidade do mercado atual, as empresas passaram a necessitar de estratégias que permitissem o aumento da produtividade e a maximização da lucratividade, com o menor custo possível (Fernandes, 2022; Cardoso, 2019).

É, então, neste âmbito em que se insere a conceituação de Manutenção, como, de acordo com Almeida Filho (2023), a conjunção de todas as técnicas, recursos, diretrizes e ferramentas que são direcionadas para manter, ou recolocar, os ativos da Organização em condições de desempenho, conforme solicitado. Por sua vez, esta conjunção pode ser tanto de caráter técnico quanto administrativo. Em decorrência disto, Castro (2020) destaca que a Manutenção visa garantir a segurança dos colaboradores e a preservação do patrimônio organizacional, promover a qualidade das operações e diminuir os custos operacionais.

Em complemento à informação destacada, segundo é exposto por Costa (2022), para que as Organizações possam expandir os seus negócios, bem como garantir a maximização de sua função produção, é de indispensável relevância que haja a implementação de práticas assertivas de manutenção. Em função disto, Soeiro, Olívio e Lucato (2017) destacam que a Manutenção passou a preconizar-se como sendo uma função estratégica das empresas da contemporaneidade, influenciando na capacidade de estas alcançarem as suas metas, em todos os níveis da Organização.

2.2.2 Tipos de manutenção

A Manutenção, de acordo com o exposto por Teles (2019), é um conjunto de operações que, em geral, são subdivididas em categorias que podem ser consideradas esforços metodológicos. Dentre estes, é possível se destacar: a

Manutenção Corretiva, a Manutenção Preventiva e a Manutenção Preditiva. Estas, então, por sua vez, configuram-se como as de principal importância no âmbito dos procedimentos de análise, intervenção e outras questões mais.

2.2.2.1 Manutenção corretiva

A Manutenção Corretiva (MC) é uma tipologia de manutenção mais inicial, advinda de um período onde se visava apenas um caráter reativo quanto às ocorrências em ativos organizacionais. Por conseguinte, é destacado por Brandão (2021), que a MC é o conjunto de atividades que são direcionadas para a restauração das condições operacionais de um determinado equipamento, seja isto em se tratando do desempenho ou da ocorrência de uma falha funcional.

Sendo assim, pode-se observar que a MC se subdivide em programada e emergencial. Com isto, de acordo com Teles (2019) percebe-se que a primeira tipologia aplicada é direcionada a correção do desempenho da máquina, de modo anterior à quebra da mesma; por sua vez, já a segunda ocorre em caráter reativo, o que implica na recolocação das condições normais de operação após uma parada não prevista.

Em vista disto, para Kardec e Nascif (2009), a Manutenção Corretiva apresenta um elevado custo, em decorrência do fato de, usualmente, ser aplicada após uma ocorrência emergencial. No entanto, apesar disto, Araújo (2021) ainda destaca que esta é a principal tipologia aplicada no âmbito brasileiro, em decorrência de uma série de fatores, tais como: cultura organizacional, nível tecnológico, dificuldade com a análise de dados, e outros.

2.2.2.2 Manutenção preventiva

A Manutenção Preventiva (MP) de acordo com o entendimento de Kardec e Nascif (2009), refere-se ao conjunto de técnicas e procedimentos que são empregados para garantir a redução da probabilidade de falha funcional em um determinado equipamento de uma empresa. Como consequência, torna-se de grande importância a elaboração sistemática de uma estratégia, conhecida como plano de manutenção, para garantir a execução de procedimentos de prevenção em intervalos determinados.

Dessa forma, em complemento às informações supramencionadas, Gonçalves (2020) destaca que a manutenção preventiva pode ser baseada em intervalos previamente determinados de tempo ou número de operações (p. ex. disjuntores e chaves), de um equipamento ou sistema. Sendo assim, Teles (2019) ressalta que a MP, em geral, obedece aos seguintes parâmetros de consideração para a elaboração de um plano: tempo, independente da operação da máquina, como meses ou semanas; funcionamento, em horas operacionais do dispositivo; produtividade, que consiste nas na quantidade de peças ou de ciclos; ou sistema misto, que abrange estas categorizações, ou outras mais.

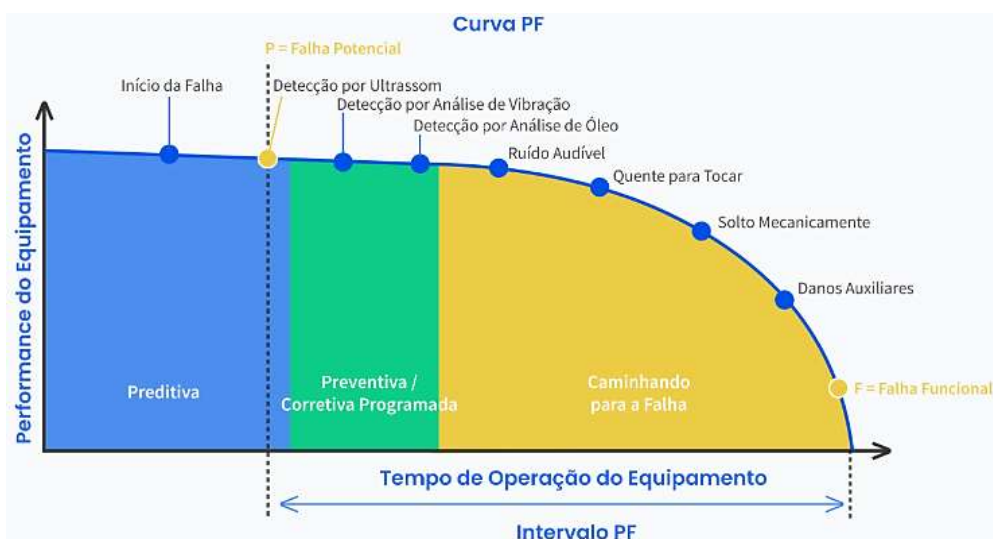
2.2.2.3 Manutenção preditiva (MPR)

De acordo com o entendimento de Teles (2019, pg. 45):

A manutenção preditiva também é conhecida como manutenção sob condição ou manutenção com base no estado do equipamento. É baseada na tentativa de definir o estado futuro de um equipamento ou sistema, por meio dos dados coletados ao longo do tempo por uma instrumentação específica, verificando e analisando a tendência de variáveis do equipamento.

Em suma, então, às considerações observadas pelo supracitado autor, tem-se na Figura 5 a caracterização da MPR em função da curva de falha potencial.

Figura 10 – Curva de falha potencial para a Manutenção Preditiva com destaque das principais tecnologias utilizadas e comparação com as tipologias de Manutenção Corretiva e Manutenção Preventiva

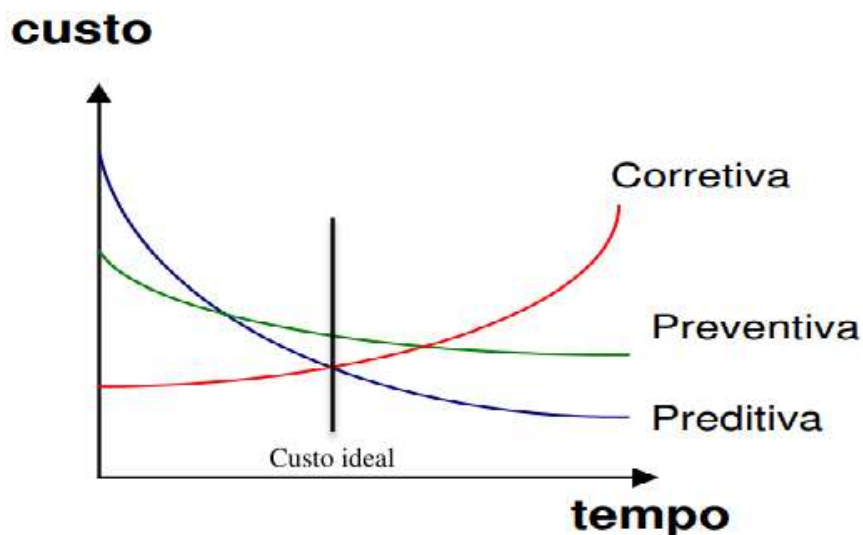


Fonte: Marinelli (2022)

A Figura 10 apresenta as principais características da Manutenção Preditiva, em comparação com as outras tipologias existentes. Neste sentido, pode-se destacar que a mesma emprega recursos tecnológicos mais avançados, como ensaios de ultrassom e de vibração, por exemplo. Em vista disto, Teles (2019) e Michelin (2019) ressaltam que a finalidade consiste em determinar o melhor momento de intervenção, à fim de se maximizar a eficácia das práticas de manutenção, em comparação com as outras duas tipologias.

Em complemento a isto, no que é concernente aos custos, observa-se a Figura 11 com a análise comparativa, de acordo com Gonçalves Júnior, Ribeiro e Franco (2015).

Figura 11 – Análise comparativa dos custos com manutenção, entre a corretiva a preventiva e a preditiva



Fonte: Gonçalves Júnior, Ribeiro e Franco (2015)

No que concerne à Figura 11, esta apresenta a análise comparativa dos custos com a manutenção corretiva, a preventiva e a preditiva. Sendo assim, pode-se observar que a primeira tipologia (manutenção corretiva) tem um diminuto custo inicial, mas configura-se como a mais dispendiosa à medida que o tempo passa; já a segunda (manutenção preventiva), tem um custo inicial mediano, porém que não diminui exponencialmente no decorrer do tempo. Por outro lado, a preditiva é a que demanda por maior quantificação de aportes iniciais, mas retorna o menor custo final ao longo do período considerado (Gonçalves Júnior, Ribeiro e Franco, 2015). De fato, isto é destacado por Teles (2019), uma vez que o autor ressaltava que esta valoração inicial se refere à aquisição de equipamentos e treinamento de pessoal.

Além disto, outra questão de bastante importância que é destacada por Teles (2019) é que a Manutenção Preditiva apresenta custos de implementação que podem ser considerados elevados. Sendo assim, é importante a análise de sua viabilidade de implementação, de modo que os resultados esperados sejam devidamente alcançados. Outro fator importante, segundo Kardec e Nascif (2009), é que para analisar a viabilidade de implementação da manutenção preditiva deve-se considerar os seguintes fatores: se o equipamento apresenta a possibilidade de monitoramento de suas condições, o que configura a viabilidade técnica; se o grau de complexidade e tecnologia dos equipamentos demandada por essa prática em relação aos custos, de modo que se analise a viabilidade econômica; e a possibilidade de sistematização do projeto de acompanhamento, monitoramento e intervenção.

2.3 TECNOLOGIAS EMERGENTES EM MANUTENÇÃO PREDITIVA EM TRANSFORMADORES

2.3.1 Manutenção em transformadores

No que concerne às estratégias de manutenção preditiva principais que são empregadas em transformadores de potência, tem-se o Quadro 1, de acordo com o entendimento de Prata (2019), Carrusca (2021), Noronha (2012), Secue (2008), Melo (2008), Hussain (2021), Chavda (2021) e Bittencout (2025).

Quadro 1 – Principais técnicas preditivas aplicadas aos transformadores

PRINCIPAIS TÉCNICAS PREDITIVAS APLICADAS AOS TRANSFORMADORES	
TÉCNICA	DETALHAMENTO
Análise do Óleo isolante	A análise do óleo isolante é de grande importância para a confiabilidade e disponibilidade dos transformadores, uma vez que mediante uma série de avaliações pode-se averiguar as suas propriedades elétricas e grau de contaminação. Com isto, tem-se que as seguintes características podem ser investigadas: rigidez dielétrica, fator de potência, tensão, teor de partículas, e outros mais.

	<p>Além disso, a interação do óleo isolante com os materiais orgânicos e inorgânicos presentes dentro do equipamento, sob influência do calor, geram subprodutos gasosos que podem ser relacionados a falhas específicas, sendo a detecção destes também utilizados para análises de manutenção preditiva.</p>
<p>Análise de resposta em frequência (SFRA)</p>	<p>Técnica não invasiva realizada com a aplicação de um sinal elétrico de baixa tensão, com frequência variável, em um dos terminais de um enrolamento do transformador, para que se obtenha a resposta na outra extremidade. Esta resposta, geralmente obtida como diagrama de Bode, reflete as características elétricas da geometria interna do transformador, como indutâncias, capacitâncias e resistências. Alterações nessas respostas são, essencialmente, provenientes de falhas mecânicas.</p>
<p>Monitoramento da temperatura (Termografia)</p>	<p>É um procedimento de natureza não invasiva, que emprega sensores para a averiguação das condições de temperatura do transformador. Com isto, deve ser realizado com o equipamento em funcionamento, à fim de assegurar a eficácia das imagens térmicas obtidas com os sensores. Sua relevância é ímpar, uma vez que permite identificar, de modo antecipado, diversas falhas potenciais em decorrência do desempenho térmico do equipamento.</p>
<p>Análise de vibração</p>	<p>A análise de vibração é de indispensável relevância para os transformadores, uma vez que avalia, em geral, as condições de integridade dos enrolamentos. Sendo assim, sensores são posicionados nas laterais da cuba, de modo a captar os sinais vibratórios e identificar se o dispositivo está em condições normais de operação.</p>
<p>Descargas parciais</p>	<p>As descargas parciais são estresses elétricos localizados, decorrentes da degradação do sistema de isolamento,</p>

	<p>sólido ou líquido, dos transformadores. Sugerem defeitos como umidade, impurezas ou envelhecimento do material isolante. Podem ser detectadas através de métodos elétricos, eletromagnéticos, acústicos, ópticos e análise de gases dissolvidos. As buchas são um ponto crítico para surgimento de DPs, devido a possibilidade formação de cavidades no material isolante, o que torna o estudo das mesmas essencial para a avaliação da integridade do material isolante.</p>
<p>Análise dos parâmetros elétricos</p>	<p>No que é concernente à análise dos parâmetros elétricos, estes são de suma importância para os transformadores. Sendo assim, tem-se os principais tipos: análise da resistência do isolamento e polarização, fator de dissipação dielétrica, resistência dos enrolamentos, indutância das fugas, correntes de excitação, e outros mais.</p>
<p>Inspeção visual e ultrassônica</p>	<p>A técnica de inspeção visual visa analisar as condições aparentes dos componentes do transformador, de modo a assegurar se estes encontram-se em condições adequadas. Já o ultrassom utiliza um equipamento avançado de monitoramento de imagem, um transdutor, de modo a averiguar, por meio de uma onda mecânica de 20KHz, o estado do objeto investigado.</p>
<p>Monitoramento online de capacitância e fator de dissipação ($\tan \delta$)</p>	<p>A utilização de um sistema de monitoramento online de capacitância e fator de dissipação é útil para a detecção, de forma contínua, do envelhecimento do isolamento de buchas de transformadores e identificação de falhas dielétricas incipientes, como instabilidades térmicas e surgimento de descargas parciais. As técnicas de monitoramento online baseiam-se na extração de informações dos sinais elétricos dos isolantes e comparando-se as variações obtidas com valores de referência.</p>

Resposta em frequência dielétrica	Técnica não invasiva utilizada para avaliação do isolamento dos transformadores de potência, visa estimar o teor de umidade existente no óleo e nos demais isolantes sólidos, como papel. Neste teste, a frequência é de 0,002Hz a 1000Hz, visto que faixas de frequência mais baixas e mais altas fornecem mais informações sobre o conteúdo da umidade existente no material isolante.
-----------------------------------	--

Fonte: Adaptado de Prata (2019), Carrusca (2021), Noronha (2012), Secue (2008), Melo (2008), Hussain (2021), Chavda (2021) e Bittencourt (2025).

2.3.2 Inteligência Artificial e Machine Learning

No âmbito das inovações tecnológicas da conjuntura social e econômica da contemporaneidade, que podem ser utilizadas no cenário da manutenção preditiva, tem-se a Inteligência Artificial (IA), que, de acordo com o entendimento de Carola (2024), refere-se à utilização de dispositivos autômatos, com capacidade de aprendizado, mediante a utilização de modernos sistemas computacionais, para a realização de tarefas diversas, como a análise de dados.

Então, em complemento a esta informação, segundo é destacado por Barbosa (2023), tem-se que as Organizações podem, também, empregar o conceito de aprendizado de máquina, ou, *machine learning*, que consiste em uma vertente da Inteligência Artificial, que se refere a um método que visa a identificação de padrões dentro de um conjunto de dados, e utiliza para previsões em projeções futuras; ou, até mesmo, para outros processos de tomada de decisão que apresentam certo grau de incerteza.

Neste sentido, de acordo com Arantes (2005), a utilização dos recursos tecnológicos em questão encontra uma ampla aplicação no que se refere aos transformadores, principalmente em relação ao monitoramento de dados e facilitação de outros processos que visam contribuir com a confiabilidade do sistema como um todo. Dentre as possibilidades que o autor destaca, técnicas de análise como a avaliação dos gases, a qualidade da energia elétrica, e avaliações do óleo isolante tem sido o objeto de implementação destas tecnologias, no capítulo de Discussão de Resultados serão mostrados exemplos do uso desta técnica na manutenção de transformadores.

2.3.3 Internet das coisas, Big Data e análise de dados

A Internet das Coisas (IOT), segundo é destacado por Maia *et.al* (2022), refere-se à uma conjunção de elementos que compõem uma infraestrutura global, de natureza dinâmica, com recursos de autoconfiguração, mediante a aplicação de protocolos de comunicação e interoperabilidade. Desta forma, com o mínimo de intervenção humana, há um compartilhamento de dados entre o mundo físico e o digital, de modo que se ganhar maior produtividade, eficiência e eficácia nos processos de monitoramento, coleta, tratamento e compartilhamento de informações.

O *Big Data*, de acordo com o entendimento de Land (2022), refere-se a uma terminologia que é empregada para se referir a uma grande quantidade de dados que devem ser analisados e processados, em um intervalo de tempo consideravelmente diminuto, de modo a facilitar o processo de tomada de decisão. Desta forma, segundo é destacado por Renz (2014), esse recurso tecnológico visa a conjunção de parâmetros de volume, variedade e velocidade para o tratamento de informações, de modo a agregar valor às operações interconectadas.

Por conseguinte, Medeiros (2021) destaca que em função da elevada complexidade dos sistemas elétricos da atualidade, e do montante expressivo de dados que são essenciais de se analisar para realizar as análises preditivas, estes recursos tecnológicos se fazem de indispensável relevância para diversas questões, tais como: monitoramento do histórico das máquinas, levantamento de causas de falhas, integração em tempo real, dentre outras possibilidades mais.

Outrossim, é importante ressaltar que, principalmente para concessionárias de energia, que utilizam técnicas de *Machine Learning* e *Deep Learning* para gestão de ativos e de manutenção, a aquisição de dados ainda é o principal desafio para implementação de tecnologias que possibilitem identificação de padrões e possíveis condições de falhas, como demonstrado por Costa (2023). Porém, ainda para o autor, a aquisição de uma quantidade relevante de dados está intrinsecamente associada à exatidão dos modelos que serão utilizados para estudo da previsibilidade das falhas, tornando essencial a existência de uma robusta base de dados.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para a análise de casos que são correlatos à temática proposta, foram escolhidos 3 distintos projetos, abrangendo um espaço temporal entre os anos 2005 e 2022, de modo a haver a construção do conhecimento e o impacto quanto à aplicação das técnicas de manutenção preditiva em transformadores de potência.

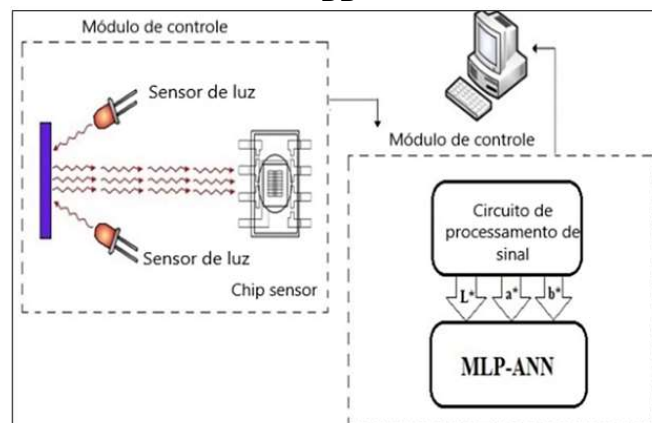
3.1 PRIMEIRO ESTUDO ANALISADO

O primeiro estudo analisado consiste na investigação que foi realizada por Oliveira (2022) e que empregou tecnologia avançada de redes neurais e *machine learning* para análise da temperatura em transformadores de potência.

Neste sentido, primeiramente, o autor realizou, primeiramente, diversas análises de termografia, difração de raios X, e outras mais, à fim de desenvolver microesferas com um revestimento químico que reage de acordo com a temperatura. Estas esferas, então, deveriam agir como elementos de sensoreamento térmico dos transformadores de potência, à fim de realizar a análise preditiva dos dispositivos em questão.

Sendo assim, a transição da coloração associadas às variações de temperatura nos transformadores seria realizada com base nestes sensores por meio da reflectância utilizando-se de um dispositivo de LED com tecnologia (RGB) que seria acionado por uma unidade de microcontrolador (MCU). Os sinais seriam convertidos às redes neurais por meio de coordenadas CIEL*a*b, mediante a elaboração do algoritmo adequado. Sendo assim, tem-se a Figura 12.

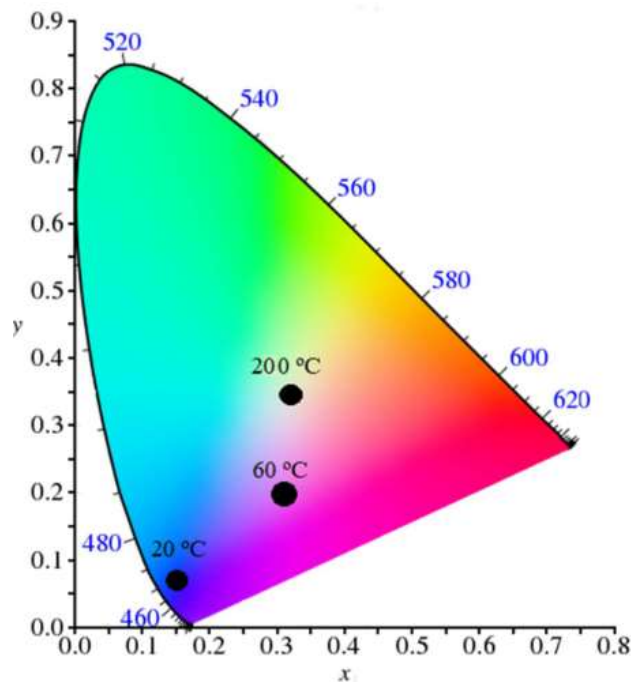
Figura 12 – Circuito elaborado por Oliveira (2022) utilizando o hardware de sensoreamento TCS230-DB



Fonte: Oliveira (2022)

A Figura 12 apresenta o esquema geral do circuito elaborado por Oliveira (2022). Quanto a isso, o autor destaca que se utilizou de um chip de sensoriamento com fotodiodo TCS230-DB, bem como 2 LEDs D65. Ademais, ainda de acordo com o estudo em questão, tem-se a Figura 13.

Figura 13 – Diagrama de cromaticidade CIE com a emissão de cor analisada no estudo de Oliveira (2022)



Fonte: Oliveira (2022)

A Figura 13 demonstra as alterações de cores em função das coordenadas captadas pelo sistema de sensoriamento convertido mediante o algoritmo utilizado. Com isto, pode-se observar que o azul escuro compreende a uma faixa de temperatura equivalente a 20°C, enquanto o rosa já é associado a uma temperatura de 60°C. Sendo assim, Oliveira (2022) destaca que os resultados obtidos com este estudo demonstram que a rede neural utilizada, bem como o sensor e o sistema elaborado, apresentam uma excelente capacidade preditiva de monitoramento da temperatura.

Além disto, no que tange à etapa do treinamento e validação dos dados para a rede que foi elaborada, Oliveira (2022) destaca que a faixa de erro encontra-se em cerca de 4,7% das ocorrências, o que significa que o monitoramento da temperatura do transformador encontra-se com eficácia superior a 95% em relação à rede estabelecida. Além disto, no que tange à comparação efetiva do sensor com a

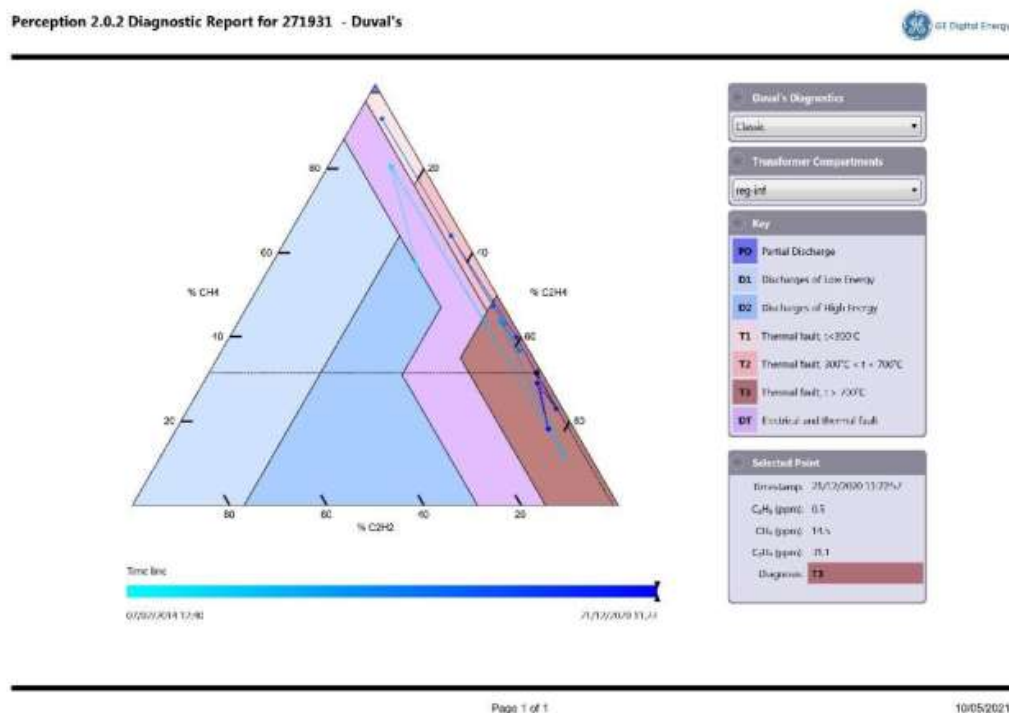
temperatura real de trabalho, Oliveira (2022) destaca que a margem de erro é de pouco mais de 6%, de maneira que a eficiência global do projeto preditivo se encontra acima dos 90%, evidenciando um impacto significativo na capacidade de monitoramento de um transformador.

3.2 SEGUNDO ESTUDO ANALISADO

Por conseguinte, o estudo que foi desenvolvido por Medeiros (2021) visa a análise da Manutenção Preditiva, e suas técnicas, no que consiste ao óleo isolante dos transformadores de potência. Com a necessidade de análise e acompanhamento dos dados, o autor emprega a ferramenta Power BI, *software* desenvolvido pela *Microsoft Corporation* capaz de filtrar, manipular e tratar dados, além de apresentar informações de forma visual. Com o *software* foi possível analisar o perfil histórico, planejamentos realizados, e outros indicadores relevantes para essa questão da MPR aplicada.

Sendo assim, tem-se a Figura 14.

Figura 14 – Software Perception Desktop utilizado para a análise massiva de dados no estudo de Medeiros (2021) quanto ao triângulo de Duval e a análise de gases em transformadores

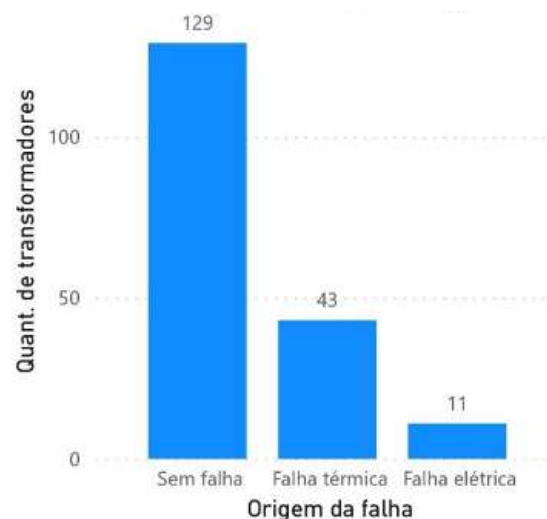


Fonte: Medeiros (2021)

A Figura 14 apresenta a utilização do software Perception Desktop por parte do autor Medeiros (2021), como elemento da análise massiva de dados para a manutenção preditiva em transformadores. De acordo com o autor, em seu estudo, analisou-se mais de 150 transformadores, com todo o seu histórico de monitoramento, o que seria relativamente impossível analiticamente sem o apoio de um recurso tecnológico adequado. Diante disto, ao se empregar o software supramencionado, que conjuga recursos de big data, IoT, e power BI, pode-se obter um resultado adequado em tempo hábil.

Em vista disto, observa-se na Figura 15 os resultados do estudo do autor em questão.

Figura 15 – Resultados da análise de Medeiros (2021) por origem de falha nos transformadores estudados para a técnica DGA



Fonte: Medeiros (2021)

A Figura 15 apresenta os resultados de Medeiros (2021) no que tange à aplicação dos recursos tecnológicos anteriormente destacados. Sendo assim, pode-se observar que foi possível catalogar a quantidade de transformadores e a natureza da falha, de modo a otimizar o processo de acompanhamento do histórico. Isso facilita bastante as técnicas de manutenção a serem utilizadas neste tipo de dispositivo.

Em suma a isso, então, Medeiros (2021) destaca que a utilização das técnicas discriminadas configura-se como uma prática preditiva de bastante importância, possibilitando o monitoramento estratégico dos transformadores. Além disto, considerando-se a possibilidade de predição de falhas em contraste com o

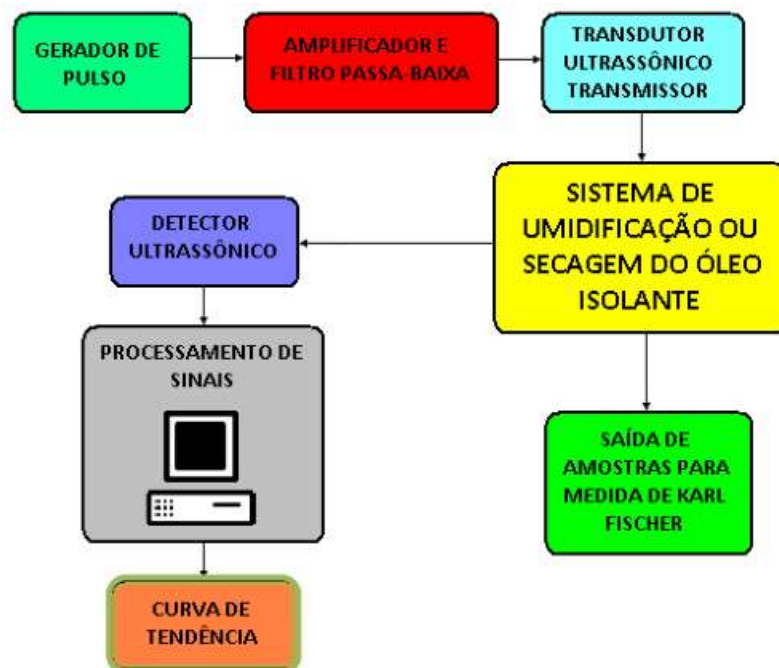
potencial de risco de uma quebra, há uma vantagem significativa no que se refere aos custos de implementação da manutenção preditiva.

3.3 TERCEIRO ESTUDO ANALISADO

O estudo que foi realizado por Noronha (2012) visou a análise preditiva da técnica de ultrassom para avaliação da qualidade do óleo isolante, com maior enfoque, por meio da construção de um protótipo de bancada em laboratório. A finalidade consistia na metodologia para manutenção preditiva, por meio de recursos tecnológicos inovadores.

Sendo assim, pode-se observar na Figura 16 um esquema geral do sistema elaborado pelo autor para a realização do estudo.

Figura 16 – Esquema geral do sistema proposto no estudo de Noronha (2012)



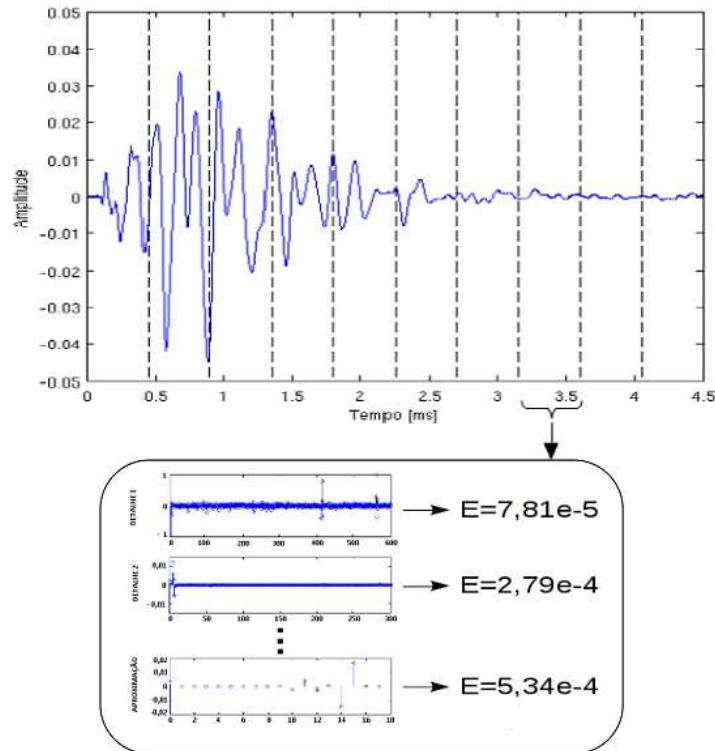
Fonte: Noronha (2012)

A Figura 16 apresenta o sistema que foi elaborado por Noronha (2012) para o experimento da detecção de contaminação do óleo por umidade utilizando a técnica de ultrassom. Sendo assim, o sistema determina que o óleo passe por uma turbulência na frente de um link ultrassônico, que é instalado em uma cubeta de formato cilíndrico. Por conseguinte, tem-se que os transdutores, os transmissores e os receptores são alinhados de modo axial, com ajuste de 50mm de distância.

Ademais, o impulso da onda utilizado por Noronha (2012) foi de 5Vpp, com uma frequência de 150Hz.

Sendo assim, observa-se a Figura 17 com o detalhamento geral do processo do estudo de Noronha (2012).

Figura 17 – Processo do estudo proposto por Noronha (2012)



Fonte: Noronha (2012)

A Figura 17 demonstra a caracterização do estudo que foi realizado por Noronha (2012) no que tange aos sinais percebidos pelo sistema demonstrado na Figura 16. Sendo assim, o autor destaca que os pulsos emitidos são decompostos com base na transformada de Wavelet discreta em nove níveis de detalhes e um de aproximação. Além disto, ocorre a decomposição em dez níveis de intervalo de tempo, de modo que há uma partição do tipo espectro-temporal.

Desta forma, como resultado, o estudo do autor demonstrou que foi possível analisar o perfil de contaminação por umidade presentes no óleo do transformador. Em função disto, o emprego do transdutor e da tecnologia de ultrassom foi sumária para garantir a qualidade da técnica preditiva em questão. Sendo assim, Noronha (2012) reforça o resultado positivo, indicando o impacto da MPR na robustez da conservação de transformadores de potência.

4 CONCLUSÕES

Os Sistemas Elétricos de Potência são de indispensável relevância para o Brasil, uma vez que asseguram a geração, a transmissão e a distribuição da energia elétrica para o consumidor final, na quantidade solicitada e no momento demandado. Desta forma, os transformadores, que se configuram como elementos fundamentais para garantir a qualidade do fornecimento de energia elétrica, são de grande importância de análise em se tratando do aspecto correlato à sua manutenção e conservação. Isso é evidente no que concerne à objetivação de assegurar a sua confiabilidade e disponibilidade.

Diante disto, o presente estudo buscou analisar os impactos da aplicação das técnicas e recursos da Manutenção Preditiva em transformadores de potência, por meio de uma Revisão Bibliográfica. Para isto, discorreu-se sobre as principais características destas máquinas, bem como as principais vantagens da MPR e as técnicas mais utilizadas em TMR. Com isto, pode-se destacar que os objetivos propostos para este estudo foram devidamente alcançados.

Sendo assim, a primeira hipótese que foi formulada para este estudo ditava que a aplicação da manutenção preditiva em transformadores de potência poderia reduzir, de modo significativo, os custos operacionais em comparação com as outras duas tipologias principais. Desta forma, esta hipótese mostrou-se assertiva, uma vez que a MPR atua diretamente na redução de custos, determinação do melhor momento de intervenção, e outros aspectos mais, assim como evidenciado pelo estudo de Gonçalves Júnior, Ribeiro e Franco (2015) que analisa o custo de manutenção como estratégia no ambiente industrial.

Em seguida, a segunda hipótese formulada visava a análise de se a utilização de técnicas de manutenção preditiva poderia aumentar a vida útil dos transformadores de potência. Desta forma, com base nas técnicas que foram evidenciadas, tanto de cunho elétrico, quanto mecânico, físico e químico, bem como em se tratando das principais falhas evidenciadas, pode-se afirmar que esta hipótese se mostra adequadamente assertiva também.

No que é concernente à terceira hipótese, esta visava avaliar se a implementação de um programa de manutenção preditiva poderia reduzir a frequência de falhas e a melhoria da confiabilidade do transformador de potência como um todo. Com isto, considerando-se os recursos tecnológicos e análise da

curva de falha potencial, pode-se afirmar que esta hipótese está correta para o contexto estudado neste documento.

No que se refere à última hipótese elencada, estava ditava que a utilização da inteligência artificial e a internet das coisas na manutenção preditiva de transformadores de potência poderia melhorar a precisão na detecção de falhas em comparação com outras tipologias e métodos. Neste sentido, tem-se que esta hipótese confirma-se, considerando a investigação dos conceitos por detrás de cada um destes parâmetros tecnológicos e sua aplicação na manutenção como um todo, além do caráter de inovação.

Ademais, também foram analisados casos estudados e realizados por outros autores, com um extenso período de abrangência, de modo a determinar o impacto da manutenção preditiva nos transformadores, bem como questões correlatas a avanços tecnológicos. Diante disto, tem-se que a MPR foi de fundamental relevância, permitindo ganhos expressivos em produtividade, eficiência, eficácia e, sobretudo, em confiabilidade e disponibilidade.

Como principais avanços tecnológicos, observou-se uma tendência crescente em ensaios e desenvolvimento de metodologias para facilitação dos processos preditivos, passando pela criação de bancos de dados e softwares mais automatizados, para, por fim, empregar recursos de Inteligência Artificial, aprendizado de máquina e redes neurais. Com isto, ressalta-se a importância do avanço tecnológico para a Manutenção Preditiva eficaz em transformadores de potência.

Ademais, sugere-se para futuras investigações a análise de outras técnicas de investigação avançada no âmbito da manutenção preditiva, como a manufatura aditiva, para a redução de custos em substituição de componentes desgastados; ou, ainda, a robótica para facilitação operacional. Estes estudos poderiam abranger métodos estatísticos para validação, ou, se possível, estudos de caso, tanto em campo quanto em laboratório.

REFERÊNCIAS

- AdNormas. (2022). Acesso em 08 de Abril de 2025, disponível em Os parâmetros normativos obrigatórios das buchas:
<https://revistaadnormas.com.br/2022/09/20/os-parametros-normativos-obrigatorios-das-buchas-para-transformadores>
- Almeida Filho, M. H. (2023). *Tecnologia da Informação na gestão da manutenção*. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica).Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia. Acesso em 16 de Março de 2025, disponível em
<https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/41664>
- Almeida, Í. D. (2021). *Metodologia do trabalho científico*. Recife: UFPE.
- Anschau, E. H. (2020). *Automação do Ensaio de Relação de Transformação em Transformadores de Potência*. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia de Controle e Automação). Blumenau: Universidade Federal de Santa Catarina. Acesso em 16 de março de 2025, disponível em
<https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/204231>
- ANTUNES, H. A. (2020). *Metodologia de acompanhamento e identificação de falha em transformadores (MAIFT): contribuição da identificação da causa raiz aliada à manutenção preditiva*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Itajubá: Universidade Federal de Itajubá. Acesso em 18 de Março de 2025, disponível em
<https://repositorio.unifei.edu.br/jspui/handle/123456789/2216>
- ARANTES, J. G. (2005). *Diagnóstico de falhas em transformadores de potência pela análise de gases dissolvidos em óleo isolante através de redes neurais*. Dissertação (Mestrado em Ciências). Itajubá: Universidade Federal de Itajubá. Acesso em 18 de Março de 2025, disponível em
<https://repositorio.unifei.edu.br/jspui/handle/123456789/2559>
- Araujo, A. P. (2021). *Proposta de aplicação da gestão de manutenção em um laboratório de ensino.: Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Textil)*. Apucarana: Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Acesso em 18 de Março de 2025, disponível em
<https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/31349>
- Barreto, G. K. (2023). *Um Estudo Comparativo sobre a Influência da Temperatura em Transdutores Piezelétricos Aplicados ao Diagnóstico de Falhas em Transformadores por meio de Emissão Acústica*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Bauru: Universidade Estadual Paulista. Acesso em 14 de março de 2025, disponível em <http://hdl.handle.net/11449/244679>
- Barth, N. D. (2020). *Metodologia de Análise Térmica e Hidráulica em Transformadores de Potência*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria. Acesso em 17 de março de 2025, disponível em <http://repositorio.ufsm.br/handle/1/22432>

- Bittencourt, I. R. (2025). *Análise Comparativa do Diagnóstico e Classificação de Falhas em Transformadores por meio de Sensoriamento de Corrente em Altas Frequências, UHF e Piezeletricidade*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Bauru: Universidade Estadual Paulista. Acesso em 15 de março de 2025, disponível em <https://hdl.handle.net/11449/261450>
- Brandão, J. C. (2021). *Gestão da Manutenção*. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Gestão Industrial). Coimbra: Instituto Superior de Engenharia de Coimbra. Acesso em 17 de Março de 2025, disponível em <https://comum.rcaap.pt/handle/10400.26/51861>
- Cardoso, R. M. (2019). *Organização e gestão da manutenção*. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Gestão Industrial). Coimbra: Instituto Politécnico de Coimbra. Acesso em 15 de Março de 2025, disponível em <https://comum.rcaap.pt/handle/10400.26/36457>
- Carola, G. A. (2024). *Aplicações de inteligência artificial em sistemas de controle inteligente*. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia da Computação). Goiânia: Pontífica Universidade Católica de Goiás. Acesso em 18 de Março de 2025, disponível em <https://repositorio.pucgoias.edu.br/jspui/handle/123456789/8367>
- Carraro, R. (2017). *Desenvolvimento De Um "Health Index" Para Transformador De Potência*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria. Acesso em 17 de março de 2025, disponível em <http://repositorio.ufsm.br/handle/1/21409>
- Carrusca, G. M. (2021). *Ensaio de manutenção para transformadores de potência a óleo com tensão superior a 69KV*. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica). Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro. Acesso em 18 de Março de 2025, disponível em <http://www.repositorio.poli.ufrj.br/monografias/projpoli10033954.pdf>
- Castro, B. A. (2020). *Gestão administrativa da manutenção náutica*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Covilhã: Universidade do Minho. Acesso em 18 de Março de 2025, disponível em <https://repositorium.sdum.uminho.pt/handle/1822/74131>
- Chavda, A. et al. **Dielectric frequency response of transformers - field experience**. 2021 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC). **Anais...IEEE**, 2021.
- CNI. (2021). *Cartilha da energia elétrica : entendendo melhor os termos técnicos e conceitos do setor*. Brasília: Confederação Nacional da Indústria.
- Costa, A. M. (2022). *Automação da gestão da manutenção de um sistema industrial*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrotécnica). Coimbra: Instituto Superior de Engenharia de Coimbra. Acesso em 18 de Março de 2025, disponível em <https://comum.rcaap.pt/handle/10400.26/40910>

- Costa, G.; Izumida, M. Machine Learning e Big Data no Setor Elétrico: Guia de conteúdo para docentes. [s.l.] GIZ, 2023.
- Fernandes, J. L. (2020). *Análise SWOT da implementação da filosofia Lean na indústria em Portugal*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica e Gestão Industrial). Porto: Instituto Superior de Engenharia do Porto. Acesso em 13 de Março de 2025, disponível em <http://hdl.handle.net/10400.22/16972>
- Frontim, S. O. (2013). *Equipamentos de alta tensão: Prospecção e Hierarquização de Inovações Tecnológicas*. Brasília: Teixeira.
- Gonçalves Júnior, J. J. (2015). Custo de manutenção de ativos numa óptica operacional e estratégica no ambiente industrial. *XII Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia*. Acesso em 18 de Março de 2025, disponível em <https://www.aedb.br/seget/arquivos/artigos15/23022234.pdf>
- Gonçalves, H. R. (2020). *Gestão da manutenção na Indústria 4.0*. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção). Setúbal: Instituto Politécnico de Setúbal. Acesso em 18 de Março de 2025, disponível em <https://comum.rcaap.pt/handle/10400.26/34667>
- HUSSAIN, M. R.; REFAAT, S. S.; ABU-RUB, H. Overview and partial discharge analysis of power transformers: A literature review. *IEEE access: practical innovations, open solutions*, v. 9, p. 64587–64605, 2021.
- Ivanenko, A. E. (2019). *Análise comparativa da eficiência energética em transformadores monofásicos de baixa Potência*. Trabalho de conclusão do curso (Engenharia Elétrica). Curitiba: Universidade Tecnológica Federal Do Paraná. Acesso em 15 de março de 2025, disponível em <http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/28084>
- Jorge, P. M. (2015). *Estudo sobre o ruído originado pela magnetostricção em transformadores de potência*. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores). Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Acesso em 12 de 03 de 2025, disponível em <https://hdl.handle.net/10216/80446>
- Kardec, A., & Nascif, J. (2009). *Manutenção: função estratégica*. Rio de Janeiro: Qualitymark.
- Land, R. O. (2022). *Big data e suas tecnologias em organizações orientadas por dados: uma revisão sistemática de literatura*. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Produção). Ponta Grossa: Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Acesso em 18 de Março de 2025, disponível em <https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/29807>
- MAIA ET.AL. (2022). Coleta e análise de dados em tempo real das medições de variáveis em transformadores de potência utilizando tecnologia iot. *Revista brasileira de mecatrônica*. Acesso em 18 de Março de 2025, disponível em <https://revistabrmecatronica.sp.senai.br/ojs/index.php/revistabrmecatronica/article/view/156>

- Mamede Filho, J. (2020). *Proteção de sistemas elétricos de potência*. Rio de Janeiro: LTC.
- Marinelli, I. (2022). Acesso em 18 de Março de 2025, disponível em Entenda o que é a curva PF: <https://revistamanutencao.com.br/literatura/tecnica/gestao-de-ativos/entenda-o-que-e-a-curva-pf.html>
- Mauricio, J. A. (2019). *Desenvolvimento de Metodologia e Ferramentas de Avaliação de Transformadores de Potência e Reactâncias Shunt da RNT*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrotécnica). Porto: Instituto Superior de Engenharia do Porto. Acesso em 15 de março de 2025, disponível em <http://hdl.handle.net/10400.22/15022>
- Medeiros, K. D. (2021). *Uma contribuição para gestão de vida útil de transformadores de potência via manutenção preditiva de óleo isolante*. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica). Palmas: Universidade Federal do Tocantins. Acesso em 18 de Março de 2025, disponível em <https://umbu.uft.edu.br/handle/11612/2984>
- Melo, M. A. C.; Alves, M. E. G.; Moura, G. A. Experience with on-line monitoring of capacitance and tangent delta of condensive bushings. 2008 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America. Anais IEEE, 2008.
- Michelon, É. C. (2019). *Gestão da manutenção: análise da criticidade em equipamentos de uma indústria no sudoeste do Paraná*. Monografia de Especialização (Especialista em Engenharia de Produção). Francisco Beltrão: Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Acesso em 18 de Março de 2025, disponível em <https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/20068>
- Mota, J. P. (2017). *Estudo e Caracterização Experimental da Magnetostricção da Chapa Magnética de Transformadores de Potência*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Porto: Instituto Superior de Engenharia do Porto. Acesso em 16 de março de 2025, disponível em <https://hdl.handle.net/10216/80446>
- Nascimento, A. M., & Brandão, J. W. (2016). *Principais Proteções de Transformadores de Potência de 765kV: Análise e Implementação das Principais Funções de Proteção em Transformadores de Alta Tensão*. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Elétrica). São Paulo: Faculdades Metropolitanas Unidas. Acesso em 15 de março de 2025
- NORONHA, I. (2012). *Sistema de avaliação da contaminação, por umidade, de Óleo Isolante de Transformador usando técnicas de Ultrassom*. Tese (Doutado em Ciências e Engenharia Elétrica). Itajubá: Universidade Federal de Itajubá. Acesso em 13 de Março de 2025, disponível em <https://repositorio.unifei.edu.br/jspui/handle/123456789/1162>
- OLIVEIRA, M. L. (2022). *Microesferas termocrômicas potencialmente aplicáveis à manutenção preditiva de transformadores de potência*. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência dos Materiais). Itajubá: Universidade Federal de Itajubá.

Acesso em 16 de Março de 2025, disponível em <https://repositorio.unifei.edu.br/jspui/handle/123456789/3303>

- Pinheiro, M. H. (2015). *Desenvolvimento de modelos numéricos e análise experimental de subestruturas soldadas de transformadores de potência, sujeitas a forças de curto-circuito em regime transitório*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Minho: Universidade do Minho. Acesso em 17 de março de 2025, disponível em <https://hdl.handle.net/1822/39865>
- Potencial. (2015). Acesso em 08 de abril de 2025, disponível em Potencial - eletricidade e manutenção: <https://potencial-rc.com.br/servicos/subestacoes-de-energia-e-comutadores-sobrecarga/>
- Prata, B. C. (2019). *Análise de estratégias de manutenção industrial em transformadores de potência*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores). Coimbra: Universidade de Coimbra. Acesso em 18 de Março de 2025, disponível em <https://search.proquest.com/openview/c43016a316cf46498447266d4ce1e330/1?pq-origsite=gscholar&cbl=2026366&diss=y>
- Renz, F. (2014). *Como big data pode auxiliar as empresas a gerar vantagem competitiva: estudo de caso único em empresa da indústria agrícola*. Monografia de Especialização (Especialista em Administração de Tecnologia da Informação). São Leopoldo: Universidade do Vale do Rio dos Sinos. Acesso em 18 de Março de 2025, disponível em https://repositorio.jesuista.org.br/bitstream/handle/UNISINOS/6708/Felipe+Renz_.pdf?sequence=1
- Ribeiro, J. P. (2020). *Modelos de Ordem Reduzida na Análise Estrutural de Transformadores de Potência*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Acesso em 15 de março de 2025, disponível em <https://hdl.handle.net/10216/128294>
- Ribeiro, M. B. (2019). *Mitigação de ruído em transformadores de potência recorrendo a absorvedores*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do. Acesso em 14 de março de 2025, disponível em <https://hdl.handle.net/10216/122499>
- Ribeiro, V. M. (2016). *Desenvolvimento e Análise de Indicadores de Condição de Transformadores de Potência*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores). Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Acesso em 18 de maro de 2025, disponível em <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/88254/2/139645.pdf>
- Silva, R. S. (2019). *Sistemas elétricos de potência I*. Londrina: Editora e distribuidora educacional S/A.
- SECUE, J. R.; MOMBELLO, E. Sweep frequency response analysis (SFRA) for the assessment of winding displacements and deformation in power

transformers. *Electric power systems research*, v. 78, n. 6, p. 1119–1128, 2008.

Soeiro, M. V., Olivio, A., & Lucato, A. V. (2017). *Gestão da manutenção*. Londrina: Editora e distribuidora educacional S/A.

Teles, J. (2019). *Planejamento e controle da manutenção descomplicado: uma metodologia passo a passo para implantação do PCM*. Brasília: ENGETELES.

Viana, J. P. (2015). *Estudo e caracterização mecânica por via experimental de modelos de subestruturas eletromecânicas aplicadas ao fabrico de transformadores de grande potência*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Minho: Universidade do Minho. Acesso em 15 de março de 2025, disponível em <https://hdl.handle.net/1822/40207>

WEG. (2021). Acesso em 8 de Abril de 2025, disponível em Cergal adquire dois transformadores WEG e proporciona mais confiabilidade em todo seu sistema elétrico:
<https://www.weg.net/institucional/BR/pt/news/produtos-e-solucoes/cergal-adquire-dois-transformadores-weg-e-proporciona-mais-confiabilidade-em-todo-seu-sistema-eletrico>

WEG. (2025). Acesso em 18 de Março de 2025, disponível em Transformador de Distribuição Pequeno (até 300 kVA):
https://www.weg.net/catalog/weg/BR/pt/Gera%C3%A7%C3%A3o%2C-Transmiss%C3%A3o-e-Distribui%C3%A7%C3%A3o/Transformadores-e-Reatores-a-%C3%93leo/Transformadores-de-Distribui%C3%A7%C3%A3o-a-%C3%93leo/30-a-300-kVA/Transformador-de-Distribui%C3%A7%C3%A3o-Pequeno-%28at%C3%A9-300-kVA%29/p/MKT_WTD_SMALL_DISTRIBUTION_TRANSFORMOR

WEG. (2025). Acesso em 18 de Março de 2025, disponível em Transformadores de Potência (até 500 MVA):
https://www.weg.net/catalog/weg/US/pt/Gera%C3%A7%C3%A3o%2C-Transmiss%C3%A3o-e-Distribui%C3%A7%C3%A3o/Transformadores-e-Reatores-a-%C3%93leo/Transformadores-de-Pot%C3%AAncia-a-%C3%93leo/50-A-500-MVA-/Transformadores-de-Pot%C3%AAncia-%28at%C3%A9-500-MVA%29/p/MKT_WTD_MEDIUM_POWER_TRANSFORMER_UP_TO_150000KVA

ANEXO A – PRINCIPAIS FALHAS EM UM TRANSFORMADOR POR COMPONENTE E NATUREZA DA OCORRÊNCIA

Componentes	Natureza da falha	Falha
Enrolamento	Elétrica	Curto-circuito entre espiras Curto-circuito entre cabos Curto-circuito à terra Descargas totais
	Térmica	Sobrecarga Térmica do transformador, falha no sistema de refrigeração, Arco elétrico, centelhamento de baixa energia, descarga parcial, pontos quentes
	Mecânica	Inclinação mecânica de condutor Dobra de condutor Movimento do enrolamento Instabilidade axial Estrutura de aperto frouxa Deformação interna do enrolamento
Núcleo	Elétrica	Laminações de núcleo em curto-circuito Aterramento de vários núcleos Núcleo não aterrado
Bucha	Mecânica	Deformação Mecânica do Núcleo
	Elétrica	Curto-circuito entre as camadas
	Térmica	Sobrecarga da rede, centelhamento de baixa energia, descarga parcial, superaquecimento local do isolante da bucha, pontos quentes.
Comutador	Mecânica	Danos mecânicos à porcelana devido a descarga elétrica, raios, força externa de curto-circuito e rachaduras na parte externa do revestimento da bucha.
	Elétrica	Contatos de circuito aberto elétricos do comutador
	Térmica	Coqueamento térmico de contatos
Isolação	Mecânica	Falhas do mecanismo de acionamento mecânico
	Química	Água em óleo Água em Papel Alta temperatura de óleo e papel Envelhecimento do óleo e do papel devido à decomposição térmica do isolamento do óleo e do papel e contaminação por umidade.
	Elétrica/Mecânica	Bomba Elétrica/Mecânica do Sistema de Arrefecimento Ventilador Radiador
Tanque		Vazamento
Outros	Outras	Erros operacionais Falta de manutenção Falha do sistema de proteção

Fonte: Barreto (2023)

ANEXO B – PRINCIPAIS NORMAS TÉCNICAS APLICADAS A TRANSFORMADORES

Norma/ano	Descrição
NBR 5356-1/2007	Transformadores de Potência - Parte 1: Generalidades
NBR 5356-2/2007	Transformadores de Potência - Parte 2: Aquecimento
NBR 5356-3/2007	Transformadores de Potência - Parte 3: Níveis de isolamento, ensaios dielétricos e espaçamentos externos em ar
NBR 5356-4/2007	Transformadores de Potência - Parte 4: Guia para ensaio de impulso atmosférico e de manobra para transformadores e reatores
NBR 5356-5/2007	Transformadores de Potência - Parte 5: Capacidade de resistir a curto circuitos
NBR 10295/1988	Transformadores de potência secos
NBR 12454/1990	Transformadores de potência de tensões máximas até 36,2 kV e potência de 225 kVA até 3750 kVA
ANSI/IEEE C57.12.00/2006	<i>General requirements for liquid-immersed distribution, power and regulating transformers</i>
IEC 60076/2008	<i>Power transformers</i>
NBR 5416/1997	Aplicação de carga em transformadores de potência - Procedimento
NBR 5458/1986	Transformadores de potência - Terminologia
NBR 7036/1990	Recebimento, instalação e manutenção de transformadores de potência para distribuição, imersos em líquido isolante
NBR 7037/1993	Recebimento, instalação e manutenção de transformadores em óleo isolante
NBR 8153/1983	Guia de aplicação de transformadores de potência
NBR 8926/1985	Guia de aplicação de relés para proteção de transformador
NBR 9368/1986	Transformadores de potência de tensões máximas até 145 kV - Características elétricas e mecânicas
NBR 12455/1990	Indicador, detector e transdutor de temperatura do óleo e do enrolamento para transformadores de potência nominal acima de 500 kVA
NBR 1246/1990	Indicador magnético de nível de óleo, relé detector de nível de gás tipo Buchholz e respirador do conservador de óleo para transformadores de potência nominal acima de 500 kVA
NBR 1247/1990	Dispositivo de alívio de pressão para transformadores de potência acima de 500 kVA
NBR 1248/1990	Válvulas para transformadores de potência acima 500 kVA - Características mecânicas
NBR 13297/1990	Recebimento, instalação e manutenção de transformadores de potência secos
NBR 15633/2008	Ensaio não destrutivo - Emissão acústica - detecção e localização de descargas parciais e anomalias térmicas e mecânicas (DPATM) em transformadores de potência e reatores isolados a óleo

Fonte: Adaptado de Anschau (2020)