

RESSALVA

Atendendo solicitação da autora, o texto completo desta dissertação será disponibilizado somente a partir de 23/04/2022.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Faculdade de Engenharia - Câmpus de Bauru

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

ÍNDICE DE SAÚDE APRIMORADO PARA DIAGNÓSTICO DE TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA

Daniella Gonzalez Tinois da Silva

Bauru – SP

2020

Daniella Gonzalez Tinois da Silva

**ÍNDICE DE SAÚDE APRIMORADO PARA
DIAGNÓSTICO DE TRANSFORMADORES DE
POTÊNCIA**

Tese apresentada ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia de Bauru – UNESP como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Doutorado em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Automação

Orientador: Prof. Dr. Flávio Alessandro Serrão Gonçalves

Prof. Dr. Helmo Kelis Morales Paredes

Bauru - SP

2020

S586i

Silva, Daniella Gonzalez Tinois da

Índice de saúde aprimorado para diagnóstico de transformadores de potência / Daniella Gonzalez Tinois da Silva. -- Bauru, 2020

121 p. : il., tabs.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp),
Faculdade de Engenharia, Bauru

Orientador: Flávio Alessandro Serrão Gonçalves

Coorientador: Helmo Kelis Morales Paredes

1. Transformadores Elétricos. 2. Óleos de transformadores. 3.

Manutenção. 4. Vida útil (Engenharia). I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de Engenharia,
Bauru. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA TESE DE DOUTORADO DE DANIELLA GONZALEZ TINOIS DA SILVA, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.

Aos 23 dias do mês de outubro do ano de 2020, às 14:00 horas, por meio de Videoconferência, realizou-se a defesa de TESE DE DOUTORADO de DANIELLA GONZALEZ TINOIS DA SILVA, intitulada **DESENVOLVIMENTO DE MODELOS PARA ESTIMATIVA DE VIDA ÚTIL DE TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA**. A Comissão Examinadora foi constituída pelos seguintes membros: Prof. Dr. FLÁVIO ALESSANDRO SERRÃO GONÇALVES (Orientador(a) - Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia de Controle e Automação / Instituto de Ciência e Tecnologia - UNESP - Câmpus de Sorocaba, Professor Associado JOÃO ONOFRE PEREIRA PINTO (Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Elétrica / Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS), Prof. Dr. CLAUDIONOR FRANCISCO DO NASCIMENTO (Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Elétrica / Universidade Federal de São Carlos - UFSCar, Prof. Dr. ANTONIO CESAR GERMANO MARTINS (Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Ambiental / Instituto de Ciência e Tecnologia - UNESP - Câmpus de Sorocaba, Prof. Dr. WESLEY ANGELINO DE SOUZA (Participação Virtual) do(a) Pós-doutorado do Departamento de Engenharia de Controle e Automação / Instituto de Ciência e Tecnologia - UNESP - Câmpus de Sorocaba. Após a exposição pela doutoranda e arguição pelos membros da Comissão Examinadora que participaram do ato, de forma presencial e/ou virtual, a discente recebeu o conceito final: APROVADO. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelo(a) Presidente(a) da Comissão Examinadora.

Prof. Dr. FLÁVIO ALESSANDRO SERRÃO GONÇALVES

PROPOSTA DE ALTERAÇÃO DO TÍTULO

A COMISSÃO EXAMINADORA PROPÕE A ALTERAÇÃO DO TÍTULO DO TRABALHO DA ALUNA:
DANIELLA GONZALEZ TINOIS DA SILVA

DE: "DESENVOLVIMENTO DE MODELOS PARA ESTIMATIVA DE VIDA ÚTIL DE
TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA"

PARA:

"ÍNDICE DE SAÚDE APRIMORADO PARA DIAGNÓSTICO DE TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA"

Bauru, 23 de outubro de 2020.

Prof. Dr. Flávio Alessandro Serrão Gonçalves
Orientador

*Para Guilherme e Pedro, por seu amor, incentivo,
apoio e por todas as horas de convívio que foram
privados, mas, que pacientemente esperaram...*

OFEREÇO

*Para Lisete e Mateos, pelo incentivo,
companheirismo, cumplicidade e amor que
me concedem constantemente...*

DEDICO

AGRADECIMENTOS

Todo trabalho científico é, sempre, um trabalho de equipe. Assim sendo, agradeço a todos que, direta ou indiretamente, colaboraram na execução deste trabalho, especialmente...

- À **Deus**, que nos possibilita esses momentos.
- A **todos os meus mestres**, desde aqueles que me ensinaram as primeiras letras até os que, atualmente, orientam minhas atividades. A eles devo a minha formação intelectual e profissional.
- Ao meu orientador e amigo **Flávio Alessandro**, pelas orientações e diretrizes para a realização deste trabalho, mas também pela paciência e amizade.
- Ao Prof. **Fernando Marafão** pelas dicas sempre precisas e preciosas e por estar sempre disponível.
- Ao meu coorientador **Helmo Paredes**.
- Ao meu amor **Guilherme Tinois** pela sua incansável disposição para incentivar o término deste trabalho e por seu amor.
- Ao meu filho **Pedro Tinois** por seu amor, apoio, paciência e por todas as horas de convívio que foi privado para me dedicar a elaboração desta tese.
- À minha irmã **Andressa Gonzalez Mantovani** pelo seu zelo, apoio e torcida, e ao meu cunhado **Thiago Mantovani** pelas “brejas” e piadas necessárias para a vida ser mais leve.
- Aos meus pais **Mateos e Lisete Gonzalez** por todo amor, respeito, carinho, dedicação e torcida de sempre.
- Ao meu amigo **Halley Braga**, pela colaboração e ajuda com os dados, sem as quais esse trabalho não seria possível.

SILVA, DANIELLA GONZALEZ TINOIS DA. ÍNDICE DE SAÚDE APRIMORADO PARA DIAGNÓSTICO DE TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA. 2020. 121p. Tese (doutorado). Faculdade de Engenharia - FEB, UNESP, Bauru, 2020.

RESUMO

O desligamento não planejado de transformadores de potência (TP) resulta em despesas significativas para as operadoras, tornando essencial o uso de técnicas de avaliação capazes de diagnosticar e estimar com eficiência as condições de operação reais de tais equipamentos. O diagnóstico eficiente permite a gestão da operação desta cadeia de ativos visando o equilíbrio ideal entre investimentos, custos de manutenção e desempenho na operação. Neste contexto, este trabalho apresenta uma metodologia de diagnóstico aprimorada para estimar o estado técnico/operacional dos transformadores de potência, comumente chamado de saúde do equipamento, baseada em dados de fácil aquisição e de baixo custo que podem ser obtidos sem a necessidade de interrupção na operação do TP. Especificamente, a metodologia emprega dados provenientes de análises de amostras de óleo, coletadas a partir de dispositivo externo ao equipamento e sem a necessidade de desligamento, e de sistemas de aquisição de grandezas elétricas disponíveis de forma remota, e, propõe a criação de um novo fator diagnóstico para identificar a condição da isolamento sólida do transformador. O novo fator diagnóstico se baseia no histórico da curva média diária de carga do TP, permitindo a estimação e contabilização da degradação da isolamento do TP “em serviço”. Além disso, o novo critério proposto, incorpora características que permitem que sejam incluídos os efeitos das distorções harmônicas na obtenção do índice de saúde. Assim, a metodologia de diagnóstico aprimorada tem a capacidade de estimar e atualizar o estado de saúde dos transformadores, em intervalos de tempo menores que os demandados pelas metodologias de diagnóstico do estado de saúde convencional, que dependem de resultados mais demorados, podendo representar uma ferramenta importante para o planejamento estratégico e otimização de recursos das empresas de energia elétrica. A eficácia da metodologia proposta foi avaliada considerando dados provenientes de uma população de 204 transformadores de potência instalados no Brasil em comparação direta com diagnósticos provenientes da metodologia do índice de saúde convencional, em que o índice de saúde aprimorado proposto se mostrou mais eficaz na observação da degradação do isolante sólido do enrolamento.

PALAVRAS CHAVE: Transformadores de Potência. TP. Índice de Saúde. Isolamento Sólido. Carregamento médio diário. Ferramenta de Diagnóstico. Depreciação da Vida útil.

SILVA, DANIELLA GONZALEZ TINOIS DA. IMPROVED HEALTH INDEX FOR POWER TRANSFORMER DIAGNOSIS. 2020. 121p. Thesis (doctoral). Faculdade de Engenharia - FEB, UNESP, Bauru, 2020.

Abstract

The unplanned shutdown of power transformers (TP) results in significant expenses for utilities, making it essential to use assessment techniques capable of efficiently diagnosing and estimating the actual operating conditions of such equipment. The efficient diagnosis allows the management of the operation of this chain of assets aiming at the ideal balance among investments, maintenance costs and performance in the operation. In this context, this work presents an improved diagnostic methodology to estimate the technical / operational status of the power transformers, commonly called equipment health, based on data of easy acquisition and low cost that can be obtained without the need to interrupt the TP operation. Specifically, the methodology uses data from analysis of oil samples, collected from a device external to the equipment and without the need for shutdown, and from remote electrical acquisition systems, and proposes the creation of a new diagnostic factor to identify the condition of the transformer's solid insulation. The new diagnostic factor is based on the history of the average daily load curve of the PT, allowing the estimation and accounting of the degradation of the PT insulation "in service". In addition, the proposed new criterion incorporates characteristics that allow the effects of harmonic distortions to be included in obtaining the health index. Thus, the improved diagnostic methodology can estimate and update the health status of the transformers, in shorter intervals than those required by the conventional health status diagnostic methodologies, which depend on more time-consuming results, and may represent a tool important for the strategic planning and resource optimization of electric power companies. The effectiveness of the proposed methodology was evaluated considering data from a population of 204 power transformers installed in Brazil in direct comparison with diagnoses from the conventional health index methodology, in which the proposed improved health index was more effective in observing the degradation of the winding solid insulation.

KEYWORDS: Power Transformers. Health Index. Solid Insulation. Average daily load. Diagnostic Tools. Depreciation of Insulation.

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1 - Figura exemplificando funcionamento resumido de um transformador</i>	30
<i>Figura 2 - Transformador ideal alimentando uma carga genérica</i>	31
<i>Figura 3 - Circuito equivalente de um transformador real</i>	32
<i>Figura 4 - Transformador de potência e seus componentes principais</i>	33
<i>Figura 5 - (a) Transformador tipo núcleo envolvido e (b) Transformador tipo núcleo envolvente</i>	36
<i>Figura 6 - Condição teórica da degradação do transformador</i>	44
<i>Figura 7 - Diagrama Térmico Simplificado do Transformador</i>	51
<i>Figura 8 - Fluxograma para o cálculo do perfil de temperaturas</i>	53
<i>Figura 9 - Comparação de limites de gases nas normatizações internacionais</i>	60
<i>Figura 10 - Ligações químicas da glicose (a) e da celulose (b)</i>	63
<i>Figura 11 - Diagrama de funcionamento do indexador de saúde padrão</i>	70
<i>Figura 12 - Pontuação para cada gás dissolvido</i>	71
<i>Figura 13 - Taxa de Falha versus Idade para diferentes tipos de transformadores de acordo com CIGRÉ</i>	77
<i>Figura 14 – Gráfico para ajuste da Idade em Função do Índice de Saúde</i>	79
<i>Figura 15 - Distribuição de idades dos transformadores de potência do parque avaliado</i>	82
<i>Figura 16 - Distribuição de Potências, em MVA, dos transformadores do parque avaliado</i>	83
<i>Figura 17 – Curvas de Carga Médias Diárias (pu)</i>	84
<i>Figura 18 - Diagrama de blocos do Índice de Saúde Aprimorado (ISA), considerando dados de entrada, critérios de pontuação, ponderação e classificação.</i>	87
<i>Figura 19 – Curvas de Temperatura de Hot Spot</i>	88
<i>Figura 20 – Comparação entre os resultados obtidos para IS e ISA</i>	89
<i>Figura 21 - Resultados Gerais de IS versus ISA – índices resultantes na mesma faixa</i>	89
<i>Figura 22 - Resultados Gerais de IS versus ISA – índices resultantes em faixas diferentes</i>	90
<i>Figura 23 - Comparação IS e ISA para os transformadores em que esses índices resultaram diferentes com ISA<IS</i>	91
<i>Figura 24 - Comparação IS e ISA para os transformadores em que esses índices resultaram diferentes com ISA>IS</i>	91
<i>Figura 25 - Resultados para AGD para os transformadores com ISA e IS em faixas diferentes</i>	92
<i>Figura 26- Resultados para FQO para os transformadores com ISA e IS em faixas diferentes</i>	92
<i>Figura 27 - Resultados para HC para os transformadores com ISA e IS em faixas diferentes</i>	93
<i>Figura 28 - Resultados para PV para os transformadores com ISA e IS em faixas diferentes</i>	93
<i>Figura 29 - Carregamentos mensais de todos os transformadores cujas nota para o critério Histórico de Carregamento (HC) resultou menor ou igual a dois</i>	94
<i>Figura 30 - Comparação entre as três metodologias mais simples para obtenção da correção da resistência dos enrolamentos do TP em relação à variação da frequência</i>	106
<i>Figura 31 - Espectros harmônicos aplicados</i>	107

<i>Figura 32 - Formas de onda das correntes distorcidas (pu x ms) aplicadas no TR95 para simulação da aplicação da metodologia do ISA em ambientes onde as formas de onda não são senoidais</i>	<i>108</i>
<i>Figura 33 - Curva de diária de carga média medida no transformador submetido à distorção</i>	<i>108</i>
<i>Figura 34 - Perfis de Temperatura Hot Spot para as Distorções Simuladas</i>	<i>109</i>

LISTA DE TABELAS

<i>Tabela 1 - Constante da taxa de envelhecimento - B</i>	49
<i>Tabela 2 - Equações para os cálculos das elevações de temperatura necessárias para a obter T_{hst}</i>	52
<i>Tabela 3 - Comparativo de expoentes para cálculo de temperatura no transformador.</i>	54
<i>Tabela 4 - Valores de referência da vida normal de isolamento para um sistema bem seco e sem oxigênio para a temperatura de referência de 110 °C</i>	56
<i>Tabela 5 - Gases gerados por faltas elétricas</i>	59
<i>Tabela 6 - Interpretação dos resultados da AGD segundo a NBR 7274/2011</i>	61
<i>Tabela 7 - Normas para ensaios física químicos do óleo</i>	62
<i>Tabela 8 - Efeitos relacionados aos compostos furânicos</i>	65
<i>Tabela 9 - Critério de Pesos e Pontuações do Indexador de Saúde</i>	69
<i>Tabela 10 - Fatores de pontuação e peso para AGD</i>	71
<i>Tabela 11 - Avaliação do transformador baseado no fator AGD</i>	72
<i>Tabela 12 - Pontuação e Pesos do FQO</i>	72
<i>Tabela 13 - Avaliação do transformador baseado no fator FQO</i>	73
<i>Tabela 14 - Categorias que agrupam as medições do histórico de carregamento</i>	73
<i>Tabela 15 - Avaliação dos transformadores baseado no HC</i>	74
<i>Tabela 16 - Avaliação dos transformadores baseado no maior fator de potência</i>	75
<i>Tabela 17 - Tabela de Pontuação de acordo com Análise do Histórico de Manutenção</i>	75
<i>Tabela 18 - Índice de Saúde (IS) e Expectativa de Vida de Transformadores de Potência</i>	76
<i>Tabela 19 - Avaliação dos transformadores baseado no PV</i>	86
<i>Tabela 20 - Pesos e Pontuações para o Índice de Saúde Aprimorado (ISA)</i>	86
<i>Tabela 21 - Índice de Saúde (IS) e ESTADO do transformador</i>	87
<i>Tabela 22 - Equações para obtenção das perdas no cobre o no ferro de transformadores submetidos a tensões e/ou correntes distorcidas</i>	105

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

TP	<i>Transformador de Potência</i>
IS	<i>Índice de Saúde</i>
ISA	<i>Índice de Saúde Aprimorado</i>
FT	<i>Funções de Transmissão</i>
RAP	<i>Revisão Periódica das Receitas</i>
PVP	<i>Parcela Variável Permitida</i>
PV	<i>Perda de Vida</i>
AGD	<i>Análise de Gases Dissolvidos</i>
FQO	<i>Fator de Qualidade de Óleo</i>
HC	<i>Histórico de Carregamento</i>
CDC	<i>Comutador de Derivação em Carga</i>
ONAN	<i>Óleo Natural Ar Natural</i>
ONAF	<i>Óleo Natural Ar Forçado</i>
OFAF	<i>Óleo Forçado Ar Forçado</i>
ODAF	<i>Óleo Direcionado Ar Forçado</i>
ONWN	<i>Óleo Natural Água Natural</i>
ONWF	<i>Óleo Natural Água Forçada</i>
OFWF	<i>Óleo Forçado Água Forçada</i>
ODWF	<i>Óleo Direcionado Água Forçada</i>
H₂	<i>Hidrogênio</i>
CH₄	<i>Metano</i>
C₂H₆	<i>Etano</i>
C₂H₂	<i>Acetileno</i>
C₂H₄	<i>Etileno</i>
CO₂	<i>Dióxido de Carbono</i>
CO	<i>Monóxido de Carbono</i>
CG	<i>Cromatografia Gasosa</i>
CGL	<i>Cromatografia Gás-Líquido</i>
Cu₂S	<i>Sulfeto de Cobre</i>
DBDS	<i>Dibenzildisulfeto</i>
TTA	<i>Tolutriazol</i>
GP	<i>Grau de Polimerização</i>
C₄H₄O	<i>Furano</i>
5H2F	<i>5 hidroximetil-2furfural</i>
2FOL	<i>Álcool furfúrico ou 2-furfurol</i>
2FAL	<i>Furfural ou furfuraldeído ou furaldeído</i>
5M2FAL	<i>5 metil – 2 furfural</i>
2ACF	<i>2 acetilfurano ou 2 furil-metil-cetona ou ácido furóico</i>
ADM	<i>Análise de dados de manutenção</i>
DHT	<i>Distorção Harmônica Total</i>

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	17
1.1 Considerações Iniciais	17
1.2 Estado da Arte	18
1.3 Relevância do Tema	23
1.4 Objetivos do Trabalho	26
1.5 Estrutura do trabalho	27
CAPÍTULO 2 – FATORES QUE INFLUENCIAM NA SAÚDE DE TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA	29
2.1 Considerações Iniciais	29
2.2 Fundamentos e Funcionamento Básico dos Transformadores de Potência	29
2.3 Parte Ativa	34
2.4 Acessórios do transformador	38
2.5 Sistema de Preservação do Óleo Isolante	41
2.6 Sistema de Isolação	41
2.7 Sistema de Refrigeração	43
2.8 Avaliação da Saúde do Equipamento	44
2.9 Considerações Finais	45
CAPÍTULO 3 – MODELOS PARA ESTIMATIVA DE SAÚDE DE TRANSFORMADORES EM POTÊNCIA	47
3.1 Considerações Iniciais	47
3.2 Perda de Vida Versus Temperatura de <i>Hot Spot</i>	47
3.3 Análises Comuns do Óleo Isolante	57
3.4 Análise Furfural	63
3.5 Índice de Saúde	66
3.6 Análise Estatística de Falhas	76
3.7 Análise Combinada (Estatística + Indexação de Saúde)	78
3.8 Considerações Finais	80
CAPÍTULO 4 – PROPOSTA DE NOVA METODOLOGIA PARA DIAGNÓSTICO DE SAÚDE DE TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA CONSIDERANDO A DETERIORAÇÃO DA ISOLAÇÃO	81
4.1 Considerações Iniciais	81
4.2 Parque de Transformadores de Potência Avaliado	81
4.3 Índice de Saúde Aprimorado (ISA)	84

4.4	Avaliação diagnóstica do parque de TPs	87
4.5	Considerações Finais	94
CAPÍTULO 5 – INCLUSÃO DE DISTORÇÃO HARMÔNICA NA NOVA METODOLOGIA DE DIAGNÓSTICO DE SAÚDE DE TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA CONSIDERANDO DETERIORAÇÃO DA ISOLAÇÃO		97
5.1	Considerações Iniciais	97
5.2	Temperatura de <i>Hot Spot</i> considerando a distorção harmônica	97
5.3	ISA considerando a distorção harmônica	106
5.4	Considerações Finais	110
CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES		113
6.1	Discussão e Conclusões	113
6.2	Trabalhos Futuros	115
REFERÊNCIAS		117

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Iniciais

Transformadores são equipamentos fundamentais na gestão do sistema elétrico, pois, além do seu funcionamento normal e sem falhas ser decisivo para manter os sistemas de transmissão de energia funcionando de forma contínua e confiável, representam uma parte significativa dos investimentos realizados na sua implantação. A perda operacional destes equipamentos pode causar impacto relevante para as operadoras do sistema, tanto do ponto de vista de qualidade do serviço prestado, quanto do ponto de vista de elevação de custos [1, 2].

O foco deste trabalho são os transformadores de potência, que serão chamados ao longo do texto, por simplicidade, de TP's, e que são equipamentos destinados a aplicações em altas potências, localizados em grandes subestações de energia elétrica.

O risco da ocorrência de falha nesses equipamentos está inerentemente relacionado à sua condição técnica, que pode ser estimada através de metodologias de diagnósticos que avaliam suas condições de operação [1].

Assim, algoritmos de diagnósticos podem ser empregados para melhorar os critérios de gestão desses ativos. A hipótese básica rege que caso um transformador de potência esteja em serviço e funcionando normalmente, então pode permanecer em serviço. Caso o TP apresente sintomas de defeito, então a sua permanência ou não em serviço depende das respostas de uma série de perguntas. Quanto custa o risco da sua permanência em serviço? O problema pode ser resolvido? A relação de custo e benefício da intervenção justifica o investimento necessário? Desta forma, os algoritmos de diagnósticos devem permitir que sejam realizadas avaliações tanto de maneira preventiva, quanto em necessidade de reabilitação [2, 3, 4].

Neste contexto, uma metodologia de diagnóstico convencionalmente utilizada para avaliar a condição técnica geral e operacional de transformadores de potência ao longo do tempo é a denominada Índice de Saúde (IS). Esse tipo de avaliação é baseada em uma coletânea de testes e ensaios de rotina que possuem complexidades variadas, em que os resultados são representados por meio de uma sistemática de pontuação, e classificados para

estimar o estado geral do transformador de potência [2]. Além disso, os algoritmos de IS podem ser implementados de diferentes formas, empregando desde sistemas especialistas baseados em experiências específicas de empresas locais [4, 5] até sistemas baseados em modelos estatísticos [6, 7] ou ainda algoritmos inteligentes empregando lógica *Fuzzy* e redes neurais artificiais [8, 9].

Desta forma, este trabalho propõe uma metodologia de diagnóstico melhorada para estimar a saúde de transformadores de potência, denominada Índice de Saúde Aprimorado (ISA), considerando a união de duas linhas de desenvolvimento. A primeira linha de desenvolvimento envolve a criação de um novo e inédito critério para diagnosticar a condição da isolação sólida do transformador, que leva em consideração a deterioração em função do carregamento diário e não , como ocorre na metodologia IS convencional. Este novo fator diagnóstico é baseado nas normas internacionais IEEE C57.91/2011 [10] e IEC 60354/1991 [11] e na norma brasileira NBR5356- Parte 7/2016 [12], e permite estimar a degradação da isolação da unidade “em serviço”. A segunda linha de desenvolvimento propõe a diminuição na quantidade de fatores diagnósticos utilizados para a obtenção do Índice de Saúde (IS), utilizando as análises físico-químicas e análises resultantes de cromatografia gasosa do óleo, na forma de dois fatores chamados, respectivamente, Fator de Qualidade do Óleo (FQO) e Análise de Gases Dissolvidos (AGD), e as curvas diárias de carga, em pu, de cada TP. Assim, permitindo que a investigação do estado de saúde do TP possa ser realizada sem a necessidade de desligamento da unidade e com custo minimizado, tornando o processo menos complexo e mais barato. Além disso, minimizando o ciclo de obtenção de estimativas para os índices de saúde e permitindo a atuação na gestão do ativo (TP) de forma mais periódica.

1.2 Estado da Arte

Considerando a importância do TP em sistemas de distribuição de energia elétrica, diversas metodologias de diagnóstico para determinação das condições de saúde de TP foram propostas na literatura visando melhorar a gestão operacional planejada de manutenções e substituições [1-15].

Através da identificação dos mecanismos de falha e degradação possíveis e relevantes em TP, juntamente com suas consequências e implicações práticas, um modelo para obtenção de um IS considerando vinte e dois fatores diagnósticos típicos foi proposto em [2]. Os fatores de diagnóstico estão baseados em análises de óleo (análise de gases dissolvidos e análises físico-químicas), análises de dados de manutenção, resultados de testes elétricos e magnéticos (resistência, reatância, polaridade e fator de potência) e recomendações do IEC e do IEEE quanto aos resultados dessas análises. O algoritmo proposto é de fácil utilização e se baseia em um sistema de pontuação que avalia a saúde do transformador em um intervalo da melhor (100%) para a pior condição (0%), em que 100% representa a condição mais saudável e menos do que 25% representa o mau estado. Além disso, de acordo com a importância de cada fator analisado é atribuído um fator de ponderação, sendo o índice de saúde geral calculado pela soma dos produtos das pontuações e fatores de ponderação de cada fator de diagnóstico. Trata-se de um algoritmo abrangente e flexível que possibilita a modificação dos fatores de diagnóstico e suas ponderações conforme a disponibilidade de dados e as necessidades das empresas, ou a sua adaptação para cenários de diferentes países. No entanto, o algoritmo necessita de um elevado número de fatores diagnósticos e ainda requer a parada do transformador para realizar determinados testes elétricos e magnéticos.

Em [13] foi realizado um estudo em que inicialmente se identificam as falhas predominantes dos componentes do TP por meio de uma análise estatística para, através dos resultados, propor uma abordagem de IS. A análise estatística foi realizada no período entre 2003 e 2013, em que 343 falhas foram registradas nos TPs analisados. Foram analisados transformadores de uma distribuidora de energia local responsável pela geração, transmissão e distribuição de energia elétrica em 32 distritos do estado Tamil Nadu na Índia. A potência dos transformadores estava na faixa de 10 a 315 MVA, e a faixa de tensão era de 33–400 kV. Como resultado foram identificadas as causas de falhas principais e secundárias de cada componente do transformador e, a partir daí foram propostas as entradas mais relevantes para a obtenção do índice de saúde (IS). Através de onze ensaios diferentes, ponderados através de um peso que varia de 1 a 5 de acordo com a importância da falha, o índice de saúde (IS) resultante classifica os transformadores em bom, regular e ruim e sugere ações de manutenção. Para ilustrar a proposta um estudo de caso com sete transformadores de energia foi apresentado e os resultados mostraram que o índice de saúde proposto foi eficiente para

diagnosticar a saúde das unidades. Entretanto, assim como o algoritmo de IS proposto em [2], requer um elevado número de fatores diagnósticos e a necessidade de desligamento da unidade para efetuar boa parte dos ensaios.

Com o objetivo de contornar a exigência do número elevado de fatores de diagnósticos requeridos no algoritmo de IS proposto em [2], um algoritmo para determinar o IS de TP utilizando apenas fatores de diagnóstico baseados em resultados de análises avançadas do óleo de transformador foi proposto em [1]. Especificamente, os fatores de diagnóstico empregados foram análises de gases dissolvidos, acidez, teor de água, fator de dissipação e tensão superficial e análise furfural. O algoritmo proposto foi aplicado para avaliar um grupo de 96 transformadores de potência, de 110 kV, com potências entre 10 e 25 MVA. Demonstrou equivalência com os resultados obtidos por meio do método especialista adotado como padrão, com a vantagem de não requerer para avaliação testes operacionais da parte ativa do TP, além dos testes de óleo. Trata-se de uma metodologia interessante para gestão dos transformadores, especialmente pelo fato de permitir a obtenção do IS sem a necessidade de desligamento das unidades, pois, utiliza somente testes de óleo. Entretanto, não assinala o devido peso para o isolamento sólido do enrolamento na determinação do IS do ativo na medida que não considera o desgaste devido ao fator de carregamento diário.

Devido à aderência com a natureza dos métodos de avaliação, uma grande variedade de algoritmos de IS baseados em lógica difusa foram propostos na literatura. Em especial, [8] e [9] abordam algoritmos que utilizam como fatores de diagnóstico as análises de cromatografia gasosa (análises de gases dissolvidos), as análises físico-químicas (acidez, teor de água, fator de dissipação e tensão superficial) e a análise furfural (2FAL) do óleo isolante do transformador. A análise do teor de furfuraldeído representa um índice de mérito importante que avalia diretamente a saúde do isolamento sólido, sendo maior quanto pior a condição do isolamento. Em ambos os casos, a utilização da lógica *Fuzzy*, por ser baseada em associações e não em limiares como a metodologia tradicional, segundo os proponentes, melhorou a eficiência do método o tornando computacionalmente simples e mais rápido. Os algoritmos destas famílias conservam a vantagem de poder serem aplicados sem a necessidade de desligamento da unidade de transformação. Entretanto, igualmente aos métodos discutidos anteriormente, ainda não contabilizam a degradação do isolamento sólido devido ao carregamento diário (atual) do transformador.

Um outro direcionamento para a avaliação das condições operacionais ou a possibilidade de falha do TP envolve a aplicação direta de métodos de estatística e probabilidade. Em [7] um estudo estatístico foi efetuado considerando uma população de cerca de 200 TPs de 110 kV e 150 kV, com potência nominal entre 15 MVA e 175 MVA e idade média de 29 anos. O comportamento de falha dos transformadores foi analisado de diferentes maneiras utilizando a ferramenta de distribuição de probabilidade contínua conhecida como *Distribuição de Weibull*. As análises foram realizadas em função das idades dos TPs, ajustando os parâmetros do modelo para toda a população de transformadores que falharam ou particularizando os parâmetros em relação a determinados modos de falhas, como, por exemplo, aqueles que tiveram falhas em comutadores. Para todas as populações analisadas, a conclusão foi que é possível estimar o número de falhas esperadas no futuro. Todavia, deve-se sempre considerar a influência da presença de *outliers*, que são valores atípicos que apresentam uma grande divergência dos demais da série, o que não é possível estimar ou conhecer com exatidão. Dessa forma, como qualquer método estatístico, o limitante para a qualidade dos resultados é o tamanho do conjunto de dados disponível para avaliação (amostra). Assim, trata-se de uma modelagem que não demonstra razoável viabilidade de ser generalizada para estimar a condição de saúde na situação “em serviço”.

Em [14], pondera-se que a probabilidade da falha de um transformador de potência é fortemente dependente da sua condição operacional, assim uma visão estatística das falhas com base apenas no envelhecimento físico não parece razoável a ser generalizada para a situação “em serviço” das unidades, bem como uma metodologia com foco somente na avaliação do índice de saúde não fornece um valor de probabilidade de falha necessário para a avaliação de vida e segurança no planejamento centralizado de um transformador de potência. Dessa forma, cada uma das técnicas, individualmente não seria capaz de apresentar resultados suficientes para os operadores classificarem a condição dos transformadores dentro da rede e terem segurança no planejamento de manutenção e substituição. Assim, uma modelagem híbrida que usa uma combinação das duas metodologias (visão estatística e IS) foi proposta em [14]. Basicamente, a proposta emprega um modelo matemático (gráfico) baseado em um banco de dados que relaciona índices de saúde com idades. Uma vez que o valor do índice de saúde de um transformador é calculado por meio das inspeções de campo e testes, o valor da idade ajustada que corresponde ao mesmo é utilizado em vez da idade

cronológica. As idades ajustadas dos TPs são aplicadas em um modelo estatístico de probabilidade de falha para a determinação do valor “real” da probabilidade de falha. Os resultados obtidos demonstraram que a adoção do tempo de serviço como o único fator de determinação de taxa de falha seria inválida para estudos de confiabilidade. Na realidade, a taxa de falha deve ser relacionada com a condição técnica, avaliada através uma coletânea de inspeções e testes realizados rotineiramente pelos proprietários nos TPs ativos. Neste caso, a metodologia híbrida proposta apresenta as mesmas limitações da modelagem puramente estatística, requerendo volume e qualidade de amostras para que o resultado seja confiável. Ainda, para utilização do modelo híbrido resultante, o IS deve ser calculado, recaindo em qualquer um dos casos anteriores.

Experiências específicas também foram utilizadas para a composição de algoritmos de IS, tais como, o sistema especialista canadense descrito em [4]. O sistema emprega uma abordagem multicritérios baseado na modelagem apresentada em [2], porém, a avaliação da condição de saúde dos transformadores é concretizada desconsiderando os dados de manutenção. A justificativa para tal simplificação é que em muitos casos os ativos (TP) que estão em péssimas condições podem ser devolvidos em boas condições pela ocorrência de manutenção, e, que no desenvolvimento de um plano de capital para substituição de ativos, os itens que podem devem ser mantidos em operação. Portanto, podendo ser removidos da formulação do IS. Tal observação é bastante relevante, pois, quanto menor o número de fatores de diagnósticos for utilizado na obtenção do IS, menor o tempo operacional demandado para sua aquisição e menor poderá ser o intervalo para obtenção de uma nova estimativa pelo IS.

Do ponto de vista de regulamentações, as normas nacionais e internacionais [10-12] consideram que a condição operacional do TP e sua consequente probabilidade de falha estão intimamente relacionadas ao efeito do carregamento no aumento da temperatura. O funcionamento do TP é essencialmente influenciado pelas propriedades dos materiais isolantes empregados na sua construção, que devem manter as características dielétricas durante toda a vida útil. No tocante ao envelhecimento do isolante sólido, os guias estabelecem a relação entre o processo de deterioração do isolamento com o tempo e a temperatura a que o transformador está submetido.

Os métodos utilizados para calcular as temperaturas internas dos transformadores em [10, 11, 12], de um modo geral, representam seu comportamento térmico por um modelo de primeira ordem. Tal modelo considera simplificações como, por exemplo, assumir que o perfil de temperatura do óleo dentro do tanque aumenta linearmente desde o fundo até o topo, ou considerar que a diferença entre a temperatura do enrolamento e a temperatura do óleo é constante ao longo do enrolamento. Tais perfis de temperatura, dependem das reais condições de operação do transformador como, fluxo interno do óleo, tipo de ventilação, entre outros fatores como vento e radiação solar, por isso, o modelo térmico apresentado nas normas é relativamente simples e pode ser fonte de erros [15]. Entretanto, é o método mais usado e apresenta resultados confiáveis para transformadores em operação [16].

1.3 Relevância do Tema

O custo médio de TPs depende diretamente da classe de tensão e da potência nominal, porém no Brasil envolvem valores da ordem de alguns milhões de reais (R\$). De acordo com estimativas obtidas por meio de consultas à fabricantes em julho de 2020, as faixas de valores estão entre R\$ 1.950.000,00 e R\$ 3.900.000,00 para potências variando entre 5 MVA e 50 MVA, e tensões variando entre 11,4 kV e 34,5 kV na média e 138 kV ou 230 kV (para as potências maiores, 40 MVA e 50 MVA) na alta.

As empresas concessionárias de subestações transmissão de energia possuem um grande número desses equipamentos instalados. Assim, uma manutenção não programada ou a perda operacional de uma unidade não só comprometem a confiabilidade do sistema elétrico, mas geram custos adicionais que podem alcançar valores tão elevados quanto o custo da unidade.

Os impactos financeiros da sua indisponibilidade variam segundo a importância do equipamento no sistema de energia e seu valor, Existem legislações diferenciadas e específicas para transformadores de transmissão e de geração, com diferenças significativas entre si.

As companhias de transmissão no Brasil são remuneradas pela disponibilidade da capacidade de seus ativos, ou seja, com base na disponibilidade dos equipamentos e linhas de transmissão, chamados de funções de transmissão (FT), independentemente da quantidade

de energia elétrica transmitida. Por outro lado, as companhias também são penalizadas pelas indisponibilidades ocasionadas tanto por manutenções preventivas quanto por falhas eventuais, através da revisão periódica das receitas permitidas (RAPs). A RAP é realizada de forma periódica pela agência reguladora vinculada ao Ministério de Minas e Energia (MME), a Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, com o intuito de induzir a operação eficiente das transmissoras [17, 18].

Os períodos de desligamentos podem ser penalizados de acordo com o intervalo de tempo até a intervenção, contado desde a solicitação, ou de acordo com a duração e frequência dos desligamentos, e variam com o valor do pagamento base da FT. São contabilizados através de uma parcela variável (PVP) deduzida da RAP, e podem variar em 10 vezes entre manutenções programadas ou de urgência [18, 19].

As regras para as concessionárias de geração possuem uma maior flexibilidade, pois, a indisponibilidade dos ativos de geração, podem afetar a energia assegurada e o montante de energia disponível para negociação, submetidos as regras específicas do mercado de energia [18].

Entre os critérios que devem ser observados para uma boa gestão da saúde e da vida útil de um transformador estão o técnico (operacional), o econômico (financeiro) e o estratégico (custo/benefício) [3].

Do ponto de vista operacional, é possível quantificar a condição do transformador através da indexação de saúde. O princípio geral da criação de um índice de saúde envolve uma sistemática de pontuação objetiva e quantitativa aplicada em resultados de observações operacionais, inspeções e testes de campo e laboratório para fornecer um índice de mérito que estima a saúde geral do ativo [2].

Cada um dos fatores de diagnósticos possui um fator de ponderação/peso, a depender de sua importância na possibilidade de o transformador apresentar falha ou não. Assim, de acordo com o resultado da análise realizada para cada um dos fatores diagnósticos utilizados na composição do IS, o critério é classificado em faixas (A, B, C, D ou E) e sua pontuação correspondente (4, 3, 2, 1, 0) é multiplicada pelo seu respectivo peso. Por conseguinte, os resultados são somados e divididos pela soma dos pesos.

Em todos os algoritmos propostos para obtenção do índice de saúde, entre os critérios diagnósticos com pontuações mais relevantes, estão aqueles relacionados à degradação da isolação do transformador: análise de gases dissolvidos (AGD), fator de qualidade do óleo (FQO) e histórico de carregamento (HC).

No comportamento e confiabilidade do transformador a degradação do papel é tão importante que muitas vezes o entendimento de tempo de vida útil do transformador se mistura com o tempo de vida do seu isolamento sólido [10].

Atualmente, nos algoritmos de IS a degradação do isolamento sólido é medida pelo fator HC, que utiliza os registros dos picos mensais de carga para classificar os transformadores fortemente carregados com baixas notas e transformadores com carregamento leve com altas pontuações. Entretanto, este critério não leva em consideração a duração desses picos de carga, apenas sua amplitude. Dessa forma, pode acontecer de um equipamento ser submetido a muitos picos de curta duração no período analisado, mas que não afetem sobremaneira a sua isolação por serem de curtíssima duração.

A AGD fornece informações sobre os gases que são produzidos devido à deterioração do óleo e dos materiais isolantes sólidos do transformador cujas causas podem ser classificadas em três categorias: corona ou descarga parcial, aquecimento térmico e arco. Por exemplo, o gás hidrogênio é produzido devido ao efeito corona sobre óleo e celulose. Ou ainda, o aquecimento térmico de baixa temperatura pode levar à produção de metano e etano, enquanto o aquecimento térmico de alta temperatura é responsável pelas produções de etileno e hidrogênio, além do metano e etano. O acetileno é produzido apenas a altas temperaturas e na presença de um arco. A degradação térmica da celulose produz gás carbônico em baixa temperatura e monóxido de carbono em alta temperatura [2].

Desta forma, a AGD fornece informações indicando se o transformador foi submetido a uma sobrecarga, com uma eficiência maior que o HC considerando que este leva o fator tempo em consideração.

O novo fator diagnóstico proposto no presente trabalho, denominado perda de vida (PV), substitui o fator HC na observação do esforço do isolante sólido do enrolamento. O PV leva em consideração se no dia a dia o transformador está sendo solicitado além da sua capacidade através do seu carregamento médio diário. Permitindo apontar o para o

verdadeiro vilão no caso do isolamento do transformador que é a sua temperatura de funcionamento ao longo do tempo.

Não obstante, muitos dos fatores de diagnósticos utilizados no cálculo do índice de saúde dos algoritmos existentes são de difícil obtenção e até de custo elevado, pois necessitam do desligamento da unidade para serem executados, tais como, os ensaios elétricos e magnéticos como de resistência, reatância, ou de polaridade, por exemplo, entre outros [18, 20]. Dessa forma, a diminuição do número de fatores de diagnósticos e a utilização de um algoritmo em que os fatores empregados possam ser obtidos sem a necessidade de desligamento das unidades transformadoras não só melhora a eficácia da técnica como a torna mais acessível, mais rápida e mais barata.

Neste contexto, justifica-se a investigação das metodologias de indexação de saúde existentes e a proposição de uma nova metodologia de IS aprimorada mais consistente para o diagnóstico eficiente da saúde dos transformadores. Especificamente, propondo uma IS aprimorada baseada em um critério que pondera a degradação do isolamento sólido levando em consideração seu funcionamento diário e não apenas em sobrecargas ocasionais, e que utilize menos fatores na composição do IS. Por conseguinte, permitindo a obtenção de sucessivos diagnósticos de IS em um intervalo menor e com um menor custo.

1.4 Objetivos do Trabalho

Observa-se que a temática da determinação da condição da saúde de transformadores de potência tem vasto histórico de exploração na literatura, abrangendo normas, todavia, devido à sua complexidade constata-se que investigações adicionais são ainda necessárias.

Dessa forma, o presente trabalho, inicialmente discute as metodologias existentes de medição do envelhecimento dos componentes elétricos dos transformadores de potência, com o intuito de buscar embasamento técnico/científico para abordagem de algoritmos de estimação de saúde neste equipamento.

Como objetivo principal, o trabalho propõe a inovação em uma metodologia de índice de saúde, reduzindo o número de fatores de diagnósticos necessários para sua obtenção e propondo um novo e inédito fator diagnóstico para observar a degradação do isolante sólido do enrolamento, chamado de PV.

Os fatores de diagnósticos empregados são apenas os de fácil aquisição, tais como, análise de gases e análises físico-químicas do óleo, que não fazem necessário o desligamento da unidade para serem obtidos e são de baixo custo.

O novo e inédito fator diagnóstico proposto, PV, permite considerar o estado do isolamento sólido através de uma modelagem matemática que considera a curva diária de carga do transformador, tornando assim o índice obtido mais eficiente além de mais barato.

1.5 Estrutura do trabalho

Com a finalidade de atingir os objetivos listados anteriormente, este trabalho apresenta-se organizado em capítulos, como segue.

O CAPÍTULO 2 – FATORES QUE INFLUENCIAM NA SAÚDE DOS TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA apresenta estudos relacionados com os fatores operacionais e de degradação que influenciam diretamente na saúde e na vida útil dos transformadores de potência.

O CAPÍTULO 3 – MODELOS PARA ESTIMATIVA DE SAÚDE EM TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA apresenta e compara uma coletânea de modelos e normas de estimativa de vida útil de transformadores de potência, como são utilizados, quais são as variáveis consideradas e quais as suas vantagens e desvantagens.

O CAPÍTULO 4 – PROPOSTA DE NOVA METODOLOGIA PARA DIAGNÓSTICO DE SAÚDE DE TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA CONSIDERANDO DETERIORAÇÃO DA ISOLAÇÃO discorre a proposta de um novo modelo que possui o intuito de agregar os aspectos vantajosos dos modelos abordados neste trabalho (Capítulo 3). Um estudo de caso considerando o confronto direto com a metodologia padrão IS e uma base de dados relacionada com 204 transformadores de potência é apresentado visando a corroborar o potencial da nova abordagem do modelo proposto.

O CAPÍTULO 5 – INCLUSÃO DE DISTORÇÃO HARMÔNICA NA NOVA METODOLOGIA DE DIAGNÓSTICO DE SAÚDE DE TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA CONSIDERANDO DETERIORAÇÃO DA ISOLAÇÃO apresenta a fundamentação técnica e a metodologia de aprimoramento da nova metodologia de diagnóstico de saúde de TPs proposta para a inclusão da contabilização das distorções harmônicas.

Por fim, o CAPÍTULO V – DISCUSSÕES E CONCLUSÃO tem como objetivo apresentar as principais discussões e conclusões envolvidas nos estudos apresentados nos capítulos que formam o corpo deste trabalho, além de apresentar as sugestões para trabalhos futuros no intuito de colaborar com a melhoria da gestão das unidades transformadoras de potência.

CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES

6.1 Discussão e Conclusões

Este trabalho atingiu o seu objetivo de desenvolver uma inovação na metodologia tradicional de diagnóstico de saúde de transformadores de potência, mediante a integração de técnicas de análise do óleo mineral isolante, com um método de classificação que considera a degradação da isolamento sólida em função do carregamento médio diário aplicado na unidade.

O método foi testado e validado em uma base de dados ampla e sólida e, as principais conclusões obtidas são destacadas neste capítulo. Além disso são apresentadas propostas de continuidade deste trabalho para tornar possível a melhoria, o desenvolvimento e a aplicação de novas metodologias de diagnóstico de saúde de transformadores de potência para que seja possível cada vez mais otimizar a gestão desses ativos.

Destaca-se inicialmente o levantamento bibliográfico realizado nos Capítulos 2 e 3 em que procurou-se analisar e avaliar os fatores que influenciam na saúde dos transformadores de potência e quais os modelos atuais mais efetivos para diagnosticar o seu estado, em consonância com o objetivo proposto.

Mas o desafio foi contribuir com uma metodologia que possa ser aplicada aos transformadores em operação. Para isso, no Capítulo 4 foi apresentada a proposta de uma nova metodologia para diagnóstico de saúde de transformadores de potência, que obtém seu índice de saúde reduzindo a quantidade de fatores diagnósticos utilizados para aqueles que podem ser obtidos sem a necessidade de desligamento da unidade.

Além disso, na proposta de metodologia apresentada no Capítulo 4, introduziu-se um novo fator de diagnóstico para a isolamento sólida do enrolamento, inédito, chamado “perda de vida” (PV), e criado para substituir de forma mais eficiente o atual histórico de carregamento (HC), na composição do algoritmo do índice de saúde aprimorado proposto.

A partir dos resultados, conclui-se que o fator HC não permite fazer uma avaliação precisa das condições do isolamento sólido do transformador, já que leva em consideração os picos de carga mensais, sem considerar seu tempo de duração. Dessa forma, é possível que

um transformador seja submetido a muitos picos de carga e não tenha seu isolamento comprometido, como exemplificado pelo transformador 121, que teve um resultado ótimo para AGD, outro fator que também permite diagnosticar comprometimento da isolação sólida.

O novo fator PV é mais eficaz na observação da degradação do isolante sólido do enrolamento, pois, leva em consideração se, no dia a dia, o transformador está sendo solicitado além da sua capacidade através do seu carregamento médio diário, que permite apontar o para o verdadeiro vilão no caso do isolamento do transformador que é a sua temperatura de funcionamento ao longo do tempo.

Com o fator PV e diminuindo os fatores diagnósticos, os resultados obtidos ISA apresentaram 80 % de concordância comparado com o IS.

Além disso, o PV, sendo um critério baseado no perfil diário de temperaturas, permite que sejam incluídas as distorções harmônicas na obtenção do índice de saúde, tal como apresentado no Capítulo 5.

Os transformadores de potência estão inseridos em uma parte do sistema elétrico onde as distorções nas formas de onda de tensão e/ou corrente ainda não está presente, entretanto, como o aumento das cargas não lineares nas redes de distribuição é crescente, logo esses equipamentos poderão estar mais sujeitos a reflexos desses. Tais distorções, como causam aumento nas potências absorvidas e nas perdas internas, fatalmente causam aumento nas temperaturas de funcionamento.

Para o parque de distribuição analisado, o conjunto de dados de medição de harmônicas e/ou de taxa de distorção não estavam disponíveis. Dessa forma, para aplicação da metodologia e avaliação dos efeitos foram realizadas análises em um dos transformadores do parque, considerando operação fictícia com quatro situações de distorção diferentes, mantendo-se o carregamento.

Como esperado, o aumento da temperatura influenciou diretamente na saúde do ativo, diminuindo o valor do seu índice de saúde sempre que a distorção foi suficiente para elevar a temperatura acima da máxima permitida e, quanto maior a distorção, maior o efeito sobre a temperatura. Entretanto, as limitações estabelecidas pelas normatizações

internacionais, tornam o conteúdo harmônico presente no PAC de transformadores de potência, provavelmente, insuficiente para provocar degradação anormal da isolação.

Nesse ponto, é importante destacar a abrangência deste trabalho foi baseado em um parque com 204 transformadores de potência, com potências entre 3,75 MVA e 40 MVA e idades cronológicas variando entre 2 e 60 anos, que geraram mais de 12000 dados resultantes das análises de óleo, dados de carregamento, ensaios elétricos e magnéticos, dados de manutenção.

Essas informações tornaram possível a confecção e comprovação desta tese, com a criação do novo fator diagnóstico para compor o índice de saúde, mais eficiente que o atual e que permite a inclusão das harmônicas, tanto de tensão quanto de corrente. E ainda com a comprovação de que, a diminuição no número de fatores diagnósticos, para esses sugeridos, que podem ser obtidos sem o desligamento do transformador mantém a eficiência do método.

Portanto, de uma forma geral, conclui-se que os resultados apresentados apontam para o potencial de aplicação do método apresentado neste trabalho como ferramenta para auxiliar na estimativa da saúde de transformadores de potência.

Observando as vantagens apresentadas pelo ISA, tais como: redução de custos, melhora na utilização de mão de obra, otimização no processo de manutenção, possibilidade de redução da manutenção preventiva (pela adequação de carga), aumento na disponibilidade do ativo, melhora nos planos de trabalho e de manutenções planejadas. Entende-se que a metodologia apresentada se enquadra em um modelo de manutenção moderna que não diz respeito apenas ao conserto de equipamentos, mas que gere informações que possibilitem a previsão da falha ou a intervenção antes da falha, e que está sendo chamado de manutenção 4.0, pois, chega junto e utiliza as tecnologias da indústria 4.0.

6.2 Trabalhos Futuros

Para trabalhos futuros, seguem sugestões para inserir ainda mais o ISA na manutenção 4.0.

Entre os modelos apresentados para estimativa de saúde dos transformadores, a análise furfural foi apresentada como metodologia para acompanhamento e avaliação do envelhecimento da isolação. Trata-se de uma análise barata e que não necessita o desligamento da unidade, pois, é obtida a partir de uma cromatografia líquida do óleo. Neste sentido, sugere-se estudos envolvendo a inclusão da análise furfural na composição do ISA para melhorar ainda mais a observação do isolamento sólido.

É possível a realização da AGD online. Dessa forma, uma outra sugestão de trabalhos futuros seria a criação de uma metodologia que avaliasse a saúde do transformador totalmente “em tempo real”, utilizando dados das curvas de carga juntamente com os resultados das AGD obtidos online.

Como o modelo proposto no Capítulo 5 foi simulado considerando formas de onda com espectros harmônicos reais, mas extrapolados para as condições de operação de TP. Sugere-se a realização de um estudo abrangente nesta temática considerando o emprego de dados de distorções harmônicas coletadas em condições reais dos TP para permitir a validação estatística do modelo de forma mais consolidada.

Finalmente, embora a utilização de algoritmos baseados em Redes Neurais Artificiais (RNA) para a obtenção do Índice de Saúde, seja uma ferramenta já utilizada, ainda pode encontrar diversas aplicações em diferentes formulações ou até mesmo utilizando aquisições de dados em tempo real.

REFERÊNCIAS

- [1] P. Bohatyrewicz, J. Płowucha e J. Subocz, "Condition Assessment of Power Transformers Based on Health Index Value," *Applied Sciences*, vol. 9, nº 22, p. 4877, Nov 2019.
- [2] K. Chitnavis e D. N. R. Bhasme, "Review of critical analysis for life estimation of power transformer," *4th International Conference on Power Control & Embedded Systems (ICPCES)*, pp. 1-6, 2017.
- [3] M. A. G. Martins, "Gestão da Vida útil dos Transformadores," *Ciência & Tecnologia dos Materiais*, vol. 21, pp. 2-9, 2009.
- [4] A. Jahromi, R. Piercy, S. Cress, J. Service e W. Fan, "An approach to power transformer asset management using health index," *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 25, pp. 20-34, march-Apr 2009.
- [5] F. Scatiggio, M. Pompili e L. Calacara, "Transformers Fleet Management Through the use of an Advanced Health Index," *IEEE Electrical Insulation Conference (EIC)*, pp. 395-397, 2018.
- [6] E. A. a. O. P. Malik, "Failure rate estimation of power transformers using inspection data," *Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems (PMAPS), Beijing*, pp. 1-4, 2016.
- [7] L. Chmura, P. Morshuis, E. Gulski, e A. Janssen , "Statistical analysis of subcomponent failures in power transformers," *Electrical Insulation Conference*, pp. 216-220, 5-8 june 2011.
- [8] A. E. B. Abu-Elanien, M. M. A. Salama e M. Ibrahim, "Calculation of a Health Index for Oil-Immersed Transformers Rated Under 69 kV Using Fuzzy Logic," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 27, pp. 2029-2036, 2012.
- [9] A. Wadhwa , V. Singh, R. M. Rao e G. Dubey, "HEALTH INDEX CALCULATION OF POWER TRANSFORMER USING FUZZY LOGIC," *International Interdisciplinary Conference on Science Technology Engineering Management Pharmacy and Humanities Held on 22nd*, pp. 336-341, 23 Abri 2017.
- [10] IEEE - INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, *Standard C57.91 - Guide for Loading Mineral Oil Immersed Transformers*, 2011.
- [11] IEC - INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, *IEC Publication 60354 - Loading Guide for Oil-Immersed Power Transformers*, 1991.

- [12] ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *NBR5356 - Parte 7: Guia de carregamento para transformadores imersos em liquido isolante*, 2016.
- [13] R. Murugan e R. Ramasamy, "Understanding the power transformer component failures for health index-based maintenance planning in electric utilities," *Engineering Failure Analysis*, vol. 96, pp. 274-288, 2019.
- [14] E. Abbasi e O. Malik, "Failure rate estimation of power transformers using inspection data," *Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems (PMAPS), Beijing*, pp. 1-4, 2016.
- [15] D. J. Tylavsky, Qing He, G. A. McCulla e J. R. Hunt, "Sources of error in substation distribution transformer dynamic thermal modeling," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 15, nº 1, pp. 178-185, 2000.
- [16] J. A. Jardini, J. L. P. Brittes, L. C. Magrini, M. A. Bini e J. Yasuoka, "Power transformer temperature evaluation for overloading conditions," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 20, nº 1, pp. 179-184, 2005.
- [17] J. F. M. Pessanha, M. A. R. F. d. Mello, M. Barros e R. C. Souza, *Avaliação dos custos operacionais eficientes das empresas de transmissão do setor elétrico Brasileiro: uma proposta de adaptação do modelo dea adotado pela ANEEL*, vol. 30, Rio de Janeiro, 2010, pp. p. 521-545.
- [18] CIGRÉ BRASIL - Grupo de Trabalho A2.05, "Guia de Manutenção para Transformadores de Potência," *Brochuras Técnicas - Cigré*, Novembro 2013.
- [19] ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, "RESOLUÇÃO NORMATIVA Nº 729/2016," 28 Junho 2016. [Online]. Available: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2016729.pdf>. [Acesso em 2020 Setembro 12].
- [20] S. Tenbohlen, S. Coenen, M. Djamali, A. Müller, M. H. Samimi e M. Siegel, "Diagnostic Measurements for Power Transformers," *Energies*, vol. 9, nº 5, p. 347, Maio 2016.
- [21] A. E. Fitzgerald, C. Kingsley Jr e S. D. Umans, *Máquinas elétricas: com introdução a eletrônica de potência*, Porto Alegre: Bookman, 2008.
- [22] J. H. Harlow, *Electric Power Transformer Engineer*, New York: CRC Press, 2004.
- [23] IEEE - INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, *C57.110/1998 - Recommended Pratices for Estabilishing Transformer Capability when Supplying Nonsinusoidal Load Currents*, NY: IEEE, 1998.
- [24] J. McNutt, "Insulation Thermal Life Considerations for Transformer Loading Guides," *IEEE Trans. Power Dellivery*, pp. 392-398, 1 January 1992.

- [25] D. H. Shrof e A. W. Stannett, "A Review of Paper Aging in Power Transformers," *IEEE Proceedings*, pp. 312-319, November 1985.
- [26] V. M. Montsinger, "Loading transformer by temperature," *AIEE transactions*, pp. 776-792, 1930.
- [27] T. W. Dakin, "Electrical Insulation Deterioration Treated as a Chemical Reaction," *AIEE Transactions*, pp. 113-122, 1947.
- [28] A. A. Elmoudi, *Evaluation of Power System Harmonic Effects on Transformers - Hot Spot Calculation and Loss of Life Estimation*, Tese doutorado - Helsinki University of Technology, 2006.
- [29] J. A. Jardini e et al, *Comparação dos Resultados de Perda de Vida em Transformadores Usando curvas Estratificadas de Carga e a Função KVAS*, Nota Técnico do Centro de Excelência em Distribuição de Energia Elétrica, 1995.
- [30] IEEE - INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, *IEEE Std C57.92/1981 - Guide for Loading Mineral-Oil-Immersed Power Transformers Up to and Including 100 MVA with 55 C or 65 C Average Winding Rise*, 1981.
- [31] IEEE - INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, *IEEE Std C57.104/2008 - Guide for the Interpretation of Gases Generated in Oil-immersed Transformers (Revision of IEEE Std C57.104-1991)*, New York, 2009, pp. 1-36.
- [32] IEC - INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, *IEC 60599/2015: Mineral Oil-impregnated Electrical Equipament in Service – Guide to the Interpretation of Dissolved and Free Gases Analysis*, 2015.
- [33] J. Bolhuis, E. Gulski e J. Smit, *Monitoring and diagnostic of transformer solid insulation*, 2 ed., vol. 17, IEEE Transactions on Power Delivery, 2002, pp. 528-536.
- [34] T. Saha, *Review of modern diagnostic techniques for assessing insulation condition in aged transformers*, 5 ed., vol. 10, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2003, pp. 903-917.
- [35] M. Duval, *A review of faults detectable by gas-in-oil analysis in transformers*, 3 ed., vol. 18, M. Duval, "A review of faults detectable by gas-in-oil analysis in transformers," in IEEE Electrical Insulation Magazine, 2002, pp. 8-17.
- [36] M. Duval, *New techniques for dissolved gas-in-oil analysis*, 2 ed., vol. 19, IEEE Electrical Insulation Magazine, 2003, pp. 6-15 .
- [37] ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *NBR 7274: Interpretação da análise dos gases de transformadores em serviço*, Rio de Janeiro, 2012.

- [38] T. C. B. N. Assunção, *Contribuição à Modelagem e Análise do Envelhecimento de Transformadores de Potência*, São João del Rei: Tese - UFMG, 2007.
- [39] W. Lundgaard, W. Hansen, D. Linhjell e T. Painter, *Aging of oil-impregnated paper in power transformers*, 1 ed., vol. 19, IEEE Transactions on Power Delivery, pp. 230-239.
- [40] R. D. Stebbins, . D. S. Myers e A. B. Shkolnik, "Furanic compounds in dielectric liquid samples: review and update of diagnostic interpretation and estimation of insulation ageing," *Proceedings of the 7th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials (Cat. No.03CH37417)*, vol. 3, pp. 921-926, 2003.
- [41] A. P. Marques, *Diagnóstico otimizado de transformadores de potência mediante a integração de técnicas preditivas*, Goiânia: Tese Doutorado - UFG, 2018.
- [42] IEEE - INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, *IEEE C57.106/2006 - IEEE Guide for Acceptance and Maintenance of Insulating Oil in Equipment*, 2006.
- [43] L. Chmura, P. H. F. Morshuis, E. Gulski, J. J. Smit e A. Janssen, "Statistical analysis of subcomponent failures in power transformers," *Electrical Insulation Conference (EIC)*, pp. 216-220, 5 a 8 junho 2011.
- [44] A. C. Delaiba, "Comportamento de transformadores com cargas não lineares: Uma abordagem analítica, experimental e numérica pelo método dos elementos finitos," Tese de Doutorado, Escola Politécnica da USP, São Paulo-SP, 1997.
- [45] A. Delaiba, F. Belchior, J. Camargo e O. Souto, "Desempenho térmico de transformadores: Uma reflexão sobre as metodologias de cálculo das perdas Eddy Current.," em *Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE)*, Campina Grande, PB, 2006.
- [46] D. Gonzalez, "Influência de Correntes Harmônicas na Perda de Vida Útil de Transformadores de Distribuição," Dissertação de Mestrado Dept. Eng. Elétrica, Univ. Est. Paulista - UNESP, Ilha Solteira - SP, 2002.
- [47] W. D. Stevenson, *Elements of Power System Analysis*, McGraw Hill Company, 1962.
- [48] J. Oliveira e Et Al, *Cargas Elétricas Especiais (Apostila)*, UFU, 1986.
- [49] F. Pires, *Uma contribuição ao estudo de harmônicas em Sistemas de Potência (Tese Doutorado)*, Campinas - SP: Unicamp, 1991.
- [50] C. A. Canesin, F. A. S. Gonçalves, L. C. Origa, J. C. Rossi , J. O. P. Pinto, L. Galotto Junior , R. B. Godoy, M. Sciamana e L. C. E. d. Silva, "sistema de Medição e Modelação

de Erros em Medidores de Energia Elétrica Ativa,” *Eletrônica de Potência*, vol. 13, pp. 33-43, 2008.

- [51] IEEE - INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, IEEE 519/1991 Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power, 1991.
- [52] M. S. Hwang, W. M. Grady e Sanders, *Distribution Transformer Winding Losses Due To Nonsinusoidal Currents*, IEEE Transactions on Power Delivery, 1987.