

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

VINICIUS HAMMOUD CARLOS

**FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA GESTÃO DA
MANUTENÇÃO DE TRANSFORMADORES A ÓLEO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CORNÉLIO PROCÓPIO

2018

VINICIUS HAMMOUD CARLOS

**FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA GESTÃO DA
MANUTENÇÃO DE TRANSFORMADORES A ÓLEO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
como requisito parcial para obtenção do grau de
Bacharel em Engenharia Elétrica, da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Esp. Ulisses Pereira Rosa
Borges

CORNÉLIO PROCÓPIO

2018



Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Cornélio Procópio
Departamento Acadêmico de Elétrica
Curso de Engenharia Elétrica



FOLHA DE APROVAÇÃO

Vinicius Hammoud Carlos

Ferramenta Computacional para Gestão da Manutenção de Transformadores a Óleo

Trabalho de conclusão de curso apresentado às 13:30hs do dia 21/11/2018 como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Eletricista no programa de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O candidato foi arguido pela Banca Avaliadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Avaliadora considerou o trabalho aprovado.

Prof(a). Esp. Ulisses Pereira Rosa Borges - Presidente (Orientador)

Prof(a). Dr(a). Márcio Mendonça - (Membro)

Prof(a). Me(a). Marco Antonio Ferreira Finocchio - (Membro)

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus mais do que a qualquer outro. Ele bem sabe o quanto não sou merecedor de tudo aquilo que me deu, por isso devo ser muito grato.

Agradeço ao meu pai Antonio Carlos; minha mãe, Maria Ivanira; e à minha avó, Nair. Se este trabalho pode conter algo de bom, também é graças a vocês.

Agradeço ao meu orientador, o Prof. Esp. Ulisses Pereira Rosa Borges pela dedicação e paciência.

RESUMO

CARLOS, Vinicius H. **Ferramenta Computacional para Gestão da Manutenção de Transformadores a Óleo**. 2018. 69 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Engenharia Elétrica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2018.

Este trabalho mostra a criação de um programa em linguagem Java para a gestão dos processos de manutenção em transformadores a óleo, onde a partir da inserção dos dados de ensaios de manutenção realizados, é possível conhecer as condições do transformador analisado de maneira simples e rápida. A criação da ferramenta computacional considera ensaios de ruído, inspeção visual, ensaios físico-químicos, ensaios cromatográficos, ensaios de resistência de isolamento, ensaio de medição de relação de transformação, ensaio de fator de potência das buchas, e medições da temperatura dos enrolamentos e do óleo. Ainda, é possível com esta ferramenta computacional traçar um cronograma de manutenção em períodos inferiores a seis meses, semestrais, anuais e quinquenais. O programa cuida de armazenar todos os dados de manutenção realizados em um banco de dados. Neste trabalho, a eficiência do programa de gestão é testada utilizando dados de relatórios de manutenção de transformadores a óleo, comparando os resultados obtidos no uso do programa com o resultado encontrado nestes relatórios de manutenção.

Palavras-chave: Transformador. Manutenção. Java.

ABSTRACT

CARLOS, Vinicius H. **Computational Tool for Oil Transformers Maintenance Management**. 2018. 69 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Engenharia de Software. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procopio, 2018.

This work shows the creation of a program on Java language for the management of the maintenance processes of oil transformers, where from the insertion of done maintenance tests' data, it is possible to know the conditions of the analyzed transformer simply and quickly. The creation of the computational tool considers noise tests, visual inspection, physico-chemical tests, chromatographic tests, insulation resistance tests, transformation ratio measurement test, bushing power factor test, temperature measurements of the winding and temperature measurements of the oil. Still, it is possible with this computational tool to draw up a maintenance schedule in periods of less than six months, semiannual, annual and five-year periods. The program takes care of storing all maintenance data carried out in a database. In this work, the efficiency of the management program is tested using data from maintenance reports of oil transformers, comparing the results obtained in the use of the program with the result found in these maintenance reports.

Keywords: Transformer. Maintenance. Java.

LISTA DE SÍMBOLOS

e_1	Tensão induzida no primário
v_1	Tensão sobre o primário do transformador
B	Campo Magnético
φ	Fluxo magnético
λ	Fluxo magnético concatenado
t	Tempo
E	Campo elétrico
N_1	Número de espiras no primário
v_2	Tensão sobre o secundário do transformador
e_2	Tensão induzida no secundário
N_2	Número de espiras no secundário
i_1	Corrente no enrolamento do primário
i_2	Corrente no enrolamento do secundário
I_a	Índice de absorção
I_p	Índice de polarização
R_{60s}	Resistência de isolamento medida a 60 segundos do teste
R_{30s}	Resistência de isolamento medida a 30 segundos do teste
R_{10min}	Resistência de isolamento medida a 10 minutos do teste
R_{1min}	Resistência de isolamento medida a 60 segundos do teste
R_{75}	Resistência de isolamento equivalente para 75°C
R_t	Resistência de isolamento medida a qualquer temperatura “t”
R_m	Resistência de isolamento mínima a 75°C em Megaohms
E_v	Classe de tensão em kV
P	Potência por enrolamento do transformador em kVA
f	Frequência em Hz
K_{med}	Relação de transformação medida
v_{1med}	Tensão medida no primário
v_{2med}	Tensão medida no secundário
$FP\%$	Fator de potência em porcentagem
P_{at}	Potência ativa
S	Potência aparente
FP_{ref}	Fator de potência de bucha nova
FP_{med}	Fator de potência medido

%Anorm Porcentagem de anormalidade

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	10
1.1	Justificativa.....	10
1.2	Objetivos.....	12
1.2.1	Objetivo geral.....	12
1.2.2	Objetivos específicos.....	12
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	14
2.1	Transformadores.....	14
2.1.1	Princípios de funcionamento.....	14
2.1.2	Aspectos construtivos.....	17
2.2	Manutenção em transformadores.....	19
2.3	Óleo mineral isolante.....	20
2.3.1	Influência da umidade nas características do óleo.....	21
2.3.2	Influência dos gases dissolvidos no óleo.....	22
3	INSPEÇÕES EM TRANSFORMADORES COM PERIODICIDADE INFERIOR A SEIS MESES.....	23
3.1	Inspeção visual em transformadores a óleo.....	23
3.2	Ruído.....	23
3.3	Vazamento de óleo.....	25
3.4	Pintura do transformador.....	25
3.5	Temperatura do óleo.....	25
4	TESTES SEMESTRAIS EM TRANSFORMADORES.....	28
4.1	Ensaio físico-químicos.....	28
4.1.1	Rigidez dielétrica.....	28
4.1.2	Fator de potência do óleo isolante.....	29
4.1.3	Exame visual e de cores.....	30
4.1.4	Índice de neutralização.....	31
4.1.5	Tensão interfacial.....	32
4.1.6	Teor de umidade no óleo.....	32
4.2	Ensaio Cromatográfico.....	33
4.2.1	Interpretação dos resultados.....	33
5	TESTES ANUAIS E QUINQUENAIS EM TRANSFORMADORES.....	36
5.1	Testes anuais em transformadores.....	36
5.1.1	Temperatura dos enrolamentos.....	36

5.2	Testes quinquenais em transformadores.....	36
5.2.1	Resistência de isolamento.....	37
5.2.2	Relação de transformação.....	42
5.2.3	Fator de potência das buchas.....	43
6	PROGRAMAÇÃO E A LINGUAGEM JAVA.....	46
6.1	O banco de dados e a linguagem SQL.....	47
6.2	Estrutura do banco de dados.....	47
6.3	Conexão com o banco de dados.....	48
6.4	Modelagem de variáveis no IDE NetBeans 8.2.....	49
6.5	Pacotes “dao” e “email”.....	49
6.5.1	Pacote “dao”.....	49
6.5.2	Pacote “email”.....	50
6.6	Criação de gráficos.....	51
6.7	A classe “telaPrincipal”.....	51
6.8	Funcionalidades.....	51
6.8.1	Funcionalidades do programa para procedimentos de manutenção com período inferior a seis meses.....	52
6.8.2	Funcionalidades do programa para procedimentos de manutenção semestrais.....	53
6.8.3	Funcionalidades do programa para procedimento de manutenção anual.....	53
6.8.4	Funcionalidades do programa para procedimentos de manutenção quinquenais.....	54
7	RESULTADOS OBTIDOS.....	55
7.1	Relatórios analisados.....	55
7.2	Teste de dados de relatórios no programa.....	56
7.2.1	Teste de dados de ensaios físico-químicos.....	56
7.2.2	Teste de dados de ensaios de resistência de isolamento.....	57
8	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	59
	REFERÊNCIAS.....	60
	APÊNDICE A – Conexão com banco de dados.....	62
	APÊNDICE B – Modelagem das variáveis da “tabela arquivo”.....	64
	APÊNDICE C – Adição de dados na “tabela arquivo” do banco de dados.....	66
	ANEXO A – Relatório de análises físico-químicas do óleo de transformadores.....	67
	ANEXO B – Relatório de ensaios de medição da resistência de isolamento de transformadores.....	68

1 INTRODUÇÃO

Os transformadores são dispositivos fundamentais no abastecimento de energia no Brasil. No setor empresarial e industrial são de tal modo importantes que falhas nestes dispositivos podem paralisar todo sistema produtivo e gerencial, com prejuízos a perder de vista.

No entanto, o segmento de manutenção em transformadores ainda é um tanto quanto menosprezado, seja no campo da engenharia ou no setor produtivo. Neste último, por vezes, há pouco interesse em se estabelecer um correto programa de manutenção em transformadores, ainda que estes tenham elevada importância no sistema produtivo e um alto custo.

As consequências do desleixo de engenheiros e empresas para com a manutenção de seus equipamentos são perdas produtivas, a avaria dos transformadores e acidentes de trabalho. Tudo isso poderia ser evitado com uma séria, porém simples gestão da manutenção dos transformadores.

A proposta deste trabalho lida com essa carência, e propõe a criação de um programa em linguagem Java, que receba dados básicos de ensaios e testes relativos à manutenção de transformadores, e que retorne o diagnóstico dos problemas encontrados junto a instruções de como o usuário deve proceder para com a manutenção.

A programação abordará os ensaios físico-químicos específicos, ensaios cromatográficos, ensaios de resistência de isolamento, ensaios de relação de transformação, ensaios de fator de potência em buchas, ensaios de nível de ruído, a inspeção visual, e finalmente, a medição de temperaturas dos enrolamentos e do óleo do transformador.

1.1 Justificativa

Sabe-se que os transformadores são equipamentos de extrema importância na interligação de sistemas elétricos de potência, da geração ao consumidor final, já que os transformadores fazem a adequação de tensão elétrica necessária a cada segmento, seja diminuindo a tensão elétrica de

entrada para seus terminais de saída ou fazendo o processo inverso, onde a tensão elétrica sofre uma elevação na sua saída com relação a sua entrada.

Logo, se vê que os transformadores não são dispositivos descartáveis ou opcionais ao sistema elétrico. O mesmo vale para os transformadores adotados nas empresas, onde sendo equipamentos totalmente necessários à sua parte elétrica deveriam ser cuidados e preservados por motivos econômicos, ambientais e de saúde.

A importância do emprego de uma correta sistematização da manutenção de transformadores nas empresas dá-se na medida em que eles representam um elevado investimento no que diz respeito às suas subestações, representando o equipamento de maior valor pecuniário dessas.

Além disso, um transformador, muitas vezes, não pode ser facilmente substituído em caso de falha, já que, dotado de características próprias e específicas de sua função, o mercado não consegue supri-lo em pronta entrega.

Outro fator que demonstra o prejuízo decorrente das falhas em transformadores, é a sua dificuldade para o transporte, sendo que em várias situações é necessário desmontá-lo para o envio a subestação, e posteriormente remontá-lo para a operação, com o risco de que o transformador sofra danos ainda maiores no processo.

Fora os motivos de ordem econômica, falhas de grande porte, ditas catastróficas, podem resultar em explosões e incêndios que colocam a vida humana em risco. Os vazamentos de óleo mineral isolante são considerados problemas de ordem ambiental resultando na contaminação de solos e lençóis freáticos (PENA, 2003).

Deve-se lembrar que o transformador é um equipamento utilizado no ajuste dos níveis de tensão elétrica recebidos da distribuição, e sem ele, portanto, é praticamente impossível que uma empresa mantenha sua rotina normal quanto ao uso de sua parte elétrica, o que pode levar a enormes prejuízos decorrentes do atraso de suas atividades.

Tudo isso aponta para a necessidade de prevenção de problemas e falhas com transformadores, o que envolve uma manutenção periódica e segura. Para tanto, o desenvolvimento de um *software* simples que possa

ajudar na gestão da manutenção de transformadores seria de muito bom proveito.

Com o uso desta ferramenta, as empresas proprietárias de transformadores poderiam ser responsáveis diretas pelos próprios testes e ensaios mais simples de manutenção, bem como, poderiam diagnosticar os problemas, interpretar os resultados e reagir de maneira adequada. Isso levaria a economia na área de manutenção, de forma que muitos dos testes requeridos à manutenção poderiam ser feitos e interpretados dentro da empresa proprietária dos transformadores.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Fazer um programa em linguagem Java para o gerenciamento dos ciclos de manutenção de transformadores a óleo que aborde ensaios físico-químicos específicos, ensaios cromatográficos, ensaios de resistência de isolamento, ensaios de relação de transformação, ensaios de fator de potência em buchas, ensaios de nível de ruído, a inspeção visual, e a medição de temperaturas dos enrolamentos e do óleo do transformador. Posteriormente, testar o *software*, analisando as condições dos transformadores a partir de dados coletados em empresas relativas, ao menos, a ensaios físico-químicos e ensaios de resistência de isolamento.

1.2.2 Objetivos específicos

Para se alcançar o objetivo geral deve-se cumprir alguns objetivos específicos, a saber:

1. Coletar e analisar dados de ensaios físico-químicos do óleo mineral de transformadores feitos por laboratórios e empresas especializados;

2. Coletar e analisar as medidas de resistência de isolamento de transformadores feitas por empresas especializadas em manutenção ou por departamentos específicos dentro das empresas onde os transformadores operam;

3. Programar em linguagem Java uma ferramenta capaz de receber os dados de ensaios físico-químicos, ensaios cromatográficos, ensaios de resistência de isolamento, ensaios de relação de transformação, ensaios de fator de potência em buchas, ensaios de nível de ruído, da inspeção visual, e da medição de temperaturas dos enrolamentos e do óleo de um transformador a óleo, e de retornar o diagnóstico e as instruções com respeito a sua manutenção quando viável;

4. Testar os dados, ao menos, dos ensaios físico-químicos e de resistência de isolamento no programa feito em linguagem Java e coletar os resultados e diagnósticos obtidos, comparando-os com os emitidos nos relatórios coletados junto às empresas, concluindo pela efetividade ou não do *software* desenvolvido.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Transformadores

Um transformador de potência é um dispositivo importantíssimo na transmissão e distribuição de energia em sistemas de tensão elétrica alternada. Ele trabalha adequando a tensão elétrica em cada situação, da geração ao consumidor final.

2.1.1 Princípios de funcionamento

A principal função de um transformador de potência é a alteração de um nível de tensão qualquer para um outro nível, mais elevado ou mais baixo, que sirva a uma determinada aplicação adequadamente.

Como afirma Fitzgerald (2006, p. 69):

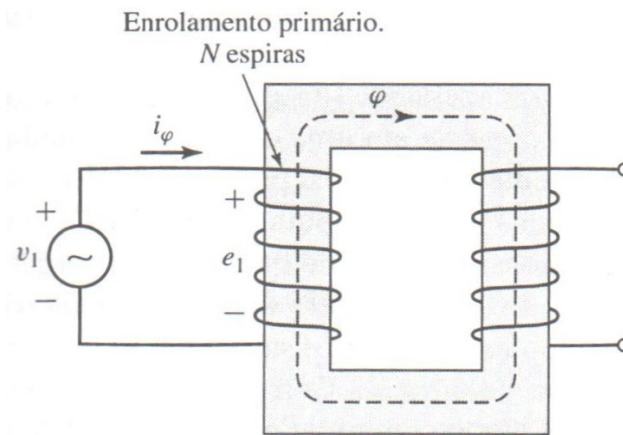
Como componente significativo de um sistema CA de potência, possibilita a geração elétrica e a transferência da energia nas tensões mais econômicas, além de permitir a utilização da energia na tensão mais adequada para um dado dispositivo em particular.

Seu funcionamento é baseado em dois ou mais circuitos elétricos interconectados em um circuito magnético pelo uso de bobinas que compartilham um fluxo magnético. Essas bobinas geralmente são enroladas em um núcleo de ferro ou de material ferromagnético de modo a tornar o acoplamento entre os enrolamentos mais eficaz, já que esses núcleos, por terem alta permeabilidade magnética, podem conduzir melhor o fluxo magnético em seu interior, o que se mostrará de grande valia ao processo.

De início, considera-se um transformador simples de dois enrolamentos com um circuito de entrada, onde existe a bobina do primário com N_1 espiras e uma tensão v_1 sobre ela. Deve-se lembrar que a principal tarefa de um transformador de potência é alterar o nível de tensão elétrica da entrada, aumentando ou diminuindo a mesma na saída. Para tanto, tem-se outra bobina

com N_2 espiras, enrolada ao núcleo, ligando o circuito magnético ao circuito elétrico da saída. É a bobina do secundário, como mostrado na Figura 1.

Figura 1 – Transformador com secundário em aberto



Fonte: Fitzgerald (2006).

Todo o funcionamento do transformador baseia-se na Lei de Faraday, que afirma, segundo Fitzgerald (2006, p. 28) que: "quando um campo magnético varia no tempo, produz-se um campo elétrico no espaço [...]", conforme a Equação (1).

$$\oint_C \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s} = -\frac{d}{dt} \int_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{a} \quad (1)$$

A Equação (1) mostra que a integral de linha do campo elétrico E em um dado contorno fechado corresponde ao negativo da derivada da variação do fluxo que concatena este contorno. No caso dos transformadores, a equação (1) pode ser simplificada, considerando que uma bobina possui N espiras concatenadas com um fluxo magnético ϕ . Disso segue a Equação (2).

$$e = N \frac{d\phi}{dt} = \frac{d\lambda}{dt} \quad (2)$$

Assim, nos transformadores, a corrente no primário produz um fluxo magnético variante no tempo que concatena eficientemente a bobina do secundário, resultando na formação de uma tensão elétrica atuante no circuito do secundário. Quando o circuito do secundário está em aberto, a condição do

transformador é dita sem carga e a corrente no primário é chamada de corrente de excitação i_ϕ .

Ao se considerar um transformador com esquema semelhante ao da Figura 1, diz-se que o mesmo é ideal quando se despreza as resistências dos enrolamentos; considera-se que todo o fluxo magnético fica confinado no núcleo; quando não há perdas no núcleo; e quando a permeabilidade do núcleo é considerada muito alta. Na prática pode-se notar que as considerações a respeito do transformador ideal se aproximam do real.

Em um transformador ideal, quando uma tensão alternada v_1 é aplicada no primário, tem-se um fluxo magnético ϕ no núcleo de modo que uma força contra-eletromotriz e_1 se iguale a v_1 , conforme mostra a Equação (3).

$$v_1 = e_1 = N_1 \frac{d\phi}{dt} \quad (3)$$

Do ponto de vista do secundário, quando o fluxo magnético confinado no núcleo concatena a bobina do secundário, induz-se uma força eletromotriz e_2 que se iguala a tensão v_2 no circuito da mesma, conforme mostra a Equação (4).

$$v_2 = e_2 = N_2 \frac{d\phi}{dt} \quad (4)$$

Das Equações (3) e (4) vêm a ideia de que um transformador manipula as tensões de acordo com a relação de espiras do secundário e do primário, conforme a Equação (5) que consiste na razão entre as Equações (3) e (4).

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (5)$$

Quando se conecta uma carga ao secundário, tem-se uma corrente i_1 no primário e uma corrente i_2 no secundário. A chamada força magnetomotriz (FMM) é produzida pela circulação de correntes elétricas em bobinas e podem ser quantificadas pelo produto entre a corrente elétrica atuante na bobina pelo

número de espiras da mesma. No entanto, sabe-se que a força magnetomotriz líquida no núcleo deve-se manter desprezível, e logo, a soma das forças eletromotrizes atuantes no primário e no secundário se compensam e se anulam, o que é mostrado nas Equações (6) e (7).

$$N_1 \cdot i_1 - N_2 \cdot i_2 = 0 \quad (6)$$

$$N_1 \cdot i_1 = N_2 \cdot i_2 \quad (7)$$

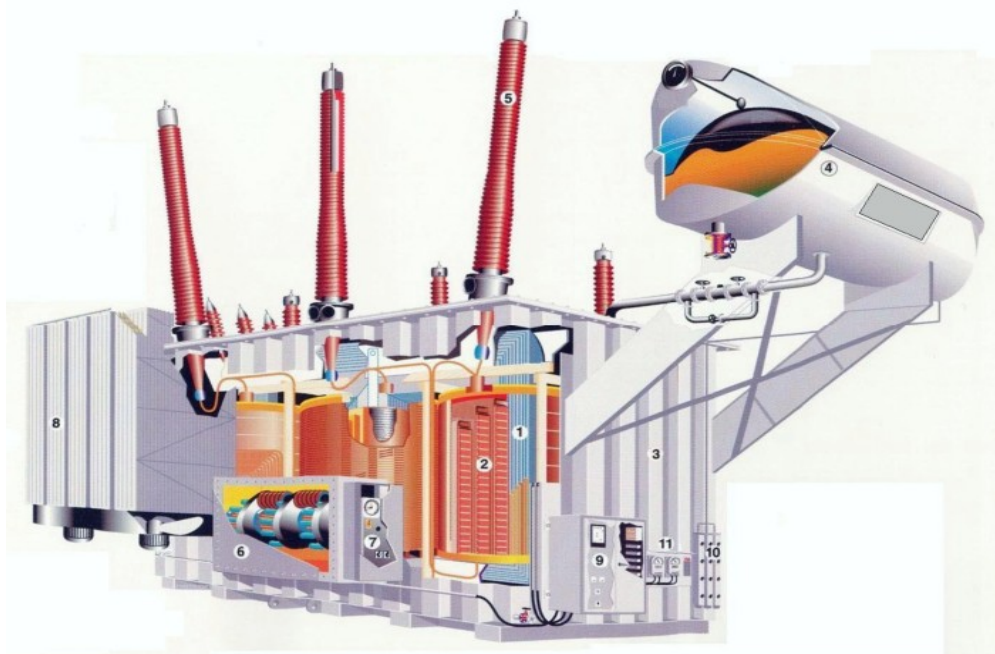
No transformador ideal cabe também a consideração da conservação de potência, de modo que a potência que entra no transformador é a mesma que sai dele, o que pode ser visto na Equação (8).

$$v_1 \cdot i_1 = v_2 \cdot i_2 \quad (8)$$

2.1.2 Aspectos Construtivos

Um transformador a óleo de potência comum possui cerca de onze partes principais, conforme mostra a Figura 2 (BECHARA, 2010).

Figura 2 – Aspectos construtivos de um transformador de potência à óleo



Fonte: Bechara (2010).

O núcleo (1) é constituído de material ferromagnético, com baixa relutância, de modo a poder confinar em seu interior todo o fluxo magnético. Os núcleos geralmente são feitos de um material ferromagnético laminado, onde placas são sobrepostas e isoladas umas das outras com o objetivo de diminuir o aquecimento e as perdas energéticas causadas por correntes parasitas ou correntes de Foucault.

As bobinas (2) são enrolamentos cilíndricos enrolados no núcleo. A relação entre o número de espiras do primário e do secundário fornece a relação de transformação do transformador, que pode ser alterada utilizando *taps*, que são conexões intermediárias; ou ainda, com chaves comutadoras.

O tanque principal (3) abriga as bobinas e o núcleo imersos em óleo, que possui tanto função isolante como função de dissipador do calor resultante das perdas nas bobinas e no núcleo. O tanque de expansão de óleo (4) permite a expansão do óleo quando este é aquecido e sofre um aumento de seu volume original.

As buchas (5) do transformador são feitas de porcelana e têm a função de isolante dos terminais do transformador. A partir de 13,8 kV, as buchas são do tipo condensiva, onde no interior da porcelana existe um papel isolante e um filme metálico imersos em óleo, que formam um capacitor (BECHARA, 2010).

O comutador sob carga (6) é um dispositivo eletromecânico que permite a manipulação dos níveis de tensão de saída do transformador com ele sob carga. O acionamento do comutador sob carga (7) é responsável pela alteração dos terminais das bobinas no comutador conforme a tensão de saída desejada.

Os radiadores ou trocadores de calor (8) são estruturas externas ao tanque principal, responsáveis pela dissipação do calor do óleo isolante com o uso de aletas. Há vários tipos de sistemas de trocadores de calor, que podem envolver o fluxo natural ou forçado do óleo, a ventilação natural ou forçada, ou até mesmo, a substituição do ar por um fluxo forçado de água.

O painel de controle (9) permite o acompanhamento e configuração do transformador na subestação, podendo fornecer o monitoramento da temperatura do transformador, temperatura e nível de gases.

O secador de ar (10) retira a umidade através do uso da sílica-gel. Os termômetros (11) medem a temperatura do óleo do transformador.

Um outro constituinte do transformador é o isolamento sólido, geralmente feito por papéis isolantes, que são estruturas flexíveis, de baixo custo relativo, abundante e resistente mecanicamente. O papel isolante é geralmente impregnado com óleo, mantendo excelentes propriedades dielétricas. É usado no núcleo, nas bobinas e nos cabos, e também como separador de barramentos ou suporte para outras estruturas no trafo (SANTOS, 2012).

Apesar desses serem os principais componentes de transformadores a óleo, cabe afirmar que nem todos esses componentes são achados em todos os transformadores. Transformadores diferentes, envolvem necessidades e aplicações diferentes, e, portanto, existem dispositivos e partes supracitados que podem não ser encontrados em alguns transformadores.

2.2 Manutenção em transformadores

A manutenção de transformadores é toda atividade realizada nos transformadores para manter sua operação segura e eficiente, atuando na prevenção de falhas, problemas e acidentes; e corrigindo defeitos e falhas encontrados. Os processos de manutenção são divididos em manutenção corretiva, manutenção preventiva e manutenção preditiva.

A manutenção corretiva atua corrigindo ou consertando problemas, defeitos e efeitos já encontrados nos equipamentos e dispositivos.

A manutenção preventiva é aquela que age no sentido de conservar e restaurar equipamentos, dispositivos ou instalações a fim de mantê-los adequados para suas atividades, prolongar seu uso da melhor maneira possível e evitar falhas futuras. A manutenção preventiva deve seguir uma programação processual, envolvendo datas, prazos, atividades e testes pré-definidos para cada situação (MILASCH, 1998).

A periodicidade e as atividades relativas à manutenção preventiva dependem das instruções do fabricante, de normas estabelecidas por instituições especializadas, do acompanhamento de profissionais responsáveis,

do custo envolvido, e do funcionamento e contexto no qual os alvos da manutenção estão inseridos.

Quando ocorre de os resultados de testes de manutenção indicarem um acompanhamento mais crítico do dispositivo ou equipamento, com a redução dos intervalos de manutenção ao se perceber que se está no limite das operações, tem-se a manutenção preditiva.

O foco deste trabalho é a manutenção preventiva, já que o cumprimento das atividades propostas dar-se-ão em função do acompanhamento periódico de ensaios físico-químicos, ensaios cromatográficos e da resistência de isolamento de transformadores a óleo, buscando a gestão e interpretação dos resultados obtidos através de um programa em interface digital.

2.3 Óleo mineral isolante

As funções de um líquido isolante, não necessariamente um óleo mineral isolante, devem garantir o isolamento elétrico entre partes ativas do transformador e a transferência de calor. Para tanto, deverá preencher todos os compartimentos do transformador que necessitam ser isoladas, evitando bolhas de ar, o que um líquido pouco viscoso seria fundamental (VÁZQUEZ MORÁN, 1996).

O líquido isolante deve possuir características próprias a cada situação de operação, dependendo da temperatura do ambiente, da rigidez dielétrica procurada, entre outros.

Os óleos minerais isolantes produtos da destilação do petróleo, há muito vêm sendo usados seguindo essas funções de isolamento elétrica e transferência de calor em transformadores de diferentes níveis de tensão. Existem três tipos de óleos minerais isolantes: o naftênico, o parafínico e o aromático; com diferentes propriedades (VÁZQUEZ MORÁN, 1996).

O óleo naftênico, proveniente do petróleo naftênico foi muito usado no passado na isolação de transformadores por reunir propriedades excelentes para tal uso. Entretanto aos poucos, teve de ser substituído devido à escassez do petróleo naftênico, passando a se utilizar os óleos parafínicos com aditivos que evitam o congelamento em temperaturas baixas.

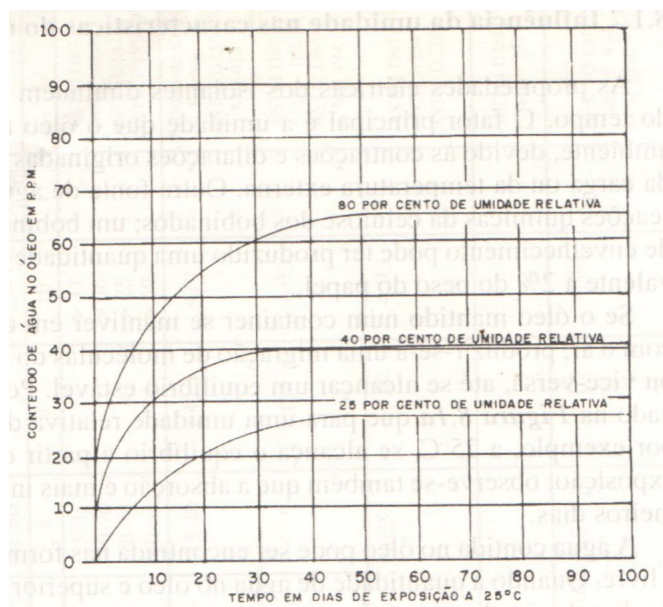
2.3.1 Influência da umidade nas características do óleo

Com o tempo os materiais isolantes de um transformador tendem a sofrer deterioração de suas características isolantes. Quanto ao óleo mineral isolante, a principal dificuldade dá-se na presença de umidade.

A umidade presente nos óleos minerais isolantes em transformadores podem ter diferentes origens, passando pelo processo de envelhecimento do papel isolante de celulose, que com 80% de envelhecimento libera 2% de umidade; até a absorção de umidade do ar ambiente pelo óleo em suas variações de volume ocasionadas pela alteração de temperatura ou carga (VÁZQUEZ MORÁN, 1996).

O Gráfico 1 mostra a umidade presente no óleo em contato com o ar com relação ao tempo de exposição para diferentes umidades relativas do ar.

Gráfico 1 – Relação entre a umidade no óleo e a sua exposição ao ar



Fonte: Vázquez Morán (1996).

A absorção da água pelo óleo é dependente da temperatura; aumentando a temperatura, aumenta-se a capacidade de dissolução. Quando ocorre um excesso de umidade com relação a capacidade de absorção do óleo, forma-se coloides, que são pequenos agrupamentos de umidade

dispersos no volume do óleo. Outra possibilidade é a formação de água depositada, livre, e que pode ser vista a olho nu.

A água encontrada em estado livre pode ser retirada por meio de papéis absorventes, porém a água dissolvida no óleo precisa passar por processos de aquecimento e vácuo.

A presença de umidade no óleo isolante enfraquece suas características de isolamento.

Com relação a isso, pode-se dizer que a presença de água em estado livre nos óleos isolantes diminui poderosamente sua rigidez dielétrica. Por isso, quando ocorre uma queda na temperatura do óleo isolante, parte da água dissolvida pode ir ao estado livre, o que diminuirá a rigidez dielétrica do óleo. Outro fator a se considerar é a presença de partículas sólidas suspensas, que podem cooperar nessa diminuição.

2.3.2 Influência dos gases dissolvidos no óleo

O principal problema existente na dissolução de gases nos óleos isolantes em transformadores é a possibilidade de perda de rigidez dielétrica.

A solubilidade dos gases é inversamente proporcional a viscosidade do óleo e aumenta com o aumento da pressão dos gases na superfície do óleo; e quanto ao CO₂, é também dependente da temperatura (VÁZQUEZ MORÁN, 1996).

3 INSPEÇÕES EM TRANSFORMADORES COM PERIODICIDADE INFERIOR A SEIS MESES

As inspeções com periodicidade inferior a um semestre são relativamente simples e podem ser feitas semanalmente, quinzenalmente ou mensalmente a depender da disponibilidade de funcionários responsáveis pela manutenção e importância dada aos equipamentos analisados.

Assim, deve-se conferir com regularidade se há vazamento de óleo, o funcionamento do sistema de ventilação, o estado da pintura do transformador e a existência de ruídos estranhos. É importante que se acompanhe e anote os valores de temperatura medidos pelo termômetro do transformador (VÁZQUEZ MORÁN, 1996).

3.1 Inspeção visual em transformadores a óleo

No geral, os departamentos de manutenção de empresas evitam técnicas que retiram os transformadores de operação ou que exigem intervenções mais agudas, evitando suspensões nas atividades da empresa, bem como desgastes e falhas. Por experiência, sabe-se que grande parte das falhas em transformadores surgem após intervenções de manutenção mais complexas (LUBRICATION-MANAGEMENT, 2017).

Nesse sentido, a inspeção visual surge como um importante agrupamento de técnicas que não exigem a parada da produção, a intervenção no transformador, e que ainda possuem um baixo custo relativo.

Basta que um profissional responsável cumpra simples tarefas periodicamente, como: verificar os níveis de óleo e a existência de vazamentos ou fissuras, o estado da sílica-gel, o estado da bomba de recirculação e da caixa, verificar a presença de óxido e a temperatura.

3.2 Ruído

Os ruídos de transformadores têm origem na vibração eletromecânica, no sistema de ventilação, no chaveamento e no efeito corona, dentre outros.

No entanto, boa parte da intensidade dos ruídos têm causa na vibração eletromecânica do transformador, em seu núcleo ferromagnético afetado por forças de magnetostricção e por forças de atração e repulsão magnéticas. As vibrações no núcleo são transmitidas a toda a carcaça e sistemas nela acoplados. Em transformadores mais modernos o núcleo é isolado da carcaça por mantas isolantes e, a carcaça é enclausurada e revestida com material acústico. A maior parte dos problemas de ruído devem ser tratados na concepção do transformador (ROSA, 2006).

Para determinação do nível de ruído de um transformador é necessário o ensaio proposto conforme a NBR 7277/2013. Os níveis de ruído devem ser dados como níveis de pressão acústica em dB. Os níveis de ruído máximos para transformadores a óleo são tratados na NBR 5356, que relaciona o ruído máximo permitido à potência nominal do transformador equivalente com dois enrolamentos em kVA, que corresponde à metade da soma das potências de todos os enrolamentos de um transformador. Neste trabalho serão considerados os ruídos de transformadores com potência nominal equivalente com dois enrolamentos até 500kVA, conforme trata a Tabela 1, encontrada na NBR 5356 (FINOCCHIO, 2015; ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007a).

Tabela 1 – Níveis de ruído para transformadores a óleo de potência nominal igual ou inferior a 500 kVA

Nível Médio de Ruído dB	Potência nominal do transformador com dois enrolamentos (kVA)
48	1 – 50
51	51 – 100
55	101 – 300
56	301 – 500

Fonte: Finocchio (2015)

O maior problema dos ruídos de transformadores inicialmente é a sua poluição sonora e o incômodo causado às pessoas próximas. Para a redução do problema, geralmente medidas são adotadas no sentido de abafar os ruídos, mas não de acabar com eles, já que estão relacionados à própria

estrutura construtiva do transformador. Entre essas medidas é possível adotar o enclausuramento ou semi-enclausuramento do transformador, desde que isso não afete sua manutenção; ou ainda optar por instalações subterrâneas.

3.3 Vazamento de óleo

Os vazamentos de óleo em transformadores geralmente podem ser notados durante inspeção visual. São o resultado de brechas formadas por chapas corroídas ou por falhas nas soldas de junção entre chapas. Os principais riscos envolvidos no vazamento do óleo são a contaminação ambiental e a perda de isolamento do transformador, de modo que se os vazamentos detectados forem significativos é necessária a interrupção imediata do transformador para a manutenção. Vazamentos não significativos ou relativamente distantes do circuito energizado podem ser corrigidos com o transformador em operação ou após um desligamento programado. O uso de bacias coletoras e de caixas separadoras óleo-água, que separam esses dois líquidos retidos após vazamentos na caixa coletora, são de grande importância. (WEG, 2010; PACITO).

3.4 Pintura do transformador

A pintura em transformadores serve para a proteção do mesmo contra corrosões e contra o intemperismo, bem como para impermeabilização e resistência química. Logo, falhas de pintura devem ser informadas e recomenda-se que, pelo menos, a cada três anos haja correção em pontos críticos ou onde a pintura apresentar desgaste (WEG, 2010, p.45; 2016, p.5).

3.5 Temperatura do óleo

A temperatura do óleo é geralmente medida através de termômetro acoplado ao transformador. O acompanhamento da temperatura do transformador e do óleo devem ser feitas sempre em prazos inferiores a seis meses. Os limites de elevação da temperatura do óleo são dados na NBR

5356-2 e consideram o uso de conservador ou de gás inerte acima do óleo. Caso o conservador seja utilizado, a medida deverá ser feita próxima à parte superior do tanque; caso haja gás inerte, a medida deverá ser feita próxima à superfície do tanque. O uso de papel termoestabilizado para a isolação também possibilita a submissão do óleo a temperaturas maiores. A Tabela 2 é válida somente para transformadores até 10MVA a uma altitude inferior a mil metros com isolação sólida definida como “Classe A” pela NBR 7034 e imersos em óleo mineral ou líquido sintético com um ponto de combustão não superior a 300°C; ela mostra os limites para a elevação de temperatura no transformador (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007b).

Tabela 2 – Limites de elevação de temperatura (°C)

Tipos		Enrolamentos			Óleo	
		Circulação do óleo natural ou forçada sem fluxo de óleo dirigido	Circulação forçada de óleo com fluxo dirigido	Do ponto mais quente		
Sem conservador e sem gás inerte sob pressão		55	60	65	50	
		95 ^a	100 ^a	120 ^a	60 ^a	
Com conservador ou com gás inerte sob pressão		Sem isolação de papel termoestabilizado	55	60	65	55
		95 ^a	100 ^a	120 ^a	65 ^a	
Com isolação de papel termoestabilizado		65	70	80	65	
		95 ^a	100 ^a	120 ^a	65 ^a	

Fonte: Associação Brasileira de Normas Técnicas (2007b)

A letra “a” sobrescrita na linha de transformadores sem conservador e sem gás inerte sob pressão indica acordo entre fabricante e comprador, onde se utiliza um sistema híbrido de isolação com isolantes à base de aramida ou

similares (geralmente adjacentes aos condutores dos enrolamentos) e isolantes sólidos à base de celulose imersos em óleo onde a temperatura máxima não ultrapassa 120°C.

Se a temperatura do ar de resfriamento (temperatura ambiente) exceder em não mais que 5°C as condições normais, de 40°C, o limite de temperatura deverá cair em 5°C. Se a temperatura do ar de resfriamento (temperatura ambiente) exceder em 5°C as condições normais, mas não mais que 10°C, o limite de temperatura deverá cair em 10°C. Caso a temperatura do ar de resfriamento (temperatura ambiente) exceder em mais que 10°C as condições normais é necessário que os limites sejam discutidos com o fabricante. O mesmo é válido a qualquer circunstância excepcional de temperatura ambiente.

Caso o transformador seja resfriado à água, e a temperatura desta ultrapassa 25°C, os limites de elevação caem conforme o valor ultrapassado arredondado em um número inteiro.

4 TESTES SEMESTRAIS EM TRANSFORMADORES

A cada seis meses é recomendável fazer os testes de ensaio físico-químico do transformador e ensaio cromatográfico do óleo. O exame com o termovisor das conexões também é recomendado.

4.1 Ensaio físico-químico

Os ensaios físicos e químicos são testes sobre o óleo isolante do transformador que verificam seu estado de envelhecimento, de isolamento e de contaminação por agentes indesejáveis, como água e partículas condutoras.

Os principais ensaios são: rigidez dielétrica, que mede a capacidade de isolamento do óleo; fator de potência e comparação por cores, que possibilitam medir o grau de contaminação do óleo; índice de neutralização e tensão interfacial, que indicam o grau de contaminantes polares ácidos; e teor de água (VÁZQUEZ MORÁN, 1996).

4.1.1 Rigidez dielétrica

A rigidez dielétrica do óleo mineral isolante é a tensão alternada onde ocorre a ruptura na camada de óleo entre dois eletrodos sob condições específicas de ensaio (MILASCH, 1998).

Um ensaio muito popular para medição da rigidez dielétrica do óleo isolante é o Método dos Eletrodos de Disco, onde o óleo é colocado entre eletrodos em formato de disco e submetido a diferentes tensões elétricas alternadas até a ruptura.

A rigidez dielétrica do óleo sofre pouco com a água nele dissolvida, no entanto é profundamente afetada pela água em suspensão. Portanto, quedas de temperatura podem gerar preocupações, pois aumentam a quantidade de água em suspensão no óleo isolante, o que diminui sua rigidez dielétrica.

Partículas sólidas em suspensão também podem diminuir consideravelmente a rigidez dielétrica do óleo. Fibras celulósicas em suspensão no óleo com água podem reduzir em até 90% a rigidez dielétrica do

óleo. Por isso, o óleo precisa ser mantido longe de umidade e partículas de carvão, cobre, papel ou poeira (MILASCH, 1998).

A rigidez dielétrica minimamente aceitável do óleo mineral isolante novo varia com o método empregado na sua medição. A ABNT NBR IEC 60156 estabelece os limites minimamente aceitáveis para rigidez dielétrica, conforme mostra a Tabela 3.

Tabela 3 – Valores limite para a rigidez dielétrica em transformadores

Tensão do Transformador (kV)	Valores limites (kV)
<i>Tensão</i> ≤ 72,5	<i>Rigidez</i> ≥ 40
72,5 < <i>Tensão</i> ≤ 242	<i>Rigidez</i> ≥ 50
<i>Tensão</i> > 242	<i>Rigidez</i> ≥ 60

Fonte: Paulino

4.1.2 Fator de potência do óleo isolante

O fator de potência do óleo isolante corresponde ao quociente entre a potência ativa e a potência reativa obtidas em teste com tensão senoidal e condições próprias. Aumentos nos valores do fator de potência do óleo podem indicar a perda da rigidez dielétrica do óleo isolante, sua deterioração e sua contaminação por água ou outras partículas. Deve-se lembrar que o aumento do fator de potência do óleo também pode ocorrer devido ao aumento de temperatura, portanto, as análises comparativas de fator de potência devem levar em conta as diferenças entre temperaturas.

Um óleo isolante novo geralmente apresenta um fator de potência em cerca de 0,05% ou menos à temperatura de 20°C. Valores maiores podem representar contaminação por partículas de materiais condutores variadas. A Tabela 4 relaciona os valores de fator de potência do óleo isolante às devidas providências a serem tomadas em cada caso (VÁZQUEZ MORÁN, 1996).

Tabela 4 – Características do óleo em função dos valores de fator de potência

Fator de potência a 20°C	Providências
Fp < 0,5%	Considerado satisfatório para serviço.
Fp > 0,5%	Duvidoso: Investigar as causas com testes adicionais de rigidez dielétrica, acidez e tensão interfacial.
Fp > 2,0%	Sem condições de uso: a) Verificar as causas; b) Recondicionar por filtragem, centrifugação e vácuo; c) Substituir por óleo novo.

Fonte: Vázquez Morán (1996)

4.1.3 Exame visual e de cores

O exame visual e de cor do óleo analisa visualmente a presença de partículas sólidas e de água no óleo, bem como faz um teste de comparação de cores do óleo.

Primeiramente, compara-se a cor do óleo coletado no transformador com cores de uma escala-padrão numerada de 0 a 8. As cores da escala são postas em um disco comparador rotativo, que deve sobrepor a amostra coletada.

O teste de comparação de cores é feito rotacionando este disco e buscando a coincidência entre uma cor da escala-padrão e a cor do óleo coletado. Após encontrar a coincidência, anota-se o número da cor da escala-padrão encontrada. No caso da cor do óleo coletado ficar entre duas cores da escala-padrão, o resultado corresponde a um número intermediário da escala-padrão.

A busca pela coincidência de cores por observação não deve exceder 15 segundos. Após esse período, o observador deve descansar a vista, de preferência em uma tela de cor cinza.

A análise visual de partículas sólidas dá-se pelo método de luz refletida ou Efeito Tyndall. Basicamente, emite-se um feixe de luz sobre a amostra de óleo em um ambiente escuro, e caso exista sombras na imagem projetada,

conclui-se que existem partículas sólidas no óleo. Um óleo isolante em boas condições deveria manter-se límpido e transparente.

No relatório do teste deverá constar o número de coloração encontrado, o aspecto de cor do óleo (turvo, claro ou com sedimentos) e a temperatura no momento de coleta do óleo.

O máximo valor aceitável para o resultado do exame de comparação de cores é o número 2,7 de coloração da escala-padrão de cores (MILASCH, 1998).

4.1.4 Índice de neutralização

O índice de neutralização do óleo isolante é uma medida da acidez do óleo, que por sua vez, está relacionada a deterioração do mesmo. A diferença entre o óleo contaminado e o óleo deteriorado, é que no primeiro caso o óleo apresenta partículas e substâncias prejudiciais a sua aplicação, mas que não são resultados de sua decomposição; enquanto no segundo caso, partículas e substâncias prejudiciais ao funcionamento e aplicação do óleo são resultados de sua oxidação e decomposição. Os ácidos são um dos produtos da deterioração do óleo isolante, e por isso são também um indicador importante deste processo.

O índice de neutralização ou número de neutralização (NN) corresponde à quantidade em mg de KOH (hidróxido de potássio) necessária para neutralizar 1 g da amostra de óleo.

Um óleo isolante em boas condições opera com um índice de neutralização de 0,03 mg de KOH. Valores superiores a 0,10 mg de KOH são os maiores valores admitidos na manutenção preventiva (MILASCH, 1998).

A situação é crítica para o óleo isolante quando o número de neutralização é superior ou igual a 0,25 mg de KOH por grama de óleo. Acima deste valor ocorre um aumento acelerado de deterioração do óleo, já que a acidez é catalisadora do processo de oxidação do óleo. A fase final de deterioração do óleo é o estado de borra ou sedimento, onde o óleo precisa ser trocado ou recuperado.

4.1.5 Tensão interfacial

A tensão interfacial (TIF) é a medida de tensão existente no contato superficial entre o óleo isolante e a água. Suas medidas são dadas em dina/cm ou mN/m.

O óleo isolante novo possui afinidade tanto com moléculas de óleo quanto com a água, o que resulta em um alto valor de tensão interfacial. Um bom óleo isolante novo a 25°C possui um TIF de cerca de 40 dina/cm. No entanto, produtos da deterioração do óleo e outros contaminantes acabam abaixando esse valor.

O teste de tensão interfacial é muito útil, pois uma redução no valor original da TIF é a consequência da contaminação ou deterioração do óleo isolante. Para uma boa manutenção preventiva, o mínimo admitido para a TIF é 27 dina/cm (MILASCH, 1998).

4.1.6 Teor de umidade no óleo

O teor de umidade do óleo é a quantidade de água em ppm (partes por milhão) do óleo coletado na superfície do transformador. Os valores de umidade no óleo em ppm máximos admitidos na manutenção preventiva de transformadores são mostrados na Tabela 5 de acordo com a classe de tensão dos transformadores.

Tabela 5 – Valores máximos de teor de umidade no óleo para a manutenção preventiva

Classe de tensão	Limite de água no óleo (ppm)
< 69 kV	39
69 kV a 238 kV	25
> 238 kV	20
Extra Alta Tensão	< 20

Fonte: Milasch (1998)

O valor crítico é 50 ppm de água e mostra a necessidade de substituição do óleo (MILASCH, 1998).

4.2 Ensaio cromatográfico

Os ensaios por cromatografia gasosa de gases dissolvidos no óleo isolante são o método mais adequado para a análise dos gases gerados no transformador.

Como já visto, a presença de gases no transformador pode contribuir para falhas e para a perda de rigidez dielétrica nos isolantes. Mas, a análise cromatográfica dos gases, por sua vez, é uma importante ferramenta para a prevenção de falhas e para o acompanhamento do envelhecimento da isolação do transformador.

A análise dos gases dissolvidos é feita em três estágios distintos: coleta de amostra do óleo; extração dos gases da amostra; e análise dos gases extraídos no cromatógrafo de gases (MILASCH, 1998).

Assim, primeiramente tem-se de coletar uma amostra do óleo mineral isolante do transformador; depois, cabe através dos devidos instrumentos, a extração dos gases dissolvidos no óleo; por último, deve-se enviar os gases extraídos do óleo para uma análise laboratorial, onde serão separados, identificados, quantificados e analisados. Nesta última parte, é empregado um aparelho chamado de cromatógrafo, que analisa os gases coletados e retorna um resultado impresso.

4.2.1 Interpretação dos resultados

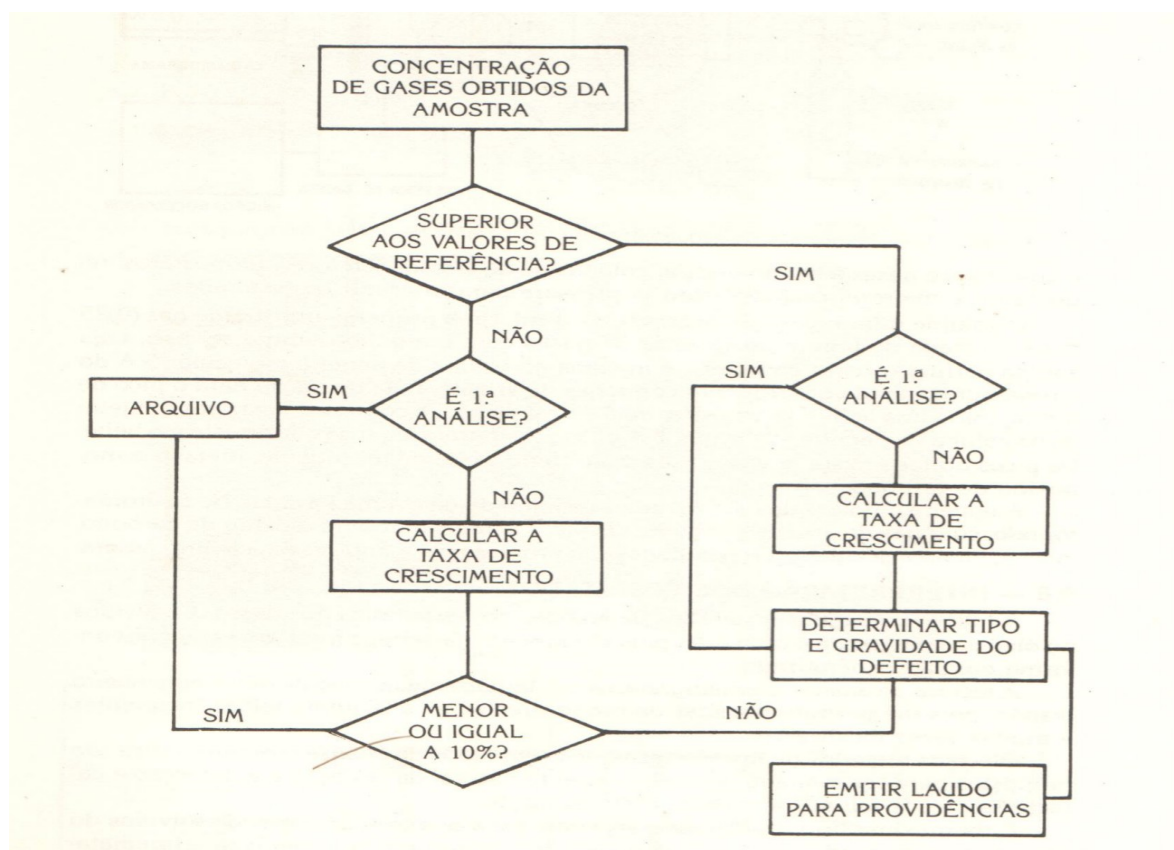
A interpretação dos resultados de uma análise cromatográfica é um processo bastante impreciso. Ela depende das características, circunstâncias e condições do óleo isolante do transformador em seu estado inicial, antes do uso (MILASCH, 1998).

Para isso, é de suma importância realizar o ensaio cromatográfico do óleo isolante em um momento anterior à sua aplicação na entrada em operação do transformador, a fim de que se possa comparar ensaios cromatográficos posteriores com este primeiro. Assim, pode-se estabelecer se houve aumento descomunal de algum gás em certo período, e assim se precaver contra falhas incipientes. É dessa forma que os ensaios

cromatográficos mostram sua importância: para cada caso, uma análise comparativa particular.

A Figura 3 representa um diagrama de blocos de como a concentração de gases deve ser tratada na manutenção preventiva, mostrando o conceito de primeira análise para comparação de resultados. Diagramas de blocos como esse são de grande importância na programação de ferramentas que auxiliem os profissionais de manutenção.

Figura 3 – Diagrama de blocos mostrando os processos de análise dos ensaios cromatográficos do óleo em transformadores



Fonte: Milasch (1998).

Um método de destaque na interpretação dos resultados de análises cromatográficas é o método de diagnóstico pelo gás-chave, que relaciona os possíveis problemas e falhas específicos no transformador com as quantidades de gases encontrados neles, de maneira, que cada tipo de problema relaciona-se com a presença de um tipo de gás, denominado de gás-chave.

Assim, pode-se deduzir os possíveis problemas que existem ou poderão existir em um transformador pela quantidade de gás encontrado dissolvido no óleo mineral isolante.

A Tabela 6 mostra as concentrações normais e anormais de gases no óleo isolante, e os possíveis problemas associados às anormalidades.

Tabela 6 – Relação de valores normais e anormais de gases combustíveis no óleo e a respectiva interpretação dessas anormalidades

Gás	Normal (ppm)	Anormal (ppm)	Interpretação
H ₂	150	1000	Arco, corona
CH ₄	25	80	Centelhamento
C ₂ H ₆	10	35	Sobreaqueciment o local
C ₂ H ₄	20	100	Sobreaqueciment o severo
CO	500	1000	Sobrecarga severa
CO ₂	10000	15000	Sobrecarga severa

Fonte: Milasch (1998)

5 TESTES ANUAIS E QUINQUENAIS EM TRANSFORMADORES

5.1 Testes anuais em transformadores

Anualmente deve-se testar todas as estruturas de resposta e proteção do transformador a uma possível falha, como os relés, proteção ao nível do óleo e temperatura de enrolamento. Deve-se também encontrar a quantidade de umidade presente nos materiais isolantes. Além disso, deve-se lavar as buchas com água e sabão neutro e aplicar nelas uma camada de material a base de silicone (VÁZQUEZ MORÁN, 1996).

5.1.1 Temperatura dos enrolamentos

A temperatura dos enrolamentos do transformador pode ser conferida anualmente, levando em consideração a existência de circulação forçada de óleo com fluxo dirigido, além da existência de conservador ou de gás inerte acima do óleo. Os limites de elevação da temperatura dos enrolamentos são mostrados na Tabela 2, válida também para os limites de elevação da temperatura do óleo, obedecendo às mesmas condições de avaliação.

5.2 Testes quinquenais em transformadores

A cada cinco anos deve-se fazer alguns testes elétricos como a medição do fator de potência das buchas e dos enrolamentos, a medição da resistência de isolamento e a medição da relação de transformação (VÁZQUEZ MORÁN, 1996).

Além disso, deve-se verificar o estado do sílica-gel (quando seco, apresenta coloração azul; e quando saturado, apresenta coloração roxa) e reapertar todas as conexões e bornes.

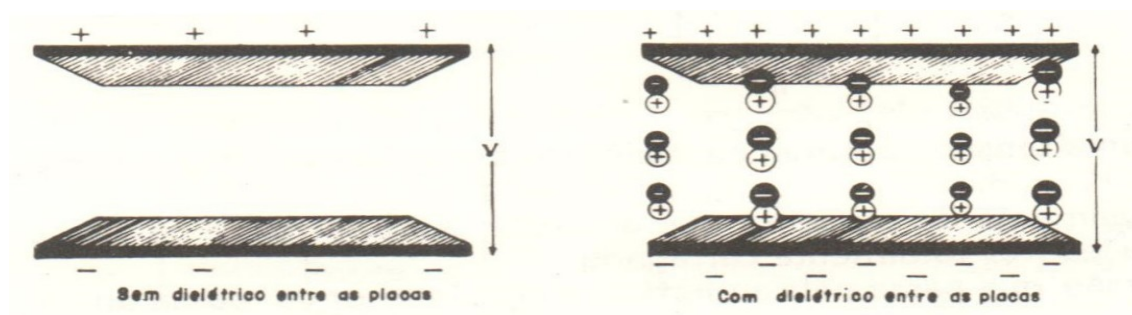
5.2.1 Resistência de isolamento

Os metais são excelentes condutores devido à existência de elétrons livres nas suas estruturas. Estes elétrons sob a influência e orientação de um campo elétrico formam as correntes elétricas (MILASCH, 1998).

Os isolantes, de maneira contrária, possuem pouquíssimos elétrons livres e, por isso, não são bons condutores. No entanto, os materiais isolantes não ideais possuem impurezas; sendo, muitas delas, impurezas ionizáveis que prejudicam a isolação, já que os íons são responsáveis pela condução elétrica (MILASCH, 1998).

Bons materiais isolantes possuem grande quantidade de moléculas polares, que são formadas por uma parte de carga positiva e outra de carga negativa. Quando estão sob a influência de um campo elétrico, elas tendem a se orientar em uma mesma direção e sentido, evitando a ionização e permitindo uma maior rigidez dielétrica, como é mostrado na Figura 4. A medição da resistência de isolamento é um excelente método para prevenir e diagnosticar falhas na isolação de transformadores. O teste é muito simples e consiste em aplicar uma tensão CC sobre a isolação e medir a corrente elétrica que passa por ela. O teste não mede a rigidez dielétrica do material, pois não é um teste destrutivo.

Figura 4 – Presença de dielétrico entre placas submetidas a tensão elétrica



Fonte: Milasch (1998).

O aparelho utilizado nos testes é chamado de megaohmímetro, já que as resistências de isolamento são geralmente dadas em megohms. O

chamado "Megger de Isolamento", da empresa Megger, é um megaohmímetro de uso corriqueiro na manutenção de transformadores.

Pode-se dizer que o ensaio para a medição da resistência de isolamento é feito em sete passos:

1. Desconectar todos os cabos das buchas do transformador, incluindo o neutro, e verificar se o tanque se encontra devidamente aterrado;

2. Ajustar o megaohmímetro (ou "Megger de Isolamento") conforme as instruções do fabricante;

3. Colocar em curto-circuito os terminais das buchas de mesmo enrolamento;

4. Selecionar a tensão elétrica de teste segundo a Tabela 7;

5. Conectar o aparelho conforme o Quadro 1 para cada resistência de isolamento a ser medida, similarmente às conexões mostradas na Figura 5;

6. Aplicar a tensão de teste de 100%, como consta na Tabela 7, registrando os valores de resistência medidos aos 15 segundos, 30 segundos, 1 minuto, e a cada minuto até 10 minutos;

7. Por fim, anotar a temperatura do óleo isolante medida, ou com termômetro embutido no tanque ou com um manual que não utiliza mercúrio.

Tabela 7 – Tensões recomendadas para testes de resistência de isolamento em trafos

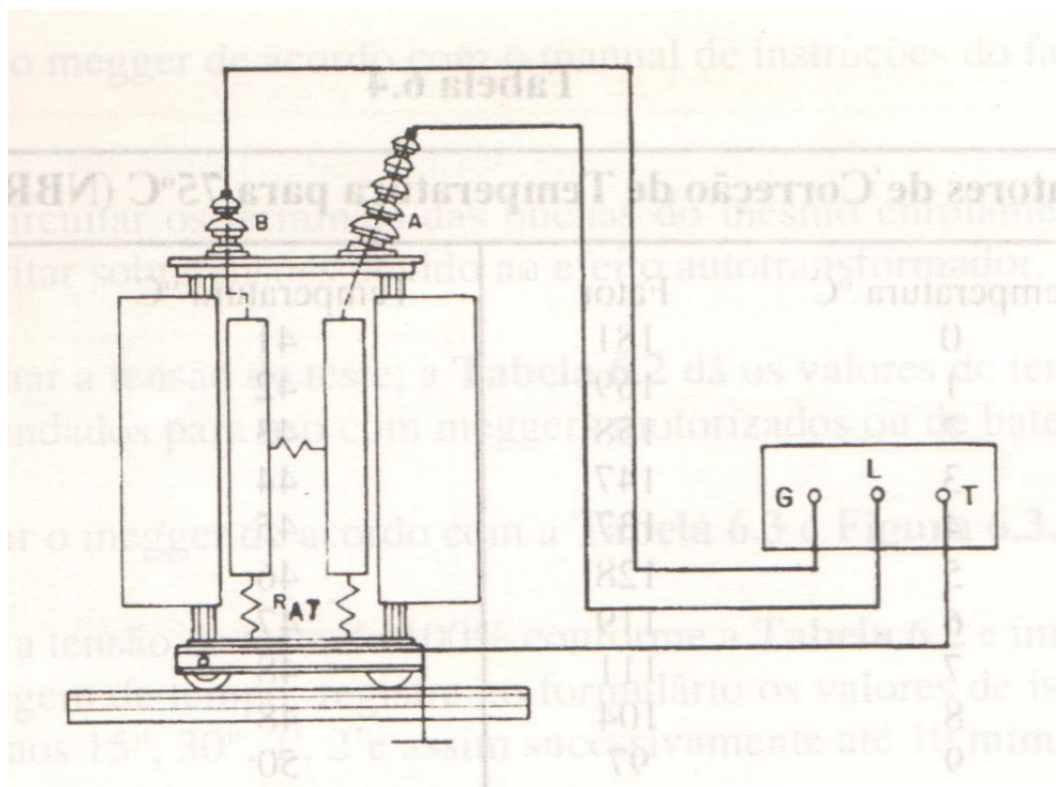
Tensão do transformador	Tensão de teste	
	100%	25%
Até 220 V	500 V	125 V
220 a 4160 V	1000 V	250 V
4160 a 69000 V	2500 V	500 V
69000 a 230000 V	5000 V	1000 V

Fonte: Vázquez Morán (1996)

Quadro 1 – Conexões no Megger para testes de resistência de isolamento

	Teste	Conexão dos terminais do Megger			Curto-circuitar	Parte medida
		Line (energia)	Earth (terra)	Guard (Guarda)		
Trafo de dois bobinados	1	Alta	Terra	Baixa		Alta-terra
	2	Alta	Baixa	Terra		Alta-baixa
	3	Baixa	Terra	Alta		Baixa-terra
Trafo de três bobinados	4	Alta	Terra	Média	Média-baixa	Alta-terra
	5	Alta	Média	Baixa	Baixa-terra	Alta-média
	6	Alta	Baixa	Média	Média-terra	Alta-baixa
	7	Média	Terra	Alta	Alta-baixa	Média-terra
	8	Média	Baixa	Alta	Alta-terra	Média-baixa
	9	Baixa	Terra	Alta	Alta-média	Baixa-terra

Fonte: Vázquez Morán (1996)

Figura 5 – Conexão de transformador de dois enrolamentos no “Megger” para medição de resistência de isolamento alta-terra

Fonte: Vázquez Morán (1996).

Com o fim dos procedimentos de medição de isolamento, faz-se necessário o cálculo dos índices de absorção para cada resistência, conforme a Equação (9); e dos índices de polarização, conforme a Equação (10).

$$I_a = \frac{R_{60s}}{R_{30s}} \quad (9)$$

$$I_p = \frac{R_{10min}}{R_{1min}} \quad (10)$$

Caso o valor do índice de polarização seja menor que 1,5, deve-se repetir o teste utilizando no “passo 6” da medição de resistência de isolamento a tensão de teste a 25% da Tabela 6, comparando os resultados obtidos (VÁZQUEZ MORÁN, 1996).

A Tabela 8 relaciona os valores dos índices de absorção e polarização encontrados com suas condições, de acordo com James G. Biddle Co.

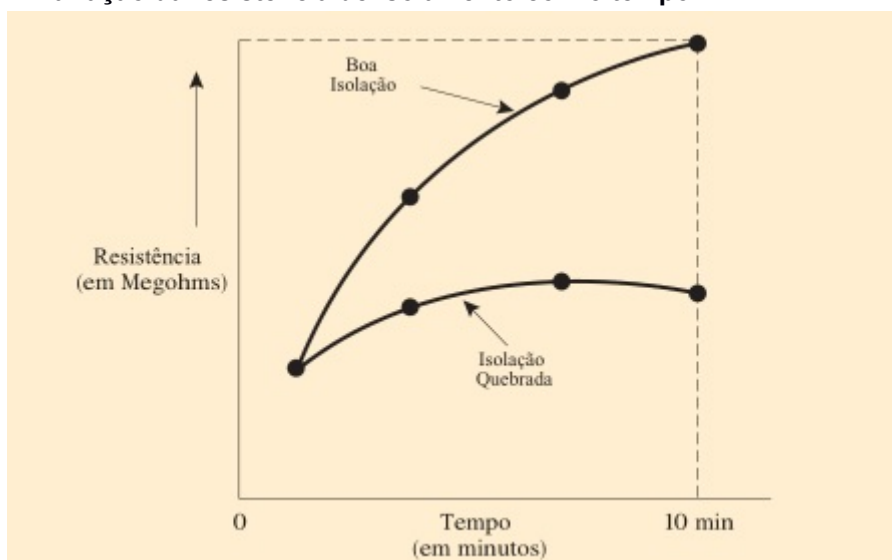
Tabela 8 – Análise da condição de isolamento a partir dos valores dos índices de absorção e polarização conforme proposto por James G. Biddle Co.

Condição da isolação	Relação	
	I_a	I_p
Perigosa	-	< 1
Pobre	< 1,1	1 a 1,5
Questionável	1,1 a 1,25	1,5 a 2
Duvidosa	1,25 a 1,4	2 a 3
Boa	1,4 a 1,6	3 a 4
Excelente	> 1,6	> 4

Fonte: Milasch (1998).

Os valores dos índices de absorção e dos índices de polarização procuram medir o aumento da resistência de isolamento durante os primeiros 10 minutos de teste. Uma excelente resistência de isolamento apresentará aumentos consideráveis com o tempo sob a tensão de teste, conforme procura demonstrar o Gráfico 2.

Gráfico 2 – Variação da resistência de isolamento com o tempo



Fonte: Vórtex Equipamentos

Para obtenção do menor valor de resistência de isolamento permitido, o valor obtido da resistência de isolamento no ensaio deve ser corrigido. Para efeito de comparações e estabelecimento dos mínimos valores das resistências de isolação, deve-se corrigir a resistência obtida para o valor padrão de resistência de isolamento a 75°C. Para tanto, emprega-se a Equação (11).

$$R_{75} = \frac{R_t}{2^{\frac{75-t}{10}}} \quad (11)$$

A resistência mínima de isolamento para transformadores a 75°C considerando o uso do óleo mineral isolante é dada pela Equação (12), para trafos monofásicos; e pela Equação (13), para trafos trifásicos (VÁZQUEZ MORÁN, 1996).

$$R_m = \frac{3 \cdot 2,65 \cdot Ev}{\sqrt{\frac{P}{f}}} \quad (12)$$

$$R_m = \frac{2,65 \cdot Ev}{\sqrt{\frac{P}{f}}} \quad (13)$$

Providências devem ser tomadas em dois casos de acordo com os resultados obtidos na medição das resistências de isolamento: primeiro, quando a resistência de isolamento medida não atinge o valor mínimo; segundo, quando a qualidade da resistência de isolamento mostra-se continuamente em queda, o que indica que falhas podem sobrevir a qualquer momento.

Se houver uma redução de 50% ou mais da resistência de isolação em comparação com testes de 2 a 3 anos atrás, é certo que existe algum problema a ser corrigido, ainda que se tenha valores de resistência acima dos valores mínimos (VÁZQUEZ MORÁN, 1996).

Os ensaios e elementos circunstanciais devem ser discutidos por especialistas. Ademais, a análise deve ser feita em cima de comparações com os dados de fábrica do trafo e com ensaios anteriores. Assim, valores abaixo dos mínimos poderão não revelar problemas em certos casos desde que se mantenham compatíveis com os últimos ensaios.

As medidas a serem tomadas visam o aumento da resistência de isolamento e podem envolver a secagem do transformador, a melhoria do sistema de radiação, a limpeza do transformador, entre outras.

5.2.2 Relação de transformação

A relação de transformação corresponde, na teoria, à razão da tensão medida no primário do transformador com relação à tensão medida no secundário, conforme mostra a Equação 14. A relação de transformação também é aproximadamente igual à razão entre o número de espiras no primário com relação ao secundário do transformador.

$$k_{med} = \frac{V_{1med}}{V_{2med}} \quad (14)$$

O teste de relação de transformação deve ser feito ao menos uma vez a cada cinco anos e visa, na manutenção, encontrar discrepâncias muito acentuadas entre a relação de transformação nominal e a obtida no teste. O principal problema relacionado à relação de transformação é a ocorrência de curto entre espiras. Uma diferença maior que 0,5% entre o valor nominal e a relação obtida no teste indica problemas. Nesse caso, sendo o bobinado feito em seções, deve-se conferir de duas em duas as espiras das bobinas do transformador, visando identificar algum curto (PLATH, 2016; FONSECA, 2014).

Os testes mais confiáveis geralmente são feitos com o uso de um dispositivo conhecido por TTR (*Transformer Turn Ratio*), que apresenta vários modelos e funcionalidades, podendo ser analógico ou digital. Para um correto uso desse aparelho, recomenda-se consultar o manual de seu fabricante.

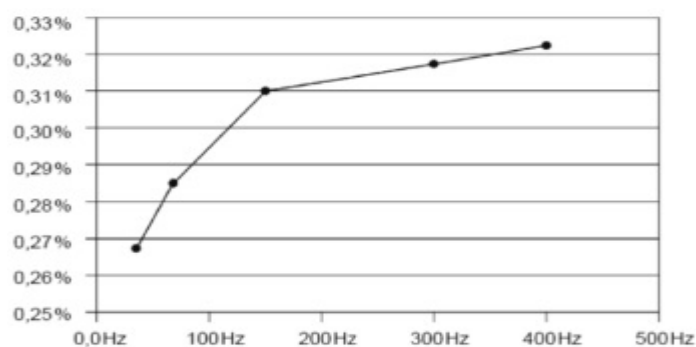
5.2.3 Fator de potência das buchas

O ensaio de fator de potência nas buchas do transformador avaliam o grau de contaminação e deterioração das mesmas. Trata-se de um ensaio comparativo, ou seja, a avaliação da condição da bucha depende do fator de potência coletado antes dela entrar em operação. O fator de potência deve ser dado em porcentagem, conforme a Equação 15 (PAULINO, 2011; NASCIMENTO, 2015).

$$FP \% = \frac{P_{at} \times 100}{S} \quad (15)$$

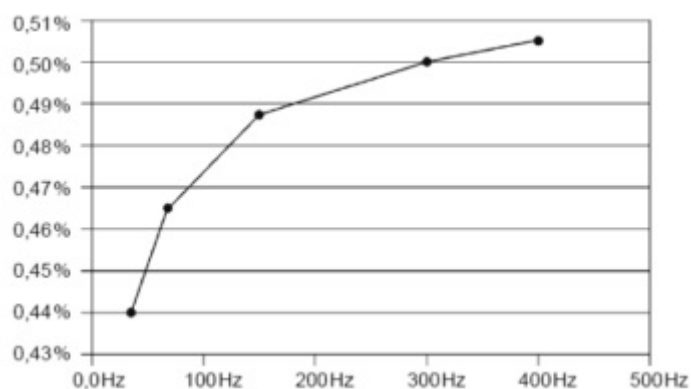
Equipamentos mais modernos conseguem realizar ensaios em diferentes frequências de tensão alternada, possibilitando análises mais completas, como mostram os Gráficos 3 e 4. Nota-se que com o aumento da frequência, aumenta-se também os valores do fator de potência das buchas, similarmemente a ensaios de fator de potência do óleo isolante (PAULINO, 2011).

Gráfico 3 – Ensaio de fator de potência de uma bucha nova sob frequências variadas



Fonte: Paulino (2011)

Gráfico 4 – Ensaio de fator de potência de uma bucha envelhecida sob frequências variadas



Fonte: Paulino (2011)

Embora uma gama maior de frequências de teste possibilite compreender melhor o estado do óleo, é suficiente aqui o uso da frequência

padrão da rede elétrica para os exames. A Tabela 9 mostra os limites aceitáveis para o fator de potência das buchas.

Tabela 9 – Avaliação do fator de potência em buchas

	Avaliação
$FP_{med} < 2xFP_{ref}$	Aceitável
$Fp_{med} < 3xFP_{ref}$	Deve ser investigada
$Fp_{med} > 3xFP_{ref}$	Crítica

Fonte: Paulino (2011)

6 PROGRAMAÇÃO E A LINGUAGEM JAVA

A linguagem Java é utilizada para uma ampla gama de funções e atinge uma série de dispositivos. Pode ser empregada tanto para entretenimento de consumidores comuns quanto para aplicações de empresas e sistemas corporativos. A linguagem Java é estruturada em pacotes (os mecanismos de *namespace* em Java) onde existem classes, que por sua vez, abrigam métodos, variáveis, constantes, estruturas de programação, dentre outras. Os pacotes são importantes, pois permitem a organização das classes em torno de características comuns, bem como possibilita que classes de mesmo nome existam em pacotes diferentes.

A programação em linguagem Java, gera arquivos do tipo “.java”, cujo o compilador Java lê e grava *bytecode* em arquivos “.class”. O *bytecode* é um tipo de linguagem a ser executada em uma JVM (Java Virtual Machine), o que representa uma grande vantagem para a linguagem, pois a JVM interpreta arquivos “.class” para qualquer máquina (similarmente à leitura que uma CPU faz da linguagem assembly), seja um computador (Linux ou Windows), um celular, um relógio; enfim, qualquer máquina cujo a implementação JVM já tenha sido desenvolvida. Trata-se do princípio “escreva uma vez, leia em qualquer lugar” da linguagem Java.

Para programar em Java é necessária a utilização do Java Development Kit (JDK), contendo o compilador Java. Para executar programas escritos em Java, basta ter o Java Runtime Environment (JRE) instalado na máquina. O JDK já inclui o JRE.

Uma ferramenta que auxilia muito na programação em Java é o uso de um ambiente de desenvolvimento integrado (IDE – Integrated Development Environment), como o IDE NetBeans, que possibilita a edição de códigos de maneira rápida e fácil, a integração do usuário com a linguagem Java de maneira mais simples, e um melhor gerenciamento dos projetos em Java.

6.1 O banco de dados e a linguagem SQL

Para o armazenamento das informações inseridas no programa é necessário a utilização de um banco de dados, que receba os dados inseridos, os armazene e depois carregue esses dados mesmo após o desligamento da máquina.

A maioria dos bancos de dados são gerenciados e manipulados através da linguagem SQL (Structured Query Language), e para a construção do programa de gestão em transformadores a linguagem SQL será de grande importância, pois é ela que dará os comandos finais para adição, alteração e exclusão dos dados no banco.

No desenvolvimento do programa, conforme proposto, toda a estruturação do banco de dados, a relação entre tabelas e a programação do banco de dados será feita com a utilização da ferramenta visual MySQL Workbench.

6.2 Estrutura do banco de dados

A primeira etapa da programação é a estruturação do banco de dados do programa. O banco de dados funciona armazenando as informações inseridas no programa; quando do funcionamento do programa em linguagem Java, toda vez que for necessário consultar algum dado específico de um transformador, recorrer-se-á a uma conexão com o banco de dados, possibilitando a importação dos dados.

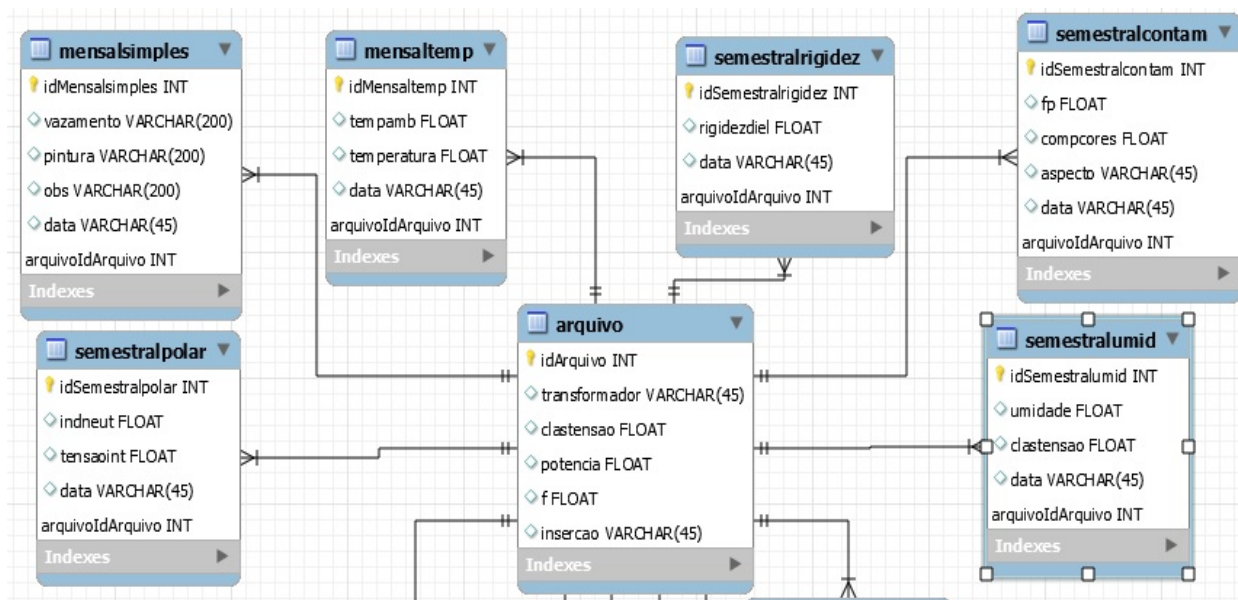
Com o auxílio da MySQL Workbench, a estruturação do banco de dados deu-se através de tabelas em um diagrama feito dentro de um modelo chamado “gestaoetrafo”. Cada variável de cada tabela corresponde a uma coluna da respectiva tabela. As tabelas contêm, além de suas variáveis específicas (cujo conteúdo é visível no uso do programa), outras variáveis.

Uma primeira variável invisível no uso do programa é necessária a todas as tabelas, que identifica a tabela e cujo conteúdo numera automaticamente as linhas com uma função de incremento automático, de maneira que a cada nova

linha adicionada à tabela, soma-se uma unidade no respectivo conteúdo dessa variável.

Uma segunda variável invisível no uso do programa não é necessário a todas as tabelas, mas somente àquelas que são conectadas a uma tabela principal. No caso, a tabela principal do banco de dados é a tabela “arquivo”, que registra o nome do transformador que passará pela manutenção. Quando o usuário do programa escolhe o transformador com o qual trabalhará, todas as outras tabelas conectadas a essa tabela filtrarão seus dados de modo a que somente os dados relacionados a esse transformador apareçam. Tudo isso pode ser contemplado na Figura 6; nela se vê, por exemplo, na tabela “semestralrigidez” a primeira variável invisível ao usuário chamada “idSemestralrigidez” e a segunda variável invisível ao usuário chamada “arquivoIdArquivo”, que conecta a tabela “semestralrigidez” à tabela principal.

Figura 6 – Estrutura do banco de dados



Fonte: Autoria própria (2018)

6.3 Conexão com banco de dados

A conexão do programa de linguagem Java com o banco de dados no MySQL Workbench foi feita dentro de uma classe em pacote de código-fonte estruturado na IDE NetBeans 8.2. Para a conexão, foi necessário baixar a

biblioteca para Java “Connector/J 5.1.47” disponível no próprio site do MySQL, e posteriormente importá-la para o programa.

O código em linguagem Java desta conexão pode ser visto no “Apêndice A – Conexão com banco de dados”.

6.4 Modelagem de variáveis no IDE NetBeans 8.2

Após a estruturação do banco de dados e a criação de uma classe Java que estabeleça a conexão do programa com o banco de dados, é necessário modelar as variáveis declaradas no banco de dados dentro do IDE NetBeans 8.2. Para isso foi criado um pacote chamado “modelo” contendo classes Java de todas as tabelas feitas no MySQL Workbench. Dentro dessas classes era necessário declarar as variáveis com o mesmo nome que o estabelecido no banco de dados, bem como com o tipo equivalente de dados (float, int, String, por exemplo).

Em seguida, gerou-se o encapsulamento destas variáveis através da ferramenta do IDE NetBeans 8.2 de “gerar *getter* e *setter*”, possibilitando a comunicação dessas variáveis em outras classes Java do projeto. O código em linguagem Java da modelagem da “tabela arquivo”, feita no banco de dados, pode ser vista no “Apêndice B – Modelagem das variáveis da ‘tabela arquivo’”.

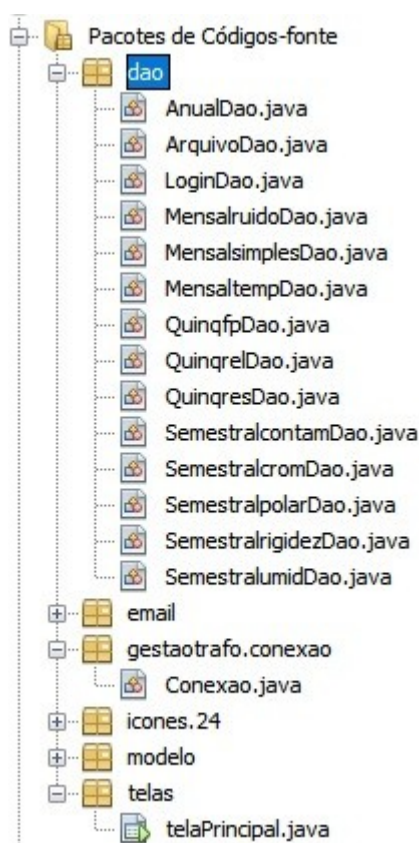
6.5 Pacotes “dao” e “email”

6.5.1 Pacote “dao”

Como já visto anteriormente, é necessário para o desenvolvimento desta aplicação em linguagem Java, o armazenamento de dados em um banco de dados. Assim, o objetivo do padrão Data Access Object (DAO) é encapsular os mecanismos de acesso aos dados (data source) dentro de pacotes do programa em Java. Assim, as classes dentro destes pacotes abrem a conexão com o banco de dados, manipulam os dados, os devolvem para a aplicação e finalmente, fecham a conexão com o banco de dados.

O pacote criado para estabelecer essa relação foi chamado de pacote “dao”, e contém dentro dele classes referentes à manipulação de dados (adição, exclusão, alteração, por exemplo) das tabelas. A Figura 7 mostra o pacote “dao” criado e suas classes. O “Apêndice C – Adição de dados na ‘tabela arquivo’ do banco de dados” contém o código da classe, interna ao pacote “dao”, que adiciona dados à “tabela arquivo” do banco de dados.

Figura 7 – Pacote “dao” e suas classes dentro dos pacotes de código-fonte



Fonte: Autoria própria (2018)

6.5.2 Pacote “email”

Uma das funcionalidades do programa desenvolvido para a gestão da manutenção em transformadores é a possibilidade do envio de *e-mails* informando as datas das próximas manutenções. Isso só é possível através da importação de bibliotecas responsáveis pelo envio de *e-mails*: a biblioteca JavaMail 1.4.6, disponível para *download* no site da empresa Oracle; e as

bibliotecas Apache Commons Email 1.5, disponíveis para *download* no site da Apache Commons.

O pacote 'email' foi criado dentro do pacote de código-fonte a fim de receber uma mensagem do tipo *String* e enviá-la a um endereço de *e-mail* específico.

6.6 Criação de gráficos

A criação de gráficos no programa só é possível graças as utilidades das bibliotecas "JfreeChart 1.0.19", que permitem a edição de gráficos na aplicação Java a partir dos dados selecionados de tabelas, bem como a manipulação e exportação desta tabela a outros formatos, como PNG, por exemplo. A biblioteca é um software livre e de código aberto.

6.7 A classe "telaPrincipal"

A classe "telaPrincipal" contém todas as janelas do programa que fazem a comunicação gráfica com o usuário. Nesta classe, também se encontram todo o código que estabelece a interação do usuário com o programa: as ações de resposta de cada botão, a passagem do dado inserido para a máquina, a chamada de classes mantidas no pacote 'dao' que fazem comunicação com o banco de dados, o carregamento das informações do banco de dados, a criação de gráficos, entre outras.

A parte gráfica do programa contida nesta classe, foi criada a partir dos recursos disponíveis por padrão no IDE NetBeans 8.2 ou com *design* próprio.

6.8 Funcionalidades

O programa inicia com uma tela de *login*, que pede um nome de usuário e uma senha, cadastrados anteriormente no sistema, o que dá mais segurança na manipulação dos dados no banco de dados da empresa ou do engenheiro responsável.

Após entrar no sistema, o programa abrirá a tela de cadastro dos transformadores que serão armazenados no sistema para a gestão de sua manutenção. O usuário poderá cadastrar um nome para esse transformador, sua classe de tensão em kV, sua potência kVA e sua frequência de operação em Hz; o próprio sistema cadastrará a data da inserção do transformador no sistema e a armazenará no banco de dados. Alterações podem ser feitas, mantendo-se a data cadastrada; a exclusão do transformador do sistema, também acarretará na perda de todos os seus dados cadastrados.

Para a gestão da manutenção de um transformador, o usuário poderá selecionar o transformador cadastrado e posteriormente, clicar em “consultar”. A tela de manutenção se abrirá com os procedimentos de manutenção divididos por períodos de tempo (inferior a seis meses, semestral, anual e quinquenal). Uma caixa de seleção contém os procedimentos de manutenção para cada período de tempo; basta que o usuário selecione algum e clique em “OK” para que a janela do respectivo processo seja aberta.

Todas as janelas de procedimentos de manutenção permitem adicionar dados, alterá-los e excluí-los, salvando a data relativa ao momento da adição dos dados. Também toda a aplicação leva em conta a teoria e os limites de cada ensaio especificados nesse trabalho.

6.8.1 Funcionalidades do programa para procedimentos de manutenção com período inferior a seis meses

A janela de medição de temperatura do óleo permite a geração de um gráfico de *temperatura (°C) x tempo (dia da manutenção)*, além de retornar o resultado em uma nova janela informando se a temperatura está acima do recomendável pela NBR 5356.

A janela de manutenção visual permite a adição de um comentário até 200 caracteres relativos ao exame visual de vazamentos, pintura e observações gerais, que podem incluir a descrição das condições da sílica-gel, o estado do sistema de ventilação, o estado da carcaça do transformador, observações a respeito da limpeza, entre outras (WEG, 2010, p. 43-49).

A janela de nível de ruído, permite que, tendo o usuário notado níveis de ruído estranhos ou de alta intensidade, ele possa inserir o nível de ruído encontrado em ensaio e analisar se o mesmo encontra-se acima da média pela NBR 5356.

6.8.2 Funcionalidades do programa para procedimentos de manutenção semestrais

Todas as janelas permitem que o usuário receba o *feedback* do estado do transformador para cada dado inserido, bem como, na maioria das vezes, o aumento do dado inserido com relação ao ensaio anterior. Os gráficos dos *dados obtidos x data da manutenção* também estão disponíveis na janela de consulta.

Em casos onde existe um limite que estabelece a anormalidade do resultado de um ensaio, e ao mesmo tempo, um limite superior, que estabelece o estado crítico do transformador, adotou-se uma maneira de se medir o quão próximo está o transformador do estado crítico. Trata-se da Porcentagem de Anormalidade dada pela Equação 16, e informada ao usuário no *feedback*. Assim, o usuário pode saber o quanto está perto do valor obtido no ensaio atingir o limite crítico.

$$\%Anorm. = \frac{100x(\text{valor medido} - \text{valor anormal})}{\text{valor crítico} - \text{valor anormal}} \quad (16)$$

6.8.3 Funcionalidades do programa para procedimento de manutenção anual

O único procedimento anual de manutenção tratado neste programa é a temperatura dos enrolamentos do transformador. A consulta permite saber se os valores obtidos de temperatura estão acima do recomendado pela NBR 5356.

6.8.4 Funcionalidades do programa para procedimentos de manutenção quinquenais

A janela de manutenção de resistência de isolamento permite que os dados dos ensaios sejam armazenados em cada passo da manutenção, com os cálculos automáticos dos índices de absorção e polarização, e a informação da necessidade ou não de um ensaio a 25% da tensão de teste. O *feedback* nesse caso, retorna a condição de isolação, e as providências a serem tomadas caso a resistência de isolamento não atinja o mínimo esperado ou apresente redução de 50% ou mais com relação ao último ensaio. Os gráficos dos índices de absorção e polarização e das resistências medidas no ensaio podem ser gerados na janela de consulta.

A janela de manutenção da relação de transformação permite consultar se o resultado dos ensaios estão acima do recomendável de discrepância com o valor nominal e a providência a ser tomada nesse caso.

A janela de manutenção do fator de potência dos ensaios com relação as buchas do transformador permite a identificação de cada bucha de transformador pelo nome, o cadastro de seu fator de potência quando nova, e o cadastro do fator de potência medido nos ensaios de manutenção. A consulta retorna o estado da bucha quanto a sua deterioração e contaminação.

7 RESULTADOS OBTIDOS

7.1 Relatórios analisados

O primeiro passo do trabalho envolveu a captação de resultados laboratoriais e de ensaios de manutenção de transformadores. Conseguiu-se relatórios de ensaios físico-químicos e da medição de resistência de isolamento de transformadores feitos por engenheiros e empresas especializados na manutenção de transformadores. A origem dos dados é sigilosa.

Nos ensaios físico-químicos constam os resultados dos ensaios de comparação por cores e aspecto visual do óleo, índice de neutralização, tensão interfacial e umidade. Os ensaios de fator de potência do óleo foram à temperatura de 100°C, e não puderam ser analisados no programa de manutenção, visto ele ser projetado para receber análises de fator de potência feitos à temperatura de 20°C. Os ensaios de rigidez elétrica não puderam ser adotados, pois o método adotado no ensaio (NBR 6869) difere do método proposto para o trabalho. Esses relatórios estão disponíveis no “Anexo A – Relatório de análises físico-químicas do óleo de transformadores”.

Quanto aos ensaios de medição da resistência de isolamento em transformadores a óleo, que fornecem a segunda base de comparação para análise do programa, os relatórios fornecem a medição das resistências de isolamento em cada fase do transformador em três ensaios: isolação entre AT e BT, isolação entre AT e Terra, e isolação entre BT e Terra. Os tempos de aplicação da tensão de teste são mostrados no relatório; foi anotado apenas um tempo de teste para uma medição, e não as medidas respectivas de medição de resistência de isolamento para os tempos de 30 segundos, 60 segundos e 10 minutos, que permitem uma melhor compreensão das condições do isolamento. Os relatórios de resistência de isolamento estão disponíveis no “Anexo B – Relatório de ensaios de medição da resistência de isolamento de transformadores”.

Uma outra diferença importante a ser notada é que a correção das resistências para a temperatura de 75°C ocorre nos relatórios não com relação

às resistências medidas, mas com relação à resistência mínima calculada. Para efeitos de comparação, as conclusões não são afetadas nesse caso.

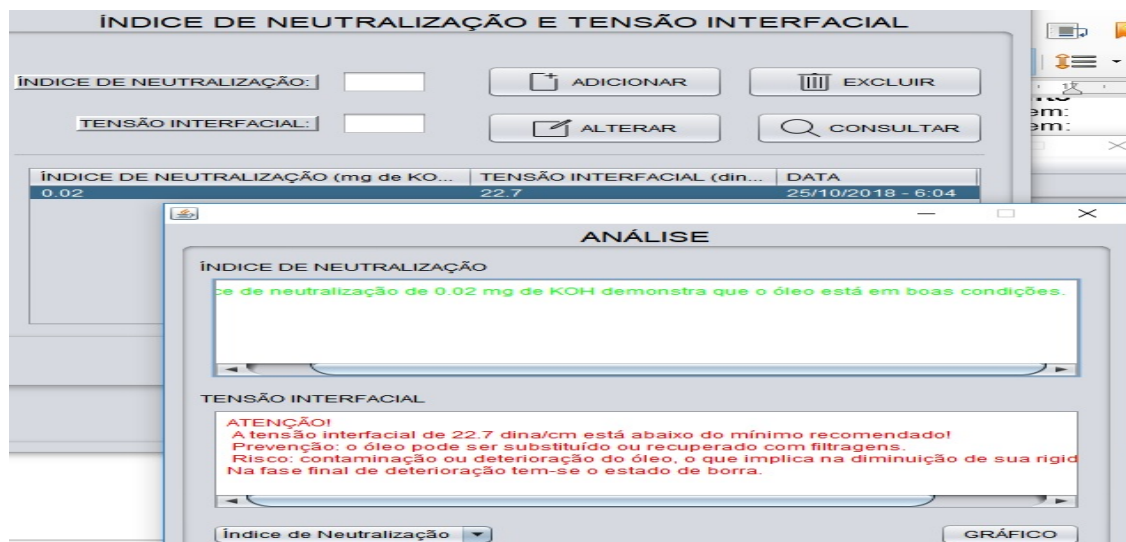
7.2 Teste de dados de relatórios no programa

7.2.1 Teste de dados de ensaios físico-químicos

Os dados de ensaios físico-químicos contidos no “Anexo A – Relatório de análises físico-químicas do óleo de transformadores” foram analisados no programa, seguindo seus métodos e consultas. Com relação à análise da coloração do óleo, o programa retornou resultado similar ao do relatório anexado, informado a coloração do óleo dentro dos padrões aceitáveis.

Acerca do índice de neutralização e da tensão interfacial, o programa interpretou diferentemente o resultado do relatório para a tensão interfacial, pois o programa considerou o limite proposto de 27 dina/cm. O relatório considerava um valor inferior (20 dina/cm) e, por isso, considerou aceitável a condição do óleo. A Figura 8 mostra o comportamento do programa desenvolvido nesse caso. A análise da umidade retornou como resultado a aprovação do óleo, considerando sua classe de tensão.

Figura 8 – Resultado obtido com o programa para Índice de neutralização e tensão interfacial



7.2.2 Teste de dados de ensaios de resistência de isolamento

Os dados contidos no “Anexo B – Relatório de ensaios de medição da resistência de isolamento de transformadores” foram inseridos no programa retornando os resultados mostrados nas Figuras 9 e 10. A Figura 9 mostra os resultados relativos ao transformador da Cabine 02 de 500 kVA, enquanto a Figura 10 mostra os resultados relativos ao transformador da Cabine 02 de 300 kVA. Ambos tiveram suas resistências de isolamento acima do mínimo recomendável, sendo que o programa calculou com precisão a resistência mínima de isolamento em cada caso. A condição de isolação foi simulada com valores que tornavam todas excelentes conforme trata a Tabela 8, pois não havia valores de resistências de isolamento para os tempos de 60 segundos e 10 minutos. O programa encontrou as resistências mínimas de isolamento do ensaio AT/Terra e BT/Terra para o trafo de 500 kVA: respectivamente os valores de 21,942 Megaohms e 0,6042 Megaohms. Para o trafo de 300 kVA os valores encontrados para os ensaio AT/Terra e BT/Terra foram, respectivamente, 28,327 Megaohms e, aproximadamente, 0,78 Megaohms.

Figura 9 – Resultado obtido com o programa para a resistência de isolamento no trafo de 500 kVA

CONDIÇÃO DE ISOLAÇÃO	CONDIÇÃO DE ISOLAÇÃO
<p>ATENÇÃO! A condição de isolação é excelente.</p>	<p>ATENÇÃO! A condição de isolação é excelente.</p>
RESISTÊNCIA MÍNIMA	RESISTÊNCIA MÍNIMA
<p>A resistência de isolamento está acima do mínimo aceitável de 21.942 Megaohms.</p>	<p>A resistência de isolamento está acima do mínimo aceitável de 0.6042 Megaohms.</p>

Fonte: Autoria própria (2018). O Lado esquerdo mostra o ensaio de AT/Terra; o direito mostra o ensaio BT/Terra.

Figura 10 – Resultado obtido com o programa para a resistência de isolamento no trafo de 300 kVA

CONDIÇÃO DE ISOLAÇÃO	CONDIÇÃO DE ISOLAÇÃO
<p>ATENÇÃO! A condição de isolação é excelente.</p>	<p>ATENÇÃO! A condição de isolação é excelente.</p>
RESISTÊNCIA MÍNIMA	RESISTÊNCIA MÍNIMA
<p>A resistência de isolamento está acima do mínimo aceitável de 28.327 Megaohms.</p>	<p>A resistência de isolamento está acima do mínimo aceitável de 0.780019 Megaohms.</p>

Fonte: Autoria própria (2018). O Lado esquerdo mostra o ensaio de AT/Terra; o direito mostra o ensaio BT/Terra.

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O uso do programa em linguagem Java proposto provou-se útil na gestão da manutenção de transformadores, evitando possíveis erros relativos ao processo e facilitando a manutenção por parte de técnicos especializados ou responsáveis.

O programa foi testado com a inserção de dados para o aspecto visual do óleo, sua coloração, índice de neutralização, tensão interfacial e umidade, apresentando resultados satisfatórios. O mesmo aconteceu com relação aos ensaios de resistência de isolamento: o programa foi capaz de calcular a resistência mínima de isolamento, receber todas as resistências, fazer a equivalência destas para a temperatura de 75°C, e retornar o resultado do ensaio. Infelizmente não foi possível testar outras funcionalidades do programa pela dificuldade em realizar ensaios de manutenção com transformadores ou de até mesmo conseguir dados desses ensaios.

Os próximos passos envolvem testar a efetividade do programa em todas as suas funcionalidades, e não somente nas funcionalidades a que esse trabalho testou, visando prová-lo em campo, já que sua importância está em seu uso simples e satisfatório no meio industrial ou empresarial.

Sua aprovação e uso pode representar um passo importante para o acompanhamento e gestão da manutenção pelas instituições proprietárias de transformadores, paralelamente a empresas e laboratórios especializados em manutenção, principalmente no que diz respeito aos ensaios mais simples.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5356-1**: Transformadores de potência Parte 1: Generalidades. Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5356-2**: Transformadores de potência Parte 2: Aquecimento. Rio de Janeiro, 2007.

BECHARA, R. **Análise de falhas de transformadores de potência**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

FINOCCHIO, M. A. F.; DESTRO, J. F. Z.; FERREIRA, Jeferson G. **Ruído em transformadores de distribuição da classe 15kv em função da indução do núcleo**. In: CONGRESSO TÉCNICO CIENTÍFICO DA ENGENHARIA E DA AGRONOMIA CONTECC' 2015. 2015, Fortaleza. Acesso em: 24 de out. 2018.

FITZGERALD, Arthur E.; KINGSLEY JR, Charles; UMANS, Stephen D. **Máquinas elétricas**: com introdução à eletrônica de potência. 6.ed. Porto Alegre: Bookman, 2006.

FONSECA, Jackson F. **Elementos de manutenção em transformadores de potência**. 2014. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2014.

LUBRICATION-MANAGEMENT. **A manutenção dos transformadores através da inspeção visual**. 19 jan. 2017. Acesso em: 06 nov. 2017.

MILASCH, Milan. **Manutenção de transformadores em líquido isolante**. São Paulo: Edgard Blücher, 1998.

NASCIMENTO, Cleiton M. **Análise de ensaio de fator de potência em transformadores de corrente com variação de frequência utilizando o instrumento de testes CPC-100**. 2015. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Pará, Tucuruí, 2015.

NETBEANS. **Netbeans IDE – a forma mais inteligente e rápida de codificar**. Acesso em: 24 de out. 2018.

PACITO, Antonio et al. **Solução ambiental para retenção de vazamento de óleo de transformadores**. Acesso em: 24 de out. 2018.

PAULINO, M. E. de C. Avaliação em campo de buchas em transformadores de potência – fator de dissipação a 60 Hz é suficiente? **Revista CIER**, n. 60, Buenos Aires, set. 2011.

PAULINO, M. E. de C. **Ensaio de ensaios de resistência de isolamento e de rigidez dielétrica**. Acesso em: 25 de out. 2018.

PENA, M. C. M. **Falhas em transformadores de potência: uma contribuição para análise, definições, causas e soluções**. 2003. Dissertação (Mestrado em Ciências da Engenharia) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2003.

PERRY, Steven. **Fundamentos da linguagem Java**. 2016. Acesso em: 24 de out. 2018.

PLATH, Cornelius; ANGLHUBER, Martin. **Medições para diagnóstico em transformadores de potência**. 2016. Acesso em: 24 de out. 2018.

ROSA, Eduardo de S. et al. Estudo do ruído gerado por transformadores em subestações. **Revista Ciências do Ambiente On-Line**, v. 2, n. 1, 2006.

SANTOS, Edmilson O. **Determinação do grau de polimerização em papel isolante através da espectroscopia no infravermelho próximo e calibração multivariada**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2012.

VÁZQUEZ MORÁN, Angel. **Manutenção elétrica industrial**. São Paulo: Ícone, 1996.

VÓRTEX EQUIPAMENTOS. **Teste de resistência de isolamento**. Acesso em: 24 de out. 2018.

WEG. **Manual transformadores a óleo até 4000kVA**. São Paulo, 2010. Acesso em: 24 de out. 2018.

WEG. **Tintas. 2016**. Acesso em: 24 de out. 2018.

APÊNDICE A – Conexão com banco de dados

Código em linguagem Java para a conexão com o banco de dados:

```
package gestaoetrafo.conexao;

import java.sql.Connection;
import java.sql.DriverManager;
import java.sql.PreparedStatement;
import java.sql.ResultSet;
import java.sql.SQLException;

public class Conexao {

    private static final String DRIVE = "com.mysql.jdbc.Driver";
    private static final String URL = "jdbc:mysql://localhost/gestaoetrafo";
    private static final String USUARIO = "root";
    private static final String SENHA = "mysql";

    public static Connection getConnection() {
        try {
            Class.forName(DRIVE);
            return DriverManager.getConnection(URL, USUARIO, SENHA);
        }
        catch (ClassNotFoundException | SQLException ErroSql) {
            throw new RuntimeException("Erro na conexão: "+ ErroSql);
        }
    }

    public static void closeConnection(Connection con) {
        try {
            if(con !=null){
                con.close();
            }
        } catch (SQLException ErroSql) {
```

```
throw new RuntimeException("Erro não foi possível fechar a conexão: "+
ErroSql);
}
}
public static void closeConnection(Connection con, PreparedStatement pstm) {
closeConnection(con);
try {
if(pstm !=null){
pstm.close();
}
} catch (SQLException ErroSql) {
throw new RuntimeException("Erro não foi possível fechar o
PreparedStatement: "+ ErroSql);
}
}
public static void closeConnection(Connection con, PreparedStatement pstm, ResultSet
rs) {
closeConnection(con, pstm);
try {
if(rs !=null){
rs.close();
}
} catch (SQLException ErroSql) {
throw new RuntimeException("Erro não foi possível fechar o ResultSet: "+
ErroSql);
}
}
}
```


APÊNDICE B – Modelagem das variáveis da tabela arquivo

Código em linguagem Java para a modelagem das variáveis da tabela arquivo:

```
package modelo;

public class Arquivo {

    private int idArquivo;
    private String transformador;
    private float clastensao;
    private float potencia;
    private float f;
    private String insercao;

    public int getIdArquivo() {
        return idArquivo;
    }

    public void setIdArquivo(int idArquivo) {
        this.idArquivo = idArquivo;
    }

    public String getTransformador() {
        return transformador;
    }

    public void setTransformador(String transformador) {
        this.transformador = transformador;
    }

    public float getClastensao() {
        return clastensao;
    }
}
```

```
public void setClastensao(float clastensao) {  
    this.clastensao = clastensao;  
}
```

```
public float getPotencia() {  
    return potencia;  
}
```

```
public void setPotencia(float potencia) {  
    this.potencia = potencia;  
}
```

```
public float getF() {  
    return f;  
}
```

```
public void setF(float f) {  
    this.f = f;  
}
```

```
public String getInsercao() {  
    return insercao;  
}
```

```
public void setInsercao(String insercao) {  
    this.insercao = insercao;  
}  
}
```

APÊNDICE C – Adição de dados na “tabela arquivo” do banco de dados

Código em linguagem Java para a adição de dados na “tabela arquivo”:

```
public void adicionar(Arquivo arquivo) {

    Connection con = Conexao.getConnection();
    PreparedStatement pstmt = null;

    try {
        String sql = "insert into arquivo (transformador, clastensao, potencia, f, insercao)
values (?, ?, ?, ?, ?)";
        pstmt = con.prepareStatement(sql);

        pstmt.setString(1, arquivo.getTransformador());
        pstmt.setFloat(2, arquivo.getClastensao());
        pstmt.setFloat(3, arquivo.getPotencia());
        pstmt.setFloat(4, arquivo.getF());
        pstmt.setString(5, arquivo.getInsercao());

        pstmt.execute();

    } catch (SQLException ErroSql) {
        JOptionPane.showMessageDialog(null, "Erro ao adicionar: "+ErroSql,"Erro",
JOptionPane.ERROR_MESSAGE);
    }

    finally{

        Conexao.closeConnection(con, pstmt);

    }
}
```

ANEXO A – Relatório de análises físico-químicas do óleo de transformadores

ANÁLISE FÍSICO QUÍMICA					
ENSAIOS	UNIDADE	MÉTODO ENSAIO	VALOR MEDIDO	ANÁLISE ANTERIOR	REFERÊNCIA
ASPECTO VISUAL	-	VISUAL	LÍMPIDO	-	LÍMPIDO
COR	-	ASTMD-1500	1,0	-	4,0 MAXIMO
RIGIDEZ DIELÉTRICA	kV/25 mm	NBR 6869	49,0	-	30,0 MÍNIMO
DENSIDADE A 20/40 °C	-	NBR 7148	0,8540	-	0,9000 MAXIMO
ÍNDICE NEUTRALIZAÇÃO	mg KOH/g	MB - 101	0,02	-	0,25 MAXIMO
FATOR POTENCIA 100 °C	%	ASTM D-924	7,81	-	15,0 MAXIMO
TENSÃO INTERFACIAL	DINA / cm	NBR 6234	22,7	-	20,0 MÍNIMO
TEOR ÁGUA	PPM	NBR 5755	28,0	-	35,0 MAXIMO
PONTO DE FULGOR	°C	MB - 50	-	-	130 MÍNIMO
PONTO DE COMBUSTÃO	°C	MB - 50	-	-	-
SERVIÇO EXECUTADO	COLETA (X) - FILTRAGEM () - SUBSTITUIÇÃO ()				
CONCLUSÃO	* EQUIPAMENTO EM CONDIÇÕES NORMAIS DE OPERAÇÃO.				

ANEXO B – Relatório de ensaios de medição da resistência de isolamento de transformadores

3) Isolação entre AT e BT do trafo nº 11672 de 500kVA

Registro n.	Condutor	Tensão de Teste	Tempo de aplicação	Res. De isolamento
269	Fase R vermelha	0,5kV	1min	356 GΩ
270	Fase S amarela	0,5kV	1min	326 GΩ
271	Fase T verde	0,5kV	45'	209 GΩ

4) Isolação entre AT e Terra do trafo nº 11672 de 500kVA

Registro n.	Condutor	Tensão de Teste	Tempo de aplicação	Res. De isolamento
273	Fase R vermelha	0,5kV	30'	2,86 GΩ
274	Fase S amarela	0,5kV	30'	2,91 GΩ
275	Fase T verde	0,5kV	30'	2,83 GΩ

5) Isolação entre BT e Terra do trafo nº 11672 de 500kVA

Registro n.	Condutor	Tensão de Teste	Tempo de aplicação	Res. De isolamento
	Fase X1	0,5kV	30'	40,0 GΩ
281	Fase X2	0,5kV	30'	42,2 GΩ
	Fase X3	0,5kV	30'	43,0 GΩ

1) Isolação entre AT e Terra do trafo de 300kVA

Registro n.	Condutor	Tensão de Teste	Tempo de aplicação	Res. De isolamento
283	Fase R vermelha	0,5kV	30'	22,10 GΩ
285	Fase S amarela	0,5kV	30'	23,10 GΩ
286	Fase T verde	0,5kV	30'	23,60 GΩ

2) Isolação entre BT e Terra do trafo de 300kVA

Registro n.	Condutor	Tensão de Teste	Tempo de aplicação	Res. De isolamento
287	Fase X1	0,5kV	30'	9,68 GΩ
288	Fase X2	0,5kV	30'	10,70 GΩ
290	Fase X3	0,5kV	30'	11,80 GΩ
291	X0	0,5kV	30'	11,50 GΩ

3) Isolação entre AT e BT do trafo de 300kVA

Registro n.	Condutor	Tensão de Teste	Tempo de aplicação	Res. De isolamento
293	H1/X1	0,5kV	30'	27,90 GΩ
294	H2/X2	0,5kV	30'	28,50 GΩ
295	H3/X3	0,5kV	30'	29,40 GΩ

CABINE 02 - TRAF0 500kVA

Teste	Tensão (kV)	Potência (kVA)	R_m calculada (Mohm)	Fator de correção p/ temp. de 27 ^o C	R_{m27} calculada (Mohm)	Resist. Isol. Medida (Mohm)
AT/Terra	13,8	500	21,94	27,90	612,18	2.830
BT/Terra	0,38	500	0,60	27,90	16,86	40.000

Conclusão para AT: Comparando com valor medido na fase T (valor mínimo entre as fases) de 2,83GΩ e o valor calculado de 612,18MΩ, conclui-se que a resistência de isolamento entre as fases e o terra encontra-se dentro dos valores recomendados.

Conclusão para BT: Comparando com valor medido na fase X1 (valor mínimo entre as fases) de 40GΩ e o valor calculado de 16,86MΩ, conclui-se que a resistência de isolamento entre as fases e o terra encontram-se dentro dos valores recomendados.

CABINE 02 - TRAF0 300kVA

Teste	Tensão (kV)	Potência (kVA)	R_m calculada (Mohm)	Fator de correção p/ temp. de 27 ^o C	R_{m27} calculada (Mohm)	Resist. Isol. Medida (Mohm)
AT/Terra	13,8	300	28,33	27,90	790,32	22.100
BT/Terra	0,38	300	0,78	27,90	21,76	9.800

Conclusão para AT: Comparando com valor medido na fase R (valor mínimo entre as fases) de 22,1GΩ e o valor calculado de 790,32MΩ, conclui-se que a resistência de isolamento entre as fases e o terra encontra-se dentro dos valores recomendados.

Conclusão para BT: Comparando com valor medido na fase X1 (valor mínimo entre as fases) de 9,80GΩ e o valor calculado de 21,76MΩ, conclui-se que a resistência de isolamento entre as fases e o terra encontram-se dentro dos valores recomendados.