

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ENGENHARIA DE ENERGIA

**ESTUDO DE CASO DO REPARO DE UM TRANSFORMADOR DE POTÊNCIA
UTILIZANDO FERRAMENTAS DA QUALIDADE PARA ANÁLISE DE FALHAS**

por

Leonardo Rossi Penha

Monografia apresentada à Comissão de Graduação do Curso de Engenharia de Energia da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Bacharel em Engenharia de Energia.

Porto Alegre, julho de 2024



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
ENGENHARIA DE ENERGIA

ESTUDO DE CASO DO REPARO DE UM TRANSFORMADOR DE POTÊNCIA
UTILIZANDO FERRAMENTAS DA QUALIDADE PARA ANÁLISE DE FALHAS

por

Leonardo Rossi Penha

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
BACHAREL EM ENGENHARIA DE ENERGIA.
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA

Prof. Roberto Chourry Leborgne
Coordenador do Curso de Engenharia de Energia

Orientador: Prof. Dr. Luiz Tiarajú dos Reis Loureiro

Banca examinadora:

Prof. Dr. Luiz Tiarajú dos Reis Loureiro – DELET / UFRGS

Eng. Esp. Cássio Marques Somavilla - WEG

Prof. Dr. Flávio Antonio Becon Lemos – DELAE / UFRGS

Porto Alegre, Julho de 2024.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Marco Aurélio e Giane, que sempre me incentivaram e apoiaram, desde os estudos para o vestibular, até os momentos de ausência devido à mudança para a capital. Mais do que isso, por trazer calma nos momentos de estresse e por não me deixarem desacreditar do meu potencial.

Agradeço às minhas irmãs, Larissa e Laura, por toda a paciência durante os períodos de provas e estudos na pandemia, quando a casa parecia pequena para tantas videochamadas.

À minha namorada, Manuela, por ter sido uma das peças principais durante a etapa final de graduação, estando sempre ao meu lado, trazendo amor e suporte nos momentos difíceis e, principalmente, pelo incentivo para que eu alcance os meus objetivos.

Agradeço aos colegas e amigos da Engenharia da UFRGS pelas risadas e estudos para as provas, em especial ao Felipe Ranzan, pela parceria desde o primeiro dia de aula até o final da graduação. Tenho certeza que será uma pessoa que levarei comigo para a vida.

Aos meus colegas de trabalho, que contribuíram de forma muito enriquecedora para a elaboração deste estudo e, também, da minha formação como profissional. Por fim, agradeço ao Professor Tiarajú, por ter me orientado e acompanhado na elaboração deste estudo.

RESUMO

Transformadores de potência são equipamentos responsáveis por interligar o sistema elétrico brasileiro, abrangendo desde a geração da energia elétrica até a sua distribuição para os consumidores finais, podendo ser um equipamento de transmissão, subtransmissão e distribuição. Assim, interrupções não-programadas causadas por falhas nesse equipamento são um risco para o correto funcionamento da rede elétrica básica e indústrias. Na indústria, a utilização de ferramentas da qualidade e controle de manutenção de equipamentos reduzem as paradas indesejadas e o retrabalho de peças não-conformes, tornando o sistema produtivo mais eficiente e rentável. A análise de falhas é primordial para garantir que a avaria no sistema seja sanada e identificada de forma ágil para manter os padrões estabelecidos de operação. O controle e conhecimento da causa do problema são essenciais para aprimorar o projeto do equipamento visando mitigar, cada vez mais, danos e falhas na operação. Este trabalho apresenta os princípios do transformador de potência, as suas principais falhas, métodos de identificação e desenvolve, através das ferramentas de qualidade, uma metodologia para garantir a reconstrução de transformadores que foram avariados durante a operação, de modo a que estejam de acordo com os requisitos de qualidade desejados. As ferramentas utilizadas foram 5W1H, 5 Porquês e Diagrama de Ishikawa, por sua vez, foram sintetizadas em um relatório A3. Também é apresentado estudo de caso de um processo de recuperação de um transformador elevador trifásico de 5000 kVA e tensão nominal de 4,16 kV – 34,5 kV.

Palavras-chave: Transformadores, ferramentas da qualidade, análise de falhas, reconstrução.

ABSTRACT

Power transformers are critical components responsible for interconnecting the Brazilian electrical system, encompassing the entire process from electricity generation to its distribution to end consumers. They can serve as transmission, sub-transmission, and distribution equipment. Consequently, unplanned interruptions due to failures in these transformers pose a risk to the proper functioning of the basic electrical grid and industries. In the industrial sector, the use of quality tools and equipment maintenance control reduces unwanted downtime and rework of non-conforming parts, thus making the production system more efficient and profitable. Failure analysis is essential to ensure that system faults are quickly identified and resolved to maintain established operational standards. Control and understanding of the root cause of issues are crucial to improving equipment design, aiming to increasingly mitigate operational damages and failures. This study presents the principles of power transformers, their main failures, identification methods, and, through quality tools, develops a methodology to ensure the reconstruction of transformers damaged during operation, aligning with the desired quality standards. The tools used include 5W1H, the Five Whys, and the Ishikawa Diagram, which were synthesized into an A3 report. Additionally, a case study of the recovery process of a 5000 kVA three-phase step-up transformer with a nominal voltage of 4.16 kV – 34.5 kV is presented.

Keywords: Transformers, quality tools, failure analysis, reconstruction.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	7
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	7
2.2 - Componentes e fabricação.....	9
2.2.1 - Núcleo.....	9
2.2.2 - Enrolamentos.....	10
2.2.3 - Tanque Principal e Expansão.....	11
2.2.5 - Ensaios.....	12
3. TIPOS DE FALHAS.....	12
3.1 - Núcleo.....	12
3.2 - Parte Ativa.....	12
3.4 - Acessórios e componentes.....	14
4. METODOLOGIA.....	15
4.1 Relatórios da Qualidade: A3.....	16
5. ESTUDO DE CASO.....	19
5.1 - Cobre e Alumínio.....	19
5.2 - Corrosão Galvânica.....	21
5.3 - Reparo do equipamento e tecnologia aplicada.....	21
6. ENSAIOS DO TRANSFORMADOR.....	23
6.1 - Relatório A3.....	25
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	29

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Partes Constituintes de um Transformador de Potência Teórico Elementar.....	8
Figura 2 – Partes Constituintes de um Transformador de Potência.....	9
Figura 3 – Perdas por histerese.....	10
Figura 4 – Estruturação de uma bobina concêntrica.....	11
Figura 5 – Esforços em bobinas concêntricas simétricas e com mesma altura.....	13
Figura 6 – Estrutura de trabalho.....	15
Figura 7 – Fluxograma de atividades.....	16
Figura 8 – Modelo Relatório A3.....	17
Figura 9 – Relatório A3 Proposto.....	18
Figura 10 – Esquema da crimpagem da luva.....	20
Figura 10 – Luvas de Crimpagem.....	22
Figura 11 – Luvas de Crimpagem.....	22
Figura 12 – A3 – Estudo de caso da recuperação do transformador.....	27

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dados do Transformador.....	19
Tabela 2 – Comparação cobre e alumínio.....	20
Tabela 3 – Gases dissolvidos em óleo isolante.....	23
Tabela 4 – Tabela de interpretação de análise de gases dissolvidos.....	24
Tabela 5 – Gases dissolvidos em óleo isolante.....	24
Tabela 6 – Gases dissolvidos em óleo isolante.....	25

1. INTRODUÇÃO

O apagão ocorrido no Amapá no dia 03 de novembro de 2020 teve como sua principal causa a falha de dois transformadores, TR1 e TR3, de 150 MVA cada um, situados na subestação Macapá, o que originou o desligamento da Usina Hidrelétrica Coaracy Nunes. Foi exposta uma falha no sistema de manutenção pois o local deveria contar com três transformadores, sendo dois para operação e um de reserva para possíveis manutenções ou operação em caso de emergência. No entanto, o transformador TR2 estava fora de operação desde dezembro de 2019 devido a um sinistro na sua bucha de 69 kV causado por curto-circuito interno monofásico. Sendo assim, quando o incidente ocorreu, não havia nenhum transformador para suprir a carga de 13 municípios do estado (ONS, 2020).

Tendo em vista a necessidade de segurança e qualidade no fornecimento de energia elétrica, é importante que se faça a recuperação de transformadores com avaria para o correto funcionamento do Sistema Interligado Nacional - SIN, no qual de acordo com Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL é previsto que haja um equipamento reserva disponível para operar em caso de um desligamento não programado ou manutenção preventiva. Segundo Bechara (2009), tais aspectos, associados a demandas crescentes, limitação de espaço, economia de materiais e classes de tensão mais altas, têm influenciado de forma decisiva no estudo de metodologias que permitam a obtenção de informações precisas sobre tipos de falhas em equipamentos, suas causas, suas consequências e medidas preventivas. Sendo assim, identificar as falhas em transformadores e criar um plano de recuperação de forma eficiente e correta, é um dos pilares para garantir o correto funcionamento deste equipamento com requisitos de qualidade e segurança operacional.

Dessa forma, este trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de uma metodologia para a criação de um plano de reparo de transformadores de potência, iniciando com a identificação das falhas por métodos como a cromatografia do óleo isolante e inspeções visuais e suas aplicações com ferramentas da qualidade. Dentre as ferramentas básicas da qualidade, segundo Custódio (2015), pode-se destacar o Diagrama de Ishikawa (Espinha de Peixe), 5 Porquês, Diagrama de Pareto, Histograma, 5W2H e o ciclo PDCA, apresentando as exigências de operação de um transformador que passa por um processo de recuperação e o modelo do plano de ação.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A utilização de transformadores de potência na rede elétrica teve seu início na Batalha das Correntes no século XIX. De acordo com Martins (2020), o confronto entre Nikola Tesla e Thomas Edison envolvia principalmente os contratos de iluminação elétrica das cidades americanas. Edison propunha a utilização de corrente elétrica contínua, mais segura, porém cara e trabalhosa, enquanto Westinghouse e Tesla defendiam a corrente alternada, mais barata e de instalação simples, mas alardeada como letal. A possibilidade de gerar eletricidade em uma localização afastada das cidades e a energia ser transmitida com uma quantidade menor de perdas, tornou o transformador um equipamento essencial para a rede elétrica, visto que a maior parte da geração de energia está em locais afastados dos grandes centros consumidores.

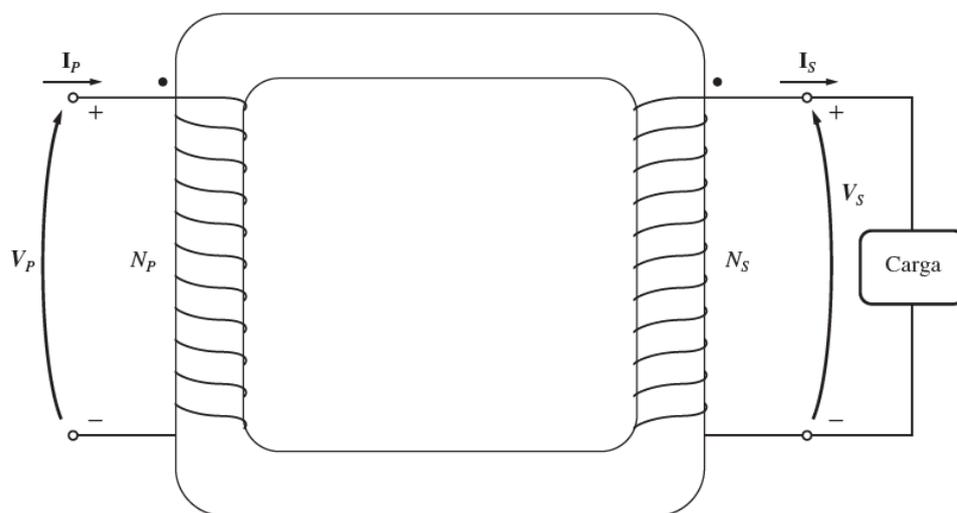
O transformador utiliza dos princípios da Lei de Faraday (CHAPMAN, 2013), a qual diz que “havendo uma variação do fluxo magnético na espira, surgirá uma força eletromotriz proporcional, também chamada de fem (força eletromotriz)”. A fem induzida é calculada como:

$$fem = N \frac{d\phi}{dt} \quad (1)$$

onde N é o número de espira e $\frac{d\phi}{dt}$ é a variação do fluxo concatenado na espira. O fluxo varia constantemente pelas espiras e geralmente está relacionado como fluxo médio.

Walter Ries (2007) define o transformador como uma bobina primária que recebe a energia elétrica numa determinada tensão e corrente e uma bobina secundária pela qual essa energia, com tensão e corrente diferentes, é transferida a uma carga. O acoplamento eletromagnético é geralmente realizado por um núcleo de material ferromagnético, que maximiza a relação entre as bobinas para uma melhor eficiência, podendo ser visualizado na Figura 1.

Figura 1 – Partes Constituintes de um Transformador de Potência Teórico Elementar



Fonte: CHAPMAN, 2013.

Os transformadores podem ser monofásicos, bifásicos e trifásicos, o que difere um do outro é a quantidade de bobinas acopladas ao núcleo e a classificação de acordo com a sua finalidade. Dessa forma tem-se:

- Transformadores de corrente (TC): transformador monofásico com o objetivo de reduzir a corrente para valores menores, normalmente de 5A, promovendo a segurança pessoal e isolando o circuito de potência do circuito de instrumentos e padronizando os valores de correntes dos dispositivos de proteção, os relés. A NBR 61869 (2021) prevê os requisitos construtivos e de dimensionamento.
- Transformadores de potencial (TP): o equipamento de potencial indutivo possui um enrolamento primário e um enrolamento secundário por meio da qual é obtida uma tensão padrão, 115V ou $115V/\sqrt{3}$. Já o transformador de potencial capacitivo é um equipamento utilizado para tensões iguais ou superiores a 138kV e possui dois conjuntos de capacitores, que posteriormente são aplicados em um transformador de potencial indutivo que irá apresentar a tensão adequada para os instrumentos, normalmente de 115V (NBR 61869, 2021). Juntamente com o transformador de corrente, esse é um equipamento de instrumentação.
- Transformadores de potência: utilizados nas subestações de distribuição, interligação e em usinas geradoras para elevar ou rebaixar as tensões.

- Autotransformadores: esse equipamento é utilizado quando há o desejo de fazer uma pequena elevação de tensão, como por exemplo de 110kV para 138kV. Nessas circunstâncias, seria um desperdício de material e excessivamente dispendioso enrolar um transformador com dois enrolamentos completos, cada um especificado para aproximadamente a mesma tensão (CHAPMAN, 2013).

O transformador de potência é constituído geralmente pelos itens a seguir que serão detalhados no decorrer deste trabalho e pode ser visualizado na Figura 2:

1. Núcleo;
2. Bobinas primárias e secundárias;
3. Tanque;
4. Conservador;
5. Buchas de Alta Tensão (AT) e Baixa Tensão (BT);
6. Comutador;
7. Acionamento do comutador;
8. Sistema de resfriamento: radiadores e moto-ventiladores;
9. Painel de proteção e controle;
10. Secador de ar;
11. Termômetros.

Figura 2 – Partes Constituintes de um Transformador de Potência



Fonte: BUSINESS CONNECTION, 2022.

2.2 - Componentes e fabricação

2.2.1 - Núcleo

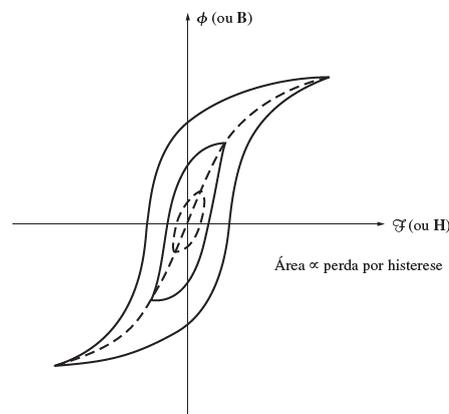
O núcleo é responsável pelo acoplamento eletromagnético entre as bobinas do primário e secundário, sendo composto por um material ferromagnético. Esse material possui uma alta permeabilidade magnética necessitando de uma força magnetomotriz reduzida para a circulação do fluxo mútuo. O material usado para a construção do núcleo de transformador utilizado para a transmissão e

distribuição de energia elétrica é uma liga de ferro-silício com grão orientado e cerca de 3% a 5% de silício (RIES, 2007).

A estrutura construtiva dos núcleos pode ser classificada em núcleo envolvido (*core type*), onde as colunas são envolvidas pelos enrolamentos, e do tipo envolvente (*shell type*), onde apenas as colunas centrais são envolvidas com enrolamentos. Para reduzir as perdas ocasionadas pela corrente de Foucault, utiliza-se geralmente chapas finas de ferro silício, cortadas em um ângulo de 45° nos cantos para reduzir a intensidade das correntes magnetizantes e maiores perdas magnéticas, dispostas de modo que os entreferros sejam localizados em posições diferentes no núcleo.

Outra perda encontrada no núcleo é a perda por histerese, sendo definida por Chapman (2013) como a energia necessária para realizar a reorientação dos domínios a cada ciclo de uma corrente alternada aplicada ao núcleo. A Figura 3 representa graficamente o comportamento da perda, no qual B é a densidade de fluxo que passa pelas espiras e H a intensidade do campo magnético no núcleo.

Figura 3 – Perdas por histerese



Fonte: CHAPMAN, 2013.

2.2.2 - Enrolamentos

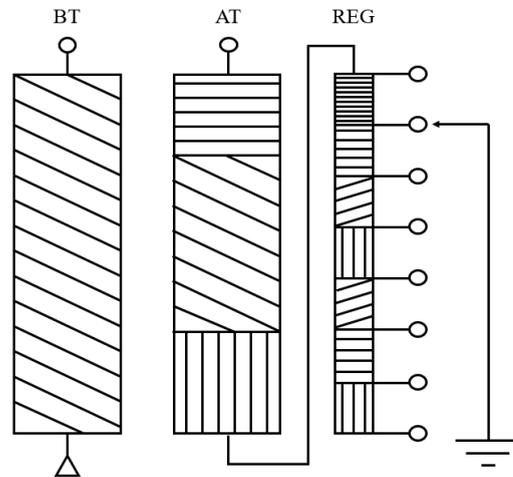
Uma estrutura primordial para o funcionamento do transformador é denominada parte ativa, sendo constituída pelo núcleo, visto anteriormente, e pelos enrolamentos primários e secundários. Os enrolamentos podem ser considerados a parte principal do equipamento pois são essenciais para um bom funcionamento e tem o maior custo de produção. As bobinas, como são chamadas, podem ser classificadas pela sua distribuição de enrolamentos, sendo concêntricas ou intercaladas, e também pelo seu aspecto construtivo, podendo ser hélices ou discos. Além disso, a importância do isolamento adequado das bobinas é um dos fatores essenciais para o projeto, podendo ser isoladas por papel ou envernizadas.

O isolamento entre as bobinas e o núcleo é realizado por um cilindro de papel isolante que serve como base para a fabricação. Uma camada de papel isolante é instalada entre os enrolamentos. Por fim, como há a passagem de uma corrente elétrica e ocorre o aquecimento dos enrolamentos, as espiras podem ser afastadas por um papel isolante de maior resistência que cria canais para a passagem do óleo e, conseqüentemente, garante o isolamento e o resfriamento das bobinas.

No processo de fabricação, tanto as bobinas de AT quanto as de BT são fabricadas paralelamente para diminuir a exposição dos enrolamentos à umidade e poeira, que podem causar avarias quando elas são energizadas. Após a finalização da bobina, a mesma é colocada dentro de uma estufa onde é realizado um tratamento térmico cujo objetivo principal é a extração da umidade do material isolante.

Geralmente as bobinas são concêntricas e possuem o seguinte aspecto estrutural representado na Figura 4.

Figura 4 – Estruturação de uma bobina concêntrica



Fonte: AUTOR.

Na figura 4 é exemplificado que os enrolamentos primários, ou seja, aqueles ligados à alta tensão, são fabricados de forma que envolvam o enrolamento secundário de baixa tensão para uma maior economia no comprimento do condutor. Além disso, pode haver terminais intermediários que possibilitam que o transformador opere com diferentes níveis de tensão, os quais são chamados de *taps* e utilizam de um comutador para realizar a transição entre eles.

2.2.3 - Tanque Principal e Expansão

A parte ativa é inserida dentro de um tanque de aço que serve como recipiente para o óleo isolante, estrutura essa que também serve como proteção contra impactos mecânicos e umidade, além de garantir as distâncias elétricas entre a parte ativa e as buchas. Também serve para proteger o núcleo e garantir a segurança aos seres vivos. As paredes do tanque podem possuir uma blindagem magnética para garantir que não haja um aumento de temperatura em virtude da circulação de correntes parasitas geradas pelas bobinas. O tanque também possui estruturas chamadas de “canecos”, onde ocorre a fixação das buchas, e os TCs, que realizam a medição de corrente no equipamento.

O tanque de expansão, também chamado de “conservador”, é um cilindro de aço com uma bolsa de borracha interna e está localizado acima do tanque principal. A funcionalidade desse item é auxiliar o tanque principal durante as expansões no volume de óleo que ocorrem devido ao aumento da temperatura do transformador. Além disso, a tubulação que interliga o tanque principal e o conservador possui o relé Buchholz responsável pela detecção de gases dissolvidos no óleo.

2.2.4 - Buchas

As buchas são dispositivos que garantem o isolamento dos condutores quando os mesmos passam pela tampa ou pelas paredes do tanque principal. As buchas podem ser classificadas de acordo com a sua tensão nominal, material e meio isolante, seja ele óleo ou resina. De acordo com Silva (2007), buchas capacitivas dos transformadores utilizam meios isolantes líquidos, enquanto buchas com isoladores de porcelana são normalmente empregadas em aplicações ao ar livre e com resina para conexões abrigadas.

2.2.5 - Ensaaios

Os ensaios realizados na fábrica verificam os parâmetros calculados na parte de projeto dos transformadores, as especificações do cliente e as obrigatoriedades prescritas na Norma 5356 (2019). Os ensaios podem ser classificados em Ensaaios de Rotina e Ensaaios de Tipo. Abaixo, segue um breve resumo sobre as medições realizadas e que posteriormente serão aprofundadas na seção de identificação de falhas.

Os Ensaaios de Rotina contemplam a resistência dos enrolamentos e de isolamento, relação de transformação, perdas em vazio, impedâncias de curto-circuito, ensaios de óleo isolante, impulsos de manobra, entre outros. Já nos Ensaaios de Tipo, são verificados o nível de ruído, elevação da temperatura, análise do óleo e resposta em frequência e possíveis ensaios requisitados pelo cliente.

3. TIPOS DE FALHAS

Nesta seção serão especificados os tipos de falhas que se apresentam em transformadores de potência durante a sua operação, especificando a localização do equipamento avariado, os aspectos de identificação e causas raízes. A divisão será de acordo com os componentes do equipamento. Bechara (2009) define falha como um evento súbito, cujo resultado é o desligamento do transformador através da atuação das proteções automáticas da subestação ou mesmo em eventos catastróficos onde nem mesmo as proteções têm condições de extinguir a falha.

3.1 - Núcleo

Sobretensões Temporárias: são aquelas que se caracterizam pelo aumento da tensão fase-fase ou fase-terra de um sistema, de longa duração, geralmente da ordem de milissegundos a vários segundos, sendo fracamente ou não amortecidas (DONG, 2001). O núcleo ferromagnético é o principal fator nesse tipo de falha, pois o seu objetivo é acoplar as bobinas e obter o fechamento do circuito magnético. Como o núcleo geralmente compõe-se de chapas finas de silício, o seu custo de produção é elevado. Dessa forma, os fabricantes buscam otimizar o seu custo e se aproximar do valor limite de fluxo magnético suportável, com tensão nominal.

Com sobretensões, o núcleo tende a saturar pois se comporta como um indutor não-linear, o que gera um aumento na sua temperatura. As consequências do aumento de temperatura são: redução da vida útil do sistema de isolamento, óleo, papel e papelão e, conseqüentemente, na vida útil do transformador. Além disso, o aumento da temperatura pode ocasionar um aumento da pressão interna do equipamento e deterioração da tinta externa, que pode resultar em uma oxidação no tanque. Ressalta-se que esse caso é incomum, pois o transformador possui um sistema de refrigeração e o equipamento precisaria operar por longos períodos nessa condição para aquecer a massa de material isolante.

As causas de sobretensões temporárias definidas por Bechara (2009) são:

- Ferro-ressonância: ressonância que envolve o transformador e equipamentos capacitivos, manifestando-se de acordo com as condições de operação;
- Ressonância a uma frequência em particular: quando as reatâncias indutivas e capacitivas forem similares;
- Rejeição de carga: quando há uma retirada de grandes cargas do sistema alimentado pelo transformador.

3.2 - Parte Ativa

- I. Deterioração dos materiais isolantes

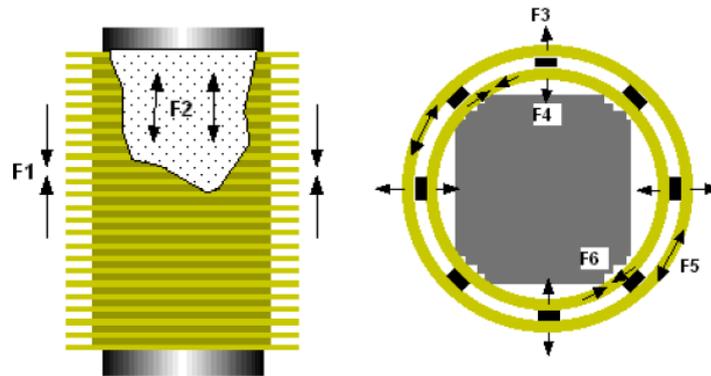
A parte ativa é composta principalmente de materiais celulósicos que são utilizados para validar as distâncias elétricas especificadas durante o projeto, além de servir como isolante dos demais componentes do equipamento. A diminuição do grau de polimerização está diretamente associada à quebra das cadeias celulósicas que compõem estes materiais, devido à ação de fenômenos inerentes ao funcionamento normal de transformadores que são de natureza térmica, oxidativa e hidrolítica (BECHARA, 2010). Sendo assim, a vida útil do transformador depende diretamente de um grau de polimerização adequado para o seu funcionamento, pois quanto maior o período de uso do equipamento em temperaturas maiores do que o projetado, maior será a degradação do material isolante celulósico, do papel e do papelão.

II. Deformação mecânica dos enrolamentos

Os esforços mecânicos nos enrolamentos sob correntes de operação nominais são relativamente pequenos. No entanto, sob condições de curto-circuito, e especialmente num curto-circuito assimétrico, os esforços mecânicos, que são proporcionais ao quadrado da corrente, são grandes e até mesmo destrutivos caso não forem considerados no projeto mecânico de fixação das bobinas (RIES, 2007).

Na Figura 5, há uma representação dos esforços mecânicos das bobinas em operação.

Figura 5 – Esforços em bobinas concêntricas simétricas e com mesma altura



Fonte: BECHARA, 2010.

III. Sobretensões de manobra

São resultados do chaveamento e faltas do sistema elétrico, que criam uma frente de onda muito rápida e de curta duração. O transformador de potência sofre diretamente quando ocorre esse tipo de sobretensão e segundo Bechara (2009), a distribuição de tensão ao longo da bobina não será uniforme se o transitório tiver uma frente de onda muito rápida, resultando na concentração de tensão nas espiras próximas à entrada da bobina, podendo causar ruptura do meio dielétrico entre as espiras nessa região.

3.3 - Óleo Isolante

Óleos minerais isolantes são feitos de uma mistura de diferentes hidrocarbonetos, grupo de substâncias orgânicas que possuem apenas carbono e hidrogênio em sua composição, contendo CH₃, CH₂ e grupos CH mantidos unidos pelas ligações moleculares carbono-carbono. A cisão de algumas das ligações C-H e C-C pode ocorrer como resultado de falhas térmicas ou elétricas, com a formação de pequenos fragmentos instáveis, como H, CH₃, CH₂, CH ou C, que se recombinam rapidamente em gases hidrocarbonetos (NBR 7274, 2012).

O material isolante utilizado em transformadores é formado principalmente de papel, papelão prensado e blocos de madeira, absorvem o óleo mineral, facilitando a refrigeração dos enrolamentos. De acordo com a NBR 7274 (2012), ocorre uma taxa significativa de cisão das cadeias poliméricas em temperaturas superiores a 105°C, com a completa decomposição e carbonização acima de 300°C, gerando uma concentração alta de CO e CO₂ no transformador. De acordo com Benedet (2008), as principais falhas responsáveis pelo surgimento de gases no óleo mineral isolante podem ser classificadas em três categorias: descargas parciais, aquecimento e arcos elétricos. O produto principal dessas falhas são os seguintes gases:

- Gases hidrocarbonetos e hidrogênio: metano (CH₄), etano (C₂H₆), etileno (C₂H₄), acetileno (C₂H₂) e hidrogênio (H₂);
- Óxidos de carbono: monóxido de carbono (CO) e dióxido de carbono (CO₂);
- Gases não provenientes de falhas: nitrogênio (N₂) e oxigênio (O₂).

A NBR 7274 (2012) apresenta os tipos de falhas que podem ser identificadas pela análise do óleo, sendo classificadas pela sua causa raiz, abaixo:

- Descargas parciais: possível cera depositada no isolamento celulósico, induzindo perfurações carbonizadas no papel que podem não ser facilmente visualizadas.
- Centelhamento: ocorre entre partes metálicas na forma de ruptura dielétrica de alta densidade de ionização.
- Descargas de baixa energia: evidenciada pela larga carbonização perfurante através do papel ou partículas de carvão no óleo, como na operação de mudança de *tap* do comutador.
- Descargas de alta energia: potência evidenciada pela extensiva destruição e carbonização do papel, fusão do metal e carbonização do óleo.
- Sobreaquecimento: o papel assume um tom mais escuro para temperaturas menores de 300°C, já para temperaturas maiores há a presença de papel carbonizado. Para temperaturas maiores de 700°C, há carbonização do óleo, coloração e/ou fusão do metal.

Por fim, a análise de óleo deve ser realizada de forma periódica para avaliar os gases dissolvidos e identificar possíveis defeitos ainda em um estágio inicial. O acompanhamento da evolução dos gases é importante para avaliar a condição de operação do equipamento e identificar a possível localização da falha, seja no material isolante ou na cisão do óleo.

3.4 - Acessórios e componentes

Comutador: existem dois tipos de comutadores, à vazio e sob carga. A comutação à vazio ocorre com o transformador desligado, enquanto a comutação sob carga ocorre quando o equipamento está em operação. As falhas em comutadores sob carga geralmente decorrem de problemas de natureza mecânica, desgaste de contatos, procedimentos de manutenção inadequados e deterioração do óleo isolante da chave de carga (LIMA JÚNIOR, 2014).

Buchas: acessórios responsáveis por propiciar um caminho condutivo entre o meio externo e interno do transformador (ALVES, NOGUEIRA, 2009). A correta e adequada especificação técnica deste acessório é muito importante visto que as buchas são acessórios com elevado índice de falhas. A principal causa dessas falhas são a perda de estanqueidade, redução da suportabilidade, má conexão do *tap* capacitivo, poluição da porcelana e sobretensões transitórias (FRONTIN, 2013).

3.5 - Tanque

O tanque é responsável por dar sustentação para a parte ativa do transformador e armazenar o óleo isolante. Dentre as falhas nesse componente, pode-se citar a falta de estanqueidade do equipamento,

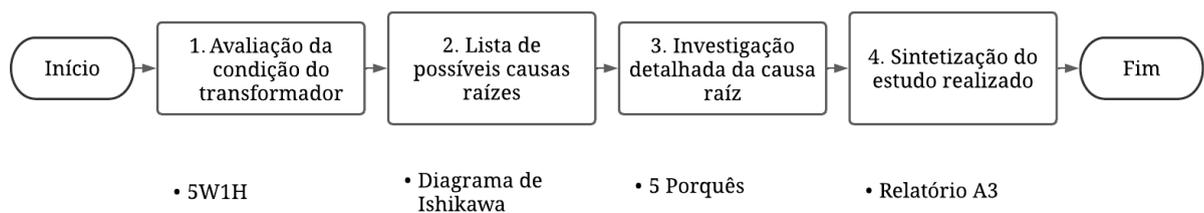
que causa vazamento de óleo para o meio externo e prejudica as características dielétricas e de resfriamento do transformador. Nesse caso, há também a preocupação ambiental com a contaminação do óleo no solo. Para prevenir esse acontecimento, algumas subestações constroem uma bacia de contenção em torno do equipamento.

A pintura do tanque também é um ponto importante na vida útil do equipamento, pois quando há uma camada fina de tinta, o aço do tanque pode oxidar e, dependendo da localização da avaria, é necessária uma substituição do componente. Locais com alta maresia ou pontos fora da costa necessitam de um plano de pintura especial. Os principais pontos que devem ser cuidados são os das tubulações onde há uma passagem de óleo, pois podem contaminar o óleo.

4. METODOLOGIA

O objetivo deste capítulo é elaborar uma proposta de metodologia para a reconstrução de transformadores de potência, quando apresentam avarias que impossibilitem a sua operação. Para isso, o trabalho é estruturado de acordo com a Figura 6 abaixo.

Figura 6 – Metodologia da análise

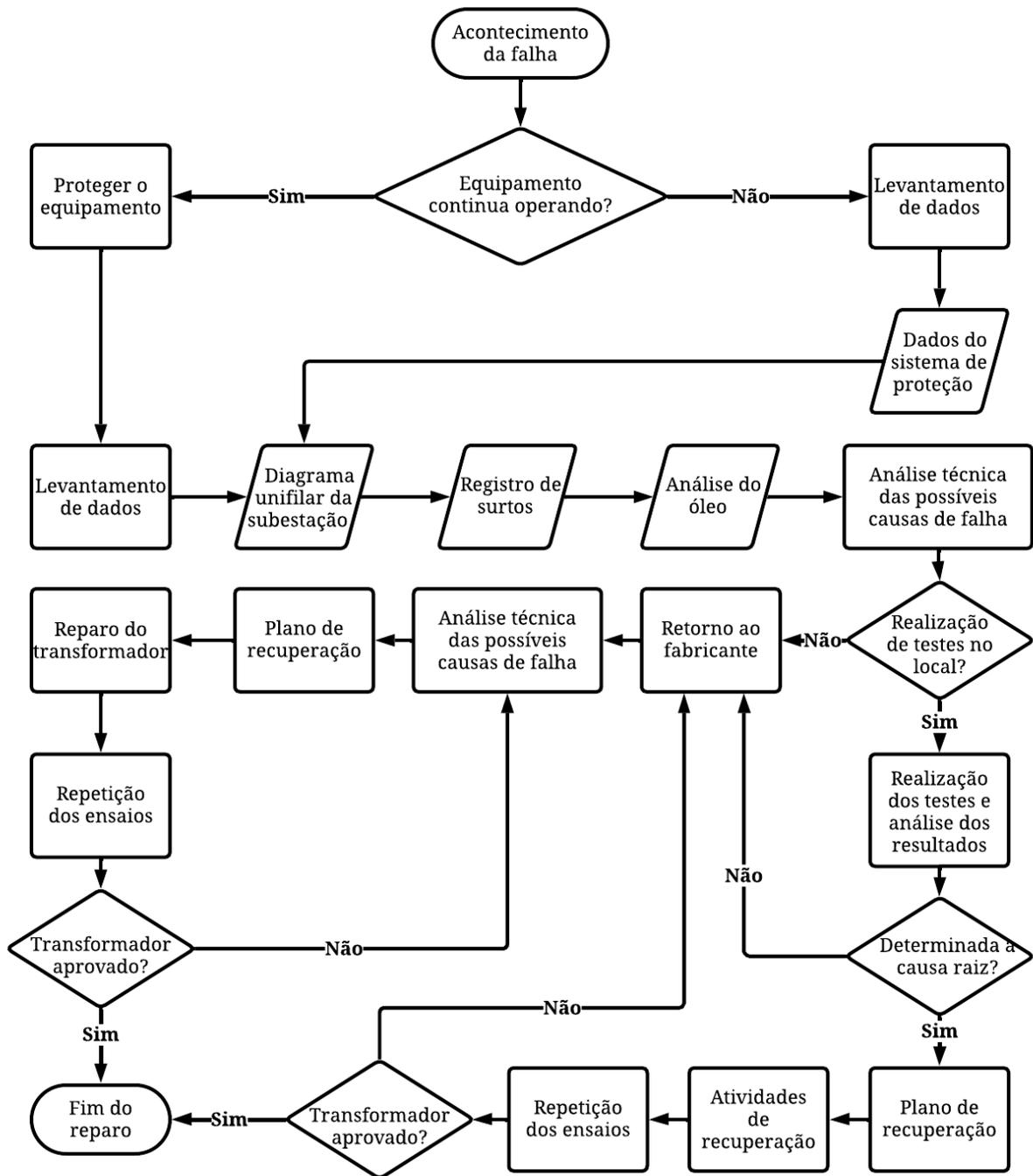


Fonte: AUTOR.

A partir dessa estruturação é apresentada a metodologia, que se baseia nas ferramentas da qualidade e engloba desde a identificação das avarias e falhas até os métodos e resoluções de reconstrução, bem como a definição do time que fará a avaliação do equipamento e o cronograma de projeto. É importante salientar que, além de buscar uma maneira efetiva de reparo do equipamento, optada também uma solução barata e eficiente para manter o custo da não-conformidade de fabricação baixo. Assim, é avaliada a possibilidade de realizar o reparo do transformador no seu local de operação, diminuindo o tempo de parada de operação, reduzindo custos de transporte e mão de obra. Quando não há meios de realizar o conserto em campo, é necessário enviar o transformador para o fabricante ou para a empresa reformadora.

As ferramentas da qualidade são cruciais na atividade de “Análise técnica das possíveis causas de falha” e na “Criação de um plano de reparo”. Quanto ao “Estudo com as partes envolvidas”, é necessário ter três profissionais, cada um com um foco diferente, visando a construção de uma equipe multidisciplinar, sendo eles: cálculo, produção e operação. Na Figura 7, é possível visualizar o fluxograma das atividades exigidas para a resolução da avaria.

Figura 7 – Fluxograma de atividades



FONTE: AUTOR

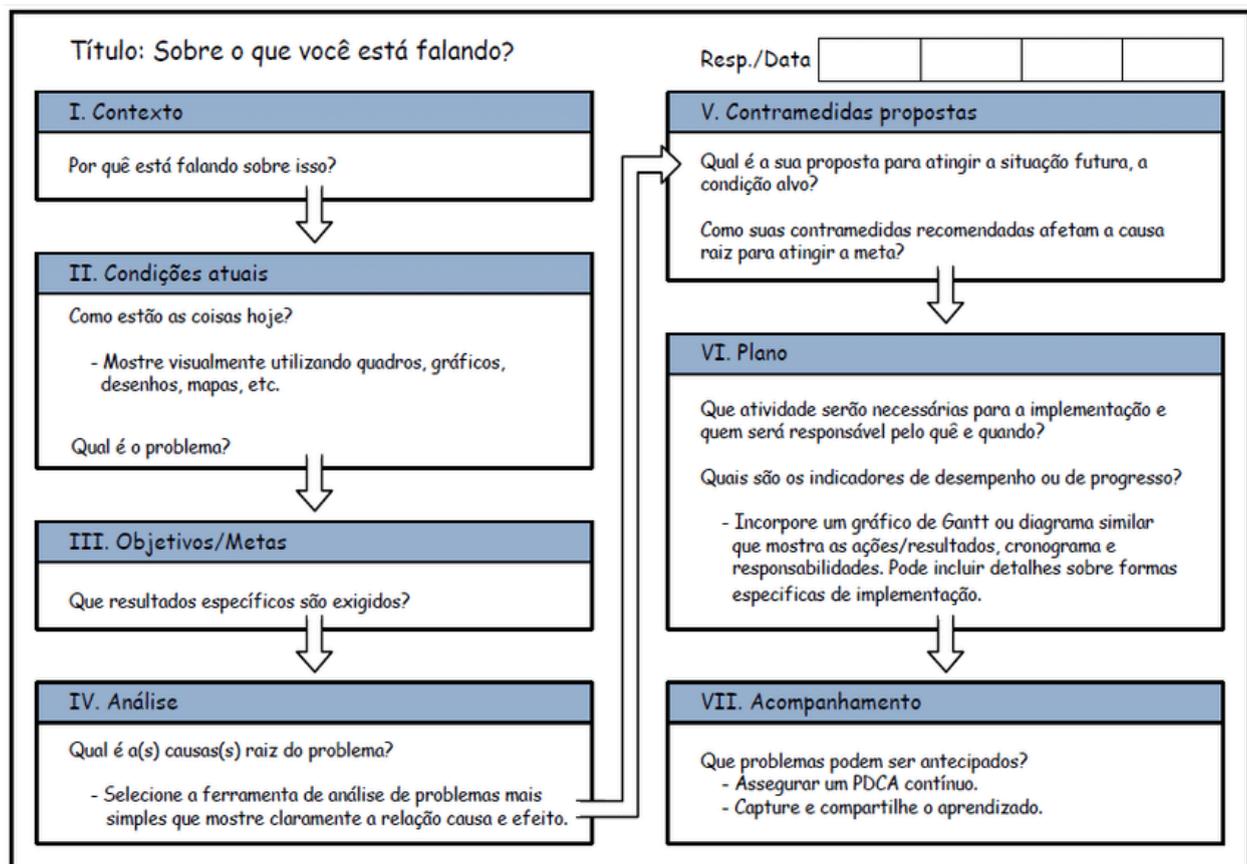
4.1 Relatórios da Qualidade: A3

O Relatório A3 funciona tanto como uma ferramenta de resolução de problemas como um processo estruturado para criar solucionadores de problemas. Ele ajuda a disseminar o método científico, que força o indivíduo a observar a realidade, apresentar dados, propor uma contramedida de trabalho

projetada para atingir a meta definida e fazer o acompanhamento da falha com um processo de verificação e ajustes com base nos resultados reais (DENNIS, 2010).

O relatório deve descrever um problema através de uma sequência de ações que qualquer pessoa seja capaz de entender. Os relatórios não definem simplesmente uma meta ou um problema de maneira estática ou isolada. Como qualquer narrativa, um A3 relata uma história completa com início, meio e fim na qual os elementos específicos são relacionados de forma sequencial e causal. Essa é a razão pela qual o A3 descreve uma jornada desde o contexto e definição até a sua resolução (OHNO, 1997). Na Figura 8 é representado um modelo de relatório A3 desenvolvido por Shook (2008), apresentando as sequências de atividades para resolução de problemas.

Figura 8 – Modelo Relatório A3



Fonte: SHOOK, 2008.

Sendo o relatório A3 uma ferramenta da qualidade amplamente utilizada, pode ser associado aos conhecimentos e ensaios de transformadores de potência para uma melhor eficácia na resolução dos problemas do equipamento. As ferramentas da qualidade auxiliares apresentadas no A3 são: 5W2H e Diagrama de Ishikawa, responsáveis por identificar e estratificar as possíveis causas da avaria no equipamento e que auxiliam na elaboração do relatório. Outras ferramentas também são comumente utilizadas nesse tipo de relatório, como a 5 Porquês, Ciclo PDCA – *Plan, Do, Check and Action*, entre outras.

De acordo com Custodio (2015), a técnica dos 5W2H consiste em um plano de ação organizado e simples, que encaminha a solução dos problemas, ordenando de forma prática a tomada de ações e identificando os principais elementos a serem abordados. Na Figura 9 foram elencadas as principais

perguntas para auxiliar na descrição do transformador. As iniciais “W” e “H” são referentes aos questionamentos: O quê (*What*), Por quê (*Why*), Quem (*Who*), Onde (*Where*), Quando (*When*), Como (*How*) e Quanto (*How much*). Para esse relatório, foi excluído o último “H” pois a ferramenta foi utilizada para a descrição do problema, sem a necessidade de quantificar o gasto necessário para o reparo.

O Diagrama de Causa e Efeito - ou Espinha de peixe - é uma ferramenta da qualidade muito utilizada, que mostra a relação entre um efeito e as potenciais causas que podem estar contribuindo para que o problema ocorra (ISHIKAWA, 1985). De acordo com Costa e Mendes (2018), “a ferramenta é utilizada para apresentar a relação existente entre um resultado de um processo, que no caso referia-se ao efeito e os fatores que possam ter modificado o resultado do processo considerado.”

O método dos 5 porquês é uma abordagem científica, utilizada no sistema Toyota de Produção, para se chegar à verdadeira causa raiz do problema, que geralmente está escondida através de sintomas óbvios. É uma ferramenta simples de resolução de problemas que consiste em formular a pergunta “Por quê” cinco vezes para compreender o que aconteceu (a causa-raiz). Nada impede, porém, que mais (ou menos) do que 5 perguntas sejam feitas. O número 5 vem da observação de Taiichi Ono, criador do Sistema de Produção Toyota, de que esse número costuma ser suficiente para se chegar à causa raiz. (COSTA e MENDES, 2018)

A análise do diagrama ocorre com a separação em seis fatores de causas, sendo elas: materiais, mão de obra, método, máquina, medição e meio ambiente. Conforme representado na Figura 9, a ferramenta está sendo utilizada para identificar as possíveis causas da falha no equipamento e que por consequência gerou o efeito que danificou o equipamento.

Figura 9 – Relatório A3 Proposto

A3 – RECUPERAÇÃO DE TRANSFORMADOR		Elaborado por:	Data:										
Transformador avaliado:		Objetivo:											
<p>Condição atual Ferramenta auxiliar: Método 5W 1H</p> <p>O que - O que aconteceu com o transformador? Quando - Em que momento aconteceu? Qual ensaio? Em que estado de operação estava o equipamento? Onde - Onde ocorreu a avaria? Ocorreu em campo ou no laboratório? Quem - Que tipo de operador conseguiria visualizar que era um problema? Qual - Como ocorre este problema? Ele é aleatório ou frequente? Como - O que causou a falha? Por que ela aconteceu?</p>		<p>Plano de Ação</p> <ul style="list-style-type: none"> • Criação do Plano de Ação • Elencar as atividades para correção • Identificar os responsáveis • Alinhamento entre chão de fábrica e Engenharia de Produto 											
<p>Verificação e identificação das avarias Ferramenta auxiliar: Diagrama de Ishikawa</p>		<p>Resultados</p> <ul style="list-style-type: none"> • Validação das correções • Ensaios comprobatórios • Capacitação da equipe para a mitigação da causa raiz • Levantamento de custos • Padronização dos procedimentos 											
<p>Validação da causa raiz Ferramenta auxiliar: 5 Porquês</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <tr> <td style="width: 20%;">1- Por quê?</td> <td style="width: 20%;">2- Por quê?</td> <td style="width: 20%;">3- Por quê?</td> <td style="width: 20%;">4- Por quê?</td> <td style="width: 20%;">5- Por quê?</td> </tr> <tr style="background-color: #cccccc;"> <td> </td> <td> </td> <td> </td> <td> </td> <td> </td> </tr> </table>		1- Por quê?	2- Por quê?	3- Por quê?	4- Por quê?	5- Por quê?							
1- Por quê?	2- Por quê?	3- Por quê?	4- Por quê?	5- Por quê?									

Fonte: AUTOR.

5. ESTUDO DE CASO

O equipamento escolhido para o estudo de caso consiste em um transformador trifásico elevador, de frequência 60 Hz, fabricado em 2017 e instalado em uma Pequena Central Hidrelétrica – PCH. Durante a sua operação, foi identificado um aumento da temperatura do óleo a partir do método de análise apresentado na Figura 7. Durante a operação foi feita a coleta de uma amostra de óleo, sendo constatada uma grande concentração dos gases hidrocarbonetos, que indicam a existência de pontos de carbonização do isolamento. Por fim, foi decidido que o reparo do equipamento não poderia ser realizado no local da subestação, enviando-se de volta para o fabricante para a realização do reparo. Na Tabela 1, são apresentadas as informações principais do transformador.

Tabela 1 – Dados do Transformador

Características	Valores
Tensão AT	34,5 kV
Tensão BT	4,16 kV
Potência	5 MVA
Material dos enrolamentos	Alumínio
Tipo de comutador	Sem tensão
Corrente AT	79,69 – 88,08 A
Corrente BT	693,9 A
Tipo de ligação	YNd1
Refrigeração	ONAN

Fonte: AUTOR.

Na fábrica, foi necessário retirar a parte ativa do tanque para uma melhor avaliação do equipamento e levantamento das possíveis causas que ocasionaram a avaria. Examinando as ligações do transformador, foi evidenciado a queima do isolamento nas crimpagens entre os fios da bobina e o cabo flexível da bucha, ou seja, no local onde há o encontro dos fios de alumínio com o cabo de cobre.

5.1 - Cobre e Alumínio

De todos os metais comuns o cobre é o que mostra a mais alta classificação para condutividade elétrica e térmica, facilitando a sua aplicação nas mais diversas indústrias, tais como de eletroeletrônicos, de telecomunicações e automobilística (TOLEDO, 2005; CASPERS, 2012).

Para Toledo (2005), além de ter propriedades térmicas e elétricas, o cobre apresenta excelente resistência à corrosão devido à formação de uma película de óxido realmente passiva. Esse tipo de material resiste a muitas soluções salinas, alcalinas e a produtos químicos orgânicos. Em contrapartida, o cobre é propenso a uma oxidação mais rápida na oxidação de ácidos, sais de metais oxidantes fortes, enxofre e amônia.

O cobre é amplamente utilizado para a transmissão de energia elétrica e está presente desde fios convencionais de instalações elétricas quanto fios retangulares e trançados para fabricação de bobinas de transformadores de potência, tornando-se um componente crucial na fabricação desse tipo de equipamentos.

O alumínio, devido às suas propriedades, é utilizado em várias aplicações, desde as mais simples embalagens de alimentos, até mesmo na indústria automobilística e aeronáutica (HOLZLE, 2005).

Por ser mais barato e leve, o alumínio torna-se uma boa opção para a substituição do cobre na fabricação dos enrolamentos de transformadores de potência, diminuindo o custo do equipamento. Entretanto, como suas características elétricas são inferiores ao cobre, é mais comum em transformadores de menor potência. Além disso, o alumínio é amplamente utilizado em linhas de transmissão.

Na Tabela 2, é apresentada uma comparação entre condutores, no qual possui as características físicas do cobre e do alumínio. As informações foram retiradas de KONRAD (2001) e MACKENZIE (2003) e adaptadas pelo autor.

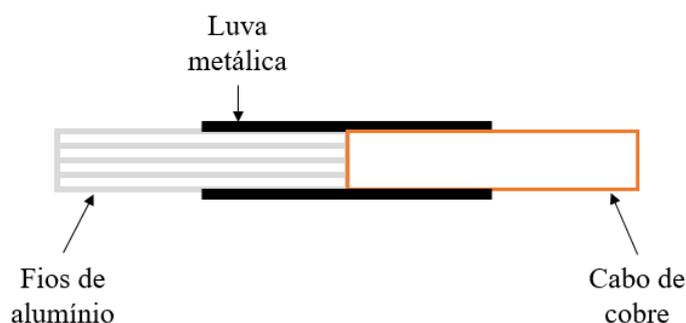
Tabela 2 – Comparação cobre e alumínio

Propriedades físicas	Cobre	Alumínio
Resistividade [$\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$]	0,016642	0,03
Densidade de massa [kg/dm^3]	8,89	2,7
Coefficiente de expansão [$\mu\text{m}/\text{m}^\circ\text{C}$]	16,7	23,36
Condutividade térmica [W/mK]	398	210
Resistência à tração [MPa]	124	46,5
Ponto de fusão [$^\circ\text{C}$]	1084,88	660,4
Calor específico [J/kgK]	384,6	904

Fonte: Adaptado de KONRAD (2001) e MACKENZIE (2003).

Considerando as características de cada material apresentadas na Tabela 2, é possível evidenciar que a resistividade do alumínio é 80% maior que a do cobre e, com um coeficiente de expansão 39% maior, torna-se um ponto de atenção em projetos nos quais haja interação entre os dois materiais. O transformador do estudo possuía um esquema de ligação entre os fios da bobina e os cabos da bucha de BT, conforme a Figura 10.

Figura 10 – Esquema da crimpagem da luva



Fonte: AUTOR.

Dessa forma, deve-se considerar os seguintes aspectos: as diferenças mecânicas de expansão quando o transformador estiver operando e também a corrosão galvânica quando há o contato do cobre com o alumínio.

5.2 - Corrosão Galvânica

Considerando que sempre existirão os pares galvânicos nas ligas de alumínio, já que os intermetálicos estão em contato com a matriz, a maneira de evitar a corrosão é escapar do contato do eletrólito com a superfície metálica e/ou os reagentes catódicos, mediante barreiras ou inibidores de corrosão (GENTIL, 1996; RAMANATHAN, 1998; TWITE, 1998).

A forma mais usual de corrosão galvânica envolve o contato físico, ou através de uma ligação elétrica, de dois diferentes metais imersos em um eletrólito. Esse fenômeno é chamado de corrosão bimetalica, pelo qual também é conhecida a corrosão galvânica. A diferença de potencial entre estes metais produz uma corrente elétrica entre eles. O metal menos condutor à corrosão tem sua taxa de corrosão ampliada em relação a sua taxa se estivesse sozinho imerso no meio. Em contrapartida, o material mais condutor terá o seu ataque corrosivo reduzido na mesma situação. O material menos condutor se torna anódico, ao passo que o mais condutor, catódico (DOS SANTOS, 2005).

Dessa forma, o metal com a menor nobreza, o alumínio, é corroído com maior intensidade por ser anódico, causando uma avaria no material e no seu isolamento.

Segundo Fontana (1986), três condições são essenciais para existir corrosão galvânica:

- Existir dois metais diferentes eletronicamente presentes;
- Existir um caminho eletricamente condutor entre os dois metais;
- Existir um caminho para os íons de metal moverem-se do metal mais anódico ao metal mais catódico.

Além disso, de acordo com a referência (*Galvanic Corrosion*, 1987), há outros fatores que influenciam para que a corrosão aconteça:

- Efeitos do meio: A natureza e agressividade do meio determina quão extensa pode vir a ser a corrosão galvânica. Usualmente, materiais menos resistentes num determinado meio tendem a se tornar o componente anódicos do par bimetalico.
- Efeito de área: Uma indesejável relação entre áreas é aquela onde a catódica é maior que a anódica. Para um dado fluxo de corrente na célula, a densidade de corrente é maior para um eletrodo de menor área. E uma maior densidade de corrente na região anódica leva a uma maior taxa de corrosão. Tem-se como exemplo utilizar rebites de alumínio em chapas de cobre.

5.3 - Reparo do equipamento e tecnologia aplicada

As etapas de reparo do transformador seguiram a metodologia apresentada na Figura 6, onde primeiramente foi realizada uma reunião de alinhamento entre os setores de: Qualidade, Engenharia de Produto, Engenharia de Processos, Montagem de Parte Ativa e Assistência Técnica. Sendo assim, foi possível obter visões diferentes da avaria, pois houve a formação de um time multidisciplinar para realizar a análise das possíveis causas que danificaram o isolamento do transformador.

Após a avaliação do equipamento, levantou-se as seguintes hipóteses:

- O equipamento sofreu uma possível sobrecarga durante a sua operação e ocasionou as avarias no isolamento;
- Corrosão galvânica pelo contato entre o cobre e o alumínio causado pela utilização de uma luva metálica comum na crimpagem;
- A crimpagem foi malfeita e surgiram espaços vazios dentro da luva.

Assim, decidiu-se por substituir as luvas e iniciou-se o reparo no transformador. O processo de recuperação começa com a retirada de todo o material isolante carbonizado e das luvas de crimpagens utilizadas nas ligações entre as bobinas e os cabos flexíveis. Na sequência, é aplicado o produto químico do tipo Penetrox, um inibidor oxidante composto de base natural de petróleo, que inibe a oxidação de ligações de alumínio, sendo aplicado nos fios das saídas das bobinas. Foram também fabricados novos cabos de cobre flexíveis, utilizados para ligar as bobinas no comutador e buchas, garantindo a qualidade do material isolante e do cabo utilizado. A substituição das luvas de crimpagem foi o fator crucial para o reparo do transformador, pois houve uma evolução de tecnologia utilizada para ligações entre cobre e alumínio.

Para inibir a corrosão galvânica, a ELPRESS AB, empresa conhecida mundialmente pelos seus equipamentos para transformadores e linhas de transmissão, desenvolveu uma luva bimetálica de alumínio e cobre. Na Figura 10, é representada uma comparação entre a nova luva desenvolvida e a convencional. A quantidade de área de alumínio é consideravelmente maior que a de cobre para evitar que o efeito de área apareça na crimpagem, visto que é necessária uma seção transversal maior para que o fluxo de corrente seja o mesmo que no cobre.

Figura 10 – Luvas de Crimpagem

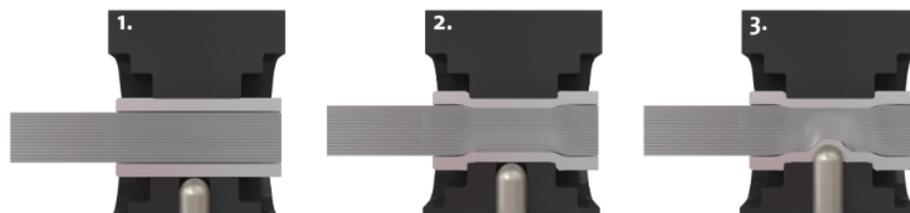


Fonte: ELPRESS AB, S/D.

O desenvolvimento desse material foi possível devido à utilização do método de solda por fricção sob pressão. De acordo com Marques (2000), a soldagem por fricção é um processo de soldagem no estado sólido, no qual o aquecimento causa a ligação entre as partes a serem soldadas. Esse aquecimento é gerado devido à rotação de uma das partes condicionadas sob certa pressão contra a outra, que está fixa.

O processo de crimpagem é diferente do convencional para cabos de cobre e foi desenvolvido pela ELPRESS, pois há uma combinação de crimpagem hexagonal e recortada, garantindo que haja uma fixação melhor do cabo de alumínio na luva. O processo está apresentado na Figura 11 abaixo.

Figura 11 – Luvas de Crimpagem



Fonte: ELPRESS AB, S/D.

6. ENSAIOS DO TRANSFORMADOR

Após a finalização do reparo das ligações da parte ativa do transformador, foram realizados os testes preliminares de relação de espiras e resistência ôhmica para validar os parâmetros solicitados pelo cálculo. Além disso, foi realizado o tratamento térmico para a retirada de umidade e em seguida o fechamento, onde é inserida a parte ativa no tanque. Por fim, o transformador é abastecido de óleo isolante e o material isolante é impregnado para garantir que não haja umidade ou partículas de água dentro do transformador.

Finalizada a montagem e impregnação, o transformador está apto para entrar no laboratório onde será testado e o reparo feito será validado. A Tabela 3 apresenta os momentos em que houve a retirada das amostras de óleo e os gases que foram encontrados. A sigla ND é utilizada para quando não há a identificação do gás na amostra.

Tabela 3 – Gases dissolvidos em óleo isolante

Determinação	Antes dos ensaios [ppm]	Após os dielétricos [ppm]	Após aquecimento [ppm]	Após sobrecarga [ppm]
Hidrogênio [H_2]	ND	ND	ND	2
Oxigênio [O_2]	1.556	1.691	1.782	1.953
Nitrogênio [N_2]	4.634	4.672	5.043	5.252
Metano [CH_4]	ND	ND	ND	ND
Monóxido de carbono [CO]	1	1	2	4
Dióxido de carbono [CO_2]	10	11	19	36
Etileno [C_2H_4]	ND	ND	ND	ND
Etano [C_2H_6]	ND	ND	ND	ND
Acetileno [C_2H_2]	ND	ND	ND	ND

Fonte: AUTOR.

Após a coleta dos resultados, é utilizada a norma ABNT NBR 7274 (2012) para realizar as interpretações dos gases dissolvidos nos transformadores.

De acordo com a NBR 7274 (2012), cada uma das sete classes de defeitos conduz para uma característica-padrão da composição de hidrocarbonetos gasosos, a qual pode ser traduzida para uma tabela de interpretação de análise de gases dissolvidos, sendo visualizada abaixo na Tabela 4.

Tabela 4 – Tabela de interpretação de análise de gases dissolvidos

Caso	Falha característica	$\frac{C_2H_2}{C_2H_4}$	$\frac{CH_4}{H_2}$	$\frac{C_2H_4}{C_2H_6}$
DP	Descargas parciais	NS	< 0,1	< 0,2
C1	Centelhamento	0 - 0,6	0,1 - 1	< 1
D1	Descargas de baixa energia	> 1	0,1 - 0,5	> 1
D2	Descargas de alta energia	0,6 - 2,5	0,1 - 1	> 2
T1	Sobreaquecimento $t < 300^\circ\text{C}$	< 0,01	> 1	< 1
T2	Sobreaquecimento $300^\circ\text{C} < t < 700^\circ\text{C}$	< 0,1	> 1	1 - 4
T3	Sobreaquecimento $t > 700^\circ\text{C}$	< 0,2*	> 1	> 4

Fonte: ABNT NBR 7274, 2012. (Adaptado pelo autor)

A partir das relações entre os gases, e analisando os gases obtidos nas amostras coletadas, pode-se constatar que o transformador não apresentou nenhuma possível falha. Há outras relações de gases apresentadas na NBR 7274 (2012), visualizadas abaixo:

- CO₂/CO: A formação de CO₂ e CO originada da isolamento de papel impregnada com óleo aumenta rapidamente com a temperatura. Incrementos da relação CO₂/CO menores que três são geralmente considerados um indicativo de provável defeito envolvendo papel, com algum grau de carbonização.
- O₂/N₂: O₂ e N₂ dissolvidos no óleo são decorrentes do contato com ar atmosférico. Em situações normais de operação, a solubilidade relativa de O₂ e N₂ e a relação O₂/N₂ em óleo refletem a composição do ar. Essa relação pode decrescer como um resultado da oxidação do óleo e/ou envelhecimento do papel, se O₂ for consumido mais rapidamente ao que é repostado por difusão. Resultados menores que 0,3 são geralmente considerados para indicar excessivo consumo de oxigênio.

A Tabela 5 apresenta os resultados das relações dos gases citados acima:

Tabela 5 – Gases dissolvidos em óleo isolante

Determinação	Antes dos ensaios	Após os dielétricos	Após aquecimento	Após sobrecarga
CO ₂ /CO	10	11	9,5	9
O ₂ /N ₂	0,335	0,361	0,353	0,371

Fonte: AUTOR.

A relação entre os gases dióxido de carbono e monóxido de carbono apresentada na Tabela 5, evidencia que o transformador está apto para voltar a operar pois teve valores satisfatórios de acordo com a ABNT NBR 7274 (2012).

Para fins de comparação de resultados e parâmetros utilizados, são apresentados na Tabela 6 os valores indicados pela norma *IEEE Std C57.130 (2015): IEEE Guide for the Use of Dissolved Gas Analysis Applied to Factory Temperature Rise Tests for the Evaluation of Mineral Oil-Immersed Transformers and Reactors*.

Tabela 6 – Gases dissolvidos em óleo isolante

Determinação	Valores obtidos após o aquecimento	IEEE C57.130 (2015)
Hidrogênio [H_2]	ND	2
Oxigênio [O_2]	1.782	-
Nitrogênio [N_2]	5.043	-
Metano [CH_4]	ND	0.1
Monóxido de carbono [CO]	2	5
Dióxido de carbono [CO_2]	19	10
Etileno [C_2H_4]	ND	0.1
Etano [C_2H_6]	ND	0.1
Acetileno [C_2H_2]	ND	0.1

Fonte: AUTOR.

Dessa forma, é possível averiguar que, após o ensaio de elevação de temperatura (que é o ensaio relatado pela norma), a quantidade de gases dissolvidos no óleo do transformador teve apenas um valor superior ao estipulado pela IEEE C57.130 (2015), se tratando do dióxido de carbono. Entretanto, como a NBR 7274 (2012) utiliza como comparação a relação entre os valores de monóxido de carbono e dióxido de carbono concentrados no óleo mineral, o transformador está aprovado para voltar para operação.

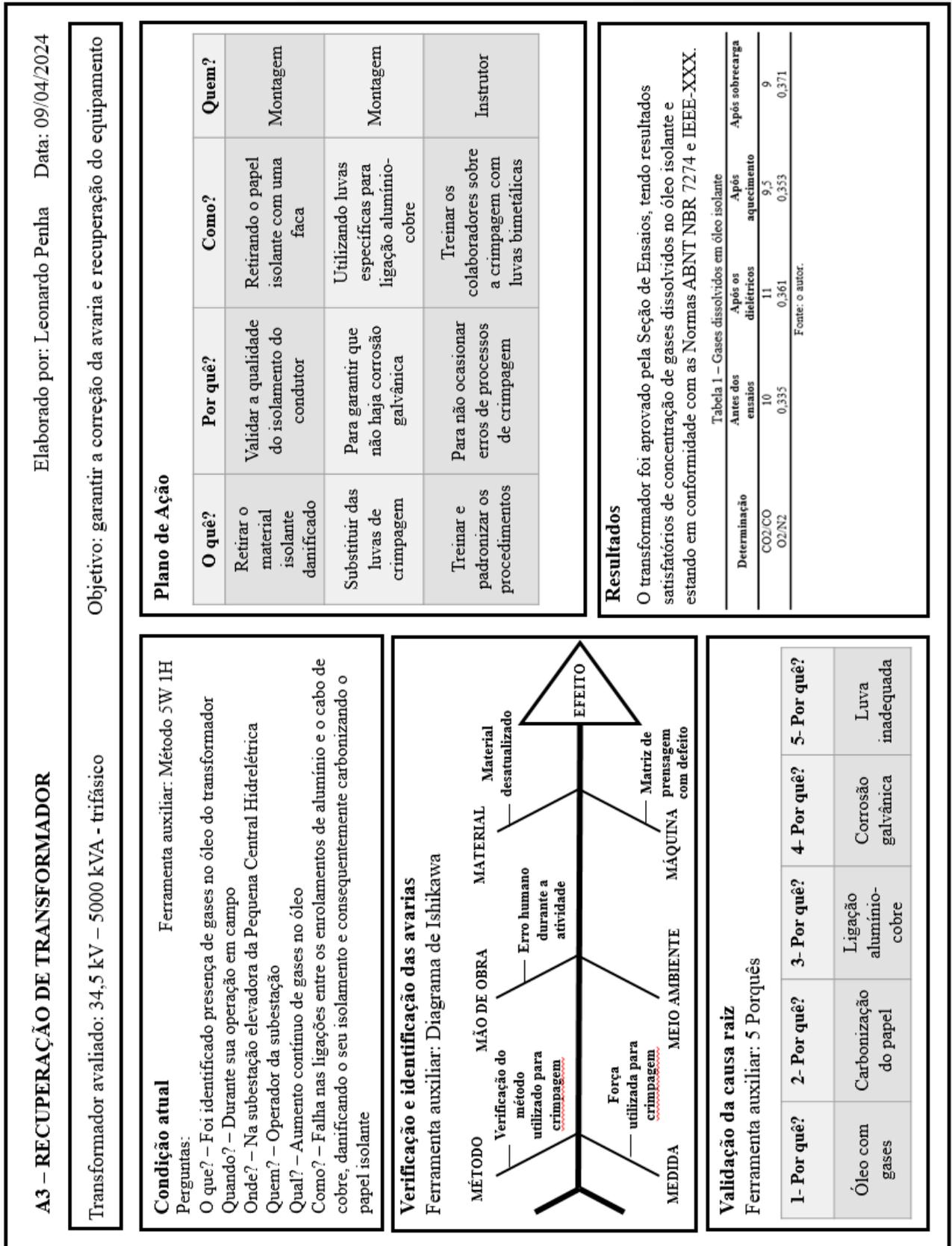
6.1 - Relatório A3

Por fim, após a realização dos ensaios e, tendo o transformador utilizado pelo estudo de caso sido aprovado pelas normas vigentes, foi realizado o preenchimento do relatório A3 para garantir a gestão da qualidade dos processos de fabricação. O relatório incluiu as condições atuais onde havia sido detectada a falha no equipamento e, através do Diagrama de Ishikawa, tornou-se possível elencar as possíveis causas principais da avaria. E assim, utilizando a ferramenta da qualidade 5 Porquês, definiu-se a causa raiz principal da não-conformidade.

Dessa forma, foi elaborado um plano de ação para executar as atividades de reparo onde foram envolvidos os setores responsáveis para garantir que a solução fosse implementada. Além disso, conforme é relatado por diversas ferramentas da qualidade, um problema só é solucionado quando há a padronização do processo crítico. Sendo assim, os colaboradores foram capacitados para utilizar as luvas bimetálicas quando há transformadores com enrolamentos de alumínio e utilizar as matrizes condizentes para o processo de crimpagem adequado, sendo também inseridos na norma de fabricação.

Na seção dos resultados foram inseridos os valores encontrados após a relação proposta entre os gases dissolvidos pela norma NBR 7274 (2012) e, assim, o transformador foi aprovado pelo cliente e retornará a operar normalmente.

Figura 12 – A3 – Estudo de caso da recuperação do transformador



CONCLUSÃO

O presente estudo apresentou uma metodologia de apoio para o processo de reparo de um transformador de potência, sendo possível observar visões de diferentes especialidades aplicadas na solução, como engenharia elétrica, engenharia de produção, engenharia mecânica e engenharia química. Tal abordagem foi possível pela integração que o curso de engenharia de energia possui em seu currículo, abordando o tema energia como um todo e, não apenas, na sua produção. Sendo assim, elaborou-se estudo de caso no qual foi detalhado, de forma clara e concisa, os principais pontos de verificação no reparo de um transformador e a sua documentação para servir de embasamento na gestão da qualidade no ambiente do chão de fábrica.

O resultado apresentado nesse trabalho serve como um material de apoio para a utilização das ferramentas da qualidade, 5W2H, Diagrama de Ishikawa e 5 Porquês no processo de reparo de transformadores de potência. Na sequência, o estudo de caso foi sintetizado em um relatório A3 como uma ferramenta de solução de problemas e comunicação, que visa a promover um aprendizado da gestão da qualidade e implementação de ações corretivas. O objetivo foi agregar os conhecimentos e melhorias utilizados no Sistema Toyota de Produção em um processo de fabricação de transformadores que tem como base principal a mão de obra manual.

Por fim, após realizada a reconstrução do transformador de potência, solucionando a causa raiz da avaria, foi feita a substituição das luvas de crimpagem e ensaiado o equipamento na seção de ensaios. A verificação dos parâmetros necessários definiu-se pelas normas ABNT NBR 5356 (2019) e ABNT NBR 7274 (2012), e os valores obtidos das amostras de gases dissolvidos no óleo isolante foram apresentados. Concluindo, o equipamento foi aprovado e poderá voltar a operar normalmente na subestação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVES, D. P.; NOGUEIRA, D. S. **Transformadores de Potência: teoria e aplicação - tópicos essenciais**. 2009. Monografia. Universidade do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 5356-2 – Transformadores de potência**. Rio de Janeiro, ABNT, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6855:2021 Transformador de potencial indutivo com isolamento sólida para tensão máxima igual ou inferior a 52kV – Especificação e ensaios**. Rio de Janeiro, ABNT, 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6856:2021 Transformador de corrente com isolamento sólida para tensão máxima igual ou inferior a 52kV – Especificação e ensaios**. Rio de Janeiro, ABNT, 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7274:2012 – Interpretação da Análise dos Gases de Transformadores em Serviço**. Rio de Janeiro, ABNT, 2012.
- BABOIAN, R. e POHLMAN, S. L., **Galvanic Corrosion**. 13. ed. United States Of America: Asm International Handbook Committee, 1987.
- BECHARA, R. **Análise de falhas em transformadores de potência**. 2010. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.
- BENEDET, M. E. **Otimização de um analisador de gás dissolvido em óleo de múltiplos transformadores de potência**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.
- BUSINESS CONNECTION (ed). **Transformadores de potência: Como funcionam?** 2022
Disponível em:
<https://www.businessconnection.com.br/transformadores-de-potencia-como-funcionam/>
- CASPERS, C. **Estudos Eletroquímicos de Uma Célula Termo galvânica de Cobre Empregando Diferentes Líquidos Iônicos Como Eletrólito**. 2012. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.
- CHAPMAN, S. **Fundamentos de Máquinas Elétricas**. Rio de Janeiro: McGraw Hill, 2013.
- COSTA, T. B.S., MENDES, M. A. **Análise da causa raiz: utilização do diagrama de ishikawa e método dos 5 porquês para identificação das causas da baixa produtividade em uma**

cacaucultura. In: SIMPROD - SIMPÓSIO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO DE SERGIPE, 10., 2018, São Cristóvão, SE. Anais [...] Departamento de Engenharia de Produção - Universidade Federal de Sergipe, 2018. p. 1-11. Disponível em: <http://ri.ufs.br/jspui/handle/riufs/10450>. Acesso em: 02 ago. 2024.

CUSTODIO, M. F. **Gestão da qualidade e produtividade**. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2015.

DENNIS, P. **The remedy: Bringing Lean Thinking Out of the Factory to Transform the Entire Organization**. Nova Jersey. 5. ed. 2010.

DONG, X. R. S., L. Y., W. N., G. T. **Transients at GSU Transformer Terminals Part 1: Historical Case Analysis**. IEEE, 2001.

DOS SANTOS, F. G. D. **Avaliação da Susceptibilidade à Corrosão Galvânica em Aços Inoxidáveis Ferrítico AISI 444 e Austenítico AISI 304 Utilizados na Fabricação de Reservatórios Térmicos de Aquecimento Solar**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais, 2005.

ELPRESS AB (Sweden). **AlCu terminals**. Disponível em: <https://www.elpress.net/products/terminals/alcu-terminals/>. Acesso em: 02 ago. 2024.

FONTANA, M. **Corrosion engineering**. 3. ed. New York: McGraw-Hill Book Company, New York, 1986.

FRONTIN, S. O. **Equipamentos de alta de tensão: prospecção e hierarquização de inovações tecnológicas**. 1ª Edição. Brasília: Teixeira, 2013.

LIMA JÚNIOR, R. C. **Análise de falhas e defeitos nos transformadores de potência e seus dispositivos**. 2014. TCC. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

GENTIL, V. **Corrosão**, 3. ed. Rio de Janeiro: Livros técnicos e científicos, 1996.

IEEE Std C57.130: **Guide for the Use of Dissolved Gas Analysis Applied to Factory Temperature Rise Tests for the Evaluation of Mineral Oil-Immersed Transformers and Reactors**. 2015

ISHIKAWA, K. **What is total quality control**, Englewood Cliffs: Prentice Hall. 1. ed. 1985.

INTERNATIONAL COPPER ASSOCIATION. **Cooper: its trade, manufacture, use, and environmental status**. Ohio, U.S: Asm Intl, 1999. Edited by Gunter Joseph e Konrad J. A. Kundig.

MARTINS, M. A. S. **Um novo capítulo da “Guerra das Correntes”**. Porto Alegre. 2020.

MODENESI, P. J.; BRACARENSE, A. Q.; MARQUES, P. V. **Soldagem: fundamentos e tecnologia**. 3. ed. Belo Horizonte: Editora da Ufmg, 2009.

OHNO, T. **O sistema Toyota de produção: além da produção em larga escala** Tradução: Cristina Schumacher, Porto Alegre: Bookman, 1^a edição, 1997.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO- ONS. **Análise da Perturbação do dia 03/11/2020 às 20h48min com Início nos Transformadores de 230/69/13,8 kV da SE Macapá, com Desligamento da UHE Coaracy Nunes e do Sistema Amapá**. Rio de Janeiro: ONS, 2020.

RAMANATHAN, L. V., **Corrosão e seu controle**. São Paulo, Editora Hemus, 1988.

RIES, Walter. **Transformadores: fundamentos para o projeto e cálculo**. Porto Alegre: Edipucrs, 1. ed. 2007.

SHOOK, J. **Gerenciando para o aprendizado: usando um processo de gerenciamento de A3 para resolver problemas, promover alinhamento, orientar e liderar**. 1. ed. São Paulo: Lean Institute, 2008.

SILVA, L. N. A.. **Monitoramento e Diagnóstico de Buchas de Alta Tensão**. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2007.

TOLEDO, R. **La Corrsión Em El Cobre y Sus Aleacione**. Science Corrosion, Santiago, 2005.

TOTTEN G.E., MACKENZIE D.S. (EDS.). **Handbook of aluminium Physical Metallurgy and Processes**, Marcel Dekker, NY, 2003, vol. 1

TWITE, R.L., BIERWAGEN, G.P., **Review of alternatives to chromate for corrosion protection of aluminum aerospace alloys**, *Progress in Organic Coatings*, 1998.