



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL- UFRGS
ESCOLA DE ENGENHARIA - DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA ELÉTRICA
PROJETO DE DIPLOMAÇÃO



Autor: André Martins Costa Simões Pires
Orientador: Luiz Tiaraju dos Reis Loureiro

**TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA: UM ESTUDO DE CASO DO
PROJETO AOS ENSAIOS EM FÁBRICA**

Porto Alegre, Outubro de 2021.

Resumo

Este projeto de diplomação tem como objetivo a documentação e estudo de caso dos processos que envolvem o projeto de um transformador de potência trifásico, desde os cálculos iniciais até a aprovação dos ensaios da máquina em fábrica, com exceção do processo fabril, que não é contemplado neste trabalho. Além dos cálculos e ensaios, é feita uma breve revisão teórica acerca de transformadores e uma breve introdução à conceitos de gerenciamento de projetos e de contratos. As escolhas para o desenvolvimento do transformador são justificadas assim como desvios de valores de ensaios no equipamento em questão. São feitas diversas propostas de melhorias no projeto.

Palavras-chave: transformador de potência, usina fotovoltaica, ensaios de transformadores.

SUMÁRIO

1	Introdução	7
2	Revisão em transformadores elétricos	8
3	Descrição e especificação técnica do transformador	16
4	Gerenciamento do projeto	19
5	Projeto	23
6	Ensaio	41
7	Resultados e análise	52
8	Sugestões de melhoria	61
9	Considerações finais	68
10	Conclusões	69
11	Referências	70
12	Anexo I – Folha de dados do transformador	71
13	Anexo II – Medição de resistência elétrica	72
14	Anexo III – Relação de tensões	74
15	Anexo IV – Perdas em carga	76
16	Anexo V – Elevação de temperatura	78
17	Anexo VI – Cromatografia do óleo	79

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Circuito Equivalente de Transformador	10
Figura 2 – Cronograma do projeto	22
Figura 3 - Diversos Formatos Construtivos de Núcleo	26
Figura 4 - Sucessão de Camadas de um Transformador Trifásico	27
Figura 5 – Núcleo Trifásico com Entrefe­rras a 45°	28
Figura 6 - Bobina Helicoidal em Construção	29
Figura 7 – Bobina em Discos em Construção	30
Figura 8 – Buchas OIP e RBP	34
Figura 9 – Comutador SHZV	35
Figura 10 – Curva de saturação do núcleo	38
Figura 11 – Ligação típica para ensaio em curto-circuito	43
Figura 12 – Ligação típica para ensaio a vazio	44
Figura 13 – Circuito para o ensaio de tensão induzida	56
Figura 14 – Modelo de shield em caminho fechado	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Limites de Elevação de Temperatura	32
Tabela 2 - Valores Garantidos e Calculados	36
Tabela 3 - Tolerância para ensaio de relação de transformação	42
Tabela 4 – Tolerâncias para ensaio de curto-circuito e perdas em carga	42
Tabela 5 – Tolerância para ensaio de perdas em vazio e corrente de excitação	44
Tabela 6 – Requisitos de isolamento e de ensaios dielétricos	46
Tabela 7 – Níveis de isolamento na especificação técnica	46
Tabela 8 - Valores para ensaio de estanqueidade	47
Tabela 9 – Características do óleo mineral após contato com o equipamento	49
Tabela 10 – Níveis de ruído para transformadores em óleo de potência > 500kVA	50
Tabela 11 – Resultados para ensaio de perdas a vazio	54
Tabela 12 – Resultados para o ensaio de tensão induzida	57
Tabela 13 – Resultados do ensaio de óleo isolante	58
Tabela 14 – Elevação de temperatura	60

LISTA DE ABREVIATURAS

TDP:	Transformador De Potência
GOS:	<i>Grain Oriented Steel</i>
TC:	Transformador de Corrente
TP:	Transformador de Potencial
SE:	Subestação
UFV:	Usina Foto Voltaica
ONAN:	Óleo com circulação Natural e Ar com circulação Natural
ONAF:	Óleo com circulação Natural e Ar com circulação Forçada
OFAF:	Óleo com circulação Forçada e com circulação Ar Forçada
AT:	Alta Tensão
BT:	Baixa Tensão
CA:	Corrente Alternada
NBR:	Norma Brasileira

1 INTRODUÇÃO

Aliado ao sempre crescente aumento da população mundial, está o aumento na demanda de energia elétrica. Não obstante, o modo de vida moderno constantemente exige mais e mais dos sistemas elétricos de energia, seja para carregar um dispositivo eletrônico, um carro elétrico ou ainda fomentar a necessidade ininterrupta de produção fabril. Nesse contexto, o estudo e aprimoramento constante no setor de energia elétrica é imprescindível para sustentar a vida que levamos e o contínuo desenvolvimento tecnológico humano.

Transformadores são dispositivos elétricos de suma importância no campo da engenharia, sendo responsáveis pela transformação de sistemas de tensões e correntes elétricas. A transformação de tensões e correntes elétricas viabiliza a transmissão e distribuição de energia elétrica, reduzindo perdas por efeito Joule, seção e peso dos condutores de energia. São instalados usualmente nos pontos de geração e distribuição de energia elétrica ou ainda como elemento de interconexão entre duas ou mais redes de energia elétrica. O transformador de potência (TDP) é uma máquina elétrica de alto grau de complexidade, desde os cálculos iniciais de projeto até sua energização e operação, resultado de décadas de pesquisa visando o aperfeiçoamento e eficácia do equipamento.

Visto a enorme gama de aplicações de um transformador, é natural que cada caso exija uma solução customizada e concebida considerando fatores específicos para a situação definida. Embora a Norma Brasileira (NBR) 5356 – Transformadores de Potência da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) especifique TDP's, a especificação técnica fornecida pelo cliente é o documento que norteia todo projeto e desenvolvimento do equipamento.

Esse trabalho tem como objetivo o estudo de caso de um transformador que fará parte da operação de uma usina fotovoltaica. O fornecimento em realidade consiste em dois transformadores distintos, porém, por similaridade entre as máquinas, o escopo desse trabalho se refere a somente uma das máquinas. Esse trabalho serve como documentação acerca do gerenciamento, cálculo e ensaios de um TDP trifásico elevador de tensão de 180 MVA.

2 REVISÃO EM TRANSFORMADORES ELÉTRICOS

O transformador é um dispositivo que permite a transferência de energia elétrica de um circuito para outro, sendo esses isolados eletricamente. Além de transferir energia, o transformador também é responsável pela transformação do sistema de tensões e correntes elétricas. A transferência ocorre através de um campo magnético que acopla os dois ou mais circuitos. Esse acoplamento magnético se dá através de um núcleo ferromagnético comum aos dois circuitos. Dois ou mais enrolamentos envolvem o núcleo e são responsáveis por gerar os campos magnéticos variantes no tempo através da corrente que circula nos seus condutores. Toda a argumentação teórica deste capítulo se dá conforme Chapman (2013).

2.1 Circuito Equivalente

Considerando em um primeiro momento o transformador ideal, tem-se um dispositivo de funcionamento relativamente simples, onde uma tensão alternada aplicada na bobina do lado primário gera uma tensão alternada na bobina do lado secundário proporcional à relação entre o número de espiras de cada um dos lados. Essa consideração é um bom ponto de partida, no entanto conforme aumenta-se a complexidade da aplicação, aumenta-se a necessidade de fidelidade do modelo matemático.

Existem diversas não idealidades em transformadores que consideradas durante o projeto da máquina. Os principais itens a serem considerados são:

- a. Perdas ôhmicas no cobre: as perdas no cobre são devidas efeito Joule nas bobinas do primário e secundário do transformador. São proporcionais ao quadrado da corrente que circula nos condutores.
- b. Perdas por correntes parasitas: as perdas por correntes parasitas ocorrem no núcleo ferromagnético do transformador. São proporcionais ao quadrado da tensão a qual a máquina está submetida.
- c. Perdas por histerese: as perdas por histerese estão associadas à dificuldade dos campos magnéticos alternados em reorientar os domínios magnéticos a cada semi-ciclo.

d. Perdas por dispersão de fluxo: os fluxos magnéticos que passam apenas por uma das bobinas e escapam do núcleo geram indutâncias próprias.

Cada uma das perdas enumeradas é considerada de forma independente, transformada em um modelo de circuito e após seus efeitos sobrepostos.

O elemento mais simples a ser modelado é o de perdas no cobre. As perdas no cobre dos enrolamentos primário e secundário. são modeladas como uma simples resistência R_P no primário e R_S no secundário.

Para as perdas causadas pelo fluxo disperso $\Phi_{LP/LS}$, tem-se uma tensão produzida $v_{LP/LS}$ descrita pela Equação (1).

$$v_{LP/LS}(t) = N_{P/S} \frac{d\Phi_{LP/LS}}{dt} \quad (1)$$

onde $N_{P/S}$ é o número de espiras no primário/secundário. Considerando que a relutância ar é muito maior do que a do núcleo do transformador e que o fluxo é desperdiçado em maior parte no ar, o fluxo é diretamente proporcional à corrente nos terminais. Sendo \mathcal{R} a relutância do caminho pelo qual passa o fluxo e $i_{P/S}$ a corrente no enrolamento primário/secundário, tem-se que o fluxo disperso é dado pela Equação (2)

$$\Phi_{LP/LS} = (\mathcal{R} N_{P/S}) i_{P/S} \quad (2)$$

Substituindo uma equação na outra e juntando os termos constantes, tem-se a Equação (3):

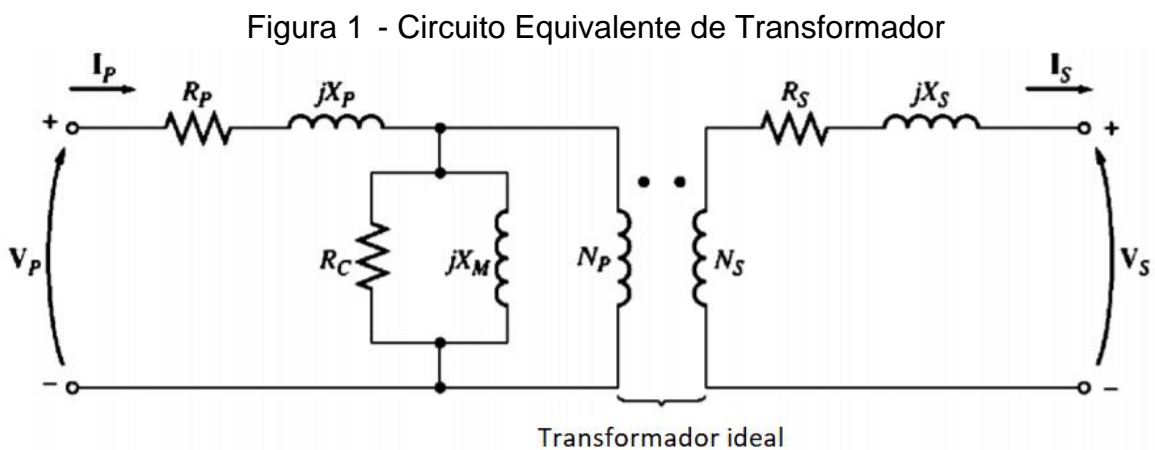
$$v_{LP/LS}(t) = L_{P/S} \frac{di_{P/S}}{dt} \quad (3)$$

Onde $L_{P/S} = N_{P/S}^2 \mathcal{R}$ é a indutância própria das bobinas no primário ou no secundário. Dessa forma, essas perdas podem ser modeladas a partir de um indutor no primário e no secundário.

Para as perdas por histerese no núcleo, considera-se que a corrente de magnetização i_m é proporcional à tensão aplicada no núcleo (desde que fora da zona

de saturação magnética do material) com um atraso de 90° . Portanto, pode ser modelada como uma reatância indutiva X_m entre os terminais da fonte de tensão.

Já as perdas por correntes parasitas no núcleo são perdas proporcionais à tensão aplicada no núcleo e em fase com essa tensão. Conseqüentemente, essas perdas podem ser modeladas através de um resistor entre os terminais da fonte de tensão. Chega-se assim ao modelo de circuito para um transformador da Figura (1), onde as não-idealidades foram extraídas de forma a poder se considerar um transformador ideal com componentes elétricos representando cada uma das perdas.



Fonte: Adaptado de CHAPMAN S., Fundamentos de Máquinas Elétricas (2013)

2.2 Partes Construtivas e Acessórios

Como qualquer máquina, o transformador elétrico de potência pode ser dividido por diversas partes constituintes, cada uma seguindo um processo de produção distinto e desempenhando um papel importante na operação da máquina. Esse capítulo apresentará uma breve introdução a essas partes.

2.2.1 Parte Ativa

A parte ativa de um transformador é considerada como a principal parte de um transformador, é a parte de fato funcional no equipamento. É constituída por partes fundamentais da máquina: o núcleo ferromagnético, os enrolamentos, a sustentação mecânica e isolamento.

a. Enrolamentos

Transformadores costumam apresentar um enrolamento primário e outro secundário, podendo apresentar ainda um terciário, dependendo da aplicação. São constituídos normalmente por condutores de cobre isolados com esmalte ou papel. O projeto das bobinas dos enrolamentos define a forma como serão fabricadas, podendo ser bobinas de discos, helicoidais ou chapas retas, por exemplo.

É nos enrolamentos onde circularão as grandes correntes, portanto associado a essas grandes correntes está um alto aquecimento. A refrigeração dos enrolamentos é realizada pela circulação do fluido isolante no tanque através de espaçamentos deixados entre os condutores. O espaçamento é feito com espaçadores de madeira seca para garantir rigidez mecânica.

b. Núcleo Ferromagnético

Uma vez que o núcleo estará submetido a um campo magnético variante no tempo e no sentido axial em relação as bobinas, surgem correntes elétricas parasitas perpendiculares ao sentido radial, também chamadas de correntes de Foucault.

De acordo com Fitzgerald (2014), a cada ciclo ao qual o núcleo está submetido, existe uma energia associada ao material. Essa energia é necessária para mover os dipolos magnéticos no material e é dissipada como calor no próprio material. Dessa forma, para um dado material e fluxo magnético, as perdas por histerese são proporcionais ao volume total do material e à curva de histerese do material. Além disso, como as perdas por histerese ocorrem ciclicamente, elas são também proporcionais à frequência do sinal de excitação.

Os materiais usados para núcleos ferromagnéticos normalmente são os chamados de ferro silício de grãos orientados (*grain-oriented steel*, em inglês ou GOS). Esses materiais possuem direções de magnetização muito favoráveis, tornando assim a curva de histerese mais estreita e reduzindo as perdas. Além disso, o núcleo é usualmente constituído pela superposição de muitas chapas, de forma a reduzir as perdas por correntes parasitas.

c. Sustentação mecânica

Para evitar o deslocamento da parte ativa dentro do transformador, são utilizados calços para fixação das bobinas, tirantes horizontais e verticais e vigas para fixação do núcleo, de sua base e do conjunto completo ao tanque principal do transformador.

2.2.2 Tanque principal

O tanque principal é a “carcaça” do transformador. Nele estão inseridos os principais elementos da máquina: o núcleo, as bobinas, o óleo (ou outro fluido isolante). Como o tanque abriga a parte fundamental da máquina, deve ser robusta o suficiente para suportar esforços mecânicos e pressões internas de acordo com a potência da máquina.

2.2.3 Tanque de Expansão

Com a operação da máquina, é inevitável que a temperatura do fluido interno se eleve, por mais que se utilizem trocadores de calor. Dessa forma é importante que o fluido isolante tenha liberdade para se expandir sem criar grandes acúmulos de pressão interna no tanque principal, prevenindo assim explosões. O tanque de expansão, ou conservador de óleo, é responsável por permitir que o fluido isolante se expanda dentro do tanque principal.

2.2.4 Radiadores

Por razões de segurança e para que a máquina mantenha as perdas por calor controladas, é imprescindível que a temperatura dentro do tanque principal se mantenha dentro do limite especificado durante o projeto da máquina. Os radiadores auxiliam na refrigeração do transformador, realizando a troca de calor entre o fluido isolante dentro do tanque principal com o ar externo através de aletas de grande superfície de contato com o meio externo. É comum ainda a adição de ventiladores,

permitindo assim uma refrigeração mais intensa e a operação da máquina em uma potência mais elevada.

2.2.5 Buchas

As buchas são responsáveis por permitir a conexão dos enrolamentos do transformador com os cabos ou barramentos elétricos de alimentação e distribuição. Como o tanque principal é fechado e pressurizado, as buchas permitem as conexões do equipamento com o exterior mantendo a estanqueidade e isolamento elétrica.

2.2.6 Acessórios

Além dos principais itens citados anteriormente, existe uma série de outros dispositivos que não estão necessariamente sempre presentes na construção da máquina, mas, mesmo assim, performam papéis indispensáveis para a operação da máquina. Nesta seção serão apresentados alguns dos principais acessórios:

- a. Indicador de Nível de Óleo: o indicador de nível de óleo, além de atuar como dispositivo para indicação de nível do óleo interno da máquina, podem atuar também como dispositivos de proteção, enviando sinais de alarme e até mesmo desligando o transformador caso o nível ultrapasse um valor pré-estabelecido.
- b. Termômetro do óleo: o termômetro de óleo funciona como indicador da temperatura do óleo, podendo registrar a temperatura instantaneamente ou durante um período. Pode atuar também como proteção caso a temperatura do óleo esteja muito alta.
- c. Válvula de alívio de pressão: caso a pressão interna no tanque principal se torne excessivamente alta, a válvula de alívio de pressão pode atuar de forma a descarregar o óleo para o meio externo ao tanque.
- d. Relé de súbita pressão: o relé de súbita pressão é um dispositivo de pressão que atua quando há uma variação muito grande no aumento da pressão instantânea. Variações lentas não acionam essa proteção, porém variações bruscas acionam um contato elétrico para o desligamento do transformador.

- e. Relé Buchholz: também chamado de relé de gás, é um dispositivo de proteção que atua quando há excesso de gases na parte interna do transformador, o que caracteriza indício de falha. A operação da máquina, a queima do óleo, descargas parciais ou curto-circuitos produzem gases no interior da máquina que são detectados pelo relé Buchholz. Caso o volume de gases seja muito alto, o relé provoca o desligamento do transformador através de contato elétrico.
- f. Secador de ar: durante a retração do óleo no tanque, há entrada de ar na máquina. O secador de ar tem como objetivo a retirada de umidade do ar através da utilização de sílica-gel.
- g. Transformador de corrente: os transformadores de corrente, ou para abreviação TC, são responsáveis por reproduzir as altas correntes que circulam no transformador em níveis seguros para os equipamentos de instrumentação da máquina.
- h. Comutador: o comutador é um equipamento que permite a troca da relação de transformação entre o primário e secundário do transformador. Existem comutadores que operam em carga, os chamados Comutadores de Derivação em Carga (CDC), que permitem essa troca sem a interrupção do funcionamento da máquina.
- i. Placa de identificação: cada transformador possui uma placa de identificação para disposição de informações como número de série do fabricante, tipo de transformador, tipo de sistema de resfriamento, tipo de óleo isolante, normas, potências, relação de tensões e diagrama fasorial, valores de peso e volume (parte ativa, tanque e óleo), valores nominais e aplicação dos TCs, valores de tensão e corrente para todos as derivações etc.

2.3 Ensaios em fábrica

Ensaios são conjuntos de medições e verificações realizados em fábrica nos transformadores de forma a garantir as especificações técnicas definidas pelo cliente. Existem diversas normas técnicas que descrevem os procedimentos necessários, porém, no Brasil, os ensaios devem seguir a norma NBR 5356. Os ensaios podem ser divididos em ensaios de rotina, de tipo ou especiais.

2.3.1 Ensaios de rotina

Ensaios de rotina são os ensaios mais comuns, devem ser realizados em todas as unidades produzidas em fábrica, sendo definidos pela norma NBR 5356:

- a. Medição de resistência dos enrolamentos;
- b. Medição de relação de transformação e da polaridade e verificação do deslocamento angular e da sequência de fases;
- c. Medição da impedância de curto-circuito e das perdas em carga;
- d. Medição das perdas em vazio e corrente de excitação;
- e. Ensaios dielétricos de rotina;
- f. Ensaios de comutador de derivações em carga;
- g. Medição da resistência de isolamento;
- h. Estanqueidade e resistência à pressão;
- i. Verificação do funcionamento dos acessórios;
- j. Ensaios do óleo isolante;
- k. Verificação da espessura e aderência da pintura da parte externa.

2.3.2 Ensaios de tipo

Caso sejam produzidas várias unidades com o mesmo projeto, sendo eles idênticos em relação a valores nominais e construção, os ensaios de tipo podem ser realizados em apenas uma unidade. Essa unidade é denominada como “unidade tipo” e representará todo o restante do grupo. Para transformadores a óleo, os ensaios de tipo são:

- a. Ensaio de elevação de temperatura;
- b. Ensaios de dielétricos de tipo;
- c. Ensaios de óleo isolante para transformadores de tensão nominal inferior a 72,5 kV.

2.3.3 Ensaios especiais

Além dos ensaios de rotina e de tipo, podem ocorrer casos em que se faça necessário outras análises da máquina que não possíveis com essa classificação de testes. Nesse caso, são feitos os ensaios chamados de especiais. Em geral são ensaios realizados por solicitação, havendo um acordo entre fabricante e comprador. Alguns ensaios especiais são:

- Ensaios dielétricos especiais;
- Medição de capacitância entre enrolamento e terra e entre enrolamentos;
- Medição das características da tensão transitória transferida;
- Medição das harmônicas da corrente de excitação etc.

3 DESCRIÇÃO E ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA DO TRANSFORMADOR

O projeto final consiste em uma Subestação (SE) elevadora de 230 kV, que fará a interface entre uma Usina Fotovoltaica (UFV) de capacidade total de 300 MVA e uma linha de transmissão de 230 kV para a conexão com outra SE, já existente, de 230/138/69 kV. A linha de transmissão será construída em circuito simples e, assim como a baía de conexão, seguirão os requerimentos da concessionária de energia elétrica local e o documento “Procedimentos de Rede” do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS).

O *bay* de conexão deve ser compatível com barra dupla a quatro chaves e um disjuntor (BD4CH). A SE terá uma configuração de Barra Principal e Transferência (BPT), consistindo em um *bay* de linha, um *bay* de transformador e um *bus tie*. As instalações devem estar preparadas para, no futuro, incluir uma quarta chave seccionadora (BD4CH).

Na usina em questão, existem no total seis plantas fotovoltaicas e dois transformadores. Cada metade das plantas será conectada a um dos transformadores. As características do transformador estão apresentadas no Anexo 1.

Assim, os seguintes itens estão incluídos no escopo do fornecimento dos transformadores:

- um transformador trifásico, imerso em óleo mineral isolante, 60 Hz, potência de 150/180 MVA, para os enrolamentos de AT e BT, método de resfriamento ONAN/ONAF, tensões nominais de 230/34,5/(15) kV, grupo de ligação YNy0nd1, com comutador de derivação em carga instalado no enrolamento de 230 kV, com faixa de regulação de $\pm 12 \times 1,04\%$, elevação de temperatura média dos enrolamentos de 65 °C.
- um transformador trifásico, imerso em óleo mineral isolante, 60 Hz, potência de 100/120 MVA, para os enrolamentos de AT e BT, método de resfriamento ONAN/ONAF, tensões nominais de 230/34,5/(15) kV, grupo de ligação YNy0nd1, com comutador de derivação em carga instalado no enrolamento de 230 kV, com faixa de regulação de $\pm 12 \times 1,04\%$, elevação de temperatura média dos enrolamentos de 65 °C.
- ensaios de rotina em todas as unidades.
- Ensaios de tipo/especiais em uma unidade: Nível de ruído, elevação de temperatura e análise cromatográfica de gases.

Como citado anteriormente, somente a unidade de maior potência será objeto de estudo nesse trabalho. Foram incluídos como acessórios os seguintes itens:

- Buchas de AT, tipo condensiva conforme norma IEC;
- Buchas de BT, neutro AT e neutro BT, tipo porcelana sólida;
- Conservador de óleo do tanque principal e do CDC acoplado ao conservador principal;
- Bolsa de borracha do conservador de óleo do tanque principal;
- Indicador de nível de óleo do conservador de óleo do tanque principal;
- Indicador de nível de óleo do conservador do tanque do CDC;
- Secador de ar sílica-gel do conservador do tanque principal;
- Secador de ar sílica-gel do conservador do tanque do CDC;
- Relé Buchholz com contatos para alarme e desligamento;
- Monitor de temperatura do óleo e do enrolamento.
- Válvula de alívio de pressões;
- Comutador de derivação em carga;
- Transformadores de corrente tipo bucha;
- Radiadores pintados destacáveis com chapa de 1,0 mm de espessura;

- Moto ventiladores;
- Placa de identificação e placa diagramática;
- Placa esquemática de ligações;
- Armário de Comando e Controle tipo TFTCP;
- Base deslizantes;
- Terminais de ligação do tanque a terra;
- Vigias de inspeção;
- Carga de óleo isolante para o primeiro enchimento, a granel;
- Ar sintético super seco;
- Registros ou válvulas;
- Ganchos ou olhais.

O projeto da máquina compreende os itens da seguinte lista de desenhos:

- Dimensões externas;
- Placa de identificação;
- Placa diagramática;
- Dimensões para transporte;
- Esquemas elétricos;
- Plano de Inspeção e Testes;
- Buchas.

Todos os ensaios, tanto das máquinas como dos acessórios, serão realizados em fábrica e seguirão à risca a norma ABNT NBR 5356. Além dos ensaios de rotina, serão realizados os seguintes ensaios de tipo:

- Nível de ruído;
- Elevação de temperatura;
- Análise do óleo.

4 GERENCIAMENTO DO PROJETO

Um projeto pode ser definido, segundo o *Project Management Body Of Knowledge* (PMBOK) do *Project Management Institute* (PMI), como um esforço temporário empreendido para criar um produto, serviço ou resultado exclusivo. Cada projeto tem seus próprios desafios e dificuldades. Devido a estas necessidades as empresas perceberam que precisavam de uma metodologia que pudesse garantir a conclusão de seus projetos de uma maneira mais eficiente, rápida e economicamente viável e dentro dos padrões de qualidade aceitáveis. É por esse motivo que a presença de uma pessoa treinada em metodologias de gerenciamento de projetos se faz necessária.

Algumas das principais causas para o fracasso de um projeto são:

- Indefinição do escopo;
- Estimativas de tempo, custo e qualidade imprecisas;
- Falta de planejamento;
- Pobre comunicação e coordenação entre áreas;
- Falta de liderança.

Segundo (PMBOK, 2017), um projeto bem sucedido e gerenciado corretamente tem como característica os seguintes benefícios:

- Evitar ou reduzir surpresas durante a execução do projeto;
- Permitir desenvolver diferenciais competitivos e novas técnicas;
- Adaptar os trabalhos ao mercado consumidor e ao cliente;
- Disponibilizar os orçamentos antes dos inícios de gastos;
- Agilizar as decisões;
- Aumentar o controle gerencial de todas as fases do projeto;
- Otimizar a alocação de recursos;
- Documentar e facilitar as estimativas para futuros projetos.

Como já foi demonstrado neste trabalho até o momento, o processo todo, desde a concepção, fabricação, ensaios até a logística, instalação e energização de um transformador de potência é extremamente complexo. É um esforço conjunto de centenas de pessoas especializadas em diferentes áreas, além de ser um empreendimento de altíssimo valor monetário.

Nesse caso, o projeto compreende todo o escopo definido pelo contrato de fornecimento do transformador, ou seja, desde o projeto e fabricação do equipamento até o final da sua garantia. Isso quer dizer que apenas conhecimento técnico em transformadores não é o suficiente para o sucesso de um projeto. É necessário um profissional com competência, além de técnica, em gerência de equipes e negócios além da utilização de ferramentas para planejamento e acompanhamento das etapas do projeto.

4.1 Principais elementos contratuais

Como comentado anteriormente, o escopo do fornecimento do transformador é definido pelo contrato entre o fabricante e o cliente. Por essa razão, muitas vezes o gerente de projetos pode receber a denominação de gerente de contratos, ou seja, o projeto é o contrato. Dentro desses contratos de fornecimento, são listadas diversas cláusulas acordadas entre o cliente e o fabricante. Por razões óbvias, é um contrato sigiloso, porém podem ser descritas de forma genérica algumas das cláusulas mais comuns nesse tipo de documento.

4.1.1 Do objeto

É usualmente a primeira cláusula descrita em um contrato. Define todo o escopo técnico do projeto. Ou seja, deve esclarecer os seguintes pontos:

- Número de máquinas a serem fabricadas;
- Potência, tensão e outras características elétricas e construtivas;
- Realização de ensaios;
- Método de entrega do equipamento;
- Algumas divisões de responsabilidade.

4.1.2 Do preço e da forma de pagamento

Conforme descrito anteriormente, o contrato de fornecimento de um transformador é um empreendimento altamente custoso, dada as dimensões do equipamento. Sendo assim, o pagamento do comprador ao fabricante é realizado em faturas separadas que são definidas por eventos estabelecidos previamente por

contrato. Usualmente esses eventos são eventos de fabricação, como por ocasião da fabricação de bobinas, da parte ativa ou então da conclusão e aceitação dos ensaios em fábrica. Porém, esses eventos podem também ocorrer por ocasião do envio/aceitação dos desenhos do transformador ou até mesmo pela entrega e montagem da máquina em campo.

Além disso, nessa cláusula são definidos o preço total do contrato e o preço por máquina. É definido o prazo para pagamento das faturas. Algumas definições fiscais se fazem necessárias como definição das alíquotas de imposto (ICMS, por exemplo), cálculos para reajustes futuros e juros.

4.1.3 Do prazo

É uma das cláusulas mais importante para o planejamento do projeto. Nela são descritos os prazos para conclusão do contrato e entrega dos equipamentos. Por essa razão, todo o planejamento futuro do projeto deve se adequar de forma a respeitar a data contratual acordada entre as duas partes. Usualmente é dada explicitamente ou como certo período a contar a partir da vigência (assinatura) do contrato.

4.1.4 Da multa

É comum contratos desse gênero apresentarem uma cláusula específica para multa por danos líquidos (*Liquidated Damages* do inglês ou LD), ou seja, multas por atraso contratual. Normalmente são calculadas como um dado percentual do valor total do contrato por dia ou semana de atraso.

O processo fabril de um transformador de potência envolve muitas etapas manuais e tem uma tolerância para erros muito baixa, além de ser um produto altamente customizado para cada cliente. Por essa razão, atrasos podem acontecer durante o fornecimento de um equipamento. É de extrema importância manter gerência e controle em possíveis valores de multa a serem notificados pelo cliente para evitar surpresas na saúde financeira do projeto.

4.1.5 Outras cláusulas

Existem ainda diversas cláusulas essenciais do ponto de vista jurídico e legal que não vem a ser pertinentes para esse trabalho. Algumas dessas partes são:

- Obrigações das partes;
- Confidencialidade;
- Obrigações trabalhistas;
- Garantia técnica;
- Entre outras.

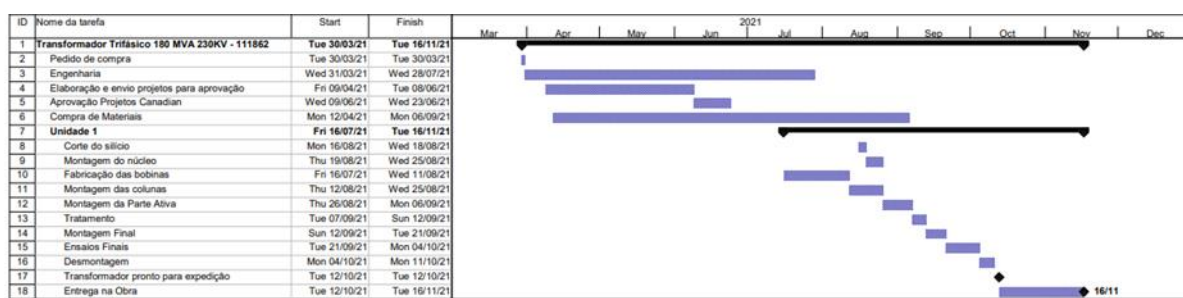
4.2 Cronograma

O cronograma constitui uma das principais ferramentas de trabalho para o gerenciamento de um projeto. Em um cronograma se divide o projeto todo em diversas etapas o quão granulares forem necessárias. O objetivo é estabelecer uma linha do tempo do projeto, duração das etapas ou dependência entre etapas.

Uma ferramenta comumente utilizada para isso é o gráfico de *Gantt*. O gráfico de *Gantt* ilustra as diferentes etapas do projeto como barras ao longo de um eixo horizontal que representa o tempo. É um breve resumo que oferece uma análise visual simplificada. Esse tipo de visualização também permite entender as dependências entre as etapas. No caso do desenvolvimento de um transformador de potência, tem-se que o cálculo e os desenhos do transformador são a primeira etapa do processo. As diferentes etapas produtivas culminam nos ensaios em fábrica, etapa de validação do produto final.

É importante entender que a coordenação entre as áreas e as etapas são um trabalho complexo, com desafios específicos. Embora os processos possam parecer independentes, o profissional que vigia o bom andamento e transferência entre as etapas é necessário. A Figura (2) apresenta o cronograma em um gráfico de *Gantt* para o projeto desse trabalho considerando as principais etapas do processo.

Figura 2 – Cronograma do projeto



5 PROJETO

Essa seção tem como objetivo apresentar o fluxo de projeto e as principais considerações para o cálculo da máquina avaliada neste trabalho. É evidente que o processo do projeto envolve muitos segredos fabris, e, portanto, muitas vezes algumas informações são de divulgação restrita. Grande parte dos parâmetros mostrados nessa seção são calculados através de um *software* próprio da empresa. Nesses casos as escolhas serão justificadas apenas qualitativamente.

5.1 Cálculos gerais

Com base nas informações fornecidas pelo cliente, pode-se calcular os parâmetros iniciais do projeto, como correntes e tensões de fase e de linha. Conforme apresentado na especificação técnica, as tensões apresentadas são as tensões de linha V_L , conforme as Equações (4)-(6).

$$V_{\text{primário}_L} = 34,5 \text{ kV} \quad (4)$$

$$V_{\text{secundário}_L} = 230 \text{ kV} \quad (5)$$

$$V_{\text{terciário}_L} = 15 \text{ kV} \quad (6)$$

Sendo os enrolamentos primário e secundário construídos com conexão em Y, tem-se que a tensão de fase V_F é dada pela Equação (7) para o enrolamento primário e pela Equação (8) para o enrolamento secundário.

$$V_{\text{primário}_F} = \frac{V_{\text{primário}_L}}{\sqrt{3}} = 19,91 \text{ kV} \quad (7)$$

$$V_{\text{secundário}_F} = \frac{V_{\text{secundário}_L}}{\sqrt{3}} = 132,79 \text{ kV} \quad (8)$$

Como o terciário apresenta uma ligação em delta, tem-se que as tensões de fase e de linha são iguais, conforme Equação (9).

$$V_{terciário_F} = V_{terciário_L} = 15 \text{ kV} \quad (9)$$

Com a potência definida pelo cliente, são calculadas as correntes de fase e de linha em cada um dos enrolamentos. Para os enrolamentos primário e secundário as correntes de fase são iguais às de linha. A corrente do enrolamento primário é dada pela Equação (10) e a corrente do enrolamento secundário é dada pela Equação (11).

$$I_{primário_F} = I_{primário_L} = \frac{180 \text{ MVA}}{34,5 \text{ kV}} = 3012 \text{ A} \quad (10)$$

$$I_{secundário_F} = I_{secundário_L} = \frac{180 \text{ MVA}}{230 \text{ kV}} = 452 \text{ A} \quad (11)$$

O enrolamento terciário apresenta uma potência trifásica de 1 MVA, então temos que a corrente de fase é dada pela Equação (12).

$$I_{terciário_F} = \frac{1 \text{ MVA}}{3 \times 15 \text{ kV}} = 22,2 \text{ A} \quad (12)$$

Com a relação entre as correntes no enrolamento terciário, a corrente de linha é dada pela Equação (13).

$$I_{terciário_L} = I_{terciário_F} \times \sqrt{3} = 38,5 \text{ A} \quad (13)$$

Importante notar que a especificação da máquina prevê a regulação do lado de AT: $\pm 12 \times 1,04\%$. Considerando os casos extremos, as tensões de linha no secundário são descritas conforme as Equações (14) e (15).

$$V_{secundário_{L,máx}} = 230 \text{ kV} + 12 \times 1,04\% = 258,7 \text{ kV} \quad (14)$$

$$V_{secundário_{L,min}} = 230 \text{ kV} - 12 \times 1,04\% = 201,3 \text{ kV} \quad (15)$$

As tensões de fase no secundário se dão conforme as Equações (16) e (17).

$$V_{\text{secundário}_F \text{máx}} = \frac{V_{\text{secundário}_L \text{máx}}}{\sqrt{3}} = 149,39 \text{ kV} \quad (16)$$

$$V_{\text{secundário}_F \text{mín}} = \frac{V_{\text{secundário}_L \text{mín}}}{\sqrt{3}} = 116,19 \text{ kV} \quad (17)$$

As correntes são calculadas nas Equações (18) e (19), analogamente às Equações (10) e (11).

$$I_{\text{secundário}_F \text{max}} = I_{\text{secundário}_L \text{max}} = 516,4 \text{ A} \quad (18)$$

$$I_{\text{secundário}_F \text{mín}} = I_{\text{secundário}_L \text{mín}} = 401,6 \text{ A} \quad (19)$$

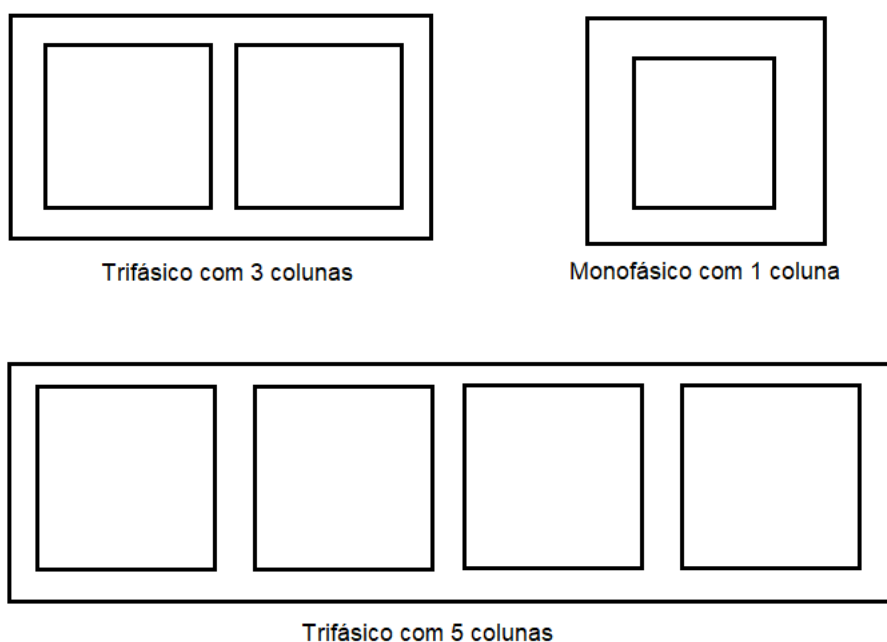
5.2 Núcleo

O cálculo do núcleo é de suma importância no projeto de um transformador. Além da escolha do material, seu formato e dimensões têm impacto direto na corrente de magnetização e, conseqüentemente, nas perdas. Nessa seção são apresentadas as principais considerações no projeto do núcleo do transformador em questão.

5.2.1 Tipo Construtivo de Núcleo

Segundo Healthcote (1998), o propósito do núcleo de um transformador é de proporcionar um caminho de baixa relutância para o fluxo magnético que concatena os enrolamentos primário e secundário. No entanto, existem várias formas de construir um núcleo. Esses formatos de construção consideram principalmente o número de fases e o tamanho do equipamento. A Figura (3) apresenta os principais tipos de núcleo para transformadores mono e trifásicos.

Figura 3 - Diversos Formatos Construtivos de Núcleo



Fonte: Própria do autor.

Transformadores trifásicos muito grandes costumam apresentar o formato em 5 colunas a fim de reduzir a altura final da máquina, facilitando o transporte. Levando em consideração a potência e o tamanho do transformador em questão nesse trabalho, o tipo construtivo adotado para o projeto foi o trifásico em 3 colunas, que é o mais comumente utilizado.

5.2.2 Dimensões do Núcleo

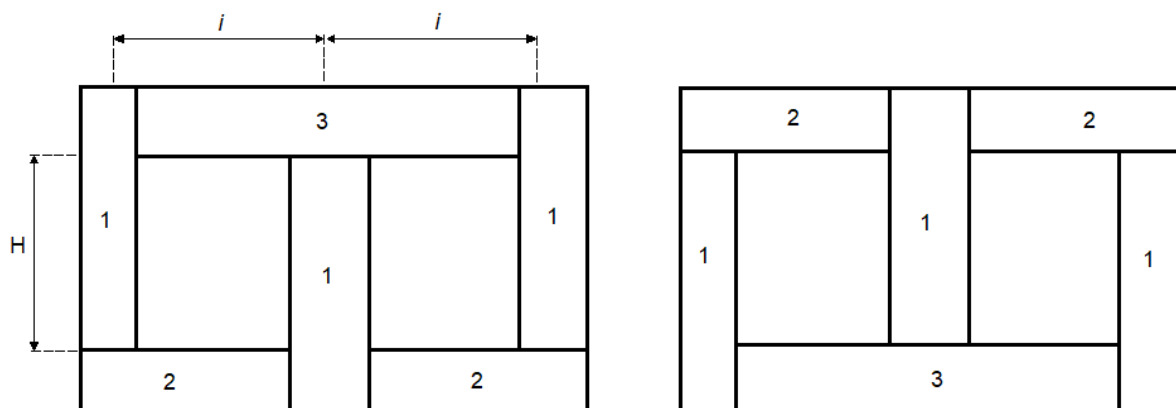
Com base no aço silício usado, se conhece a indução a partir da especificação do fornecedor, e com base na especificação técnica, se tem o máximo valor das perdas permitidas no núcleo. A especificação técnica também define o ponto de operação na curva de saturação do aço silício utilizado. De acordo com RIES, W. (2007), a determinação da seção do núcleo segue o princípio de Arnold: “Para cada tipo de transformador é constante a relação entre o comprimento da espira média dos enrolamentos e o comprimento da linha média do núcleo”. As dimensões do núcleo são então encontradas utilizando o programa, levando em conta os fatores comentados anteriormente.

5.2.3 Laminação do Núcleo

De forma a reduzir as perdas por correntes parasitas no núcleo, o núcleo é constituído por lâminas de aço empilhadas. A seção do núcleo formado pelas lâminas deve se aproximar de uma área circular. Conhecendo o diâmetro do núcleo pode ser determinado o número de degraus (ou seja, o fator de aproveitamento da seção circular), as larguras dos mesmos e as espessuras dos pacotes do núcleo são determinadas, e com isso, o número de lâminas de cada pacote.

As lâminas são dispostas de forma a reduzir o máximo possível os efeitos dos entreferros nas junções das chapas. Para isso, as lâminas são montadas em camadas sucessivas, alterando a posição do entreferro entre cada camada, como mostra a Figura (4).

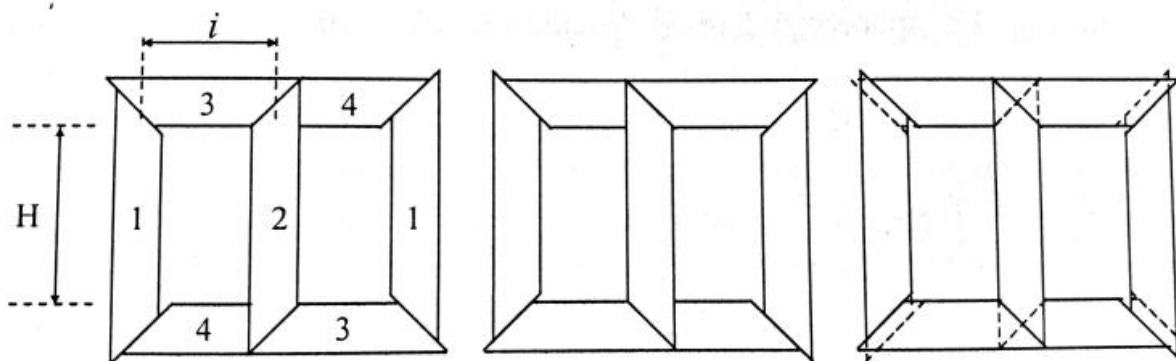
Figura 4 - Sucessão de Camadas de um Transformador Trifásico



Fonte: Própria do autor

No entanto, dessa forma o fluxo magnético nos cantos das chapas não estará alinhado conforme o sentido de orientação da chapa GOS. Isso resulta em maiores correntes magnetizantes e, conseqüentemente, maiores perdas magnéticas. De forma a contornar esse problema, as chapas são cortadas em um ângulo de 45° nos cantos, proporcionando maior aproveitamento do fluxo magnético e reduzindo as perdas. A Figura (5) exemplifica esse processo.

Figura 5 – Núcleo Trifásico com Entreferros a 45°



Fonte: Ries, W. (2007)

Considerando o diâmetro do núcleo calculado, o *software* também calculou para o projeto da máquina um núcleo com uma seção de 13 graus e lâminas de 0,27 mm de espessura.

5.3 Condutores, Espiras e Bobinas

Essa seção tem como objetivo o detalhamento do projeto dos enrolamentos do transformador. A escolha dos condutores, formato das bobinas e a disposição dos enrolamentos nas colunas do transformador são descritos e justificados.

5.3.1 Escolha dos Condutores

Os condutores mais comuns utilizados em transformadores são o alumínio e, principalmente, o cobre. Os principais governantes na escolha dos condutores são a corrente e a tensão. Segundo Harlow, J. (2004), condutores de alumínio possuem aplicações principalmente em máquinas de tamanho menor, porém quando é necessário maior força mecânica e performance, o cobre é a escolha do projetista.

A escolha dos condutores considera principalmente as correntes nos enrolamentos. Em relação a corrente, algumas das medidas que o projetista deve ter em mente são

- escolher um condutor com dimensões de forma a reduzir as perdas por correntes parasitas;

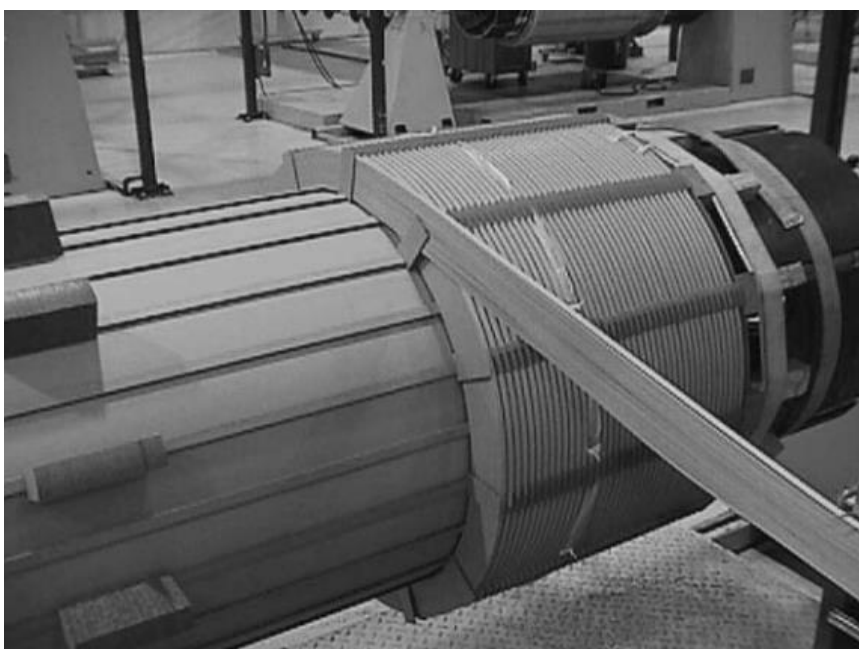
- utilizar a transposição dos condutores paralelos corretamente de forma a garantir uma distribuição de corrente ótima;
- arranjo dos condutores de forma a aumentar a superfície de contato com o óleo resfriador;
- uso da isolação mais fina possível que suporte as tensões que surgem entre condutores;
- resistência a esforços mecânicos provenientes de curto-circuito.

Uma vez que a corrente no primário do transformador é muito alta, a escolha de um cabo singelo acarretaria uma bitola muito grande. A escolha de utilizar o Cabo Transposto Contínuo (CTC) se torna mais viável, uma vez que a aglomeração dos cabos permite um aproveitamento melhor do espaço disponível na máquina.

5.3.2 Tipos de Bobinas

Existem duas classificações principais de formatos de bobinas: em camadas ou discos. Bobinas em camadas apresentam espiras separadas entre si ao longo do eixo de rotação. Um tipo usual de bobinas em camadas é a helicoidal, onde espaçadores são inseridos entre os condutores, formando dutos horizontais de resfriamento. O condutor mais comum em bobinas helicoidais é o CTC, podendo ser necessária a utilização de múltiplos cabos em paralelo para garantir a seção transversal mínima. A Figura (6) mostra uma bobina helicoidal em construção.

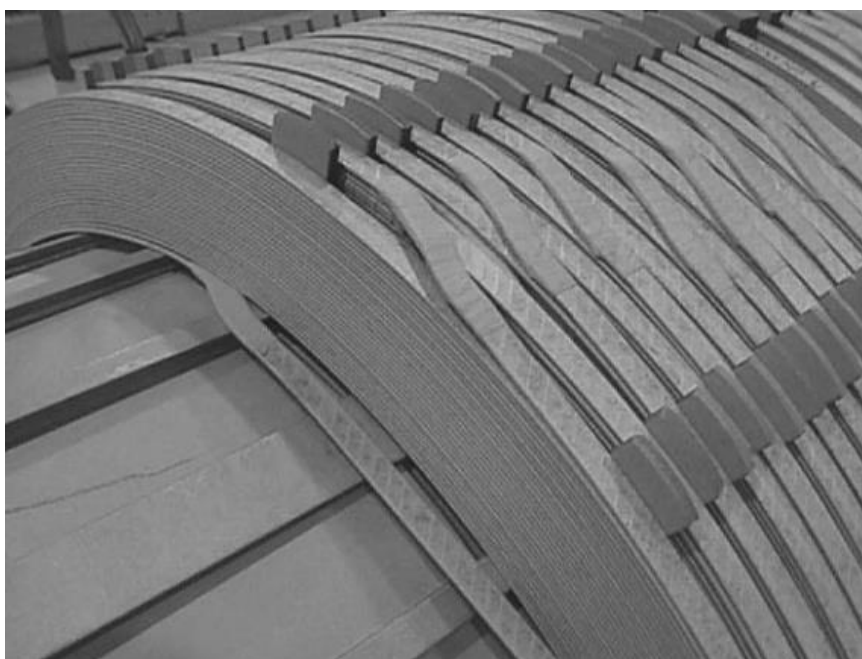
Figura 6 - Bobina Helicoidal em Construção



Fonte: HARLOW J. (2004)

As bobinas em disco apresentam espiras separadas radialmente, formando discos que são conectados em série para formar uma bobina. Um disco convencional apresenta dutos horizontais entre os discos, expondo uma grande superfície dos condutores para resfriamento. Existem ainda variações desse tipo de bobina onde pode se alcançar um resfriamento ainda maior com a inserção de dutos verticais entre as espiras, recebendo o nome de discos fechados. A Figura (7) apresenta uma bobina em discos.

Figura 7 – Bobina em Discos em Construção



Fonte: Harlow J. (2004)

Considerando os pontos citados anteriormente, as bobinas do projeto foram escolhidas e calculadas. Para o enrolamento duplo de BT, foi utilizada uma bobina helicoidal com condutores CTC de cobre, visto seu menor nível de tensão e mais alta corrente. Para o enrolamento de AT foi utilizada uma bobina em disco fechado com condutores CTC de cobre.

5.4 Projeto Térmico

Segundo Ries, W. (2007), o cálculo térmico de transformadores “consiste no dimensionamento do sistema de refrigeração necessário para dissipar as perdas, sem que as elevações de temperatura dos enrolamentos e do óleo ultrapassem os valores especificados pelas normas, de acordo com a classe térmica dos materiais empregados na construção.

O resfriamento ocorre pela retirada de calor dos enrolamentos, onde circulam correntes muito altas, e do núcleo através de um fluido (ar ou óleo). Essa troca de calor se dá por três maneiras: condução, convecção e radiação. A condução se dá do centro do núcleo e enrolamentos até as superfícies em contato com o meio (ar ou óleo) e pelas paredes do tanque e dos radiadores. A convecção se realiza pelas superfícies externas do núcleo e dos enrolamentos ao fluido, do fluido às paredes do tanque e radiadores, das paredes do tanque e radiadores ao meio externo. A radiação se dá pelas paredes externas do tanque e radiadores ao ar, da superfície do núcleo e enrolamentos ao fluido.

5.4.1 Sistema de Resfriamento

Para transformadores a óleo, os principais sistemas de refrigeração são Óleo com circulação Natural e Ar com circulação Natural (ONAN), Óleo com circulação Natural e Ar com circulação Forçada (ONAF) e Óleo com circulação Forçada e Ar com circulação Forçada (OFAF). É comum uma máquina utilizar diferentes sistemas de resfriamento para operar em diferentes faixas de potência.

No caso do sistema ONAN, tem-se que o óleo no interior do transformador circula naturalmente pelos radiadores por convecção quando o isolante aquece. Quando o óleo circula pelos radiadores, ele perde calor para o ar que circula por entre os radiadores, mantendo assim uma temperatura aceitável.

No sistema ONAF, o óleo circula dentro do transformador e dos radiadores por convecção natural, como no casos ONAN, porém são instalados ventiladores nas laterais externas ou embaixo dos radiadores. Esses ventiladores permitem uma troca de calor com o ar mais intensa, conseguindo reduzir ainda mais a temperatura da máquina.

O sistema OFAF é o sistema de resfriamento mais eficiente entre os três citados. Nesse sistema, uma bomba de óleo é instalada no transformador, aumenta a vazão do óleo no sentido da convecção natural. Na parte externa dos radiadores são instalados ventiladores para forçar a circulação de ar.

Como a máquina foi especificada para operação em duas faixas de potência, até 150 MVA e até 180 MVA, o projeto considerou um sistema ONAN para a faixa de operação até 150 MVA e um sistema ONAF de 150 até 180 MVA.

5.4.2 Limites de Elevação de Temperatura

A norma NBR 5356 apresenta a Tabela (1), onde se encontram os limites de elevação de temperatura dos enrolamentos, do óleo e das partes metálicas de um transformador nas condições normais de temperatura do meio de resfriamento, da altitude, da tensão de alimentação, da corrente de carga e do fluxo de potência.

Tabela 1 – Limites de Elevação de Temperatura

Sistema de preservação de óleo	Limites de elevação de temperatura °C ^a					
	Dos enrolamentos				Das partes metálicas	
	Média, por medição da variação de resistência		Do ponto mais quente	Do topo do óleo	Em contato com a isolamento sólida ou adjacente a elas	Não em contato com a isolamento sólida e não adjacente a elas
	Circulação do óleo natural ou forçada sem fluxo de óleo dirigido	Circulação forçada de óleo com fluxo dirigido ^f				
Sem conservador e sem gás inerte sob pressão	55 95 ^g	60 100 ^g	65 120 ^g	50 ^b 60 ^g	Não devem atingir temperaturas superiores à classe térmica do material da isolamento-adjacente ou em contato com estas	A temperatura não deve atingir-valores que venham a danificar componentes ou materiais adjacentes
Com conservador ou com gás inerte sob pressão	55 65 ^d 95 ^g	60 70 ^d 100 ^g	65 80 ^d 120 ^g	55 ^c 65 ^d 65 ^g		

^a Os materiais isolantes devem ser adequados, de acordo com a ABNT NBR 7034, ao limite de elevação de temperatura em que o transformador é enquadrado.

^b Medida próxima à superfície do óleo.

^c Medida próxima à parte superior do tanque, quando tiver conservador, e próxima à superfície do óleo, no caso de gás inerte.

^d Para esse limite de temperatura, quando é utilizada isolamento de papel, este deve ser termoestabilizado.

^e A verificação de temperatura do ponto mais quente é feita mediante acordo entre o fabricante e o comprador.

^f O método de verificação do fluxo de óleo forçado dirigido constitui objeto de acordo entre o fabricante e o comprador.

^g Estes limites de elevação de temperatura são aplicáveis, desde que acordado entre fabricante e comprador. Neste caso, deve ser utilizado o sistema híbrido de isolamento composto por isolantes sólidos à base de aramida ou similares (Classe C), apenas onde necessário (adjacentes aos condutores dos enrolamentos), e isolantes sólidos à base de celulose onde a temperatura máxima não ultrapasse os 120 °C, imersos em óleo mineral isolante, com base na IEEE Std. 1276:1997.

Fonte: NBR 5356 Parte 2: Aquecimento

O número de radiadores a ser instalado na máquina vai ser calculado de forma a garantir que os limites especificados na norma e na especificação da técnica sejam atendidos. Caso o resfriamento da máquina não se faça suficiente, são instalados mais radiadores. Para o projeto do transformador desse trabalho foram necessários 25 radiadores instalados com 28 aletas por radiador.

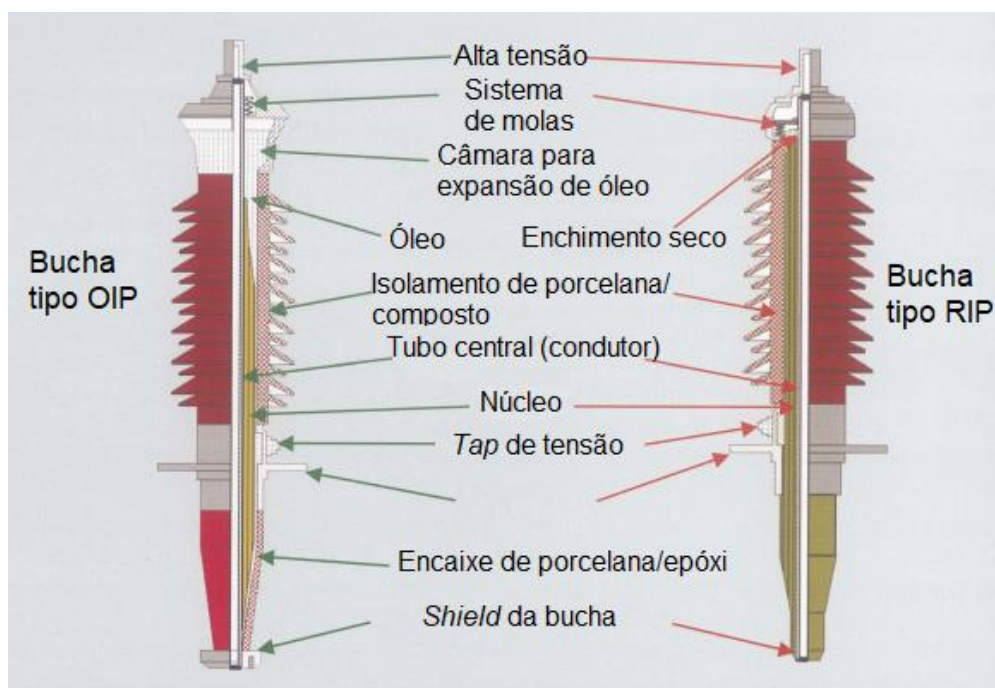
5.5 Buchas

As buchas utilizadas no transformador são escolhidas principalmente com base nos valores de tensão e corrente de cada um dos terminais, no entanto, existem outros fatores a serem considerados também, como o ambiente de aplicação e instalação. Quanto aos aspectos construtivos, os dois principais tipos são buchas sólidas ou capacitivas.

As buchas de tipo sólido são o tipo de bucha mais antigo, sendo utilizadas antigamente em aplicações até 123 kV. Atualmente, esse tipo de bucha teve seu alcance de aplicação diminuído, sendo utilizado em aplicações de média tensão, até 36 kV.

As buchas capacitivas suportam tensões aplicadas mais altas em relação às buchas sólidas pois apresentam uma melhor distribuição dos campos no interior da bucha. Isso é alcançado introduzindo camadas condutivas intermediárias, posicionadas concentricamente, de forma a controlar os campos. Esse tipo de buchas costuma apresentar como material isolante resina, a chamada bucha de papel resinado (*Resin-Bonded Paper* ou RBP), ou então óleo, a chamada bucha de papel com óleo impregnado (*Oil-Impregnated Paper* ou OIP). A Figura (8) ilustra a construção de uma bucha RBP e uma bucha OIP.

Figura 8 – Buchas OIP e RBP



Adaptado de: AREVA; Power Transformers Volume 2: Expertise

Para as buchas no terminal de BT, considerando que a tensão nominal é de 35 kV, foi escolhida uma bucha de tipo sólida com ambiente de aplicação óleo-ar e instalação ao tempo. A tensão nominal da bucha é de 40,5 kV, respeitando o limite de tensão máxima do enrolamento de BT. O mesmo ocorre para a corrente, que possui um valor nominal de 6000 A, respeitando o limite da corrente máxima no enrolamento de BT de 3615 A.

Para as buchas de AT, foi escolhida uma bucha OIP com ambiente de aplicação óleo-ar e instalação ao tempo. A tensão nominal da bucha é de 362 kV, acima do valor da tensão máxima do enrolamento de AT de 258,7 kV. Para a corrente, a bucha tem um valor nominal de 1600 A, respeitando a corrente máxima de AT do transformador de 620 A.

Para as buchas de neutro, foram escolhidas buchas sólidas com ambiente de aplicação óleo-ar e instalação ao tempo. A escolha se deve principalmente ao fato de que os neutros de ambos os terminais estão aterrados.

5.6 Comutador

O tipo de comutador a ser utilizado na máquina é determinado pelo cliente e apresentado na especificação técnica. Neste caso, foi utilizado um comutador de derivação em carga (OLTC) no terminal de AT. O modelo especificado da fabricante Huaming é um SHVZ. Segundo Huaming (2010), o modelo SHVZ é um comutador imerso em óleo com extinção de arcos dentro de interruptores a vácuo. A principal vantagem para esse tipo de equipamento é que como a extinção do arco é feita a vácuo, a carbonização do óleo não se torna um problema. A Figura (9) apresenta uma foto do comutador utilizado no transformador.

Figura 9 – Comutador SHZV



Fonte: SHZV Vacuum On-Load Tap Changer Operation Instructions

5.7 Valores Garantidos e Valores Calculados

A Tabela (2) apresenta os valores garantidos e calculados no projeto do transformador.

Tabela 2 - Valores Garantidos e Calculados

POTÊNCIA DE REFERÊNCIA	MVA		180		180
ENROLAMENTO			AT-BT		AT-BT
TENSÃO DE REFERÊNCIA	kV		230-34.5		230-34.5
IMPEDÂNCIA	85°C	%	14.06		14
CORRENTE DE EXCITAÇÃO @ 100 Vn		%	0.11		0.3
CORRENTE DE EXCITAÇÃO @ 110 Vn		%			
PERDAS A VAZIO @ 100 Vn		kW	84.31		90
PERDAS A VAZIO @ 110 Vn		kW			
PERDAS EM CARGA	85°C	kW	440.25		450
PERDAS AUXILIARES		kW			
PERDAS TOTAIS	85°C	kW	524.57		540
NÍVEL DE RUÍDO		dB(A)	74.1		86

Fonte: própria do autor

5.7.1 Potência e Tensões de Referência

As primeiras linhas apresentam as principais características do projeto. Tanto a tensão de referência quanto a potência de referência são calculadas de forma a garantir um valor exato ao especificado. Por essa razão podemos observar uma potência garantida de 180 MVA, com uma tensão garantida de 230 kV no terminal de AT e uma tensão garantida de 34,5 kV no terminal de BT.

5.7.2 Impedância Percentual

Considerando o circuito equivalente do transformador sob carga, a impedância interna do transformador pode ser representada por uma impedância Z , formada por um resistor R e uma reatância X em série, conforme mostra a Equação (20).

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} \quad (20)$$

A impedância percentual por sua vez, é dada pelo módulo da impedância Z em percentagem da impedância básica Z_B , dada pela Equação (21), onde V_B é a tensão básica, I_B a corrente básica e S_B a potência básica.

$$Z_B = \frac{V_B}{I_B} = \frac{V_B^2}{V_B I_B} = \frac{V_B^2}{S_B} \quad (21)$$

Em sistemas trifásicos, como é o caso do transformador deste trabalho, adota-se a tensão básica como sendo a tensão de linha, a corrente básica como sendo a corrente de linha e a potência básica como sendo a potência trifásica nominal. Por fim, tem-se que a impedância percentual é a impedância interna por fase do transformador dividida pela impedância básica, e pode ser encontrada pela Equação (22).

$$Z_{\%} = \frac{Z}{Z_B} \times 100 \quad (22)$$

Conforme Ries, W. (2007), a impedância percentual pode apresentar outras interpretações:

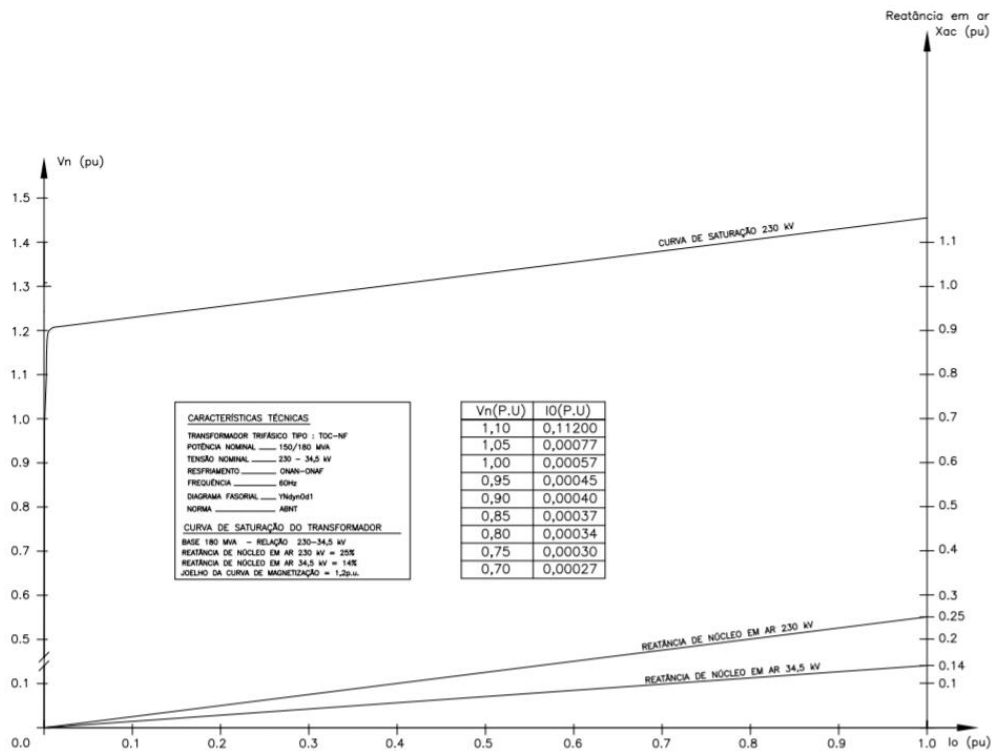
- A impedância percentual representa a percentagem da tensão nominal que deve ser aplicada por fase no transformador em curto-circuito para fazer circular pelos seus enrolamentos a corrente nominal.
- A impedância percentual representa a percentagem da potência interna nominal por fase que deve ter a fonte de alimentação para fazer circular a corrente nominal nos enrolamentos do transformador em curto-circuito.

Observa-se que o valor calculado da impedância percentual se encontra muito próximo do valor garantido especificado.

5.7.3 Corrente de Excitação e Perdas no Ferro

A corrente de excitação está diretamente associada às perdas no ferro do transformador. Com a fixação da indução máxima do núcleo prevista na especificação técnica, se encontra a intensidade de campo magnético através da curva de indução do material, conforme a Figura (10).

Figura 10 – Curva de saturação do núcleo



Fonte: própria do autor

A indução é escolhida na proximidade do joelho da curva de magnetização para que a corrente de excitação não ultrapasse o valor especificado, ou seja, o cálculo da corrente de excitação é um processo iterativo.

Além disso, ao se utilizar chapas de GOS, existem partes do núcleo onde a direção do fluxo não coincide com a orientação da chapa. Nesses casos se utiliza as curvas de magnetização que dão o valor de potência por unidade de massa do material em função da indução aplicada. Levando em consideração as questões abordadas, segundo Ries, W. (2007) as perdas por excitação no núcleo podem ser calculadas pela Equação (23),

$$p_0 = (W/kg)_0 M_0 + (W/kg)_{90} M_{90} \quad (23)$$

onde:

- M_0 e M_{90} são, respectivamente, as massas do material percorrido com fluxo coincidente e em quadratura com a orientação dos grãos da chapa;

- $(W/kg)_0$ é o valor correspondente ao material com grãos orientados no sentido do fluxo magnético e $(W/kg)_{90}$ orientados a 90° em relação ao fluxo.

A corrente de excitação percentual corresponde, segundo Ries, W. (2007), ao resultado da Equação (24).

$$I_0\% = 100 \frac{p_0}{\text{Potência Nominal}} = 100 \frac{(W/kg)_0 M_0 + (W/kg)_{90} M_{90}}{\text{Potência Nominal}} \quad (24)$$

As perdas no ferro ficaram dentro do limite especificado de 90 kW: 84,31 kW. Quanto a corrente de excitação percentual, o valor calculado foi de 0,11%.

5.7.4 Perdas no Cobre

As perdas no cobre, também chamadas de perdas nos condutores, se dão por diversas razões: perdas ôhmicas nos enrolamentos, perdas parasitas nos condutores, perdas por circulação de corrente entre condutores de uma mesma espira e perdas devidos a harmônicos no sistema.

As perdas ôhmicas são influenciadas pelos aspectos construtivos dos condutores (comprimento e seção transversal) e as características do seu material (resistividade e coeficiente de variação de resistividade em função da temperatura).

Segundo Ries, W; (2007), as perdas parasitas W_p podem ser calculadas a partir das perdas ôhmicas W_0 através de um coeficiente de perdas parasitas k_p , conforme a Equação (25).

$$W_p = k_p W_0 \quad (25)$$

O coeficiente de perdas parasitas é uma função de fatores como formato do condutor, frequência, número de condutores, corrente entre outros.

As perdas ôhmicas calculadas no projeto ficaram dentro do limite estabelecido pela norma de 450 kW: 440,25 kW. Com esse valor, o somatório de todas as perdas

calculadas no transformador ficou dentro do limite estabelecido: 524,57 kW. Tendo sido validado o projeto, pode ser iniciada a produção da máquina.

6 ENSAIOS

Uma vez que a produção da máquina e os processos fabris pelos quais ela passa não compreendem o escopo desse trabalho, essas etapas serão puladas até a última etapa em fábrica do transformador. Logo, essa seção tem como objetivo apresentar os ensaios realizados em fábrica no transformador, seus métodos e objetivos.

6.1 Ensaios de Rotina

6.1.1 Medição da resistência dos enrolamentos

O objetivo desse ensaio é identificar e corrigir possíveis curtos-circuitos entre os enrolamentos, erros nos números de espiras e diferenças nas seções das barras. A resistência elétrica dos enrolamentos deve ser medida na derivação da tensão mais alta e corrigida para a temperatura de referência. Em transformadores de trifásicos, esse valor é dado por fase.

Em transformadores de óleo, determina-se que a temperatura do enrolamento é igual à temperatura média do óleo. Para calcular a temperatura média do óleo, se faz a média das temperaturas do óleo no topo e no fundo do tanque.

6.1.2 Medição da relação de transformação e da polaridade e verificação do deslocamento angular e da sequência de fases

A relação de transformação do transformador deve ser verificada em todas as derivações do transformador. As tensões são consideradas sempre com o transformador operando em vazio e os limites de tolerância são definidos pela norma NBR 5356, conforme a Tabela (3).

A relação deve ser medida entre cada um dos enrolamentos, então no caso de o transformador ensaiado apresentar três enrolamentos, serão medidas 3 relações: entre primário e secundário, entre primário e terciário e, finalmente, entre secundário e terciário. Caso o transformador apresente um enrolamento com regulação por comutador, a relação de tensão deve ser medida para cada uma das posições do comutador.

Tabela 3 - Tolerância para ensaio de relação de transformação

Características Especificadas	Tolerância
Relação de tensões em qualquer derivação	
- Deve ser aplicada a menor das tolerâncias indicadas	$\pm 0,5 \%$
- Em transformadores providos de derivações, quando a tensão por espira for superior a 0,5 % da tensão de derivação respectiva, a tolerância especificada aplica-se ao valor da tensão correspondente à espira completa mais próxima.	$\pm 1/10$ da impedância de curto-circuito, expressa em porcentagem

Fonte: NBR 5356

6.1.3 Medição da impedância de curto-circuito e das perdas em carga

Os ensaios de medição da impedância de curto-circuito e das perdas em carga devem verificar se os valores reais desses parâmetros estão dentro da tolerância na norma NBR 5356, conforme Tabela (4).

Tabela 4 – Tolerâncias para ensaio de curto-circuito e perdas em carga

Item	Características Especificadas	Tolerância
01	Impedância de curto-circuito	
	a) Diferença no valor medido em relação ao valor declarado pelo fabricante	
	b) Tolerâncias na diferença entre os valores de impedância de quaisquer dois transformadores do mesmo projeto, em relação ao valor declarado pelo fabricante.	
	- Transformadores de dois enrolamentos	$\pm 7,5 \%$
	- Transformadores de mais de dois enrolamentos	$\pm 10 \%$
	- Transformadores com enrolamentos em zigzag	$\pm 10 \%$
	- Autotransformadores	$\pm 10 \%$
	c) São considerados aptos a trabalhar em paralelo os transformadores que obedecem aos limites acima especificados.	
02	Perdas em carga (qualquer tipo de transformador)	+6%

Fonte: NBR 5356

Esse ensaio é feito aplicando uma tensão CA com frequência nominal nos terminais de AT de forma a obter uma corrente nominal no mesmo lado. O outro enrolamento deve ter seus terminais em curto-circuito. A potência de curto-circuito e a tensão de curto-circuito são medidas e assim a impedância de curto-circuito é calculada conforme as Equações (26)-(28).

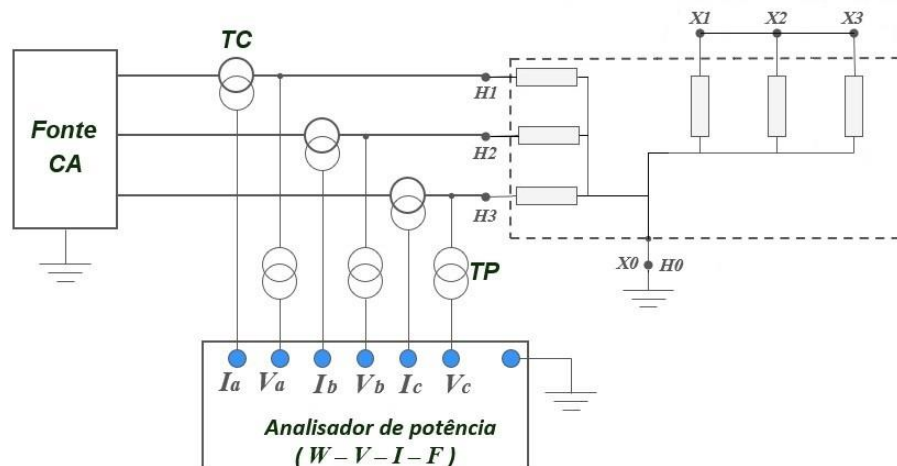
$$R_{CC} = \frac{P_{CC}}{I_{CC}^2} \quad (26)$$

$$Z_{CC} = \frac{V_{CC}}{I_{CC}} \quad (27)$$

$$X_{CC} = (Z_{CC}^2 - R_{CC}^2)^{1/2} \quad (28)$$

Uma vez que a corrente de curto-circuito é medida no lado de AT, a tensão necessária para atingir a corrente nominal no lado de BT é consideravelmente menor que a tensão nominal do lado de AT. Com essa consideração, pode se aproximar a potência medida como sendo as perdas dos enrolamentos, uma vez que as perdas no núcleo se tornam desprezíveis. A Figura (11) apresenta a ligação típica utilizada nesse ensaio.

Figura 11 – Ligação típica para ensaio em curto-circuito



Fonte: própria do autor

6.1.4 Medição das perdas em vazio e da corrente de excitação

Para o ensaio de perdas em vazio e corrente de excitação, aplica-se a tensão nominal com frequência nominal no enrolamento. Os demais enrolamentos devem permanecer em circuito aberto e enrolamentos com ligação em triângulo devem ter o triângulo fechado, conforme a norma NBR 5356. Os valores reais da medição desse ensaio devem obedecer a tolerância especificada e a tolerância estabelecida na norma NBR 5356, conforme a Tabela (5).

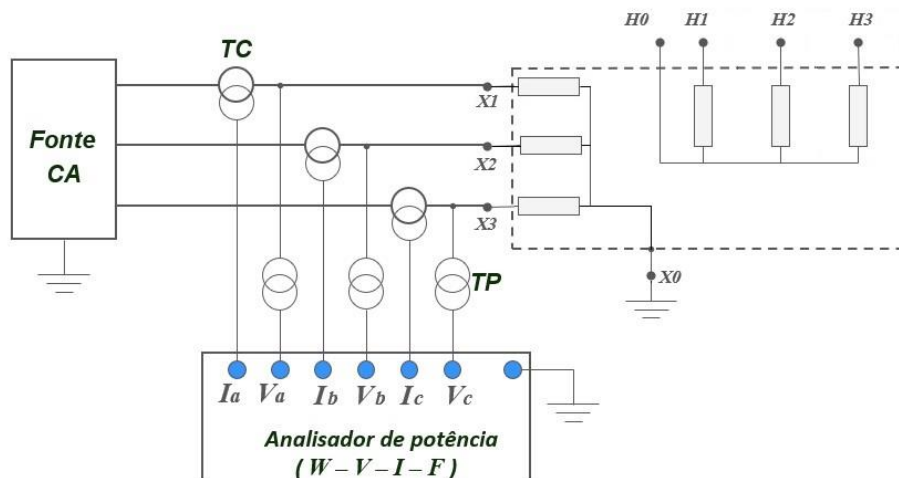
Tabela 5 – Tolerância para ensaio de perdas em vazio e corrente de excitação

Item	Características Especificadas	Tolerância
01	Perdas em vazio (qualquer tipo de transformador)	+10%
02	Corrente de Excitação	+20%

Fonte: NBR 5356

A Figura (12) apresenta a ligação utilizada nesse tipo de ensaio. O ensaio é realizado com tensão nominal, dessa maneira, a potência a vazio P_0 e a corrente de excitação I_0 são medidas. Nesse caso, a tensão V_0 corresponde à tensão nominal do enrolamento.

Figura 12 – Ligação típica para ensaio a vazio



Fonte: própria do autor

Como nesse caso a corrente que circula no enrolamento é bastante pequena (uma vez que os terminais de saída estão em circuito aberto), as perdas nos enrolamentos podem ser desprezadas. Então a potência de entrada no transformador corresponde às perdas no núcleo (perdas por histerese e perdas por correntes parasitas). Esses parâmetros são constantes desde que a tensão aplicada seja também constante.

6.1.5 Ensaios dielétricos de rotina

Os ensaios dielétricos têm como objetivo verificar se os materiais dielétricos atendem os requisitos especificados. Conforme a norma NBR 5356, os ensaios dielétricos são realizados conforme a seguinte sequência:

- a) Impulso de manobra (IM) para terminal de linha: verifica a suportabilidade a impulso de manobra nos terminais de linha e dos enrolamentos a eles conectados para terra e para outros enrolamentos, a suportabilidade entre fases e ao longo do enrolamentos sobre ensaio.
- b) Impulso atmosférico (IA) nos terminais de linha: verifica a suportabilidade a impulso atmosférico do transformador, quando o impulso atmosférico for aplicado a seus terminais de linha.
- c) Impulso atmosférico (IA) no terminal de neutro: verifica a suportabilidade a impulso atmosférico do transformador no terminal de neutro e dos enrolamentos a ele conectados, para terra e para outros enrolamentos e ao longo do enrolamento sob ensaio.
- d) Ensaio de tensão suportável a frequência industrial ou tensão aplicada: verifica a suportabilidade a tensões alternadas, para a terra e para os outros enrolamentos, dos terminais de linha e de neutro e dos respectivos enrolamentos a eles conectados.
- e) Tensão induzida de curta duração (CACD): verifica a suportabilidade a tensões alternadas, para a terra e para os outros enrolamentos, de cada terminal de linha e de neutro e respectivos enrolamentos e eles conectados, e a suportabilidade entre fases e ao longo do enrolamento sob ensaio.
- f) Tensão induzida de longa duração (CALD): é um ensaio de controle de qualidade e pretende cobrir sobretensões temporárias e solicitações contínuas durante o serviço. Ele certifica a operação livre de descargas parciais do transformador nas condições operacionais.

Conforme a especificação técnica da máquina, cada enrolamento do transformador tem um valor atribuído de tensão máxima. É esse valor de tensão máxima que vai governar as regras de isolamento do transformador e suas características dielétricas. A Tabela (6) apresenta os requisitos de isolamento e de

ensaios de dielétricos, de acordo com a NBR 5356-3 de acordo com a tensão máxima da máquina.

Tabela 6 – Requisitos de isolamento e de ensaios dielétricos

Tensão máxima do equipamento U_m kV	Ensaio					
	Impulso atmosférico (Seções 13 e 14)		Impulso de manobra (IM) (Seção 15)	Tensão induzida de longa duração (CALD) (12.4)	Tensão induzida de curta duração (CACD) (Seção 12)	Tensão suportável à frequência industrial (Seção 11)
	Onda plena (IA)	Onda cortada (IAC)				
$U_m \leq 72,5$	Tipo	Tipo	Não aplicável	Não aplicável	Rotina	Rotina
$72,5 < U_m \leq 170$	Tipo	Tipo	Não aplicável	Especial	Rotina	Rotina
$170 < U_m < 300$	Tipo	Tipo	Rotina (ver nota)	Rotina	Especial (ver nota)	Rotina
$U_m \geq 300$	Rotina	Rotina	Rotina (ver nota)	Rotina	Especial (ver nota)	Rotina

NOTA Se o ensaio de tensão induzida de curta duração for especificado, o ensaio de impulso de manobra não é necessário. Isto deve estar claramente definido nas especificações.

Fonte: NBR 5356-3

Conforme a especificação técnica do transformador, a Tabela (7) apresenta os valores dos níveis de isolamento necessários para os ensaios dielétricos.

Tabela 7 – Níveis de isolamento na especificação técnica

Níveis de Isolamento						
Terminais:	AT	BT	NAT	NBT	TERC	
Impulso Atmosférico Onda Plena (kV):	950	170	110	110	110	
Impulso Atmosférico Onda Cortada (kV):	1045	187	-	-	-	
Impulso Manobra (kV):	750					
Tensão Aplic. ao Dielétrico Entre Terminais (kV):	34	34	34	34	34	
Tensão Aplic. ao Dielétrico Terminal e Massa (kV):						
Induzida de Longa Duração (kV):	212/241					

Fonte: própria do autor

6.1.6 Ensaios de comutador de derivações em carga

Com o comutador já instalado no equipamento, esse ensaio segue à seguinte sequência de operações:

- a) Oito ciclos completos de funcionamento, com o transformador desenergizado;

- b) Um ciclo completo de funcionamento, com o transformador desenergizado, com 85% da tensão nominal de alimentação dos auxiliares;
- c) Um ciclo completo de funcionamento com o transformador desenergizado em vazio, a tensão e frequência nominais;
- d) Com um enrolamento em curto-circuito e com a corrente mais próxima possível da corrente nominal no enrolamento com derivações, dez operações de mudança de derivações entre dois degraus de cada lado da posição onde o seletor de reversão de derivações opera.

6.1.7 Medição da resistência de isolamento

Conforme a norma NBR 5356, a resistência de isolamento deve ser medida antes dos ensaios dielétricos, no entanto, esse ensaio não constitui critério para aprovação ou rejeição da máquina.

6.1.8 Estanqueidade e resistência à pressão

A estanqueidade do transformador deve ser ensaiada antes do início ou após o término dos ensaios dielétricos. O objetivo é verificar possíveis vazamentos de óleo na máquina. Quanto à resistência a pressão, os transformadores devem suportar pressões específicas por tempos determinados pela norma NBR 5356, conforme a Tabela (8).

Tabela 8 - Valores para ensaio de estanqueidade

Tipo do transformador	Pressão manométrica Mpa	Tempo de aplicação h
Selado com colchão de gás	0,07	1
Selado de Enchimento Integral	0,01	1
Não selado, com tensão máxima do equipamento superior a 72,5 kV ou potência nominal superior a 10 MVA.	0,05	24
Não selado, com tensão máxima do equipamento inferior a 72,5 kV ou potência nominal inferior a 10 MVA.	0,03	24

Fonte: NBR 5356

Para o ensaio de estanqueidade, a pressão é aplicada por meio de ar comprimido seco ou nitrogênio seco. A pressão é lida em um manômetro instalado entre a válvula de admissão de ar e o transformador. Quando o transformador atinge a pressão especificada, a válvula no tubo de fornecimento é fechada, interrompendo a entrada do gás. A pressão deve se manter constante durante o tempo de aplicação definido na norma.

6.1.9 Verificação do funcionamento dos acessórios

São realizados ensaios para verificação de funcionamento no seguintes acessórios do transformador:

- Indicador externo do nível do óleo;
- Indicador de temperatura do óleo;
- Relé Buchholz;
- Indicador de temperatura do enrolamento;
- Comutador sem tensão;
- Ventilador;
- Bomba de óleo;
- Indicador de circulação do óleo;
- Válvula de alívio de pressão.

Pode-se realizar também ensaios de verificação em outros acessórios que o transformador possa a vir utilizar. Os procedimentos para cada um dos ensaios são descritos separadamente no Anexo E da norma NBR 5356-1.

6.1.10 Ensaio de óleo isolante

Nesse ensaio são validados os parâmetros do óleo como rigidez dielétrica, teor de água, fator de perdas dielétricas ou fator de dissipação e tensão interfacial. Os critérios de aceitação do óleo mineral isolante, após contato com equipamento, são indicados na Tabela (9), conforme a norma NBR 5356.

Tabela 9 – Características do óleo mineral após contato com o equipamento

Características			Método de ensaio	Unidade	Valores garantidos	
					Mínimo	Máximo
Tensão interfacial a 25 °C			ABNT NBR 6234	mN/m	40	-
Teor de água		$U_m < 72,5\text{kV}$	ABNT NBR 5755	ppm	-	25
		$U_m \geq 72,5\text{kV}$			-	15
Rigidez dielétrica		$U_m < 72,5\text{kV}$	ABNT NBR 6869	kV	30	-
		$U_m < 72,5\text{kV}$	ABNT NBR IEC 60156		50	-
		$U_m \geq 72,5\text{kV}$			70	-
Fator de perdas dielétricas ou Fator de dissipação	a 100°C	$U_m < 72,5\text{kV}$	ASTM D924	%	-	0,9
		$U_m \geq 72,5\text{kV}$			-	0,6
	a 90°C	$U_m < 72,5\text{kV}$	IEC 60247		-	0,7
		$U_m \geq 72,5\text{kV}$			-	0,5

Fonte: NBR 5356

6.1.11 Verificação da espessura e aderência da pintura da parte externa

Para transformadores com tensão nominal maior que 242 kV, os valores de referência são especificados na norma NBR 11388. A espessura deve ser medida em ao menos três pontos do tanque principal e um ponto da tampa do transformador. Já a aderência, deve ser verificada pelo método do corte em grade ou pelo método do corte em X, de acordo com a norma NBR 11003.

6.2 Ensaio de Tipo

6.2.1 Nível de ruído

O ensaio para determinação de nível de ruído audível é realizado conforme a norma ABNT NBR 7277. Os níveis de ruído são definidos pela norma segundo a Tabela (10).

Tabela 10 – Níveis de ruído para transformadores em óleo de potência > 500kVA

Nível de ruído médio dB	Potência nominal do transformador equivalente com dois enrolamentos ^a								
	kVA								
	I.A. de 950 kV a 1 050 kV ^b			I.A. 1 175 kV ^b			I.A. de 1 300 kV a 2 100 kV ^b		
	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)
73	12 500								
74	15 000			12 500					
75	20 000	16 667		15 000			12 500		
76	25 000	20 000	20 800	20 000	16 667		15 000		
77	30 000	26 667	25 000	25 000	20 000	20 800	20 000	16 667	
78	40 000	33 333	33 333	30 000	26 667	25 000	25 000	20 000	20 800
79	50 000	40 000	41 667	40 000	33 333	33 333	30 000	26 667	25 000
80	60 000	53 333	50 000	50 000	40 000	41 667	40 000	33 333	33 333
81	80 000	66 667	66 667	60 000	53 333	50 000	50 000	40 000	41 667
82	100 000	80 000	83 333	80 000	66 667	66 667	60 000	53 333	50 000
83		106 667	100 000	100 000	80 000	83 333	80 000	66 667	66 667
84		133 333	133 333		106 667	100 000	100 000	80 000	83 333
85			166 667		133 333	133 333		106 667	100 000
86			200 000			166 667		133 333	133 333
87			250 000			200 000			166 667
88			300 000			250 000			200 000
89			400 000			300 000			250 000
90						400 000			300 000
91									400 000

^a Potência nominal do transformador equivalente com dois enrolamentos: é a metade da soma das potências nominais aparentes nos terminais de todos os enrolamentos do transformador.

^b I.A: Tensão suportável a impulso atmosférico.

NOTA 1 Tipo de resfriamento:
 (1) ONAN, OFWF, ODWF.
 (2) ONAF, OFAF, ODAF, com primeiro estágio de resfriamento em funcionamento.
 (3) OFAF, ODAF, com trocador de calor, ONAF, OFAF, ODAF com segundo estágio de resfriamento em funcionamento.

NOTA 2 Para valores intermediários de potência, usar o nível médio de ruído superior mais próximo.

NOTA 3 Nas colunas (2) e (3), os níveis de ruído são considerados com o equipamento de resfriamento auxiliar em funcionamento.

Fonte: NBR 5356

6.2.2 Elevação de temperatura

Segundo a norma NBR 5356, o método para determinação da elevação de temperatura em regime permanente de transformadores imersos em óleo, por razões práticas, é o método de curto-circuito. Nesse ensaio, o transformador é submetido a uma condição de perdas totais iguais às perdas totais calculadas. O objetivo é encontrar a elevação de temperatura do topo do óleo em regime permanente a perdas totais e a elevação de temperatura média dos enrolamentos à corrente nominal.

O ensaio é realizado em duas etapas. Na primeira etapa, o transformador opera com as perdas totais calculadas com o objetivo de estabelecer a elevação de temperatura do óleo sobre o meio de resfriamento. A temperatura do óleo e do meio de resfriamento são monitoradas até que se atinja um regime estável da elevação de temperatura. O ensaio termina quando a taxa de variação da temperatura do topo do óleo for menor que 1 °C durante um período de três horas.

Na segunda etapa do ensaio, é aplicada a corrente nominal para estabelecer a elevação de temperatura média dos enrolamentos sobre o óleo. Quando a elevação de temperatura do topo do óleo for determinada, o ensaio continua com uma corrente de ensaio nominal. Essa condição é mantida por uma hora, mantendo vigilância sobre as temperaturas do óleo e do meio de resfriamento. Ao final desse período, as resistências dos enrolamentos são medidas e os valores de temperatura média dos enrolamentos são determinados conforme a norma NBR 5356.

As duas etapas podem ser combinadas em uma aplicação de potência correspondente a um valor entre as perdas em carga e as perdas totais. Assim os valores de elevação de temperatura para o topo do óleo e para os enrolamentos devem ser determinados segundo regras de correção conforme descreve a norma NBR 5356.

6.2.3 Análise do óleo

A análise cromatográfica do óleo consiste em analisar os gases dissolvidos no óleo do transformador. Ela é utilizada para detectar possíveis pontos de aquecimento acima do normal que não seriam identificados pelo ensaio de elevação de temperatura. Tais pontos de aquecimento são originários de contatos involuntários, que acabam por fazer circular correntes parasitas. Esse costuma ser um ensaio de grande importância para transformadores de grande porte.

O óleo deve ser retirado para análise nas seguintes etapas dos ensaios:

- I. Antes do início dos ensaios;
- II. Após os ensaios dielétricos;
- III. Após o ensaio de elevação de temperatura.

A norma NBR 5356 define que os critérios de aceitação para os valores medidos devem ser acertados entre comprador e fabricante.

7 RESULTADOS E ANÁLISE

Esse capítulo tem como objetivo expor os resultados dos ensaios do transformador em fábrica. As medições encontradas são comparadas com os valores calculados durante a fase de projeto da máquina e com os limites de tolerância especificados pelas normas pertinentes. Divergências entre essas etapas são analisadas e justificadas.

7.1 Ensaio de Rotina

7.1.1 Medição da resistência dos enrolamentos

O Anexo II apresenta as medições dos ensaios de resistência dos enrolamentos. Conforme o procedimento da norma, a resistência é medida a frio com uma corrente contínua. Conforme a norma, a resistência de cada fase é medida considerando a temperatura do enrolamento (temperatura média do óleo) e corrigida para a temperatura de referência especificada de 85 °C. No caso do enrolamento de AT, a medição é repetida para cada uma das 25 posições do comutador.

7.1.2 Medição da relação de transformação e da polaridade e verificação do deslocamento angular e da sequência de fases

O Anexo III apresenta as tabelas ensaiadas para cada uma das combinações de enrolamentos. Para a relação entre o enrolamento de AT e o enrolamento de BT, foram feitas medições para as 25 posições do comutador, considerando as tensões de fase de cada um dos enrolamentos. Estando os dois enrolamentos ligados em uma conexão Y, é medida a tensão entre a fase e o neutro de cada uma das fases. Conforme a Tabela (3), a tolerância considerada para o ensaio foi de 0,5%.

Para a relação de transformação entre o enrolamento de BT e o enrolamento terciário, é feita apenas uma medida para cada uma das fases. O enrolamento de BT apresenta uma ligação em Y, então a medição da tensão é feita entre fase e neutro, já o enrolamento terciário apresenta ligação em delta, então a medição é feita entre

os terminais de duas fases. Conforme a Tabela (3), a tolerância considerada para o ensaio foi de 0,5%.

Por fim, a relação entre o enrolamento de AT e o enrolamento terciário foi realizada para cada uma das 25 posições do comutador do enrolamento de AT. O enrolamento de AT apresenta uma ligação em Y, então a medição da tensão é feita entre fase e neutro, já o enrolamento terciário apresenta ligação em delta, então a medição é feita entre os terminais de duas fases. Conforme a Tabela (3), a tolerância considerada para o ensaio foi de 0,5%.

Após a realização do ensaio, é feita a análise dos resultados. Tendo o transformador apresentado medições dentro das tolerâncias especificadas na norma para esse ensaio, ele está aprovado para esse ensaio.

O deslocamento angular é verificado simultaneamente com as medições de relação de transformação. A instrumentação utilizada para o ensaio é um equipamento chamado *Turns Ratio Tester* (TRT) utilizado especificamente para ensaio de relação de tensões em transformadores. O equipamento utilizado faz a detecção automática do grupo vetorial ensaiado. O Anexo III mostra que o equipamento verificou os deslocamentos angulares adequados para todos os terminais.

7.1.3 Medição da impedância de curto-circuito e das perdas em carga

O Anexo IV apresenta os resultados para as perdas em carga e tensão de impedância considerando o enrolamento de alta tensão excitado e o enrolamento de baixa tensão em curto-circuito. Para 5 posições do comutador e cada base de potência, foram realizadas medidas de tensão, corrente e potência através de um analisador de potência e dos transformadores de potência e de corrente. Dessa forma, as perdas são calculadas e reajustadas para a temperatura de 85 °C. As perdas em carga para o equipamento foram de 436,35 kW. Conforme a especificação técnica da máquina apresentada na Tabela (2), o limite de 450 kW do valor garantido foi respeitado e assim a máquina foi aprovada no ensaio.

Quanto à impedância, considerando-se o valor percentual, foi medido um valor reajustado para 85 °C de 13,969 %. O valor medido se manteve abaixo tanto do valor calculado, de 14,06 %, quanto do valor garantido de 14 %. Sendo assim, a máquina foi aprovada também na medição.

7.1.4 Medição das perdas em vazio e da corrente de excitação

Para a medição das perdas em vazio, foi aplicada a tensão nominal nos terminais do primário com os terminais do secundário em circuito aberto. A potência medida na entrada do transformador foi de 91,2 kW, com uma corrente de excitação de 0,057 %, ficando abaixo do valor garantido de 0,3 %. A Tabela (11) apresenta os valores medidos e calculados no ensaio.

Tabela 11 – Resultados para ensaio de perdas a vazio

Teórico		Tensão (kV)					Corrente (Io) (A)					Perdas (kW)				
%Vn	kV		Vr	Vs	Vt	$\Sigma + 3$	Ir	Is	It	Média	%	Wr	Ws	Wt	Σ	Corrig.
80	15.93	(1) Vm	15.88	15.98	15.93	15.93	1.19	0.91	1.41	1.17	0.039	18.47	13.75	21.81	54.0	54.0
		(1) Vef	15.89	15.97	15.97	15.94	-	-	-							
		(2) Vef	15.88	15.96	15.95	15.93	1.18	0.91	1.41			-	-	-	-	
85	16.93	(1) Vm	16.88	16.99	16.94	16.94	1.30	0.96	1.51	1.25	0.042	21.29	15.52	24.77	61.6	61.5
		(1) Vef	16.90	16.99	16.98	16.96	-	-	-							
		(2) Vef	16.86	16.94	16.94	16.91	1.29	0.96	1.50			-	-	-	-	
90	17.93	(1) Vm	17.88	17.99	17.94	17.94	1.44	1.01	1.62	1.35	0.045	24.56	17.44	28.13	70.1	70.0
		(1) Vef	17.91	18.00	18.00	17.97	-	-	-							
		(2) Vef	17.86	17.95	17.95	17.92	1.43	1.01	1.61			-	-	-	-	
95	18.92	(1) Vm	18.86	18.97	18.91	18.91	1.62	1.09	1.76	1.48	0.049	28.23	19.67	32.03	79.9	79.7
		(1) Vef	18.91	19.00	19.01	18.97	-	-	-							
		(2) Vef	18.85	18.94	18.95	18.91	1.60	1.08	1.75			-	-	-	-	
100	19.92	(1) Vm	19.84	19.97	19.88	19.90	1.92	1.30	2.01	1.73	0.057	31.99	22.63	37.04	91.7	91.2
		(1) Vef	19.94	20.03	20.04	20.00	-	-	-							
		(2) Vef	19.84	19.94	19.95	19.91	1.89	1.29	1.99			-	-	-	-	
105	20.91	(1) Vm	20.82	21.03	20.86	20.90	2.84	2.16	2.95	2.53	0.084	35.87	28.11	46.97	111.0	109.8
		(1) Vef	21.04	21.16	21.16	21.12	-	-	-							
		(2) Vef	20.83	20.94	20.94	20.90	2.60	1.93	2.69			-	-	-	-	
110	21.91	(1) Vm	21.79	22.09	21.80	21.89	6.65	5.91	6.91	5.45	0.181	38.16	38.62	68.07	144.9	140.9
		(1) Vef	22.41	22.57	22.53	22.50	-	-	-							
		(2) Vef	21.84	21.98	21.96	21.93	4.59	3.84	4.77			-	-	-	-	
115	22.91	(1) Vm	22.73	23.25	22.71	22.89	18.94	19.01	19.45	14.25	0.473	29.8	51.4	105.1	186.3	175.8
		(1) Vef	24.12	24.37	24.19	24.22	-	-	-							
		(2) Vef	22.82	22.99	22.93	22.91	9.47	8.84	9.78			-	-	-	-	
117	23.36	(1) Vm	23.30	23.63	23.18	23.37	50.37	54.05	51.71	31.94	1.060	6.8	64.3	160.4	231.5	200.8
		(1) Vef	26.66	26.88	26.58	26.70	-	-	-							
		(2) Vef	23.26	23.46	23.37	23.36	11.88	11.39	12.25			-	-	-	-	

Fonte: própria do autor

Embora a potência medida esteja um pouco acima do valor garantido de 90 kW (cerca de 1,3 % acima do valor garantido), a norma NBR 5356 prevê uma tolerância de 10% ao valor especificado. Além disso, pode se argumentar que a soma das perdas totais (perdas em carga e perdas em vazio) se manteve abaixo do valor garantido pela especificação. Conforme a Tabela (2), as perdas totais garantidas são de 540 kW e as perdas totais medidas somaram 527,55 kW, se mantendo assim dentro do valor especificado e sendo assim aprovadas.

Algumas das possíveis causas de não conformidade para as perdas em vazio são:

- Desvio das perdas magnéticas das chapas de aço silício em relação ao valor originalmente especificado.
- O processo de fabricação do aço silício é complexo, então dependendo do manuseio das chapas, do lote e do corte, dados obtidos podem sofrer variações. O fator de construção é um fator obtido de forma estatística para maior precisão no cálculo das perdas levando em conta esses pontos. Sendo assim, desvios no processo de fabricação podem ter contribuído para um fator de construção superior ao considerado originalmente no conjunto do núcleo.
- Corrente circulante nos enrolamentos durante a operação sem carga.

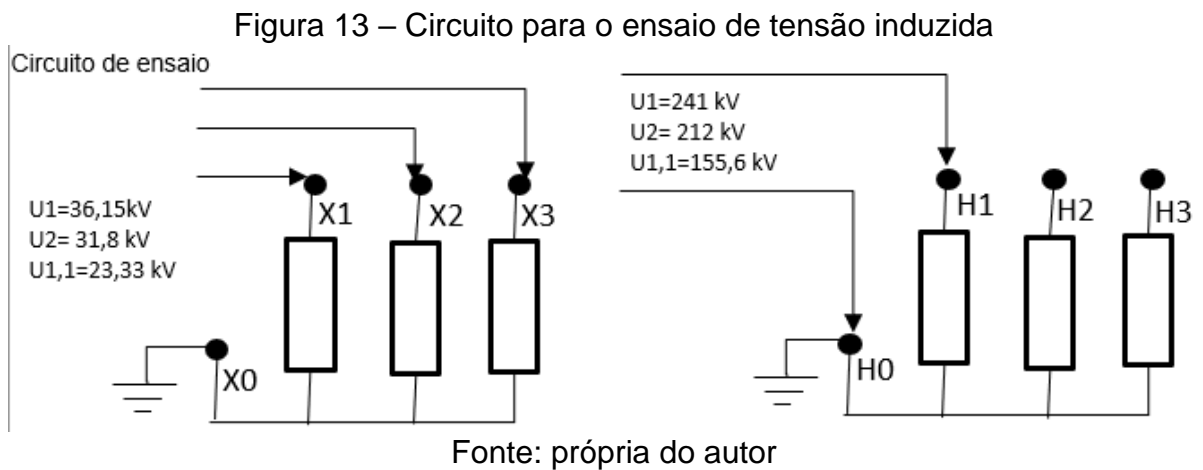
7.1.5 Ensaios dielétricos de rotina

No ensaio de tensão suportável à frequência industrial todos os terminais do enrolamento sob ensaio foram ligados ao terminal da fonte e os demais terminais externos ligados ao outro terminal da fonte e ao terra. Foi aplicada uma tensão ressonante de 60 Hz e 34 kV para cada um dos enrolamentos da máquina. Uma vez que não houve colapso da tensão de ensaio, o equipamento foi aprovado no ensaio de tensão aplicada.

Para o ensaio de tensão suportável a impulso atmosférico foi utilizado um gerador de impulsos em todos os enrolamentos com terminais acessíveis externamente. A tensão foi aplicada a um terminal por vez sendo os demais aterrados, sendo obedecida a sequência de ensaio de um impulso de tensão reduzida seguido de três impulsos plenos. Como não houve diferenças significativas entre os

transitórios de corrente e tensão registrados com impulso reduzido e impulso pleno, o transformador foi aprovado no ensaio. Da mesma forma, para o ensaio de impulso de manobra, como o equipamento não apresentou nenhum colapso repentino da tensão ou descontinuidade nos registros de corrente, o transformador foi aprovado no ensaio.

No ensaio de tensão induzida, foi montado o circuito apresentado na Figura (13), alimentando o enrolamento de BT e induzindo o de AT.



Na Tabela (12) podem ser observados os valores medidos no ensaio de tensão induzida ao longo do tempo. Sendo o critério de aceitação para o ensaio a ausência de descargas disruptivas e limite das descargas parciais de 300 pC, o transformador foi aprovado nos ensaios.

Tabela 12 – Resultados para o ensaio de tensão induzida

Enrolamento Alimentado : BT		Pos. com. : 34.5 kV		TP 104		072-EE-17									
Enrolamento Induzido : AT		Pos. com. : 230 kV TAP 13		WT1600		072-UI-54									
Enrolamento Induzido :		Pos. com. : kV		LDIC		072-EE-05									
Frequência de ensaio :		Hz		Banda de freq. : 30 - 300 kHz											
Tensões de ensaio :		BT : U1 = 36.15 kV - U2 = 31.8 kV				U1 = kV - U2 = kV									
		AT : U1 = 241 kV - U2 = 212 kV													
Fases		H1		H2		H3						Data			
Calibração		Apl.	Med.	Apl.	Med.	Apl.	Med.	Apl.	Med.	Apl.	Med.	Apl.	Med.	9/23/2021	
pC		200	200	200	200	200	200								
Atenuação (A)		1.0		1.0		1.0									
Tempo		Fases		H1		H2		H3							
Minut.	AT (kV)			pC	pC x A	pC	pC x A	pC	pC x A	pC	pC x A	pC	pC x A	pC	pC x A
Amb.	-	-		6	6.0	6	6.0	5	5.0						
Rem.	12			6	6.0	6	6.0	5	5.0						
5	155.6			5	5.0	5	5.0	4	4.0						
5	212			5	5.0	5	5.0	4	4.0						
48	241														
5	212			5	5.0	5	5.0	4	4.0						
10	212			5	5.0	5	5.0	4	4.0						
15	212			6	6.0	5	5.0	4	4.0						
20	212			5	5.0	5	5.0	4	4.0						
25	212			5	5.0	5	5.0	4	4.0						
30	212			6	6.0	5	5.0	4	4.0						
5	155.6			6	6.0	5	5.0	4	4.0						
Rem.				5	5.0	5	5.0	4	4.0						
Amb.				6	6.0	5	5.0	4	4.0						

Fonte: própria do autor

7.1.6 Ensaio de comutador de derivações em carga

A comutação do equipamento foi ensaiada conforme as quatro etapas requeridas pela norma NBR 5356. Essas etapas foram verificadas durante os ensaios de perdas em carga, perdas a vazio e corrente de excitação e no ensaio de verificação de acessórios para o ciclo completo de funcionamento com 85% da tensão nominal.

7.1.7 Estanqueidade e resistência à pressão

O ensaio de estanqueidade foi realizado conforme os procedimentos descritos na norma NBR 5356. Durante 24 horas o transformador suportou uma pressão de 0,5 kgf/cm², sendo realizados os controles acordados entre cliente e fornecedor. A máquina apresentou resultado satisfatório, sendo aprovada no ensaio.

7.1.8 Verificação do funcionamento dos acessórios

Foram efetuados os testes de funcionamento de todos os componentes dos sistemas de acionamento (comutadores), proteção e sinalização.

7.1.9 Ensaio de óleo isolante

Os resultados dos ensaios para o óleo isolante são apresentados na Tabela (13). Para cada uma das características listadas, são apontadas também as normas especificando os valores mínimos ou máximos para aceitação do óleo isolante. O óleo o equipamento em questão apresentou um resultado satisfatório para todas as características exigidas pela norma NBR 5356, sendo ele aprovado no ensaio.

Tabela 13 – Resultados do ensaio de óleo isolante

Características/Normas	Especificado	Verificado AMOSTRA 01
Rigidez Dielétrica IEC 60156	Mín. 70 KV	83,0 kV
Rigidez Dielétrica NBR 6869	Mín. 40 KV	-
Fator de Dissipação 90°C NBR 12133	Máx. 0,5%	0,15 %
Massa Específica a 20°C IEC 60422/2013	0,861 a 0,900	-
Tensão Interfacial NBR 6234	Mín. 40 mN/m	45,0 mN/m
Índice de Neutralização NBR 14248	Máx. 0,03 mg.KOH/g	-
Teor de Água NBR 10710	≤ 230 kV máx. 5 ppm	2,8 ppm
Teor de Água NBR 10710	> 230 kV Máx. 3 ppm	-
Contagem de Partículas (10 ml) ALSTOM TCT HQ 47AIC80	δ máx. 12	-
Contagem de Partículas (100 ml) NBR 14275	≤ 525 KV = 15.000 unidades	12.288
Contagem de Partículas (100 ml) NBR 14275	> 525 KV = 7.000 unidades	-
Cor ASTM NBR 14483	Máx. 1,0	-
Enxofre Corrosivo Estendido NBR 10505	Não corrosivo	-
Ponto de Fulgor NBR 11341	Mín. 140°C	-
Viscosidade NBR 10441	20°C – Máx. 25 cSt 40°C – Máx. 11 cSt 100°C – Máx. 3 cSt	-

Fonte: própria do autor

7.1.10 Verificação da espessura e aderência da pintura da parte externa

Para a verificação da aderência e da espessura da pintura da máquina a norma utilizada foi a NBR 11388. Com a utilização de um medidor de camadas foi verificada um resultado satisfatório para o equipamento.

7.2 Ensaios de Tipo

7.2.1 Nível de ruído

No ensaio de nível de ruído, foram realizadas medições com sonômetros localizados em posições e distâncias do transformador de acordo com a norma NBR 7277. Considerando a Tabela (10) e a potência do equipamento, o ruído máximo permitido pela norma NBR 5356 é de 86 dB. Uma vez que o ensaio realizado apresentou valores dentro do limite, a máquina foi aprovada no ensaio.

7.2.2 Elevação de temperatura

Considerando que o transformador opera em duas bases de potência e dois métodos de refrigeração (ONAN e ONAF), o ensaio de elevação de temperatura é realizado em cada uma das bases. O Anexo V apresenta as medições realizadas ao longo do tempo para o ensaio.

Com o transformador operando em ONAN, o enrolamento de AT foi excitado com uma tensão de 201,296 kV com o enrolamento de BT em curto-circuito. As perdas em carga foram de 366,75 kW e as perdas em vazio 91,2 kW. A Tabela (14) apresenta os resultados para a elevação de temperatura do enrolamento, elevação de temperatura do óleo e do ponto mais quente (calculado). Pode se observar que para operação em 150 MVA, a elevação de temperatura do enrolamento de AT foi mais alta, porém ainda assim dentro do limite estabelecido para aceitação. O mesmo ocorre para a elevação de temperatura do óleo e do ponto mais quente, apresentando resultados satisfatórios.

Com o transformador operando em ONAF, o enrolamento de AT foi excitado com uma tensão de 201,296 kV com o enrolamento de BT em curto-circuito. As perdas em carga foram de 532,84 kW e as perdas em vazio 91,2 kW, somando 624,04 kW. Pela Tabela (14), nota-se que, embora o transformador esteja operando em uma potência mais elevada, a utilização dos ventiladores acaba por deixar a elevação de

temperatura em um nível mais baixo quando comparado à operação em ONAN. Sendo assim, a operação em ONAF foi aprovada considerando que a elevação de temperatura se manteve abaixo dos limites estipulados.

Tabela 14 – Elevação de temperatura

MVA	ELEVAÇÃO DE TEMPERATURA DOS ENROLAMENTOS PELO MÉTODO DA RESISTÊNCIA °C (Nota 1)				ELEVAÇÃO MÁXIMA DO ÓLEO (TOPO DO ÓLEO) °C			Elevação do óleo médio °C (5)	GRADIENTE ENROLAMENTO MÉDIO - ÓLEO MÉDIO (°C)			GRADIENTE PONTO MAIS QUENTE ÓLEO MAX (TOPO DO ÓLEO) °C (Nota 2)			ELEVAÇÃO DE TEMPERATURA DO PONTO MAIS QUENTE DO ENROLAMENTO °C			
	Garantido °C	AT (1)	BT (2)	-	Garantido °C	Topo do Óleo (4)	-		AT (6)=1 - 5	BT (7)=2 - 5	-	AT (9)=5*k1	BT (10)=7*k2	-	Garantido °C	AT (9+4)	BT (10+4)	-
150	65	62,49	60,20	-	65	55,43	48,15	14,34	12,05	-	15,63	15,06	-	80	71,06	70,49	-	
180	65	49,61	45,84	-	65	43,30	32,20	17,41	13,64	-	18,98	17,05	-	80	62,28	60,35	-	

Fonte: própria do autor

7.2.3 Análise do óleo

Conforme descrito em capítulo anterior, o ensaio de análise do óleo foi realizado em três momentos distintos: antes do ensaio de aquecimento, após o ensaio de aquecimento e após os ensaios dielétricos. São consideradas as concentrações dos seguintes gases:

- Oxigênio (O₂);
- Nitrogênio (N₂);
- Metano (CH₄);
- Monóxido de carbono (CO);
- Dióxido de carbono (CO₂)

O Anexo VI apresenta os resultados da cromatografia. Esses resultados foram analisados pelo cliente para validação (uma vez que os resultados não são governados pela norma de transformadores) e aceitos, aprovando assim o equipamento nesse ensaio.

8 SUGESTÕES DE MELHORIA

Tendo analisado o projeto e os cálculos do transformador e os resultados dos ensaios de fábrica, tem-se uma validação do primeiro através do segundo. Porém, embora o transformador tenha atendido aos requisitos especificados pelo cliente e pelas normas técnicas, os ensaios em fábrica podem nos apontar pontos de melhoria no produto.

Esse capítulo tem como objetivo propor melhorias no projeto do equipamento para assim apresentar um produto de melhor qualidade, porém que ainda atenda aos requisitos necessários. É importante, porém, notar que dificilmente alguma alteração no projeto do transformador ocorre isoladamente. Muitos aspectos do transformador estão interconectados, sendo assim, a análise realizada nesse capítulo tem como ideal o ponto de início para novos desenvolvimentos.

8.1 Investigação das perdas a vazio

O primeiro ponto de melhoria no projeto do transformador está relacionado às perdas a vazio. É necessário que para o transformador tenha o melhor desempenho possível, seja possível uma melhor harmonia entre o equipamento projetado e o construído.

O valor medido no ensaio de perdas a vazio do transformador apresentou um valor maior ao valor calculado no início do projeto. Conforme descrito, as principais causas para essa divergência são:

- Material fora do especificado;
- Não conformidades no processo de fabricação;
- Cálculo do projeto fora de especificação.

Para investigar a causa de não conformidades no processo de fabricação, devem ser revistas as montagens do núcleo (erros como entreferros maiores que especificados, método de empacotamento incorreto, corte de chapas com rebarbas) e da parte ativa (erros como culatras com erro de montagem). Dentro de uma fábrica de transformadores, existe uma equipe de profissionais que atuam especificamente na garantia de qualidade do produto. Para isso, são gerados relatórios de produção a cada conclusão de etapa de fabricação. Com esses relatórios, é possível revisar todo

histórico de produção da máquina, permitindo a investigação de não conformidades causadas por esse processo.

Caso o problema seja no material especificado, deve-se confirmar de que o material não foi misturado. Ou seja, confirmar que o material utilizado para a confecção do núcleo seja efetivamente o que estava destinado para a produção dessa máquina, testando amostras do aço. Existe também a possibilidade de o problema residir no fornecimento do GOS, ou seja, que o material comprado não atendesse as especificações de perdas. É necessário, nesse último caso, que sejam realizados ensaios para confrontar os valores garantidos pelo fornecedor e os valores medidos.

Caso o problema seja no cálculo do projeto, é necessário comparar o *building factor* projetado contra o valor real. Segundo Healthcote (1998), o *building factor* de um núcleo bem projetado é em torno de 1,15. Ou seja, as perdas no núcleo devem apresentar um aumento de até 15% em relação ao produto da massa de aço e das perdas específicas do material. Os valores para esse tipo de fator são derivados de dados empíricos com base em pesquisas e testes.

Considerando as principais causas raízes, sugere-se a tomada das seguintes ações para melhor performance do núcleo da máquina:

- Ensaios no aço da máquina e, se necessário, utilizar um GOS com perdas específicas menores do que o calculado inicialmente, reduzindo assim as perdas no núcleo;
- Revisão dos processos de manufatura e relatórios de produção, buscando possíveis não conformidades;
- A adoção de métodos numéricos para a determinação do *building factor* do transformador, tal como a utilização de elementos finitos. Em Zheng (2012), é proposta uma técnica separada para simulação das correntes parasitas em lâminas internas do núcleo do transformador.

8.2 Projeto térmico

Como visto no capítulo anterior, o transformador apresentou uma elevação de temperatura maior quando operando em 150 MVA do que operando em 180 MVA. A principal razão para esse foi a utilização de uma ventilação forçada de ar para a base de maior potência. Considerando a melhoria para as perdas no núcleo sugerida

anteriormente, seria possível reduzir a elevação de temperatura causada pelas perdas no núcleo.

Essa redução pode significar a diferença entre operar com refrigeração forçada. Seria interessante tanto do ponto de vista econômico quanto do ponto de vista de otimização de espaço e reparos, a operação sem a necessidade de utilização de ventiladores. Nesse ponto, considerando um núcleo mais otimizado, o projeto do transformador poderia considerar apenas uma refrigeração em ONAN. Para isso seria necessário refazer os cálculos térmicos para saber a exata quantidade necessária de radiadores e qual relação de quantidade seria ainda vantajosa.

8.3 Óleo vegetal

A demanda por produtos com menor impacto ambiental tem sofrido um aumento considerável na indústria nos últimos anos. Tendo em mente essa tendência, a utilização de óleo de origem vegetal pode se tornar além de viável, interessante. Segundo Oommen (2002), algumas das vantagens do óleo vegetal quando comparado ao óleo mineral é que é um óleo entre 95% e 100% biodegradável, além de não-tóxico.

Além de apresentar um risco ambiental muito menor em situações de vazamento, o óleo vegetal tem a habilidade de absorver umidade contida nos isolantes de papel. Essa absorção permite uma extensão significativa da vida do isolante além de reduzir o envelhecimento causado pela exposição ao calor. Isso significa que o equipamento pode operar com uma sobrecarga maior, além de proporcionar um tempo de vida maior aos isolantes. O resultado é em um ciclo de vida mais barato comparado ao do óleo mineral.

Segundo Darwin (2007), a rigidez dielétrica do óleo vegetal é similar à do óleo mineral, no entanto existem alguns pontos a serem considerados quanto à sua aplicação:

- O ponto de fluidez é mais alto, o que pode ocasionar em dificuldades para operar em temperaturas mais baixas;
- A viscosidade é mais baixa, resultando em uma transferência de calor por convecção menos eficiente;

Considerando que o transformador deste trabalho foi desenvolvido para operação em uma usina fotovoltaica, o ponto de fluidez do óleo vegetal não apresenta um impedimento para utilização do óleo vegetal. Em alinhamento com a sugestão proposta quanto a utilização do sistema de refrigeração ONAN para operação do transformador em 180 MVA, a baixa viscosidade do óleo vegetal pode apresentar um problema. Os cálculos da quantidade de radiadores para o transformador deveriam ser refeitos considerando a troca do óleo.

A utilização do óleo vegetal tem encontrado cada vez mais espaço na indústria de transformadores de potência. Vantagens como redução no envelhecimento do óleo devido à oxidação e menor necessidade de manutenção tornam a utilização do óleo vegetal um ponto de melhoria a ser considerado neste projeto.

8.4 Perdas “tanque”

As perdas “tanque” ou dispersas, segundo Areva (2008), são a soma de todas as perdas fora as perdas no núcleo e nos enrolamentos causadas pelo fluxo disperso. Essas perdas não são calculadas de maneira fácil, sendo contabilizadas entre 5% e 15% do total das perdas.

As perdas dispersas têm duas fontes primárias: perdas em partes estruturais e perdas devido a ligações de alta corrente. As perdas em partes estruturais ocorrem devido a incidência do fluxo disperso em partes estruturais exteriores aos enrolamentos (como paredes do tanque e tirantes), causando a circulação de correntes parasitas. As perdas devido a ligações de alta corrente são ocasionadas pela geração de fortes campos magnéticos provenientes de correntes altas (da ordem de kA), causando correntes parasitas em partes metálicas próximas.

A mitigação desses problemas pode se dar de três formas:

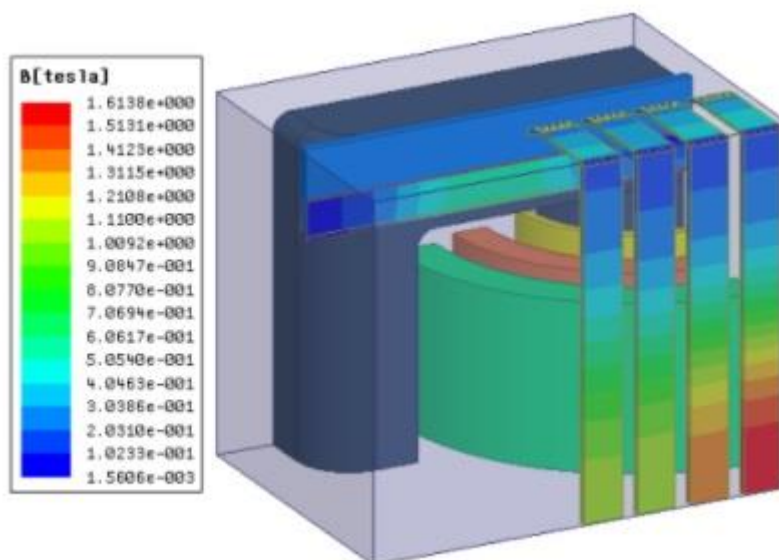
- Utilização de aço não-magnético;
- Controle do fluxo disperso através de *shields* e *shunts* eletromagnéticos;
- Design apropriado de partes estruturais metálicas.

O design apropriado se refere à redução da largura de estruturas como a armadura do transformador, reduzindo assim as correntes parasitas que circulam nessas partes. O controle do fluxo disperso com *shield* eletromagnético permite a formação de correntes parasitas no *shield*, as quais criam um campo magnético em

oposição que acaba prevenindo o fluxo disperso de atingir o componente a ser protegido. Já os *shunts* são formados por lâminas de aço que desviam o fluxo da zona protegida devido a sua alta permeabilidade. Embora os *shields* e *shunts* sejam dispositivos com perdas inerentes, desde que bem projetados, produzem perdas menores do que as perdas potenciais se não fossem utilizados. A utilização de aço não-magnético é útil na vizinhança de ligações de alta corrente, como as buchas.

No caso do projeto desse transformador, foram projetados *shields* para as buchas (ligações de altas correntes) e para as paredes do tanque. No entanto, em Wang et. al (2020), foi percebido através de simulações que existe uma concentração do fluxo causada pelo efeito de blindagem magnética. A densidade de fluxo perto das bordas dos *shields* acabava se tornando muito alta, então foi proposto um design diferente de blindagem, com as placas em um caminho fechado. Como resultado foi possível reduzir as perdas, mitigar possíveis problemas de sobreaquecimento local e poupar materiais. A Figura (14) apresenta o modelo de *shield* desenvolvido no trabalho.

Figura 14 – Modelo de *shield* em caminho fechado



Fonte: Wang et. Al (2020)

A utilização de aço não-magnético, embora mais custoso economicamente e de maior dificuldade de ser usinado, pode se tornar um grande aliado para a redução de perdas no tanque e controle de sobreaquecimento localizado. É utilizada

normalmente em ligações que passam pelas paredes do tanque quando a abertura não pode ser larga o suficiente para reduzir os efeitos de campo na ligação.

Considerando que a corrente projetada no lado de BT é da ordem de kA pode ser vantajosa a utilização de aço não-magnético nos canecos do transformador. Para os *shields* do tanque, a proposta de design de Wang et. al (2019) com placas permitindo um caminho fechado para circulação do fluxo se torna interessante. A modelagem do transformador completo considerando essas melhorias e simulações computacionais utilizando o método dos elementos finitos podem fornecer bons indicadores da viabilidade dessa solução. Porém, em uma análise macro, a redução das perdas permite, além de um melhor rendimento da máquina, a redução da elevação de temperatura causada pela dispersão do fluxo. Isso vai de encontro ao que já foi proposto anteriormente nesse capítulo.

8.5 Tanque hermeticamente fechado

Em um transformador comum, como o caso do que foi projetado, a variação do volume do óleo no tanque causada pela variação da temperatura é acomodada por um conservador de óleo. Para que o óleo possa se expandir e contrair sem extrapolar os limites de pressão interna no tanque, é necessário que o transformador permita a entrada de ar, porém esse ar precisa passar pelo secador de sílica gel para evitar acúmulo de umidade no óleo. Por essa razão, a utilização desse tipo de tanque acaba por aumentar a necessidade de manutenção, além de equipamentos de proteção e monitoramento associados.

Tanques hermeticamente fechados são projetados especialmente para que o óleo isolante não entre em contato com o ambiente externo. Nesse tipo de tanque, não são utilizados conservadores de óleo, bolsas de borracha e nem secadores de ar. Para acomodar a variação de volume do óleo, o transformador é equipado com um tipo de especial radiador de volume variável.

Esse radiador tem como objetivo a troca de calor com o ambiente externo e acomodar a variação de volume através de deformações. Essa deformação livra o transformador de elevações de pressão muito altas. Porém, o limite de pressão interna deve ser o mesmo que para transformadores comuns. Como a variação de volume só é suportada pelos radiadores, usualmente os lados do tanque são chanfrados para

reduzir o volume de óleo e, conseqüentemente, a variação do volume necessária nos radiadores.

Segundo Areva (2008), a aplicação de tanques hermeticamente fechados com radiadores expansores tem sido bem sucedida para transformadores de até 230 kV com a utilização de óleo vegetal. Como benefícios podem ser listados:

- Redução no envelhecimento do óleo devido a oxidação;
- Ausência do ingresso de umidade atmosférica;
- Não são necessários conservadores, bolsas de borracha, secadores de ar e tubulação (além de equipamentos de proteção e monitoramento associados);
- Redução do custo de ciclo de vida devido a baixa necessidade de manutenção.

Dessa forma, a utilização de um tanque hermeticamente fechado pode se tornar vantajosa quando acompanhada dos outros pontos de melhoria aqui listados.

8.6 Conclusão

As sugestões propostas nesse capítulo buscaram sempre uma performance superior da máquina em relação ao equipamento de fato fabricado. A redução dos diversos tipos de perdas permite um transformador mais robusto, com melhor rendimento e que ainda atenda as especificações do cliente. Além disso as sugestões de mudança na forma e nos elementos construtivos do transformador visam também outros aspectos como impacto ambiental.

Fica claro que embora o projeto do transformador seja extremamente complexo, com muitas variáveis a serem consideradas, sempre existem pontos onde se apresentam possíveis melhorias. A aplicação dessas melhorias deve em primeiro momento ser analisada de forma geral, respondendo perguntas como “e se...?”. Em um momento seguinte, essas hipóteses devem ser simuladas, ensaiadas para enfim serem implementadas. É um processo longo, desde a consideração de uma ideia nova até a sua efetivação e inclusão nos processos fabris de uma fabricante, porém é essa busca de *know-how* que a indústria e o mercado sempre estão em busca.

9 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nesse trabalho foram discutidas etapas essenciais acerca do gerenciamento, desenvolvimento e validação de um projeto de um transformador de potência. Em uma primeira etapa, foram considerados pontos comuns a gestão de contratos de fornecimento de equipamentos de grande investimento, tal qual um transformador de potência. A utilização de técnicas para planejamento e o conhecimento aprofundado do contrato se mostraram ferramentas essenciais para a garantia de bom andamento do projeto.

Em seguida, foi descrito em um capítulo as principais considerações elencadas durante a etapa do desenvolvimento do projeto. As escolhas do projeto foram justificadas quantitativa e qualitativamente pelo ponto de vista da engenharia. Foi possível documentar também como a especificação de cliente é peça fundamental e a base para todo o projeto do transformador.

Em uma terceira etapa, foram repassados os ensaios realizados em fábrica no transformador. Com o intuito de validar os valores garantidos pela etapa anterior e dar a garantia de um equipamento operante conforme exigido pelas autoridades, os ensaios foram apresentados conforme a NBR 5356.

Foram apresentados os resultados dos ensaios realizados no transformador e uma análise foi feita em cima da comparação entre os valores ensaiados e os valores projetados ou normatizados. Embora os ensaios sigam os procedimentos de norma, a leitura dos resultados sempre é contextualizada na máquina, sendo de extrema importância considerar tanto a norma quanto a especificação do cliente para validação do equipamento.

Em última etapa, foi realizada uma análise geral de todo o projeto, desde o cálculo até os ensaios. A partir dessa análise foram observados pontos onde o transformador poderia apresentar um desempenho melhor ainda atendendo a especificação do cliente. Além disso, algumas escolhas definidas pela fabricante puderam ser questionadas

10 CONCLUSÕES

Foi possível demonstrar diferentes pontos de interesse, tanto sob o olhar da engenharia elétrica quanto de outras disciplinas, que o processo todo pelo qual passa um transformador de potência é extremamente variante. Cada aplicação exige uma análise profunda desde sua concepção até sua implementação. Por esse motivo, a documentação e apresentação de um estudo de caso se justifica como objeto de estudo.

O resultado deste trabalho, além de servir como uma espécie de manual informativo sobre o processo de criação de um transformador de potência, é o de aprimoramentos de projeto. Uma série de possíveis pontos de melhoria foi listada: redução de perdas, aumento de rendimento, redução de complexidade, aumento de vida útil, redução de intervenções de manutenção e redução de custo. Conclusivamente, pode se dizer que o processo de projeto do transformador sempre permite espaços para modificações, sendo assim a experiência do projetista é de extrema valia.

11 REFERÊNCIAS

FITZGERALD, A.E.; KINGSLEY, C.; UMANS, S.. Máquinas Elétricas. Rio de Janeiro: McGraw Hill, 2014.

CHAPMAN, S.. Fundamentos de Máquinas Elétricas. Rio de Janeiro: McGraw Hill, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5356 - Transformadores de potência. Rio de Janeiro, ABNT, 1993.

WINDERS, John J.. Power Transformers – Principles and Applications. Allentown, Pennsylvania: Marcel Dekker, 2002

HEALTHCOTE, Martin J.. The J & P Transformer Book. Oxford: Newnes, 1998

RIES, Walter. Transformadores – Fundamentos para o Projeto e Cálculo. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2007

HARLOW, James H.. Electric Power Transformer Engineering. Florida: 2004

AREVA, Power Transformers. Paris: 2008

HUAMING. SHZV Vacuum On-Load Tap Changer Operation Instructions, 2010.

Project Management Institute. Project Management Body Of Knowledge, 2017.

ZHENG, W.; CHENG, Z.. An inner-constrained separation technique for 3-D finite-element modeling of grain-oriented silicon steel laminations, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 48, Agosto, 2012.

OOMMEN, T. V.. Vegetable oils for liquid-filled transformers, IEEE Magazine DEIS Vol. 18, nº 1, Janeiro/Fevereiro, 2002.

DARWIN, A.; PERRIER, C.; FOLLIOU, P.. The use of natural esters in transformers, MatPost, Lyon, Novembro, 2007.

WANG, T.; Yuan, W.; FU, D., YUAN, J.. Improvement of magnetic shielding for transformers based on the magnetic flux characteristics at shielding ends, IEEE Transactions on Magnetics Vol. 56, Janeiro, 2020.

12 ANEXO I – FOLHA DE DADOS DO TRANSFORMADOR

1. CARACTERÍSTICAS DO EQUIPAMENTO							
QUANTIDADE:	1 un		LIMITES DE ELEVAÇÃO DE TEMPERATURA				
FREQUÊNCIA:	60 Hz		AMBIENTE MÁXIMO: 40 [°C]				
TRANSFORMADOR	TRIFÁSICO		AMBIENTE MÍNIMO: [°C]				
LÍQUIDO ISOLANTE	ÓLEO MINERAL NAFT. TIPO A		ÁGUA: [°C]				
TIPO:	TOC-NF		TOPO DO ÓLEO: 65 [°C]				
DIAGRAMA FASORIAL:	YNyn0d1		ENROLAMENTO MÉDIO: 65 [°C]				
ALTITUDE INSTALAÇÃO:	<1000 msnm		PONTO MAIS QUENTE: 80 [°C]				
TERMINAL	Potência nominal [MVA]			TENSÃO NOMINAL [kV]	TENSÃO MÁXIMA DO EQUIPAMENTO [kV]	LIGAÇÃO	TIPO DE COMUTAÇÃO / PANEL
	SISTEMA DE RESFRIAMENTO						
	ONAN	ONAF					
AT	150	180		230±12x1,04%		Y	
BT	150	180		34,5		Y	
TERC				15		D	(Burried)
2. DESEMPENHO (Tolerâncias conforme norma NBR)							
REFERÊNCIAS			ESPECIFICADO		GARANTIDO		
Potência de Referência		kVA	180000		180000		
Tensões de Referência		kV	230-34,5		230-34,5		
Impedância de Sequência Positiva	85 °C	%			14		
Perdas em Vazio	60 Hz	kW			90		
Perdas em Carga	85 °C	kW			450		
Perdas Circuitos Auxiliares		kW					
Perdas Totais (Excluindo Auxiliares)	85 °C	kW			540		
Corrente de Excitação	100% Vn	%			0,3		
Nível de ruído	100% Vn	dB	86				
3. DESENHO REFERÊNCIA - Nº:							
Dimensões aproximadas [mm]		Massas aproximadas [kg]		Rendimento e Regulação			
(Montado / Transporte)				Base	180000 kVA	Relação	230-34,5 kV
				FP	Rendimento	FP	Rendimento
Altura	Equip. s/ óleo				125%		125%
Comprimento	Óleo mineral				100%		100%
Largura	Massa total				75%		75%
Altura p/ ret. P. A.	Parte ativa (P. A.)				50%		50%
	Tanque e acessórios				25%		25%
	Para transp. s/ óleo				Regulação		Regulação
4. ENSAIOS DIELÉTRICOS							
ENSAIOS		TERMINAIS					
TME: Tensão Máxima do Equipamento		AT	BT	NAT	NBT		
Impulso Atmosférico	Onda Plena [kV]	950	170	110	110		
	≥ 362 kV Onda Cortada [kV]	1045	187				
Impulso de Manobra p ≥362	[kV]	750					
Tensão Aplicada ao Dielétrico	[kV]	34	34	34	34		
Tensão Ind. curta duração fase-terra	[kV]						
Tensão Ind. longa duração fase-terra	[kV]	212/241					
Descargas Parciais	[pC]	≤	300	Descargas Parciais	[µV]	≤	
Tensão de Radiointerferência-	[µV]	≤	2500				

13 ANEXO II – MEDIÇÃO DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA

Enrolamento AT
Tensão 230 kV

Número de Identificação
Instr. 072-UI-105

FASES	POSIÇÃO COMUTADOR	
	TAP	(kV)
H1H0	1	258.704
H2H0		258.704
H3H0		258.704
H1H0	2	256.312
H2H0		256.312
H3H0		256.312
H1H0	3	253.920
H2H0		253.920
H3H0		253.920
H1H0	4	251.528
H2H0		251.528
H3H0		251.528
H1H0	5	249.136
H2H0		249.136
H3H0		249.136
H1H0	6	246.744
H2H0		246.744
H3H0		246.744
H1H0	7	244.352
H2H0		244.352
H3H0		244.352
H1H0	8	241.960
H2H0		241.960
H3H0		241.960
H1H0	9	239.568
H2H0		239.568
H3H0		239.568
H1H0	10	237.176
H2H0		237.176
H3H0		237.176
H1H0	11	234.784
H2H0		234.784
H3H0		234.784
H1H0	12	232.392
H2H0		232.392
H3H0		232.392
H1H0	13	230.000
H2H0		230.000
H3H0		230.000
H1H0	14	227.608
H2H0		227.608
H3H0		227.608

RESISTÊNCIA ÔHMICA (Ohms)		
22 °C	85 °C	MÉDIA
0.282740	0.352185	0.352729
0.283230	0.352795	
0.283560	0.353206	
0.279000	0.347526	0.348066
0.279390	0.348012	
0.279910	0.348660	
0.275280	0.342893	0.343408
0.275720	0.343441	
0.276080	0.343889	
0.271550	0.338246	0.338819
0.271970	0.338770	
0.272510	0.339442	
0.267760	0.333526	0.334149
0.268220	0.334099	
0.268800	0.334821	
0.264110	0.328979	0.329606
0.264590	0.329577	
0.265140	0.330262	
0.260290	0.324221	0.324860
0.260750	0.324794	
0.261370	0.325566	
0.257730	0.321032	0.320285
0.256960	0.320073	
0.256700	0.319749	
0.252830	0.314929	0.315485
0.253060	0.315215	
0.253940	0.316311	
0.249010	0.310170	0.310486
0.249490	0.310768	
0.249290	0.310519	
0.245400	0.305674	0.306213
0.245610	0.305935	
0.246490	0.307031	
0.241660	0.301015	0.301563
0.241880	0.301289	
0.242760	0.302385	
0.237310	0.295597	0.295784
0.237270	0.295547	
0.237800	0.296207	
0.241650	0.301003	0.301484
0.241810	0.301202	
0.242650	0.302248	

H1H0	15	225.216
H2H0		225.216
H3H0		225.216
H1H0	16	222.824
H2H0		222.824
H3H0		222.824
H1H0	17	220.432
H2H0		220.432
H3H0		220.432
H1H0	18	218.040
H2H0		218.040
H3H0		218.040
H1H0	19	215.648
H2H0		215.648
H3H0		215.648
H1H0	20	213.256
H2H0		213.256
H3H0		213.256
H1H0	21	210.864
H2H0		210.864
H3H0		210.864
H1H0	22	208.472
H2H0		208.472
H3H0		208.472
H1H0	23	206.080
H2H0		206.080
H3H0		206.080
H1H0	24	203.688
H2H0		203.688
H3H0		203.688
H1H0	25	201.296
H2H0		201.296
H3H0		201.296

0.245440	0.305724	0.306189
0.245610	0.305935	
0.246390	0.306907	
0.249100	0.310282	0.310830
0.249370	0.310619	
0.250150	0.311590	
0.252900	0.315016	0.315593
0.253290	0.315502	
0.253900	0.316261	
0.256720	0.319774	0.320264
0.256940	0.320048	
0.257680	0.320970	
0.260490	0.324470	0.324964
0.260740	0.324781	
0.261430	0.325641	
0.264210	0.329104	0.329648
0.264610	0.329602	
0.265120	0.330237	
0.267950	0.333762	0.334352
0.268400	0.334323	
0.268920	0.334971	
0.271730	0.338471	0.339002
0.272180	0.339031	
0.272560	0.339505	
0.275590	0.343279	0.343806
0.275990	0.343777	
0.276460	0.344362	
0.279240	0.347825	0.348394
0.279690	0.348386	
0.280160	0.348971	
0.283130	0.352671	0.353240
0.283550	0.353194	
0.284080	0.353854	

Enrolamento BT
Tensão 34.5 kV

FASES	POSIÇÃO COMUTADOR	
	TAP	(kV)
X1X0		34.500
X2X0		34.500
X3X0		34.500

Número de Identificação
Instr. 072-UI-105

RESISTÊNCIA ÔHMICA (Ohms)		
22 °C	85 °C	MÉDIA
0.005315	0.006620	0.006566
0.005268	0.006562	
0.005231	0.006516	

Enrolamento TERCÁRIO
Tensão 15 kV

FASES	POSIÇÃO COMUTADOR	
	TAP	(kV)
Y1Y2		15.000
Y2Y3		15.000
Y3Y1		15.000

Número de Identificação
Instr. 072-UI-105

RESISTÊNCIA ÔHMICA (Ohms)		
22 °C	85 °C	MÉDIA
0.017397	0.021670	0.021764
0.017487	0.021782	
0.017534	0.021841	

14 ANEXO III – RELAÇÃO DE TENSÕES

Enrolamento de Alta Tensão 230.000 kV Dados de Instrumentação Tettex 072-QI-06

Enrolamento de Baixa Tensão 34.500 kV Deslocamento Angular YNyn0 OK

POSIÇÃO COMUTADOR		RELAÇÃO CALC.	TOLERÂNCIA		MEDIDA			ERRO (%)		
TAP	(kV)		+ 0,5 %	- 0,5 %	H1H0 X1X0	H2H0 X2X0	H3H0 X3X0	H1H0 X1X0	H2H0 X2X0	H3H0 X3X0
1	258.704	7.499	7.536	7.461	7.503	7.503	7.504	0.05	0.05	0.07
2	256.312	7.429	7.466	7.392	7.433	7.433	7.433	0.05	0.05	0.05
3	253.920	7.360	7.397	7.323	7.363	7.363	7.364	0.04	0.04	0.05
4	251.528	7.291	7.327	7.254	7.294	7.294	7.294	0.04	0.04	0.04
5	249.136	7.221	7.257	7.185	7.224	7.224	7.224	0.04	0.04	0.04
6	246.744	7.152	7.188	7.116	7.154	7.153	7.154	0.03	0.01	0.03
7	244.352	7.083	7.118	7.047	7.084	7.084	7.084	0.01	0.01	0.01
8	241.960	7.013	7.048	6.978	7.014	7.014	7.015	0.01	0.01	0.03
9	239.568	6.944	6.979	6.909	6.944	6.944	6.945	0.00	0.00	0.01
10	237.176	6.875	6.909	6.840	6.875	6.875	6.875	0.00	0.00	0.00
11	234.784	6.805	6.839	6.771	6.805	6.805	6.805	0.00	0.00	0.00
12	232.392	6.736	6.770	6.702	6.735	6.735	6.735	-0.01	-0.01	-0.01
13	230.000	6.667	6.700	6.633	6.665	6.665	6.666	-0.03	-0.03	-0.01
14	227.608	6.597	6.630	6.564	6.596	6.596	6.596	-0.02	-0.02	-0.02
15	225.216	6.528	6.561	6.495	6.526	6.526	6.526	-0.03	-0.03	-0.03
16	222.824	6.459	6.491	6.426	6.456	6.456	6.456	-0.05	-0.05	-0.05
17	220.432	6.389	6.421	6.357	6.386	6.386	6.387	-0.05	-0.05	-0.03
18	218.040	6.320	6.352	6.288	6.316	6.316	6.317	-0.06	-0.06	-0.05
19	215.648	6.251	6.282	6.219	6.247	6.246	6.247	-0.06	-0.08	-0.06
20	213.256	6.181	6.212	6.150	6.177	6.177	6.177	-0.06	-0.06	-0.06
21	210.864	6.112	6.143	6.081	6.107	6.107	6.108	-0.08	-0.08	-0.07
22	208.472	6.043	6.073	6.012	6.037	6.037	6.038	-0.10	-0.10	-0.08
23	206.080	5.973	6.003	5.943	5.968	5.967	5.968	-0.08	-0.10	-0.08
24	203.688	5.904	5.934	5.874	5.898	5.898	5.898	-0.10	-0.10	-0.10
25	201.296	5.835	5.864	5.805	5.828	5.828	5.828	-0.12	-0.12	-0.12

Enrolamento de Baixa Tensão 34.500 kV Dados de Instrumentação Tettex 072-QI-06

Enrolamento Terciário 15.000 kV Deslocamento Angular YNd1 OK

POSIÇÃO COMUTADOR		RELAÇÃO CALC.	TOLERÂNCIA		MEDIDA			ERRO (%)		
TAP	(kV)		+ 0,5 %	- 0,5 %	X1X0 Y1Y2	X2X0 Y2Y3	X3X0 Y3Y1	X1X0 Y1Y2	X2X0 Y2Y3	X3X0 Y3Y1
	34.500	1.328	1.335	1.321	1.324	1.324	1.324	-0.30	-0.30	-0.30

Enrolamento de Alta Tensão

230.000 kV

Dados de Instrumentação

Tettex 072-QI-06

Enrolamento Terciário

15.000 kV

Deslocamento Angular

YNd1

OK

POSIÇÃO COMUTADOR		RELAÇÃO CALC.	TOLERÂNCIA		MEDIDA			ERRO (%)		
TAP	(kV)		+ 0,5 %	- 0,5 %	H1H0 Y1Y2	H2H0 Y2Y3	H3H0 Y3Y1	H1H0 Y1Y2	H2H0 Y2Y3	H3H0 Y3Y1
1	258.704	9.958	10.007	9.908	9.929	9.927	9.929	-0.29	-0.31	-0.29
2	256.312	9.865	9.915	9.816	9.837	9.835	9.837	-0.28	-0.30	-0.28
3	253.920	9.773	9.822	9.725	9.744	9.743	9.745	-0.30	-0.31	-0.29
4	251.528	9.681	9.730	9.633	9.652	9.651	9.652	-0.30	-0.31	-0.30
5	249.136	9.589	9.637	9.541	9.560	9.558	9.560	-0.30	-0.32	-0.30
6	246.744	9.497	9.545	9.450	9.467	9.466	9.468	-0.32	-0.33	-0.31
7	244.352	9.405	9.452	9.358	9.376	9.374	9.375	-0.31	-0.33	-0.32
8	241.960	9.313	9.360	9.266	9.283	9.282	9.283	-0.32	-0.33	-0.32
9	239.568	9.221	9.267	9.175	9.191	9.189	9.191	-0.33	-0.35	-0.33
10	237.176	9.129	9.175	9.083	9.099	9.097	9.099	-0.33	-0.35	-0.33
11	234.784	9.037	9.082	8.992	9.007	9.005	9.007	-0.33	-0.35	-0.33
12	232.392	8.945	8.989	8.900	8.914	8.913	8.915	-0.35	-0.36	-0.34
13	230.000	8.853	8.897	8.809	8.822	8.821	8.823	-0.35	-0.36	-0.34
14	227.608	8.761	8.804	8.717	8.730	8.728	8.730	-0.35	-0.38	-0.35
15	225.216	8.669	8.712	8.625	8.638	8.636	8.638	-0.36	-0.38	-0.36
16	222.824	8.576	8.619	8.534	8.546	8.544	8.546	-0.35	-0.37	-0.35
17	220.432	8.484	8.527	8.442	8.454	8.452	8.453	-0.35	-0.38	-0.37
18	218.040	8.392	8.434	8.350	8.361	8.359	8.361	-0.37	-0.39	-0.37
19	215.648	8.300	8.342	8.259	8.269	8.267	8.269	-0.37	-0.40	-0.37
20	213.256	8.208	8.249	8.167	8.177	8.175	8.177	-0.38	-0.40	-0.38
21	210.864	8.116	8.157	8.076	8.084	8.083	8.085	-0.39	-0.41	-0.38
22	208.472	8.024	8.064	7.984	7.992	7.990	7.993	-0.40	-0.42	-0.39
23	206.080	7.932	7.972	7.892	7.901	7.898	7.901	-0.39	-0.43	-0.39
24	203.688	7.840	7.879	7.801	7.808	7.806	7.809	-0.41	-0.43	-0.40
25	201.296	7.748	7.787	7.709	7.716	7.713	7.716	-0.41	-0.45	-0.41

15 ANEXO IV – PERDAS EM CARGA

Perdas Ohmicas ($I^2 R$)					Perdas em Carga na temper. de ensaio				Perdas em Carga para 85 °C					
Tap (kV)	Enrolamento	R (ohms)	Temp. (°C)	Cor. (I) (A)	$I^2 R$ (kW)	Medido (kW)	Temp. (°C)	$I^2 R$ (kW)	Adic. (A) (kW)	Entre Enrol. kV	$I^2 R$ (kW)	Adic. (A) (kW)	$I^2 R + (A)$ (kW)	Base (MVA)
258.704	AT	0.839440	20.0	334.755	94.069	272.230	19.5	192.096	80.134	AT 258.704	241.633	63.706	305.34	150.000
34.500	BT	0.015617	20.0	2510.219	98.406					BT 34.500				
258.704	AT	0.839440	20.0	401.706	135.459	396.000	19.5	276.619	119.381	AT 258.704	347.951	94.907	442.86	180.000
34.500	BT	0.015617	20.0	3012.262	141.704					BT 34.500				
230.000	AT	0.704850	20.0	376.533	99.931	261.720	19.5	197.948	63.772	AT 230.000	248.993	50.699	299.69	150.000
34.500	BT	0.015617	20.0	2510.219	98.406					BT 34.500				
230.000	AT	0.704850	20.0	451.839	143.901	382.910	19.5	285.045	97.865	AT 230.000	358.550	77.802	436.35	180.000
34.500	BT	0.015617	20.0	3012.262	141.704					BT 34.500				
201.296	AT	0.839750	20.0	430.225	155.432	313.890	19.6	253.439	60.451	AT 201.296	318.669	48.077	366.75	150.000
34.500	BT	0.015617	20.0	2510.219	98.406					BT 34.500				
201.296	AT	0.839750	20.0	516.270	223.822	457.940	19.6	364.952	92.988	AT 201.296	458.883	73.954	532.84	180.000
34.500	BT	0.015617	20.0	3012.262	141.704					BT 34.500				

Enrolamento Excitado : Alta Tensão Enrolamento Curto-circuitado : Baixa Tensão

Instrumentação : TP 52 / 0,15 kV Núm. de ident. : (r) 072-EE-14 (s) 072-EE-17 (t) 072-EE-15

TC 800 / 5 A Núm. de ident. : (r) 072-IE-55 (s) 072-IE-58 (t) 072-IE-54

Analizador de Potência : Yokogawa WT1600 Digital Power Meter Núm. de ident. : 072-JU1-54

TAP	Entre (kV)	Base (MVA)	Tensão (kV)			Corrente (A)			Perdas (kW)			Valores para In			Z % 85°C					
			Vf	Vs	VΔ	Σ / 3	If	Is	It	Σ / 3	Wr	Ws	Wt	Σ W		Amp	kV	kW	°C	
1	258,704	34,500	150	18,556	18,589	18,605	18,584	335,38	336,16	335,99	335,8433	76	95	103	274	334,7553	18,5234	272,228	19,5	12,402
			180	22,096	22,133	22,153	22,128	399,4	400,3	403,9	401,2	109	138	148	395	401,7064	22,1557	395,998	19,5	14,833
7	244,352	34,500	150	17,129	17,158	17,162	17,149	359,1	360,1	359,5	359,5867	79	97	97	273	354,4172	16,9036	265,236	19,5	11,982
			180	20,346	20,379	20,384	20,37	426,6	427,8	427,3	427,2333	111	138	137	386	425,3006	20,2775	382,515	19,5	14,373
13	230,000	34,500	150	15,578	15,594	15,603	15,592	379,1	380,2	379,5	379,6	81	96	89	266	376,5328	15,4682	261,719	19,5	11,647
			180	18,511	18,53	18,541	18,528	450,5	451,8	451,6	451,3	117	138	127	382	451,8393	18,5499	382,914	19,5	13,969
19	215,648	34,500	150	14,464	14,483	14,485	14,478	406,1	407,6	407,7	407,1333	91	108	96	295	401,5921	14,2807	287,025	19,6	11,47
			180	17,099	17,121	17,122	17,114	480,1	481,8	478,7	480,2	125	149	132	406	481,9106	17,175	408,898	19,6	13,795
25	201,296	34,500	150	13,472	13,486	13,49	13,483	433	434,3	431,8	433,0333	100	116	102	318	430,2248	13,3955	313,889	19,6	11,526
			180	16,162	16,179	16,183	16,174	519,2	520,8	520,7	520,2333	146	169	150	465	516,2698	16,051	457,942	19,6	13,811

16 ANEXO V – ELEVAÇÃO DE TEMPERATURA

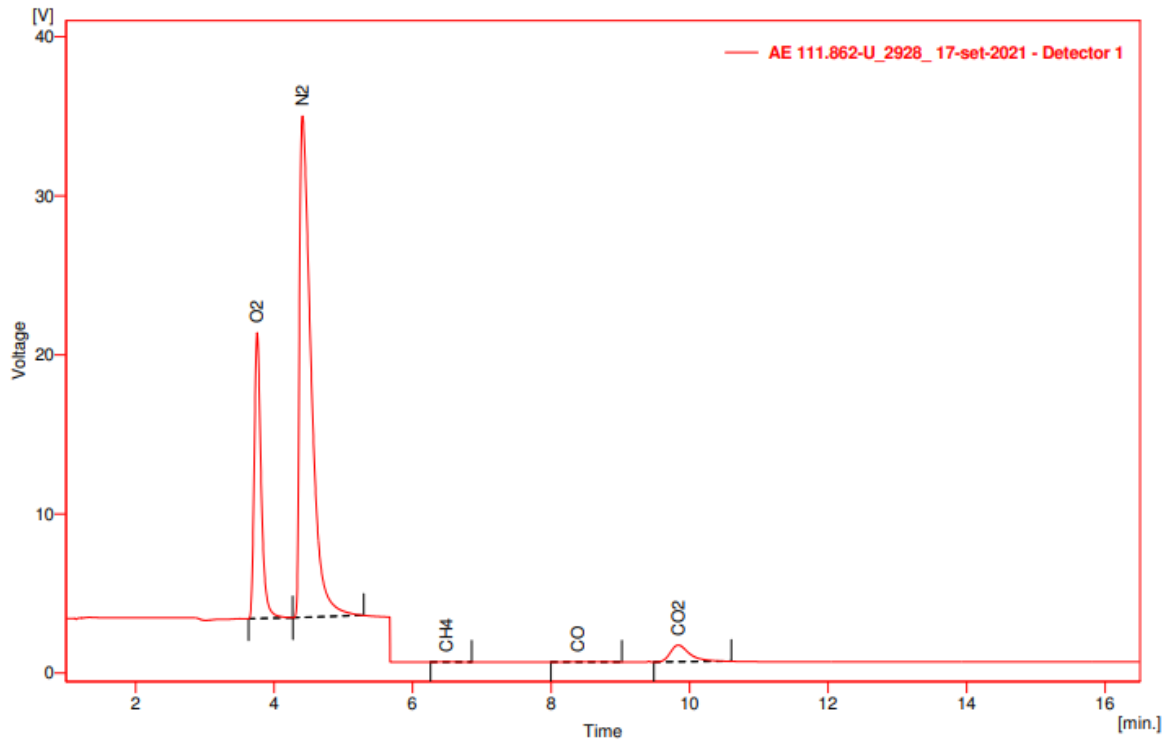
Condição de ensaio:		Enrolamento excitado 150 MVA / 201.296 kV / 430.22484 A						Perdas em Vazio (kW) = 91.2				Capacitores		Gerador													
Transformador		Enrolamento em curto-circuito 150 MVA / 34.5 kV / 2510.2186 A						Perdas em Carga (kW) = 366.75				45.72 kV		11 kV													
Número de fases		Enrolamento em circuito aberto MVA / kV / A						Perdas Totais (kW) = 457.95				54.72 MVAr		10 MVA													
Frequência (Hz)		TP : 52 / 0.15 kV N° : 072-EE-14 / 072-EE-17 / 072-EE-54						Analisador de Potência		Número		Transformador Elevador															
60		TC : 800 / 5 A N° : 072-IE-57 / 072-IE-53 / 072-IE-56						Yokogawa WT1600		072-UI-54		45 kV		30 MVA													
Tempo	Tensão	Corrente	Perdas				Temperaturas (°C)																				
							Ambiente				Sistema Refrigeração				Óleo												
hora	kV	A	kWr	kWs	kWt	kW total	t1	t2	t3	média	Sup 1	Inf 1	Sup 2	Inf 2	topo 1	topo 2	topo 3	D ot	médio	D om							
17:30	15.5	497.6	142.0	166.0	147.0	455.0	22.0	23.5	22.3	22.6					37.6			37.8				61.4	60.8	62.5	39.0	49.6	27.0
18:30	15.2	485.7	144.0	165.0	149.0	458.0	21.6	22.9	21.9	22.1					48.3			48.3				61.6	60.5	63.1	39.6	55.0	32.9
19:30	15.0	481.4	143.0	165.0	148.0	456.0	21.4	22.6	21.8	21.9					53.3			53.2				67.1	65.5	68.8	45.2	60.2	38.3
20:30	15.0	479.2	143.0	164.0	148.0	455.0	21.4	22.5	21.8	21.9					56.2			56.1				70.6	68.4	72.0	48.4	63.2	41.3
21:30	15.0	479.2	144.0	165.0	148.0	457.0	21.4	22.5	22.0	22.0					57.9			58.1				72.6	70.6	74.1	50.5	65.2	43.3
22:30	14.9	477.6	144.0	164.0	148.0	456.0	21.6	22.7	22.2	22.2					59.9			59.6				74.2	72.4	75.9	52.0	67.0	44.8
23:30	14.9	477.0	144.0	164.0	148.0	456.0	21.9	22.7	22.2	22.3					60.7			60.5				75.0	73.3	76.8	52.8	67.8	45.6
0:30	14.9	477.0	144.0	165.0	148.0	457.0	21.9	22.7	22.2	22.3					61.3			61.0				75.7	73.9	77.4	53.4	68.4	46.1
1:30	14.9	476.3	144.0	164.0	148.0	456.0	21.9	22.7	22.0	22.2					61.9			61.5				76.2	74.5	78.0	54.0	69.0	46.8
2:30	14.9	476.2	144.0	164.0	148.0	456.0	21.9	22.6	22.0	22.2					62.2			61.8				76.5	74.8	78.5	54.4	69.3	47.1
3:30	14.9	476.0	144.0	164.0	148.0	456.0	21.8	22.5	21.8	22.0					62.4			62.2				76.9	75.1	78.8	54.9	69.6	47.6
4:30	14.9	476.3	144.0	165.0	148.0	457.0	21.7	22.4	21.7	21.9					62.5			62.3				77.0	75.3	78.9	55.1	69.7	47.8
5:30	14.9	476.9	144.0	165.0	149.0	458.0	21.7	22.4	21.7	21.9					62.8			62.4				77.2	75.4	79.1	55.3	69.9	48.0
6:30	14.9	476.3	144.0	165.0	148.0	457.0	21.7	22.5	21.8	22.0					62.9			62.6				77.3	75.5	79.2	55.3	70.0	48.0
7:30	14.8	475.6	143.0	164.0	148.0	455.0	21.8	22.6	22.0	22.1					63.0			62.8				77.5	75.6	79.4	55.4	70.2	48.1
8:04	14.8	475.6	143.0	164.0	148.0	455.0	21.8	22.6	22.0	22.13					63.10			62.90				77.50	75.80	79.40	55.43	70.28	48.2
8:04	13.5	433.8	120.0	137.0	123.0	380.0	21.8	22.6	22.0	22.1					63.1			63.0				77.5	75.8	79.4	55.4	70.3	48.2
9:04	13.5	434.1	118.0	136.0	122.0	376.0	22.0	22.7	22.1	22.3					63.6			61.1				75.0	73.7	77.2	53.0	68.25	46.0

Condição de ensaio:		Enrolamento excitado 180 MVA / 201.296 kV / 516.26981 A						Perdas em Vazio (kW) = 91.2				Capacitores		Gerador													
Transformador		Enrolamento em curto-circuito 180 MVA / 34.5 kV / 3012.2623 A						Perdas em Carga (kW) = 532.84				45.72 kV		11 kV													
Número de fases		Enrolamento em circuito aberto MVA / kV / A						Perdas Totais (kW) = 624.04				54.72 MVAr		10 MVA													
Frequência (Hz)		TP : 52 / 0.15 kV N° : 072-EE-14 / 072-EE-17 / 072-EE-54						Analisador de Potência		Número		Transformador Elevador															
60		TC : 800 / 5 A N° : 072-IE-57 / 072-IE-53 / 072-IE-56						Yokogawa WT1600		072-UI-54		45 kV		30 MVA													
Tempo	Tensão	Corrente	Perdas				Temperaturas (°C)																				
							Ambiente				Sistema Refrigeração				Óleo												
hora	kV	A	kWr	kWs	kWt	kW total	t1	t2	t3	média	Sup 1	Inf 1	Sup 2	Inf 2	topo 1	topo 2	topo 3	D ot	médio	D om							
23:00	18.6	598.6	194.0	226.0	201.0	621.0	18.4	18.9	17.5	18.3					18.5			18.1				21.6	21.6	21.6	3.3	20.0	1.7
0:00	17.7	569.2	197.0	224.0	202.0	623.0	18.2	18.7	17.2	18.0					18.9			18.2				42.9	43.1	45.5	25.8	31.2	13.2
1:00	17.7	566.6	195.0	224.0	201.0	620.0	18.2	18.8	17.4	18.1					37.6			37.5				56.6	56.4	59.1	39.2	47.5	29.3
2:00	17.7	566.8	195.0	224.0	202.0	621.0	18.8	19.8	18.6	19.1					39.0			39.2				60.2	59.1	61.8	41.3	49.7	30.7
3:00	17.7	566.6	195.0	224.0	202.0	621.0	19.2	20.3	19.3	19.6					39.5			39.7				61.6	60.2	62.9	42.0	50.6	31.0
4:00	17.7	566.6	195.0	225.0	202.0	622.0	19.3	20.6	19.7	19.9					40.0			39.8				62.3	60.9	63.6	42.4	51.1	31.2
5:00	17.7	566.5	195.0	225.0	202.0	622.0	19.4	20.8	19.8	20.0					40.3			40.6				62.8	61.6	64.2	42.9	51.7	31.7
6:00	17.7	566.5	195.0	225.0	202.0	622.0	19.4	20.8	19.9	20.0					40.6			40.6				63.1	61.8	64.5	43.1	51.9	31.8
7:00	17.7	566.0	195.0	224.0	202.0	621.0	19.3	20.8	19.9	20.0					40.7			40.6				63.1	62.0	64.7	43.3	52.0	32.0
7:30	17.7	566.4	196.0	226.0	202.0	624.0	19.3	20.9	19.9	20.0					41.3			40.9				63.3	62.0	64.8	43.3	52.2	32.2
7:30	16.1	516.9	163.0	188.0	168.0	519.0	19.3	20.9	19.9	20.0					41.4			40.7				63.3	62.0	64.8	43.3	52.2	32.2
8:30	16.1	516.7	161.0	186.0	167.0	514.0	20.0	21.4	20.4	20.6					40.4			39.7				61.0	60.0	62.4	40.5	50.6	30.0
9:00	17.8	570.7	195.0	224.0	200.0	619.0	20.5	21.8	20.7	21.0					36.6			36.4				58.5	58.1	59.6	37.7	47.6	26.6
10:25	17.3	555.2	190.0	224.0	196.0	610.0	21.3	22.5	21.6	21.8					44.0			43.7				64.8	63.7	66.4	43.2	54.4	32.6
10:25	16.0	513.7	163.0	189.0	167.0	519.0	21.3	22.5	21.6	21.8					43.9			43.8				64.9	63.7	66.4	43.2	54.4	32.6
11:25	16.1	517.0	162.0	189.0	168.0	519.0	22.4	23.5	22.8	22.9					43.1			42.5				63.3	62.3	64.9	40.6	53.2	30.3
12:00	18.0	578.4	192.0	226.0	200.0	618.0	22.8	23.8	23.1	23.2					38.9			39.2				62.3	61.5	63.5	39.2	50.7	27.5
13:00	17.6	563.0	196.0	225.0	202.0	623.0	22.6	23.8	23.1	23.2					45.3			45.0				66.0	64.7	67.5	42.9	55.6	32.4

17 ANEXO VI – CROMATOGRAFIA DO ÓLEO

Sample Info:

Sample : Amostra coletada antes do ensaio de aquecimento, em 13.09.2021
 Inj. Volume [ml] : 0,3
 Amount [ppm] : 0
 ISTD Amount : 0
 Dilution : 1,5



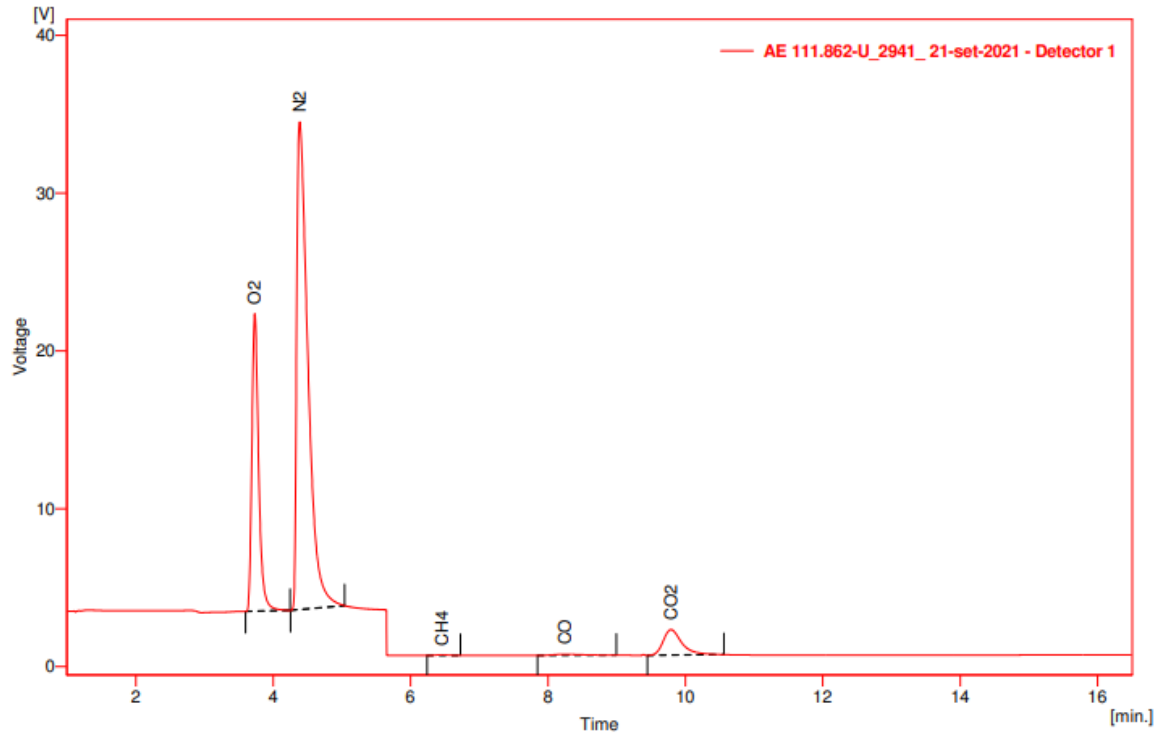
Result Table (ESTD - AE 111.862-U_2928_17-set-2021 - Detector 1)

	Compound Name	Reten. Time [min]	Amount [ppm]
1	O2	2,757	4203
2	N2	3,410	18568
3	CH4	5,487	1
4	CO	7,390	1
5	CO2	8,837	54
	Total		22827

Sample Info:

Sample : Amostra coletada após ensaio de aquecimento , em 21.09.2021
 Inj. Volume [ml] : 0

Amount [ppm] : 0
 ISTD Amount : 0
 Dilution : 2

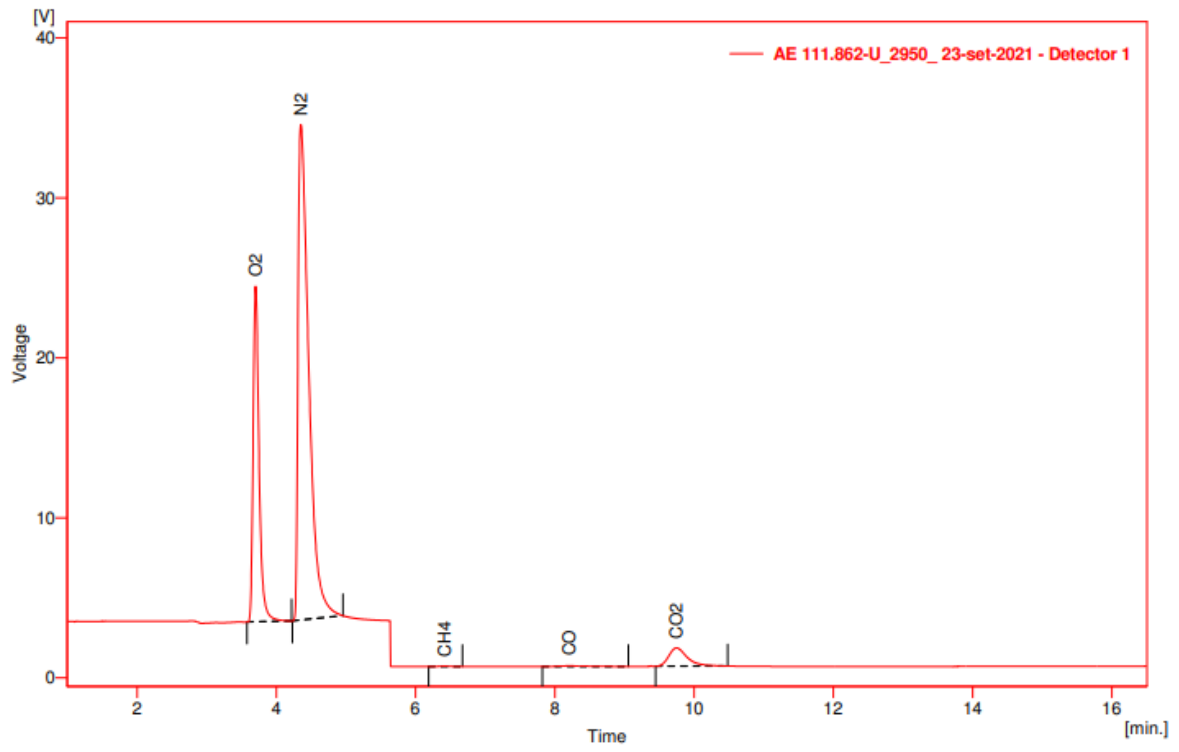


Result Table (ESTD - AE 111.862-U_2941_21-set-2021 - Detector 1)

	Compound Name	Reten. Time [min]	Amount [ppm]
1	O2	2,730	5833
2	N2	3,387	23666
3	CH4	5,453	2
4	CO	7,247	8
5	CO2	8,790	107
	Total		29616

Sample Info:

Sample	: Amostra coletada após ensaios dielétricos, em 23.09.2021	Amount [ppm]	: 0
Inj. Volume [ml]	: 0	ISTD Amount	: 0
		Dilution	: 2,8



Result Table (ESTD - AE 111.862-U_2950_23-set-2021 - Detector 1)

	Compound Name	Reten. Time [min]	Amount [ppm]
1	O2	2,703	7914
2	N2	3,353	31251
3	CH4	5,420	2
4	CO	7,203	8
5	CO2	8,747	104
	Total		39278