

**UNIFAAT
ENGENHARIA ELÉTRICA**

**ANTHONY HENRIQUE
CHARLES PIERINI BONFANTE
FERNANDO FACIO BOURGANOS
JOÃO PEDRO PLAÇA VERONA
RAPHAEL BINDER DA SILVA**

**EXECUÇÃO DE TESTES EM TRANSFORMADOR DE
DISTRIBUIÇÃO E ESTRUTURAÇÃO DO ENSAIO DE
RELAÇÃO DE TRANSFORMAÇÃO PARA UTILIZAÇÃO NO
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA.**

Atibaia, SP

2022

**UNIFAAT
ENGENHARIA ELÉTRICA**

**ANTHONY HENRIQUE – RA 6318005
CHARLES PIERINI BONFANTE – RA 4718500
FERNANDO FACIO BOURGANOS - RA 4718041
JOÃO PEDRO PLAÇA VERONA - RA 4718020
RAPHAEL BINDER DA SILVA – RA 4719651**

**EXECUÇÃO DE TESTES EM TRANSFORMADOR DE
DISTRIBUIÇÃO E ESTRUTURAÇÃO DO ENSAIO DE
RELAÇÃO DE TRANSFORMAÇÃO PARA UTILIZAÇÃO NO
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA.**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado como requisito parcial
para a obtenção do título no Curso de
Engenheiro Eletricista, da UNIFAAT,
sob a orientação da Prof. Dr. Kleber
Hashimoto.

**Atibaia, SP
2022**

E96

Execução de testes em transformador de distribuição e estruturação do ensaio de relação de transformação para utilização no curso de graduação em engenharia elétrica. / João Pedro Praça Verona... [et.al.] -- 2022.
96 f.; 30 cm.

Orientação: Kleber Hashimoto

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) – Centro Universitário UNIFAAT, como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica do Centro Universitário UNIFAAT, Atibaia, 2022.

1.Transformadores 2. Ensaio de campo 3. Engenharia Elétrica
I. Verona, João Pedro Praça II. Bonfante, Charles Pierini III. Bourganos, Fernando Facio IV. Santos, Anthony Henrique V. Silva, Raphael Binder da VI. Hashimoto, Kleber VII. Título

CDD 621.314

Ficha elaborada por Valéria Matias da Silva Rueda - CRB8 9269

DEDICATÓRIA

Este trabalho é dedicado às nossas famílias, base da nossa educação, que sempre incentivou e encorajou nossa jornada.

AGRADECIMENTOS

Aos professores do de Engenharia Elétrica que ao longo destes 5 anos estiveram dispostos a compartilhar seus conhecimentos e técnicas com tanta dedicação e profissionalismo.

A todos os meus colegas de curso, entre os quais fiz amigos que levarei para a vida toda.

Por último e, em especial, ao professor Dr. Kleber Hashimoto, por toda a orientação, paciência e parceria dedicados ao grupo.

Só fazemos melhor aquilo que repetidamente insistimos em melhorar. A busca da excelência não deve ser um objetivo, e sim um hábito.
(Aristóteles)

RESUMO

Os transformadores são equipamentos de vital importância nos sistemas elétricos de potência, utilizados desde o segmento de geração, transmissão, distribuição até o consumo. Uma falha traz grandes transtornos para as concessionárias de distribuição de energia e seus consumidores. Para mitigar esse risco a normatização técnica estabelece uma série de ensaios que são necessários para homologação de um equipamento antes de sua entrada em operação. Este trabalho explicita os principais aspectos funcionais e construtivos dos transformadores de potência e de distribuição de energia elétrica, como também apresenta os ensaios que possibilitam identificar o desempenho mínimo esperado pelo equipamento. Os ensaios costumam ser realizados por laboratórios especializados e credenciados, pelos fabricantes e pelas empresas de energia. Em geral demandam uma infraestrutura laboratorial específica para a sua realização. Este trabalho incluiu a realização de quatro procedimentos de ensaio em um transformador trifásico de distribuição. Os testes realizados, com base na estrutura montada no laboratório da UNIFAAT, permitiram desenvolver um procedimento experimental para utilização prática no curso de Engenharia Elétrica, com o intuito de enriquecer o conteúdo da matéria de Transformação de Energia e possibilitar o primeiro contato dos alunos com um equipamento. Com base nos ensaios efetuados foi constatado que o transformador da universidade foi reprovado nas posições operativas de TAP 0-3 e 0-4, e verificou-se a ausência do TAP 0-5, indicada incorretamente na placa de identificação do transformador.

Palavras-chave: Transformadores. Ensaios de campo.

ABSTRACT

Transformer is a vitally important equipment in electrical power systems, found in generation, transmission, distribution, and consumption segments. A failure brings great inconvenience to the power distribution utilities and their consumers. To mitigate this risk the technical standardization establishes a series of tests that are required for equipment approval before it is put into operation. This paper explains the main functional and constructive aspects of power and power distribution transformers, and also presents tests that make it possible to identify the minimum performance expected by the equipment. The tests are usually performed by specialized and accredited laboratories, by manufacturers and by power companies. In general, they demand a specific laboratory infrastructure for their execution. This work included the performance of four test procedures in a three-phase distribution transformer. The tests performed, based on the structure set up at UNIFAAT's laboratory, allowed the development of an experimental procedure for practical use in the Electrical Engineering course, in order to enrich the contents of the Power Transformation subject and enable the students' first contact with an equipment. Based on the tests performed, it was found that the university's transformer failed in the TAP 0-3 and 0-4 operating positions, and it was verified that TAP 0-5 was missing, incorrectly indicated on the transformer's nameplate.

Keywords: Transformers, Field tests.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Primeira bobina elétrica	15
Figura 2 - Primeiro transformador vendido comercialmente.....	16
Figura 3 – Circuito de um transformador com núcleo de ar	19
Figura 4 - Transformador ideal	20
Figura 5 - Circuito de um transformador real.....	21
Figura 6 - Ciclo de histerese para um material ferromagnético	24
Figura 7 - Diagrama vetorial corrente magnetização.....	26
Figura 8 - Diagrama fasorial do transformador sob carga	27
Figura 9 - Transformador	28
Figura 10 - Núcleo de um transformador trifásico	30
Figura 11 - Transformador Monofásico	31
Figura 12 - Transformador bifásico UNIFAAT	31
Figura 13 - Transformador trifásico da UNIFAAT	32
Figura 14 Transformador a seco	35
Figura 15 - Estrutura básica do sistema elétrico de potência	36
Figura 16 - Transformador HVDC	39
Figura 17 - Esquema de ligações em subestações.....	40
Figura 18 - Transformador 15 kVA da UNIFAAT vista frontal	45
Figura 19 - Vista da parte interna comutador	47
Figura 20 - Tampa de compartimento do comutador	47
Figura 21 - Placa do transformador UNIFAAT.....	48
Figura 22 - Marcação dos terminais de transformadores e diagramas fasoriais da tensão para ligações trifásicas	50
Figura 23 - Planilha de inspeção visual.....	53
Figura 24 - Diagrama vetorial de ligação de transformadores.....	54
Figura 25 - Teste de Relação de Transformação Utilizando o MEGGER TTRU3.....	56
Figura 26 – Parte interna MEGGER TTRU3	56
Figura 27 - Esquema de ligação no MEGGER TTRU3	56
Figura 28 - Configuração de ligação MEGGER TTRU3.....	57
Figura 29 - Posição de TAP 0-1 (13800/220V).....	58

Figura 30 - Posição de TAP 0-2 (13200/220V).....	59
Figura 31 - Posição de TAP 0-3 (12600/220V).....	59
Figura 32 - Posição de TAP 0-4 (12000/220V).....	60
Figura 33 - Planilha para ensaios de relação de transformação em transformadores trifásicos	61
Figura 34 - Ensaio de relação de Transformação pelo Método do voltímetro	65
Figura 35 - Ausência do TAP 0-5	66
Figura 36 - Medição entre H1/H3 - Medição Bobina H1	68
Figura 37 - Medição entre H1/H2 - Medição Bobina H2	68
Figura 38 - Medição entre H2/H3 - Medição Bobina H3.....	68
Figura 39 - Medição entre X0/X1 - Medição Bobina X1	69
Figura 40 - Medição entre X0/X2 - Medição Bobina X2	69
Figura 41 - Medição entre X0/X3 - Medição Bobina X3	69
Figura 42 - equipamento utilizado para Ensaio de Resistência Ôhmica Utilizando - RMO-TD.....	70
Figura 43 - Parte interna do equipamento - Quick Guide	71
Figura 44 - Ensaio entre as buchas de ALTA (H1/H2) – Posição de TAP 0/1	71
Figura 45 - Ensaio entre as buchas de ALTA (H1/H3) – Posição de TAP 0/1	72
Figura 46 - Ensaio entre as buchas de ALTA (H2/H3) – Posição de TAP 0/1	72
Figura 47 - Ensaio entre as buchas de ALTA (H1/H2) – Posição de TAP 0/2.....	73
Figura 48 - Ensaio entre as buchas de ALTA (H1/H3) – Posição de TAP 0/2.....	73
Figura 49 - Ensaio entre as buchas de ALTA (H2/H3) – Posição de TAP 0/2.....	74
Figura 50 - Ensaio entre as buchas de ALTA (H1/H2) – Posição de TAP 0/3.....	74
Figura 51 - Ensaio entre as buchas de ALTA (H1/H3) – Posição de TAP 0/3.....	75
Figura 52 - Ensaio entre as buchas de ALTA (H2/H3) – Posição de TAP 0/3.....	75
Figura 53 - Ensaio entre as buchas de ALTA (H1/H2) – Posição de TAP 0/4.....	76
Figura 54 - Ensaio entre as buchas de ALTA (H1/H3) – Posição de TAP 0/4.....	76
Figura 55 - Ensaio entre as buchas de ALTA (H2/H3) – Posição de TAP 0/4.....	77
Figura 56 - Ensaio entre as buchas de BAIXA (X0/X1) – Posição de TAP 0/1.....	77
Figura 57 - Ensaio entre as buchas de BAIXA (X0/X2) – Posição de TAP 0/1.....	78
Figura 58 - Ensaio entre as buchas de BAIXA (X0/X3) – Posição de TAP 0/1.....	78
Figura 59 - Planilha de ensaio de resistência ôhmica dos enrolamentos.....	79

Figura 60 - Esquema resistivo de um transformador.....	82
Figura 61 - Conexões de baixa curto-circuitada	83
Figura 62 - Medição RAT; 1 - 30 segundos / 2 - 60 segundos / 3 - 10 minutos	85
Figura 63 - Medição RAB; 1 - 30 segundos / 2 - 60 segundos / 3 - 10 minutos	86
Figura 64 - Medição RBT; 1 - 30 segundos / 2 - 60 segundos / 3 - 10 minutos	87
Figura 65 - Medição RBA; 1 - 30 segundos / 2 - 60 segundos / 3 - 10 minutos	88
Figura 66 - Temperatura e humidade no dia dos ensaios	88
Figura 67 - Estrutura para ensaios	92

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tabela de normas utilizadas	41
Tabela 2 - Relação de ensaios realizados	44
Tabela 3 - Cor da garra de teste bucha de alta	55
Tabela 4 - Cor da garra de teste bucha de baixa	56
Tabela 5 - Resultados entre buchas.....	63
Tabela 6 - Relação TAP/Tensão entre as Buchas	64
Tabela 7 - Resultado dos testes de relação	65
Tabela 8 - Temperatura de referência.....	80
Tabela 9 - Grau de polarização	83
Tabela 10 - Grau de absorção.....	84
Tabela 11 - Tabela de resultados.....	84
Tabela 12 - Ferramentas Utilizadas	89
Tabela 13 - Equipamentos de proteção individual utilizados.....	89

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	TEMA	16
1.2	JUSTIFICATIVAS	16
1.3	OBJETIVOS	17
1.3.1	Objetivo Geral	17
1.3.2	Objetivo Específicos	17
1.4	METODOLOGIA	18
1.4.1	Metodologia de pesquisa	18
2	CARACTERIZAÇÃO DO EQUIPAMENTO	18
2.1	PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO	18
2.2	TRANSFORMADOR IDEAL	19
2.3	TRANSFORMADOR REAL	21
2.4	CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS E TÉRMICAS	22
2.4.1	Potência Nominal	22
2.4.2	Tensão Nominal	22
2.4.3	Corrente Nominal	22
2.4.4	Frequência Nominal	23
2.4.5	Perdas	23
2.5	ANÁLISE DE TRANSFORMADORES EM OPERAÇÃO	25
2.5.1	Operação a vazio	26
2.5.2	Operação em carga	26
2.5.3	Operação em curto-circuito	27
3	CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS DOS TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS	28

3.1	BUCHAS	28
3.2	ENROLAMENTOS	29
3.3	TANQUE PRINCIPAL (TANQUE DE CONTENÇÃO)	29
3.4	TANQUE DE EXPANSÃO	29
3.5	NÚCLEO	30
3.6	PAINEL DE COMANDO	30
3.7	COMUTADOR	30
3.8	NÚMERO DE FASES	31
3.8.1	Monofásicos – Corrente Alternada	31
3.8.2	Bifásicos – Corrente Alternada	31
3.8.3	Trifásicos – Corrente Alternada	32
3.9	MEIO ISOLANTE	32
3.9.1	Transformadores em líquido isolante.....	33
3.9.2	Transformadores a seco	34
4	APLICAÇÕES	36
4.1	TRANSFORMADORES ELEVADORES DE TENSÃO.....	36
4.2	TRANSFORMADORES ABAIXADORES DE TENSÃO.....	37
4.3	TRANSFORMADORES DE ISOLAÇÃO	37
4.4	REATOR	38
4.5	TRANSFORMADOR PARA TRSMISSÃO EM CORRENTE CONTÍNUA (HVDC).....	39
5	ENSAIOS PROPOSTOS PELA NORMA	41
5.1	NORMAS TÉCNICAS APLICÁVEIS.....	41
5.2	ENSAIOS DE ROTINA	42
5.3	ENSAIOS DE TIPO.....	42
5.4	ENSAIOS ESPECIAIS.....	43

6	ESTUDO DE CASO	45
6.1	O TRANSFORMADOR DA UNIFAAT	45
6.1.1	Ligações do Transformador UNIFAAT:	45
6.1.2	Terminais de Conexão do Transformador UNIFAAT:	46
6.1.3	Comutador do Transformador UNIFAAT:	46
6.1.4	Buchas do Transformador UNIFAAT:	47
6.1.5	Placa de Identificação do Transformador UNIFAAT	48
6.1.6	Características nominais do Transformador UNIFAAT	48
6.1.7	Tipo de óleo isolante do Transformador UNIFAAT	51
6.1.8	Aplicações para este tipo de transformador	51
6.2	INSPEÇÃO VISUAL DO TRANSFORMADOR	51
6.3	PROCEDIMENTO DE ENSAIO:	51
6.4	ENSAIOS REALIZADOS NOS ESTUDO DE CASO	54
6.4.1	Relação de transformação	54
6.4.2	Ensaio de Resistência Ôhmica	67
6.4.3	Ensaio de Resistência de Isolamento	81
6.5	LISTA DE EQUIPAMENTOS E FERRAMENTAS UTILIZADAS NOS ENSAIOS DO TRANSFORMADOR UNIFAAT	89
6.6	LISTA DE EQUIPAMENTOS DE PROTEÇÃO INDIVIDUAL UTILIZADOS NOS ENSAIOS DO TRANSFORMADOR UNIFAAT	89
6.7	ANÁLISE E CONCLUSÃO DO ESTUDO DE CASO	90
6.8	LABORATÓRIO	92
6.8.1	Estrutura	92
6.8.2	Diagrama Trifilar	93
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	94

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento do primeiro transformador ocorreu no início do século XIX, mais precisamente na data de 1831, quando Michael Faraday, através de experiências práticas, descobriu que enrolando duas bobinas sobre um anel de ferro, separando-as, e submetendo uma delas a uma tensão em corrente contínua, induzia também uma tensão na outra bobina, porém, notou que isso ocorria por um curto intervalo de tempo. Diante desta incrível descoberta, Faraday percebeu que para que a tensão induzida se tornasse constante, era necessário variar constantemente o fluxo magnético entre ambas as bobinas, isso significa em outras palavras, variar o campo magnético aplicado à primeira bobina.

Com base nos resultados obtidos nesta inovadora experiência, Michael Faraday desenvolveu o primeiro transformador, nomeado anel de Faraday, apresentado na Figura 1. (DIAS; MARTINS, 2004).

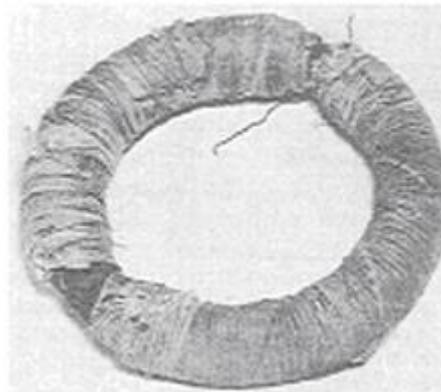


Figura 1 - Primeira bobina elétrica
Fonte: Artigo La Historia del Transformador

Décadas depois, por volta de 1876, deu-se início à denominada “Guerra das Correntes”, que é nome dado a famosa competição entre Thomas Edson e Nikola Tesla, dois renomados cientistas da época. Tal disputa foi travada para estabelecer o melhor método de transmissão de energia, em corrente contínua ou alternada, respectivamente. Alguns anos após o início do embate, em 1885, após aperfeiçoamentos dos experimentos realizados por Michael Faraday, o físico William Stanley foi encarregado por George Westinghouse, parceiro de Nikola Tesla, a partir da obtenção da patente comprada de Lucien Galard e de John Dixon Gibbs (inventores do transformador para sistema de potência em corrente alternada), a

construir o primeiro transformador comercialmente viável da história. Este primeiro produto é ilustrado na ilustra a Figura 2. (GUIMARÃES, 2009).

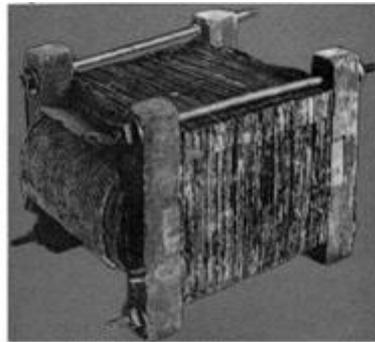


Figura 2 - Primeiro transformador
Fonte: Engenha, 2009

Vale pontuar, que não se pode cravar um único nome como inventor do transformador elétrico, já que, conforme mencionado anteriormente, o desenvolvimento passou por várias fases e aprimoramentos para se tornar o importante produto que conhecemos hoje.

Atualmente, o transformador é amplamente utilizado, tem um papel muito importante no sistema elétrico, pois possibilitou de forma econômica a transmissão de energia, cobrindo distâncias inimagináveis e que antes pareciam improváveis, utilizando altas tensões e vencendo as perdas no caminho.

1.1 TEMA

O trabalho tem como tema a demonstração dos ensaios normatizados que devem ser aplicados aos transformadores de distribuição de energia e das técnicas utilizadas na detecção de falhas em transformadores de potência.

1.2 JUSTIFICATIVAS

Com as exigências da agência reguladora no Brasil e do mercado consumidor, a busca por maior confiabilidade dos transformadores de distribuição é cada vez mais enfatizada. Contudo, para que isto se torne possível, é necessário um diagnóstico dos equipamentos que entrarão em operação. Perante a tal necessidade, este trabalho apresenta uma abordagem referente aos transformadores trifásicos de distribuição, segundo a qual, os métodos para ensaios e diagnósticos em campo são detalhados e exemplificados em sala, em uma aula desenvolvida para apresentarmos alguns dos

métodos utilizados pelas empresas, também adicionar uma pequena experiência prática para os alunos da graduação em Engenharia Elétrica.

Com as exigências da agência reguladora no Brasil, a ANEEL (Agência Nacional de energia elétrica, que tem como finalidade regular e fiscalizar a produção, transmissão, distribuição e comercialização de energia elétrica no Brasil), e do mercado consumidor, a busca por maior confiabilidade dos transformadores de distribuição é cada vez mais enfatizada.

Contudo, para que isto se torne possível, é necessário um diagnóstico dos equipamentos que entrarão em operação. Perante a tal necessidade, este trabalho apresenta uma abordagem referente aos transformadores trifásicos de distribuição, segundo a qual, os métodos para ensaios e diagnósticos em campo são detalhados e exemplificados em sala, em uma aula desenvolvida para apresentarmos alguns dos métodos utilizados pelas empresas, também adicionar uma pequena experiência prática para os alunos da graduação em Engenharia Elétrica.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

Descrever as ferramentas e técnicas utilizadas em campo, para diagnóstico de problemas e a validação do pleno funcionamento dos transformadores que entrarão em atividade.

1.3.2 Objetivo Específicos

- Apresentar e/ou reforçar de forma detalhada todo o funcionamento de um transformador.
- Exemplificar os métodos e motivos do diagnóstico do transformador através de seus ensaios de comissionamento e ensaios realizados em campo;
- Comprovar a eficácia das técnicas utilizadas na detecção de falhas em transformadores de potência, aplicando a teoria apresentada em um caso real, em sala de aula.
- Demonstrar os métodos de ensaios, efetuar a medições nas buchas de baixa e realizar o cálculo da relação de transformação do transformador da UNIFAAT.

1.4 METODOLOGIA

1.4.1 Metodologia de pesquisa

Para alcançar os objetivos da pesquisa, as etapas abaixo serão adotadas:

- I. Descrever o funcionamento do transformador;
- II. Avaliar e equacionar seus parâmetros;
- III. Apresentar os aspectos construtivos de um transformador;
- IV. Apresentar os diversos modelos e aplicações de transformadores.
- V. Descrever os ensaios realizados em laboratório, utilizados para o diagnóstico nos transformadores;
- VI. Apresentar os ensaios realizados transformador da UNIFAAT;
- VII. Realizar o ensaio de relação de transformação e desenvolver uma aula, que poderá compor a disciplina de Transformação de Energia;
- VIII. Propor a estrutura necessária para realização da aula prática;
- IX. Apresentar os resultados.

2 CARACTERIZAÇÃO DO EQUIPAMENTO

2.1 PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO

Conforme descrito por Kosow (1995), o transformador opera de acordo com o princípio da indução mútua entre duas (ou mais) bobinas ou circuitos indutivamente acoplados. Os circuitos não possuem ligação física, ou seja, sem conexão condutiva. Possui um circuito ligado à fonte de tensão que é chamado de primário. Este recebe a energia e devido a seu acoplamento em um mesmo núcleo comum de ferro, com um segundo circuito, denominado secundário, transfere quase toda a energia recebida da fonte.

Se os dois circuitos, primário e secundário, são frouxamente acoplados, seu núcleo é exposto ao ar, tal transferência de energia é drasticamente reduzida e apenas uma pequena parte da energia é transferida para o secundário.

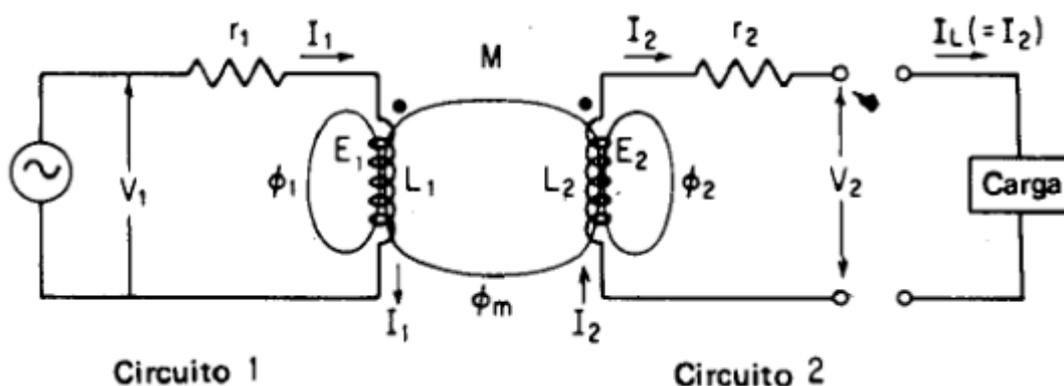


Figura 3 – Circuito de um transformador com núcleo de ar
Fonte: Mamede 2015

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) define que o transformador é um equipamento elétrico estático que, por indução eletromagnética, transforma tensão e corrente alternadas entre dois ou mais enrolamentos, sem mudança de frequência. Para o American National Standards Institute (ANSI) e o Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), definem o transformador como um equipamento elétrico estático, que não possui partes sujeitas a movimento contínuo, utilizado em sistemas elétricos para transferir potência entre circuitos por meio de indução eletromagnética.

2.2 TRANSFORMADOR IDEAL

Segundo Mamede (2015), um transformador hipotético é normalmente utilizado para fins teóricos e didáticos, pois não há perdas no ferro, não há indutância e resistência e o coeficiente de acoplamento entre as bobinas é unitário. Nele a potência de entrada é igual a potência de saída.

Com a tensão alternada aplicada no primário do transformador ideal, uma corrente I_1 circulará, produzindo assim um fluxo mútuo ϕ_m que irá induzir as tensões E_1 e E_2 , denominadas forças eletromotrizes. De acordo com a lei de Lenz, E_1 e E_2 se opõem à V_1 (tensão aplicada). Com o acoplamento de uma carga no secundário, uma corrente I_2 será produzida.

De acordo com a lei de Faraday, tem-se:

$$E_1 = N_1 * \frac{d\phi_m}{dt}$$

$$E_2 = N_2 * \frac{d\phi_m}{dt}$$

Onde N_1 e N_2 correspondem ao número de espiras dos enrolamentos primário e secundário, respectivamente.

Desta forma, tem-se:

$$E_1/E_2 = N_1/N_2$$

A relação de transformação corresponde à N_1 e N_2 .

Para o transformador ideal que não apresenta perdas, nem fluxos dispersos, pode-se dizer que:

$$\alpha = N_1/N_2 = I_1/I_2 = V_1/V_2$$

Conforme Fitzgerald, Kingsley, Umans (2006), quando falamos de transformador ideal, devemos desconsiderar todas as perdas, a potência de saída do enrolamento secundário é igual à potência de entrada do primário.

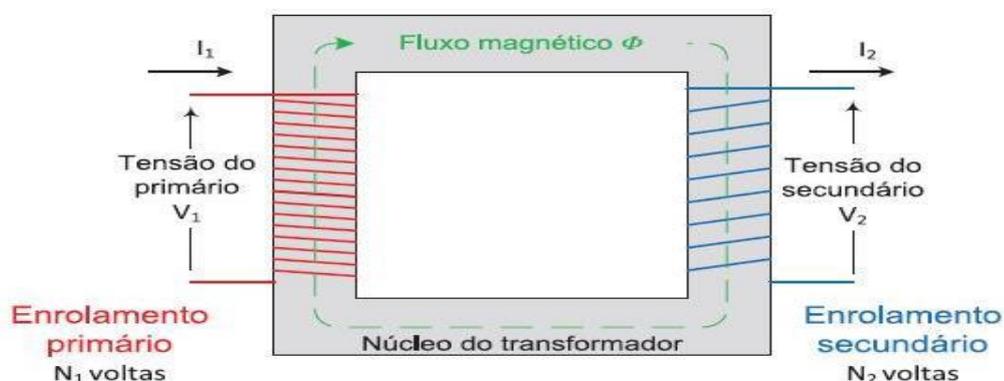


Figura 4 - Transformador ideal

Fonte: Frontin, 2014

2.3 TRANSFORMADOR REAL

O transformador real, a partir da aplicação de uma tensão V_1 , produzirá pequenos fluxos dispersos em ambos os enrolamentos, ϕ_1 e ϕ_2 , além do fluxo mútuo ϕ_m .

Desta forma, os fluxos ϕ_1 e ϕ_2 irão produzir indutâncias de dispersão, X_{L1} e X_{L2} . Por serem constituídos de cobre, esses enrolamentos apresentaram resistências R_1 e R_2 . As resistências e reatâncias compõem as impedâncias Z_1 e Z_2 , indicadas na figura abaixo:

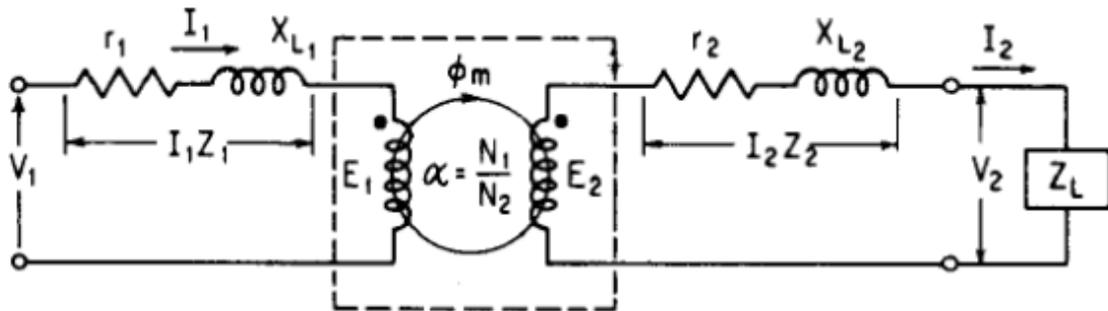


Figura 5 - Circuito de um transformador real
Fonte: Mamede 2015

Tem-se então:

$$\vec{E}_1 = \vec{V}_1 - (\vec{Z}_1 \vec{I}_1)$$

$$\vec{E}_2 = \vec{V}_2 - (\vec{Z}_2 \vec{I}_2)$$

Onde:

$$\vec{Z}_{L1} = R_1 + jX_{L1}$$

$$\vec{Z}_{L2} = R_2 + jX_{L2}$$

Desta forma, para transformadores reais, deve-se considerar que:

$$V_1 > E_1 \text{ e } V_2 < E_2$$

2.4 CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS E TÉRMICAS

Os transformadores são equipamentos que possuem características elétricas que devem ser profundamente estudadas, devido a sua complexidade e importância ao Sistema Elétrico de Potência, antes de sua aplicação para se alcançar uma operação eficiente e segura.

2.4.1 Potência Nominal

A potência nominal do transformador é o valor convencional da potência aparente, base para o projeto, ensaios e que determina a corrente nominal em condições específicas.

2.4.2 Tensão Nominal

É a tensão projetada e especificada pelo fabricante para o adequado funcionamento do equipamento. Para transformadores trifásicos, se a bobinas apresentarem ligação em triângulo, a tensão nominal dos enrolamentos será equivalente a tensão nominal do transformador. Se apresentarem ligação em estrela, a tensão nominal dos enrolamentos é $\sqrt{3}$ inferior à tensão nominal do transformador.

2.4.3 Corrente Nominal

É a corrente que circula no terminal de linha dos enrolamentos quando a tensão nominal é aplicada nos terminais de ligação. Podemos encontrar seu valor através das seguintes equações:

- Transformadores monofásicos (Fase-Neutro) ou bifásicos (Fase-Fase)

$$I_{nt} = \frac{P_{nt}}{V_{nt}}$$

- Transformadores trifásicos

$$I_{nt} = \frac{P_{nt}}{\sqrt{3} \times V_{nt}}$$

P_{nt} → potência nominal do transformador (kVA);

V_{nt} → tensão entre os terminais de linha do transformador (kV).

2.4.4 Frequência Nominal

É a frequência em que foram determinados os parâmetros do transformador.

2.4.5 Perdas

Para Mamede (2015), a perda é a potência absorvida pelo transformador e dissipada, pelo núcleo (enrolamentos e núcleo de ferro).

2.4.5.1 Perdas a vazio

Perda a vazio pode ser definida como a potência absorvida pelo transformador quando alimentado em tensão e frequência nominais, estando sem carga conectada ao secundário ou terciários (aberto).

- a) Perdas por correntes parasitas ou de Foucault: Ao submeter uma massa metálica a uma variação de fluxo magnético, é gerada um F.e.m. E que produz correntes elétricas em seu interior, causando perdas de potência, que são transformadas em calor no núcleo do transformador.
- Através da equação a seguir, podemos calcular estas perdas por correntes de Foucault, para 1 kg de lâmina de ferro silício (forma simplificada).

$$P_{cf} = 2,0 * 10^{-11} * B_m^2 * F^2 * E_c^2 * K (W/kg)$$

B_m → máxima indução magnética nas lâminas (gauss);

F → frequência da rede (Hertz);

K → coeficiente que depende do material do núcleo – Silício 1,10, para B_m 16.000 (gauss), com $F = 60$ Hz;

E_c → espessura da chapa (mm).

- b) Perdas por histerese magnética: O termo histerese é de origem grega e significa “atraso”. Ao submeter um material magnético a um campo magnético alternado, os dipolos magnéticos se atiram para inverter sua polaridade norte-sul em cada ciclo. Este atrito aquece o material ferromagnético, gerando perdas por calor. Essas perdas são denominadas perdas por histerese.

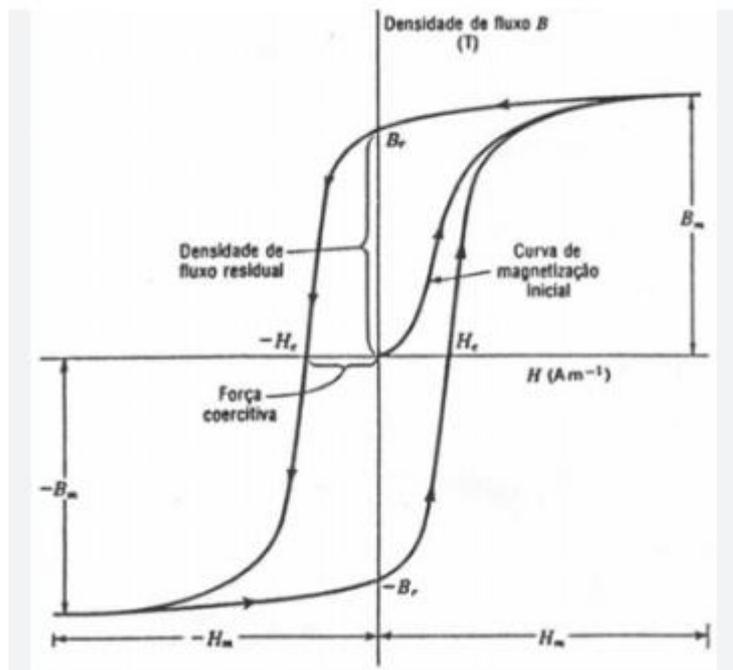


Figura 6 - Ciclo de histerese para um material

Fonte: Researchgate, 2022

Para Araujo (2009), quando um fluxo magnético percorre o núcleo do transformador, obtêm-se sua curva de histerese, cujo traçado relaciona a indução magnética (B) com a intensidade de campo magnético (H). A medida da histerese, que está relacionada com as características magnéticas do material, é dada pela área entre os traços desta curva (forma resultante). A curva de histerese mostra que existe um consumo de energia para reorientar os domínios magnéticos, formando uma memória magnética indesejável nos transformadores.

2.4.5.2 Perdas em carga

Para Mamede (2015), perda em carga pode ser definida como a potência absorvida pelo transformador quando alimentado em tensão e frequência nominais, estando os terminais secundários em curto-circuito. Neste caso as perdas são causadas somente pela resistência ôhmica das bobinas, denominadas então, perdas no cobre. De forma simplificada as perdas no cobre podem ser expressas pela seguinte equação, para 1 kg de cobre:

$$P_{cu} = 2,43 * D^2 (W/kg)$$

$D \rightarrow$ densidade de corrente em A/mm². É considerada a média das densidades de corrente dos enrolamentos.

Segundo Martignoni (1991), os enrolamentos primários e secundários do transformador sempre apresentam uma determinada resistência ôhmica. Estas resistências exercem uma perda de energia por efeito joule e uma queda de tensão nos enrolamentos. O enrolamento de alta possui número maior de espiras, para equipamentos abaixadores, sendo constituído de um condutor de cobre de menor seção, logo, apresenta uma maior resistência.

A densidade de corrente pode ser determinada através da seção transversal dos fios dos enrolamentos. As perdas totais podem ser encontradas através da seguinte equação:

$$P_t = P_{fe} + F_c^2 * P_{cu}$$

$P_t \rightarrow$ perdas totais no transformador (W);

$F_c \rightarrow$ fator de carga;

$P_{fe} \rightarrow$ perdas totais no ferro (W), dado por: $P_{fe} = P_{cfn} + P_{hmm}$

2.5 ANÁLISE DE TRANSFORMADORES EM OPERAÇÃO

Para Mamede (2015), um transformador é constituído de dois ou mais enrolamentos: o enrolamento primário, que recebe a energia do sistema supridor, e o enrolamento secundário, que transfere esta energia para o sistema de distribuição, descontando as perdas internas referentes a esta transformação, podendo também existir um terceiro enrolamento. Em seu estudo devemos analisar os transformadores nas seguintes situações, consideradas mais importantes, quando estão em operação. São elas:

2.5.1 Operação a vazio

Quando não há nenhuma carga ligada a seu enrolamento secundário e o transformador está energizado, diz-se que opera em vazio. Neste caso, uma tensão V_1 é aplicada no enrolamento primário, que induz uma tensão no secundário. Uma corrente I_1 circulará no enrolamento primário, denominada corrente a vazio. Ela será decomposta em dois componentes, sendo I_μ a corrente responsável pela magnetização do núcleo, enquanto I_p é a corrente que supri suas perdas internas, correntes parasitas de Foucault e perdas por histerese.

A corrente em vazio I_0 é normalmente muito pequena e, que chega a 8% da corrente do primário a plena carga. A corrente I_p pode variar entre 2 e 15% do valor da corrente do primário. Não há corrente percorrendo o secundário quando a transformação está operando em vazio.

Um fluxo magnético é criado no núcleo, e conceitualmente, considerando que sejam nulas as resistências ôhmicas dos enrolamentos. Ele representa o número de linhas de força magnética entrando e saindo de uma superfície magnetizada, que se relacionada com a área transversal perpendicular, às linhas de fluxo, obtêm-se a densidade de fluxo magnético B_m (linhas /cm²). Os transformadores geralmente apresentam uma densidade de fluxo variando entra 10.000 e 16.000 Gauss.

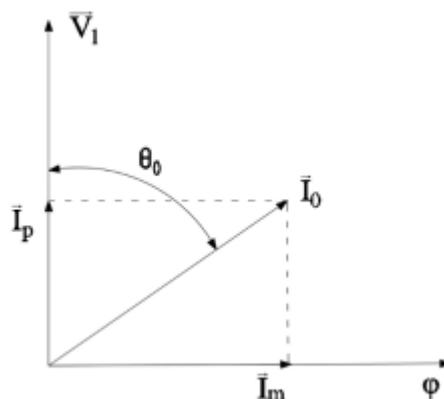


Figura 7 - Diagrama vetorial corrente
Fonte: Autoria própria

2.5.2 Operação em carga

Quando uma carga é ligada aos terminais do secundário do transformador, circula neste enrolamento uma corrente de valor I_2 que, conseqüentemente faz surgir no primário a corrente a vazio I_0 e uma nova corrente de valor I_1' . Esta nova corrente

trará o equilíbrio à força magnetomotriz (f.m.m.) gerada no secundário, onde circulará a corrente de carga I_2 .

Pode-se concluir que, quando uma determinada carga faz circular uma corrente I_2 no enrolamento secundário de um transformador, seja ele monofásico ou trifásico, o enrolamento primário absorve da rede de alimentação uma corrente total I_1 , que corresponde a corrente magnetizante I_0 e a corrente de reação I_1' , esta possui uma defasagem em relação à tensão de um ângulo ν_1 , cujo valor depende do ângulo do fator de potência da carga, ν_2 .

Se a carga é retirada, I_2 torna-se nula, assim o transformador absorve da rede somente a corrente de excitação I_0 .

É importante notar que a f.e.m. E_1 gerada quando o transformador está em carga é inferior à f.e.m. para a condição de operação de operação em vazio.

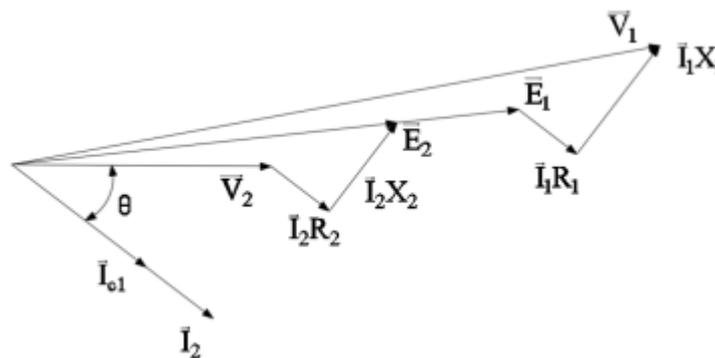


Figura 8 - Diagrama fasorial do transformador sob carga
Fonte: Autoria própria

2.5.3 Operação em curto-circuito

Quando os terminais de um transformador são ligados através de um condutor que possui impedância desprezível, a tensão medida entre tais terminais é praticamente nula. A f.e.m. gerada nestas condições resulta numa corrente secundária defasada.

Neste ensaio aplica-se uma tensão no primário para se obter nos terminais secundários (em curto) uma corrente de valor igual à nominal do transformador. Esta tensão recebe o nome de tensão de curto-circuito, e tem o valor de aproximadamente 5% da tensão nominal do primário do equipamento. Desta forma o fluxo magnético no núcleo também é cerca de 5% do fluxo registrado em carga e a f.e.m. também é muito pequena. Nestas condições as perdas no ferro são muito baixas.

3 CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS DOS TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS



Figura 9 - Transformador
Fonte: Autoria própria

3.1 BUCHAS

As buchas normalmente são feitas de porcelana para isolar as bobinas do tanque, na parte interna das buchas encontramos uma envoltória de papel e filme metálicos, imersos em óleo isolante. Existem dois tipos de buchas, a do tipo seca e a capacitiva, o que as diferencia é que a capacitiva possui várias camadas de material semicondutor e camadas isolantes. Estudos indicam que as buchas são componentes críticos de transformadores de potência, de acordo com o Cigré (Comitê Nacional Brasileiro de Produção e Transmissão de Energia Elétrica) cerca de 10% das falhas em transformadores são ocasionadas pelas buchas, geralmente as falhas em buchas capacitivas com corpo de porcelana e meio isolante de papel impregnado com o óleo geram explosões e danos expressivos ao transformador e outros equipamentos próximos instalados na subestação.

3.2 ENROLAMENTOS

São bobinas cilíndricas formadas por condutores de cobre retangulares, podendo ser isolados ou envernizados. As bobinas são dispostas em forma helicoidal. O enrolamento mais próximo ao núcleo é o de menor tensão e o mais afastado de maior tensão, com finalidade de economizar materiais isolantes, aumento gradativamente do nível de tensão com a distância elétrica.

Como mencionado por Harlow (2004), os enrolamentos podem ser feitos utilizando condutores que apresentam baixas resistências, como o cobre e o alumínio. O cobre eletrolítico é o mais utilizado, pois apesar de mais caro, tem uma capacidade de condução maior que o alumínio, além de apresentar maior resistência mecânica.

Segundo Almeida, Cogo, Abreu, os enrolamentos dos transformadores trifásicos podem ser conectados de diversas formas para atender as várias aplicações possíveis. Neste processo de decisão, fatores como o tipo de carga, a presença de harmônicos e a necessidade de aterramento são levados em conta. Os tipos de ligações existentes são basicamente três: estrela, delta e zig-zag.

3.3 TANQUE PRINCIPAL (TANQUE DE CONTENÇÃO)

É a parte onde são colocados o núcleo e as bobinas, imerso por óleo isolante, para controlar o aumento de temperatura disseminado por eles. O tanque pode ser dotado de blindagens nas paredes internas, para minimizar o aumento de temperatura do aço.

3.4 TANQUE DE EXPANSÃO

Esse tanque permite a expansão do volume de óleo isolante, quando passa a ter variação de temperatura no transformador. Na maioria das vezes formado por uma bolsa de borracha.

3.5 NÚCLEO



Figura 10 - Núcleo de um transformador trifásico
Fonte: Autoria própria

É o responsável por transferir a corrente induzida no enrolamento primário para o secundário. Composto por chapas de aço silício laminadas a frio, pois ajuda na magnetização e perdas, com espessura de 0,3 a 0,4 mm. Um transformador monofásico possui apenas duas colunas principais e o trifásico três. O núcleo pode perder sua funcionalidade caso haja um curto circuito entre as chapas, perda de aterramento ou o esmagamento do núcleo pelo enrolamento.

3.6 PAINEL DE COMANDO

O painel é onde é feito o controle e monitoramento da temperatura, descargas, e corrente do transformador.

3.7 COMUTADOR

Possibilita a variação dos níveis de tensão, através de conexão que pode adicionar ou subtrair o número de espiras que compõe o enrolamento de regulação, sem a necessidade de desligar o transformador. A chave comutadora é o dispositivo que realiza a transferência de carga sem interromper a corrente durante a mudança de tap, quando acionada a chave é inserido um resistor de transição que limita a corrente de carga.

3.8 NÚMERO DE FASES

3.8.1 Monofásicos – Corrente Alternada

Para Mamede (2015), são equipamentos construídos e pensados para utilização em área rural (pequeno porte), caracterizados por monofilar com retorno por terra - MRT. Possuem somente uma bucha no primário e uma bucha no secundário, porém, eventualmente podem ter duas ou mais buchas no secundário. Apresentam baixo custo e sua potência nominal não supera os 15 kVA. Na maioria das concessionárias da região Nordeste do Brasil que utilizam sistemas MRT, as tensões aplicadas são de $13,8/\sqrt{3}$ kV (7.968 V) no primário e 220V no secundário.



Figura 11 - Transformador Monofásico
Fonte: Embtransformadores, 2022

3.8.2 Bifásicos – Corrente Alternada

Segundo Mamede (2015), os transformadores bifásicos são equipamentos utilizados em redes de distribuição rural, assim como os monofásicos, mas também em formação de bancos de transformação, em poste e em cabines.



Figura 12 - Transformador bifásico UNIFAAT
Fonte: Autoria própria

Quando utilizados sozinhos atendem a cargas monofásicos.

3.8.3 Trifásicos – Corrente Alternada

Estes equipamentos são os mais empregados no sistema de distribuição e transmissão elétrica das concessionárias, como no atendimento a cargas industriais. Para Del Toro (2016), o uso difundido de transformadores trifásicos é devido ao rendimento e a considerável economia no uso do cobre e espaço para instalação, comparado a um sistema trifásico composto por 3 transformadores monofásicos. Por serem utilizados na maioria das aplicações, e por este trabalho de conclusão de curso ser desenvolvido em torno do transformador trifásico da UNIFAAT, tais equipamentos serão objetos de maior atenção no item a seguir (13).



Figura 13 - Transformador trifásico da UNIFAAT
Fonte: Autoria própria

3.9 MEIO ISOLANTE

A isolação é muito importante para o funcionamento de um transformador, pois ele auxilia no controle de temperatura, circulando através dos enrolamentos e do núcleo, assim eliminando o máximo de perdas. O óleo ajuda conferindo a característica dielétrica ao sistema isolante do transformador.

3.9.1 Transformadores em líquido isolante

Existem quatro tipos de líquidos isolantes que são utilizados em transformadores: óleo mineral, silicone, ascarel e óleo vegetal. A utilização do ascarel é proibida por lei no Brasil.

Por ser tóxico e nocivo à saúde humana, a Portaria Interministerial nº 19/81 proibiu em todo o território brasileiro a utilização de ascarel, que nada mais é que a mistura resultante de bifenila policlorada (PCB) com hidrocarbonetos derivados do petróleo.

O contato com essa mistura pode gerar diversos danos à saúde como lesões dermatológicas acentuadas, alterações morfológicas nos dentes, efeitos teratogênicos, e até efeitos cancerígenos, além de poluição do lençol freático decorrente do lançamento de efluentes no solo e nas águas, contaminando alimentos e animais.

3.9.1.1 Óleo mineral isolante

O fluido mais utilizado nos transformadores é um derivado do petróleo. Apresenta um ponto baixo ponto de combustão.

No Brasil existem dois tipos de óleo mineral isolante comercializados:

- Óleo tipo A ou Naftênico;
- Óleo tipo B ou parafínico.

Para Arantes (2005) A principal diferença entre os dois tipos de OMI é o ponto de fluidez, que é mais alto no óleo parafínico. Outra diferença é que uma maior quantidade de dióxido de carbono é produzida no envelhecimento dos óleos parafínicos, quando comparado aos naftênicos, e isso pode acelerar a deterioração do papel isolante.

3.9.1.2 Óleo de silicone isolante

São constituídos de polímero sintético, e seu principal elemento é o silício. É um líquido incolor, não é tóxico e é quimicamente inerte. Apresenta excelente estabilidade térmica e uma viscosidade um pouco superior à dos óleos minerais, citados no item anterior.

3.9.1.3 Óleo vegetal isolante

A produção do óleo vegetal é feita a partir de grãos (principalmente de soja, no caso do Brasil). Para Stocco (2009), em comparação com o óleo mineral isolador, o papel isolante tem sua vida estendida quando utilizado com óleo vegetal isolador.

De acordo com WILHELM (2009), o óleo vegetal isolante apresenta um desempenho dielétrico semelhante ao óleo mineral isolante. O óleo vegetal isolante possui um alto ponto de combustão, superior a 300 °C, valor consideravelmente maior que o do óleo mineral isolante, que é em torno de 150 °C. Tais fatores minimizam o risco de incêndio e de explosão.

É importante ressaltar que a troca de calor do óleo pode se tornar mais eficiente com o auxílio de exaustores ou ventiladores, posicionados junto ao radiador. O óleo isolante também pode contar com o uso de motobombas, que fazem bombeamento forçado para o interior dos radiadores. A temperatura é um fator importante, uma vez que é diretamente ligado a variação de potência elétrica que o transformador pode converter.

Segundo BECHARA (2010), a classificação do tipo de resfriamento utilizada no transformador pode ser:

- a) ONAN: óleo natural, ar natural;
- b) ONAF: óleo natural, ar forçado;
- c) OFAF: óleo forçado, ar forçado;
- d) ODAF: óleo dirigido, ar forçado;
- e) OFWF: óleo forçado, água forçada.

3.9.2 Transformadores a seco

De acordo com Mamede (2015), estes equipamentos apresentam um alto custo e têm aplicação bastante específica, sendo geralmente utilizados em locais que demandam de um nível de segurança elevada contra explosões de inflamáveis, como por exemplo em refinarias de petróleo.

A constituição destes transformadores é semelhante aos transformadores que utilizam líquidos isolantes, porém, os enrolamentos constituídos de fita de alumínio, formando as bobinas, colocados no interior de uma bobina de molde de ferro, encapsulados em epóxi em ambiente de vácuo e sob temperatura elevada, posteriormente resfriada.

Quando são destinados à instalação interna, são fabricados com invólucro metálico, ao passo que, quando usados em instalações abrigadas, são fornecidos sem o respectivo invólucro.



Figura 14 Transformador a seco
Fonte: Itaipu Transformadores, 2022

4 APLICAÇÕES

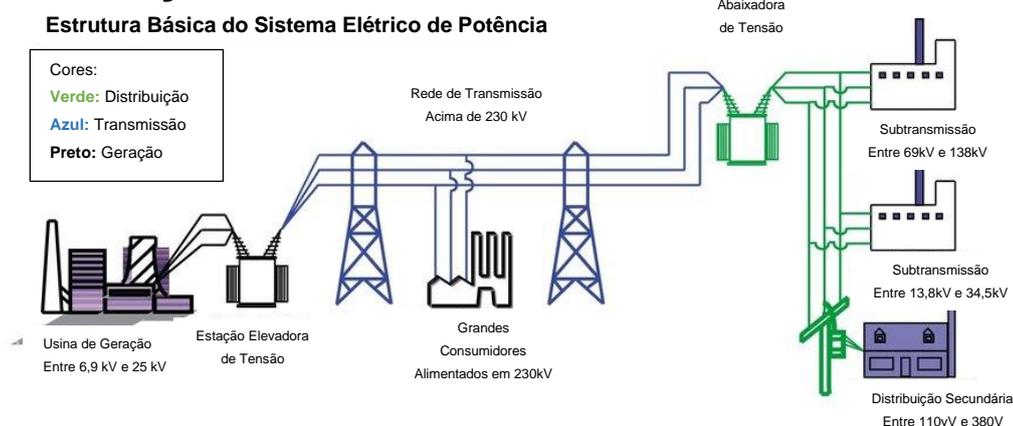


Figura 15 - Estrutura básica do sistema elétrico de potência
Fonte: Researchgate, 2022

4.1 TRANSFORMADORES ELEVADORES DE TENSÃO

Estes equipamentos podem ser monofásicos, bifásicos e trifásicos. Trata-se de um transformador com elevada capacidade de transformação de tensão. Isso se dá pelo fato de que o Transformador elevador possui mais espiras, ou seja, mais voltas de fio no seu enrolamento secundário, sendo esta particularidade responsável pelo aumento de tensão. Por conseguinte, a tensão de saída será maior do que a de entrada, o que já é esperado. Já a corrente de saída será menor do que a de entrada, uma vez que a potência precisa apresentar valores iguais na entrada e na saída.

A operação de um Transformador elevador está totalmente embasada nas leis de indução eletromagnética estudadas e difundidas por Faraday e Lenz. A transformação da energia elétrica, ou seja, o aumento da tensão elétrica acontece quando esta tensão alternada gerada por esse transformador, após ser inserida no enrolamento primário do Transformador elevador, fornece um fluxo magnético variável que induzirá no enrolamento secundário uma tensão elétrica.

O Transformador elevador e até mesmo outros aparelhos eletrônicos consomem parte da própria potência gerada, uma vez que sempre ocorrem perdas. Uma das perdas mais conhecidas é a perda por Histerese. Após se estudar e compreender as propriedades da potência elétrica quando atuando em corrente alternada, chega-se à conclusão que a potência elétrica total fornecida pelo transformador é a potência aparente. A potência perdida pelo Transformador elevador é a reativa e ativa.

4.2 TRANSFORMADORES ABAIXADORES DE TENSÃO

Estes equipamentos podem ser trifásicos, bifásicos ou monofásico. Quando se leva uma corrente elétrica a grandes distâncias, é importante elevar sua tensão, que reduz, por consequência, a corrente elétrica, diminuindo assim suas perdas. Quando as correntes elétricas chegam às cidades, o ideal é elevá-la. É nesse instante que o transformador abaixador ganha importância. Ou seja, o transformador abaixador tem uma função bem específica: abaixar a tensão, possibilitando elevar a corrente elétrica do secundário, fornecendo energia adequada às empresas e casas.

No caso do Transformador abaixador, a tensão do secundário tem que ser menor do que a do primário, ou seja, o transformador abaixador vai diminuir a tensão aplicada no enrolamento primário de modo a transferi-la para o secundário. Em outras palavras, o número de espiras do secundário deve ser menor que o número de espiras do primário.

4.3 TRANSFORMADORES DE ISOLAÇÃO

Estes equipamentos podem ser trifásicos ou monofásico. Um transformador de isolamento é um transformador usado para transferir energia elétrica de uma fonte de energia de corrente alternada (CA) para algum equipamento ou dispositivo, enquanto isola o dispositivo alimentado da fonte de energia, geralmente por razões de segurança ou para reduzir transientes e harmônicos.

Os transformadores de isolação fornecem isolação galvânica, nenhum caminho condutivo está presente entre a fonte e a carga. Este isolamento é usado para proteger contra choque elétrico, para suprimir o ruído elétrico em dispositivos sensíveis ou para transferir energia entre dois circuitos que não devem ser conectados. Um transformador vendido para isolamento geralmente é construído com isolamento especial entre o primário e o secundário e é especificado para suportar uma alta tensão entre os enrolamentos.

Os transformadores de isolamento bloqueiam a transmissão do componente CC em sinais de um circuito para o outro, mas permitem a passagem dos componentes CA em sinais. Os transformadores que têm uma relação de 1 para 1 entre os enrolamentos primário e secundário são frequentemente usados para proteger circuitos secundários e indivíduos contra choques elétricos entre condutores energizados e o aterramento. Os transformadores de isolação projetados adequadamente bloqueiam a interferência causada por *loops* de aterramento. Os

transformadores de isolamento com blindagens eletrostáticas são usados para fontes de alimentação de equipamentos sensíveis, como computadores, dispositivos médicos ou instrumentos de laboratório.

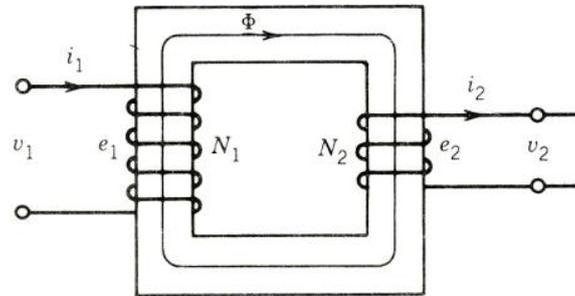


Figura 15 - Esquema de espiras de um
Fonte: Autoria própria

Considerando a imagem acima e as diversas aplicações apresentadas, temos que:

Se $N_2 > N_1$, $V_2 > V_1$ → Transformador elevador de tensão

Se $N_2 < N_1$, $V_2 < V_1$ → Transformador abaixador de tensão

Se $N_2 = N_1$, $V_2 = V_1$ → Transformador isolador

4.4 REATOR

Reatores, como os capacitores, são básicos nos sistemas de transmissão e distribuição. Dependendo de sua função, os reatores são conectados em série ou em derivação com o sistema, singularmente (reatores limitadores de corrente, reatores “shunt”) ou em conjunto com outro componente básico tal como capacitores (reatores para chaveamentos de capacitores “shunt”, reatores para descarga de capacitores e reatores para filtros).

Reatores são utilizados para prover reatância indutiva ao sistema de potência para uma vasta variedade de aplicações. Isto inclui: limitadores de corrente de falta, limitadores de irrupção para capacitores e motores, filtros de harmônicos, compensadores de VAR, redução de reatores de alisamento, bloqueadores de sinal no sistema de potência (bobinas de bloqueio), aterramento de neutro, amortecimento

de transientes chaveados, redução de " flicker" para aplicações de fornos a arco, dissintonia, balanço de carga e condicionamento de potência.

Reatores podem ser instalados nos mais variados níveis de tensão tipo industrial, de distribuição ou transmissão podendo ser de poucos Amperes até centenas de Amperes com níveis de corrente de falta até dezenas de milhares.

4.5 TRANSFORMADOR PARA TRANSMISSÃO EM CORRENTE CONTÍNUA (HVDC)

Os transformadores HVDC, também têm como principal função adequar o nível de tensão CA para o nível solicitado na entrada do conversor, assim como regular a potência através de ajustes de TAP, contribuir para a reatância de comutação e isolar a rede e o terminal conversor. Segundo Kalitjuka (2011), geralmente, são do tipo monofásico de três enrolamentos, mas podem apresentar outras configurações dependendo dos requisitos do sistema. Além disso, um transformador do tipo Y- Δ é utilizado para evitar a circulação das componentes de sequência zero através do conversor.

Porém, a revisão feita por Suzuki (2018) evidencia que alguns autores sugerem a implementação dos sistemas MMC-HVDC sem o uso de transformadores, utilizando estratégias de controle para evitar a propagação da componente de sequência zero.



Figura 16 - Transformador HVDC

Fonte: Energia Hoje, 2022

Em comparação ao sistema de transmissão de energia tradicional em CA, os sistemas HVDC apresentam um excelente desempenho quando o assunto é

transmissão de muita energia e também muita distância, com baixas perdas. Para Rudervall, Charpentier e Sharma (2000) apresenta um estudo em linhas de transmissão aéreas de 2000 MW, comparando as duas tecnologias, onde os sistemas HVDC mostram-se viáveis a partir de distâncias de 600 km.

Vale ressaltar outras vantagens da transmissão por corrente contínua:

- Interconexão de sistemas operando em diferentes frequências e modos de operação, aumentando a estabilidade para o sistema elétrico;
- Devido à menor faixa de servidão necessária, os impactos ambientais são minimizados;
- Utiliza menos condutores, torres mais simples, reduz o custo com isoladores;

Porém, as subestações são mais complexas, conforme indicado na figura abaixo:

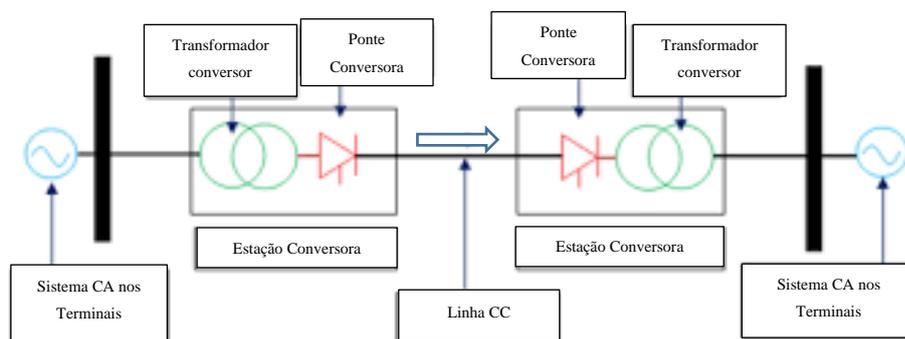


Figura 17 - Esquema de ligações em subestações
Fonte: Brasil Escola,

5 ENSAIOS PROPOSTOS PELA NORMA

O objetivo dos ensaios realizados nos transformadores é verificar a capacidade do equipamento, suas características de funcionamento e comprovar que suas propriedades estão em conformidade com as normas aplicáveis à transformadores de potência. Seguem abaixo, a definição dos tipos de ensaio e suas denominações.

5.1 NORMAS TÉCNICAS APLICÁVEIS

As normas asseguram a padronização das características desejáveis de produtos e serviços, referente a qualidade, segurança, confiabilidade e eficiência. Outro benefício da normalização para produtos e serviços no campo da engenharia, é a definição de requisitos técnicos mínimos que permitem a assertividade na aplicação dos mais diversos serviços e produtos. As principais normas aplicáveis aos transformadores de potência são apresentadas pela Tabela 1 e são pertinentes à ABNT e ao IEC. As normas citadas oferecerem informações gerais acerca dos transformadores, características construtivas e classificações. Também fornecem considerações importantes sobre a instalação, manutenção, transporte e ensaios de comissionamento de transformadores de potência.

A norma efetiva no Brasil é de autoria da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), que se baseia conceitualmente nas normas da IEC.

Tabela 1 - Tabela de normas utilizadas

Norma / ano	Descrição
NBR 5356-1/2007	Transformadores de Potência - Parte 1: Generalidades
NBR 5440 / 2014	Transformadores para Redes Aéreas de Distribuição
IEC 60076/2008	<i>Power transformers</i>

Fonte: Autoria Própria

5.2 ENSAIOS DE ROTINA

Ensaio realizado em todas as unidades de produção, ou seja, para cada transformador fabricado.

Os ensaios de rotina são os seguintes:

- a) medição da resistência dos enrolamentos;
- b) medição da relação de transformação e polaridade e verificação do deslocamento angular e 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 (ver ABNT NBR 5356-3);
- f) ensaios de comutador de derivações em carga, quando aplicável;
- g) medição da resistência de isolamento;
- h) estanqueidade e resistência à pressão, a quente em transformadores subterrâneos de qualquer potência nominal e à temperatura ambiente nos demais transformadores de potência nominal igual ou superior a 750 kVA;
- i) ensaios de óleo isolante para transformadores de tensão nominal 72,5 kV, ou potência 5 MVA;
 - Rigidez dielétrica;
 - Teor da água;
 - Fator de perdas dielétricas ou fator de dissipação;
 - Tensão interfacial;
- j) verificação da espessura e aderência da pintura da parte externa de transformadores com tensão medida de 242 kV.

5.3 ENSAIOS DE TIPO

Ensaio realizado em um transformador que representa os outros transformadores, teste por lote, com o objetivo de demonstrar que estes transformadores atendem às condições especificadas não cobertas pelos ensaios de rotina.

Os ensaios de tipo são os seguintes:

- a) ensaio de elevação de temperatura (ver ABNT NBR 5356-2);
- b) ensaios dielétricos de tipo (ver ABNT NBR 5356-3);
- c) ensaios de óleo isolante para transformadores de tensão nominal < 72,5 kV:

- Rigidez dielétrica;
- Teor da água;
- Fator de perdas dielétricas ou fator de dissipação;
- Tensão interfacial.

5.4 ENSAIOS ESPECIAIS

Ensaio específico, realizado mediante a acordo entre fabricante e comprador.

Os ensaios especiais são os seguintes:

- ensaios dielétricos especiais (ver ABNT NBR 5356-3);
- medição das capacitâncias entre o enrolamento e a terra, e entre os enrolamentos;
- medição das características da tensão transitória transferida;
- medição da (s) impedância (s) de sequência zero em transformadores trifásicos;
- ensaio de suportabilidade a curto-circuito (ver ABNT NBR 5356-5);
- determinação do nível de ruído audível (ver ABNT NBR 7277);
- medição de harmônicas da corrente de excitação;
- medição da potência absorvida pelos motores das bombas de óleo e dos ventiladores;
- medição do fator de dissipação tg (tangente) da isolação (medição do fator de potência do isolamento). Estes são valores de referência para comparação com medições no campo. Não são especificados limites para estes valores;
- análise cromatográfica dos gases dissolvidos no óleo isolante;
- vácuo interno;
- ensaio para verificação do esquema de pintura das partes interna e externa do transformador, conforme ABNT NBR 11388;
- nível de tensão de rádio interferência;
- medição da resposta em frequência e impedância terminal;
- ensaio do grau de polimerização do papel;
- medição do ponto de orvalho;
- levantamento da curva de saturação e medição da reatância em núcleo em ar do enrolamento.

Tabela 2 - Relação de ensaios realizados

Ensaio realizado no transformador da UNIFAAT	
Item	Ensaio de Rotina
A.	Medição da resistência dos enrolamentos
B.	Relação de transformação
b.1	TTR
b.2	Métodos dos 2 voltímetros
C.	Medição da resistência de isolamento

Fonte: Autoria Própria

Os ensaios realizados neste trabalho foram determinados de acordo com a disponibilidade dos equipamentos, cedidos por uma concessionária local, visto que são equipamentos muito específicos e de alto valor aquisitivo.

6 ESTUDO DE CASO

6.1 O TRANSFORMADOR DA UNIFAAT

Este transformador é construído com núcleos de aço silício Grão Orientado (GO) de alta permeabilidade magnética, o que confere baixas perdas de energia para ativação do transformador. Neste núcleo, é montado o enrolamento de cobre eletrolítico por onde circulam as correntes de carga do transformador.



Figura 18 - Transformador 15 kVA da UNIFAAT vista frontal

Fonte: Autoria própria

6.1.1 Ligações do Transformador UNIFAAT:

Os transformadores trifásicos de distribuição são compostos por três buchas de Alta Tensão (AT) e quatro buchas de Baixa Tensão (BT). Essas buchas são dotadas de terminais para a ligação do equipamento com a rede de distribuição. Os terminais AT são identificados como H1, H2 e H3, e os terminais de BT são identificados como X0, X1, X2 e X3.

A ligação utilizada no transformador é a ligação estrela. Para John J. Grainger e William D. Stevenson explicaram em seu livro (Power System analysis, 1994), "Uma conexão comum para enrolamentos trifásicos é a conexão estrela. Nessa conexão, uma extremidade de cada um dos três enrolamentos é trazida e conectada a um ponto comum, chamado de ponto neutro. As outras três extremidades são então conectadas aos condutores trifásicos."

Algumas vantagens da ligação estrela são:

- Estresse de tensão reduzido: De acordo com o “Electric Power Research Institute” (EPRI), "Em um transformador conectado em estrela, o estresse de tensão em cada enrolamento é reduzido por um fator de $\sqrt{3}$ em comparação com um transformador conectado em delta. Esse estresse de tensão reduzido permite o uso de materiais de isolamento menores e mais baratos, resultando em um transformador de menor custo."
- Capacidade aumentada: Como a corrente de linha em um transformador conectado em estrela é reduzida por um fator de $\sqrt{3}$ em comparação com um transformador conectado em delta para uma determinada classificação kVA, um transformador conectado em estrela pode ser classificado para uma capacidade kVA maior no mesmo tamanho físico de um transformador conectado em delta.
- Fator de potência aprimorado: O fator de potência de uma carga conectada a um transformador conectado em estrela é geralmente melhor do que o de uma carga conectada a um transformador conectado em delta por causa da mudança de fase introduzida pelo transformador.
- Mais fácil de conectar a carga: Geralmente é mais fácil conectar uma carga a um transformador conectado em estrela do que a um transformador conectado em delta porque a tensão fase-neutro de um transformador conectado em estrela é geralmente mais estável e previsível do que a tensão linha-a-linha de um transformador conectado em delta.

6.1.2 Terminais de Conexão do Transformador UNIFAAT:

Os terminais de conexão são colocados junto as buchas de isolamento, nos transformadores até 300 kVA os terminais do secundário (BT) podem ter capacidades de corrente em três níveis diferentes, podem ser de 160 A, 400 A ou 800 A. A capacidade de corrente irá variar conforme a tensão aplicada aos terminais do secundário.

6.1.3 Comutador do Transformador UNIFAAT:

É um dispositivo mecânico que permite variar o número de espiras dos enrolamentos de alta tensão. O comutador de derivações tem por finalidade corrigir o desnível de tensão existente nas redes de distribuição, devido à queda de tensão

ocorrida ao longo das mesmas. Estes transformadores, por padrão são despachados de fábrica com o comutador na posição de TAP 0-1. Os comutadores só podem ser operados com o equipamento desenergizado.

Para ser possível a realização das mudanças de posição, é necessário retirar a tampa do transformador, e utilizando uma luva de proteção, soltar as porcas e alterar a posição.



Figura 20 - Tampa de compartimento do transformador
Fonte: Autoria própria

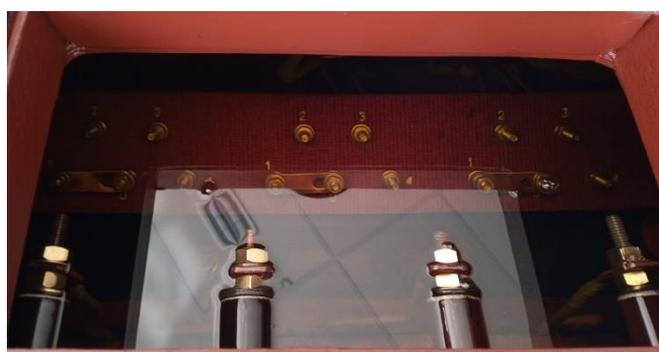


Figura 19 - Vista da parte interna do comutador
Fonte: Autoria própria

6.1.4 Buchas do Transformador UNIFAAT:

São utilizadas buchas do tipo não-capacitivo e sua isolação é constituída de porcelana. As buchas utilizadas são fabricadas para trabalhar nas classes de tensões de 1.3 kV, 5 kV e 24,2 kV.

6.1.5 Placa de Identificação do Transformador UNIFAAT

A placa de identificação informa as principais características de construção e operação do equipamento, onde é possível verificar os esquemas de ligações e as tensões de operações. É de extrema importância a verificação dos dados de placa do equipamento anteriormente a qualquer operação do equipamento.

TRANSFORMADOR TRIFÁSICO			
Nº	02250	Data Fabricação	
kVA	15	Norma	ABNT
Impedância	3,45 %	Tipo óleo isolante	B
ALTA TENSÃO			TERMINAIS
			H1 H2 H3
V	POS.	PAINEL LIGAR	LIG.
13800	0-1	0-1	0-1
13200	0-2	0-2	0-2
12600	0-3	0-3	0-3
12000	0-4	0-4	0-4
11400	0-5	0-5	0-5
BAIXA TENSÃO			TERMINAIS
			X0 X1 X2 X3
220 / 127 V			LIGAÇÃO
			Y
Volume	85	I.Massa total	258 kg PI Nº

Figura 21 - Placa do transformador
Fonte: Autoria própria

6.1.6 Características nominais do Transformador UNIFAAT

- Faixa de potências: 5 a 300 kVA
- Tensão primária: Classe 15 kV: NBI 95 kV
- Tensões secundárias trifásicas: 220/127V.
- Frequência: 60 Hz
- Elevação de temperatura: 55°C
- Classe térmica: 105°

De acordo com a NORMA ABNT NBR 5356-1:2007, as placas de identificação devem ser resistentes às intempéries, fixada em posição de fácil visualização e devem conter as seguintes informações do equipamento, são elas¹:

- a) tipo de transformador (por exemplo, transformador, autotransformador, transformador de reforço etc.);
- b) número desta Norma; *
- c) nome do fabricante;
- d) número de série do fabricante;
- e) ano de fabricação; *
- f) número de fases;
- g) potência nominal (em kVA ou em MVA) (para os transformadores com mais de dois enrolamentos, é conveniente fornecer a potência nominal de cada um deles. Deve-se indicar igualmente as combinações de cargas, salvo se a potência nominal de um dos enrolamentos for igual à soma das potências nominais dos outros enrolamentos);
- h) frequência nominal; *
- i) tensões nominais (em V ou kV) e faixa de derivações;
- j) correntes nominais (em A ou kA); *
- k) diagrama e símbolo de ligação;
- l) impedância de curto-circuito, valor medido em percentagem. Para os transformadores de mais de dois enrolamentos, fornecer as impedâncias correspondentes às diferentes combinações de dois enrolamentos, com os valores de potência de referência respectivos.
- m) sistema de resfriamento (se o transformador tiver vários estágios de resfriamentos, as potências correspondentes podem ser expressas em percentagem da potência nominal, por exemplo ONAN/ONAF 70/100 %); *
- n) massa total;
- o) massa de óleo isolante;
- p) limite de elevação de temperatura; *

¹ Os itens indicados em com indicações “*” não foram encontrados na placa de identificação do transformador da UNIFAAT.

- q) tipo de óleo isolante;
- r) massa da parte ativa²; *
- s) número do manual de instruções;
- t) vazão, para transformadores resfriados à água; (NÃO SE APLICA)
- u) corrente de curto-circuito suportável, para transformadores de potências nominais maiores que 500 kVA; (NÃO SE APLICA)
- v) polaridade, no caso de transformadores monofásicos. (NÃO SE APLICA)

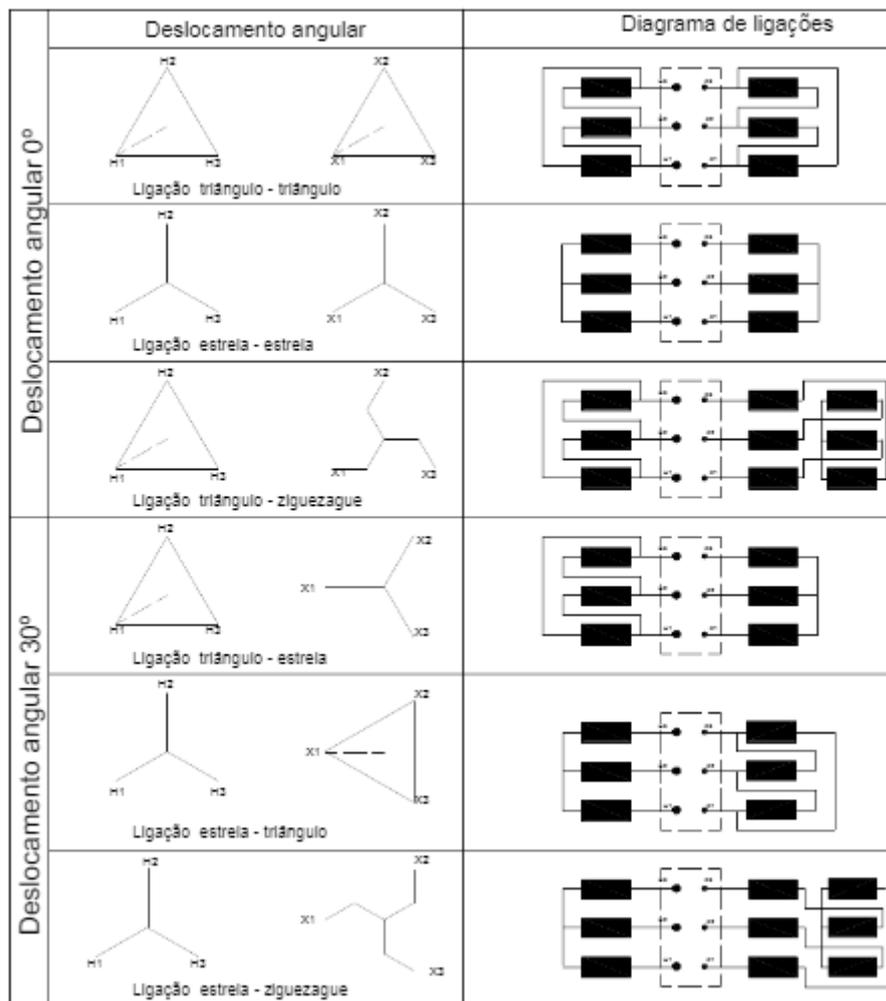


Figura 22 - Marcação dos terminais de transformadores e diagramas fasoriais da tenção para ligações trifásicas

Fonte: ABNT NBR 5356-1:2007

² Os itens indicados em com indicações “*” não foram encontrados na placa de identificação do transformador da UNIFAAT.

6.1.7 Tipo de óleo isolante do Transformador UNIFAAT

O Óleo Isolante Transformador Tipo B é um Óleo Isolante para Transformador de base parafínica, que é utilizado em interruptores, sistemas elétricos, disjuntores e equipamentos isolados com banho de óleo. O Óleo Isolante Transformador Tipo B é recomendado para isolar equipamentos de classe de tensão de até 145 kV por possuir elevada resistência à oxidação e as características ideais para a isolação de sistemas eletrificados, garantindo assim uma maior vida útil ao Óleo Isolante Elétrico.

6.1.8 Aplicações para este tipo de transformador

Usualmente destinados às seguintes aplicações:

- Redes de distribuição de energia (concessionárias de energia);
- Edifícios residenciais e comerciais;
- Indústrias e empreendimentos em geral, independentemente do porte do negócio.

6.2 INSPEÇÃO VISUAL DO TRANSFORMADOR

A inspeção visual deve ser realizada antes de iniciar os procedimentos e ensaios. Ela tem o intuito de visualmente identificar qualquer alteração no corpo do ativo que possa estar relacionada com uma avaria. (ABNT NBR5440:2014) Esta Norma estabelece os requisitos das características elétricas e mecânicas dos transformadores aplicáveis a redes aéreas de distribuição, nas tensões primárias até 36,2 kV e nas tensões secundárias usuais dos transformadores monofásicos e trifásicos, com enrolamento de cobre ou alumínio, imersos em óleos isolantes com resfriamento natural.

6.3 PROCEDIMENTO DE ENSAIO:

- a) Verificar estado geral quanto a limpeza;
- b) Verificar estado geral da pintura e sinais de corrosão;
- c) Verificar estado geral das buchas quanto a trincas e pontos lascados;
- d) Verificar conexões AT (buchas de Alta) e BT (Buchas de baixa);
- e) Verificar conexões de aterramento (Carcaça e neutro);
- f) Verificar nível de óleo;
- g) Verificar existência de óleo isolante;

- h) Verificar condições da tampa de visita;
- i) Verificar condições dos radiadores;
- j) Verificar correspondência entre o indicador de posição e comutador;
- k) Verificar identificação das buchas no transformador.



UNIFAAT - CENTRO UNIVERSITÁRIO

Inspeção Visual

CLIENTE: UNIFAAT

Página 2

CURSO : ENGENHARIA ELÉTRICA

APLICAÇÃO: LABORATÓRIO DE ENSAIOS

3 - PLACA DE IDENTIFICAÇÃO DO TRANSFORMADOR

TRANSFORMADOR TRIFÁSICO

Nº Data Fabricação

kVA Norma

Impedância % Tipo óleo isolante

ALTA TENSÃO			TERMINAIS		
V	POS.	PAINEL LIGAR	H1	H2	H3
13800	0-1	0-1	0-1		
13200	0-2	0-2	0-2		
12600	0-3	0-3	0-3		
12000	0-4	0-4	0-4		
11400	0-5	0-5	0-5		

BAIXA TENSÃO

220 / 127 V

TERMINAIS X0 X1 X2 X3

LIGAÇÃO Y

Volume l. Massa total kg PI Nº

4 - INSPEÇÃO FINAL

EXECUTANTES: Charles / João Pedro / Fernando

DATA: 19 / 10 / 2022

C - CONFORME / NC - NÃO CONFORME / NA - NÃO SE APLICA

DESCRIÇÃO	C	NC	NA	OBS
Verificar estado geral quanto a limpeza	x			
Verificar estado geral da pintura e sinais de corrosão		x		1
Verificar estado das buchas quanto a existencia de trincas e pontos lascados	x			
Verificar conexões A.T. e B.T.	x			
Verificar conexões de aterramento (Carcaça e Neutro)	x			
Verificar nível de óleo	x			
Verificar existência de vazamento de óleo isolante	x			
Verificar condições da tampa de visita	x			
Verificar condições dos radiadores			x	2
Verificar correspondência entre o indicador de posição e o comutador		x		
Verificar identificação das buchas no trafo	x			

Observações / Comentários / Restrições:

1 - Necessário retoques de pintura na parte traseiro do transformador

2- Placa característica do transformador especifica a tensão de 11400 equivalente ao TAP 0-5, após inspeção interna, não encontramos este tap de derivação.

Figura 23 - Planilha de inspeção visual

Fonte: Autoria própria

6.4 ENSAIOS REALIZADOS NOS ESTUDO DE CASO

6.4.1 Relação de transformação

Este ensaio visa estabelecer a relação entre a tensão aplicada no primário e a tensão induzida no secundário. Este é um dos principais ensaios de transformadores, que serve para análise das bobinas e identificação da relação entre espiras primarias e secundárias. Desta forma é possível avaliar seu funcionamento e prevenir curto-circuito entre as bobinas.

Os transformadores utilizados na distribuição, em sua maioria são dos seguintes grupos de ligação:

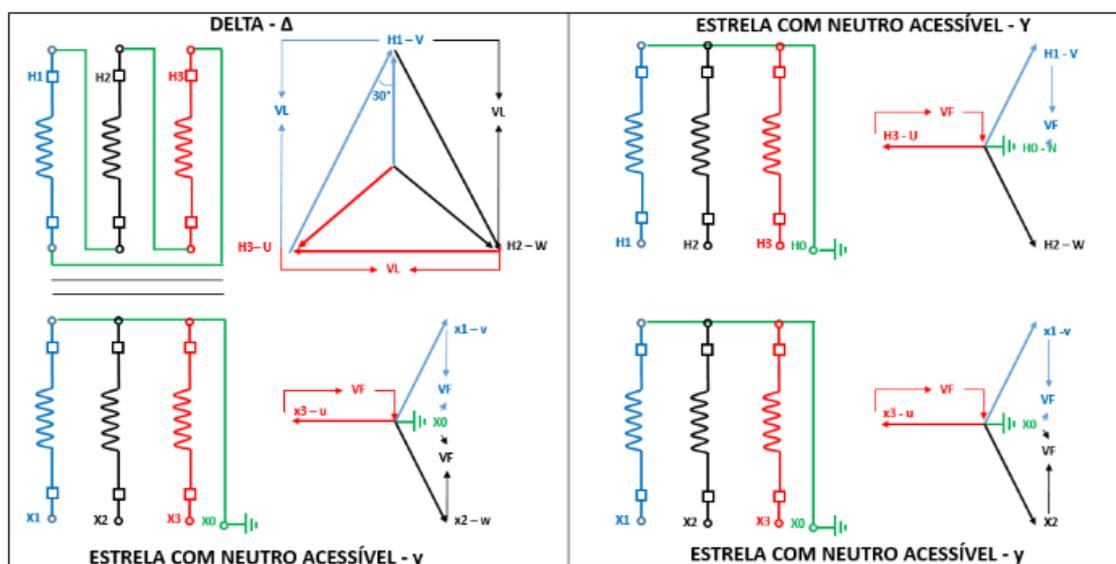


Figura 24 - Diagrama vetorial de ligação de transformadores

Fonte: Autoria própria

Para se obter a relação calculada, deve-se levar em consideração o grupo de ligação, sabendo-se que:

$$V_f = V_1 * \sqrt{3}$$

Sendo assim, o cálculo para se determinar a relação nominal de um transformador Δ/y deve-se utilizar a seguinte formula:

$$Relação\ Nominal = \frac{V_1}{V_f}$$

Para o cálculo de relação nominal em transformadores de grupo de ligação sem deslocamento angular Y/y ou Δ/Δ , o cálculo é feito dividindo-se diretamente a tensão

do enrolamento de maior “H” por tensão do enrolamento de menor tensão “X”, conforme segue:

$$\text{Relação Nominal} = V(H)/v(X)$$

6.4.1.1 Teste de Relação de Transformação Utilizando o MEGGER TTRU3.

Configuração do equipamento e instalação dos cabos de teste. De acordo com as instruções do equipamento, fizemos as seguintes conexões:

O ensaio realizado a partir de um dispositivo TTR como a medição por meio de um transformador padrão com relação de transformação variável. A IEEE denomina como um método de circuito de ponte - bridge meter ou ratio meter. Ambas as denominações se baseiam no princípio físico da medição realizada pelo TTR, que se utiliza internamente de um circuito de ponte munido de um transformador padrão com relação de transformação ajustável.

A NBR 5356-1 (2007) diz que a tolerância máxima para o desvio do valor da relação de transformação medido, em relação ao valor nominal de placa, é de 0,5%.

GARRAS – ALTA TENSÃO:

Tabela 3 - Cor da garra de teste bucha de alta

Cor da Garra/Bucha de Alta	
Vermelho	H1
Amarelo	H2
Azul	H3

Fonte: Autoria própria

GARRAS – BAIXA TENSÃO:

Tabela 4 - Cor da garra de teste bucha de baixa

Cor da Garra/Bucha de Baixa	
Branco	X0
Vermelho	X1
Amarelo	X2
Azul	X3

Fonte: Autoria própria

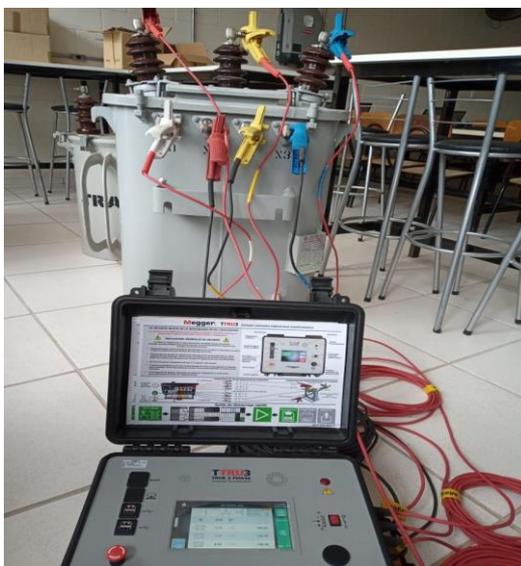


Figura 25 - Teste de Relação de Transformação Utilizando o MEGGER TTRU3

Fonte: Autoria própria



Figura 27 - Esquema de ligação no MEGGER TTRU3

Fonte: Autoria própria



Figura 26 – Parte interna MEGGER TTRU3

Fonte: Autoria própria

Configuração das ligações do primário e do secundário, de acordo com os dados de placa, fixada na carcaça do transformador. No caso do transformador da UNIFAAT, os dados de placa indicam a ligação DELTA para o enrolamento primário e ESTRELA para o enrolamento secundário.



Figura 28 - Configuração de ligação MEGGER TTRU3
Fonte: Autoria própria

6.4.1.2 Procedimento de ensaio:

- 1) Confirmar todos os conectores desconectados das buchas do transformador.
- 2) Colocar a posição do TAP de derivação na menor posição 0-1.
- 3) Calcular a relação teórica para o transformador sob teste, observando na placa o seu diagrama e o grupo de ligação.

$$e = \frac{R_e - R_c}{R_c} * 100$$

e → Erro (%)

R_e → Relação em encontrada

R_c → Relação calculada

- 4) Aterrar o instrumento de preferência no mesmo ponto de aterramento do tanque do transformador.
- 5) Conectar os cabos de teste ao instrumento.
- 6) Conectar os cabos do medidor de relação de transformação aos enrolamentos “H” e “X” do transformador.
- 7) Realizar o ensaio em todos os TAPs de ligação para a fase sob teste, registrando os valores na tabela desenvolvida.

- 8) Repetir os passos 05 a 08 para as demais fases.
- 9) Desconectar os cabos de ligação do medidor de relação ao transformador.
- 10) Limpar os terminais e condutores de interligação do transformador.



Figura 29 - Posição de TAP 0-1 (13800/220V)
Fonte: Autoria própria

Conforme podemos observar abaixo, ao realizarmos injeção de tensão 48 V, o equipamento registrou as seguintes relações de transformação:

$$\frac{H1-H3}{X1-X0} = 108,95$$

$$\frac{H2-H1}{X2-X0} = 108,40$$

$$\frac{H3-H2}{X3-X0} = 108,98$$

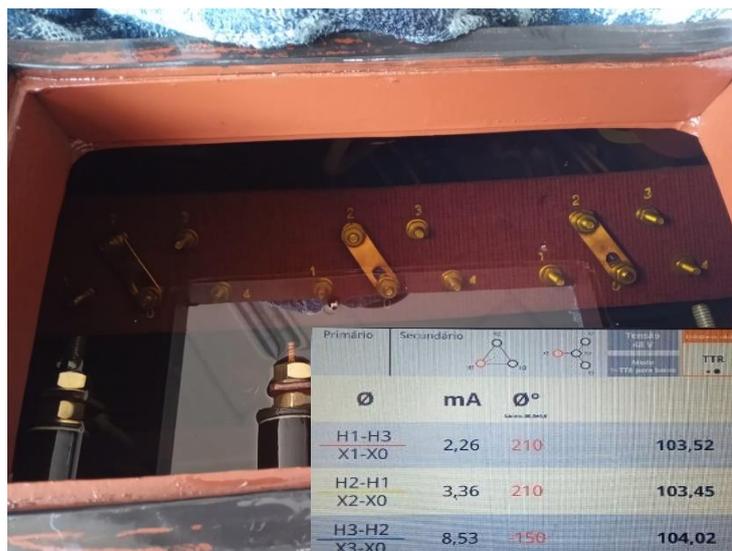


Figura 30 - Posição de TAP 0-2 (13200/220V)

Fonte: Autoria própria

Conforme podemos observar abaixo, ao realizarmos injeção de tensão 48 V, o equipamento registrou as seguintes relações de transformação:

$$\frac{H1-H3}{X1-X0} = 103,52$$

$$\frac{H2-H1}{X2-X0} = 103,45$$

$$\frac{H3-H2}{X3-X0} = 104,02$$

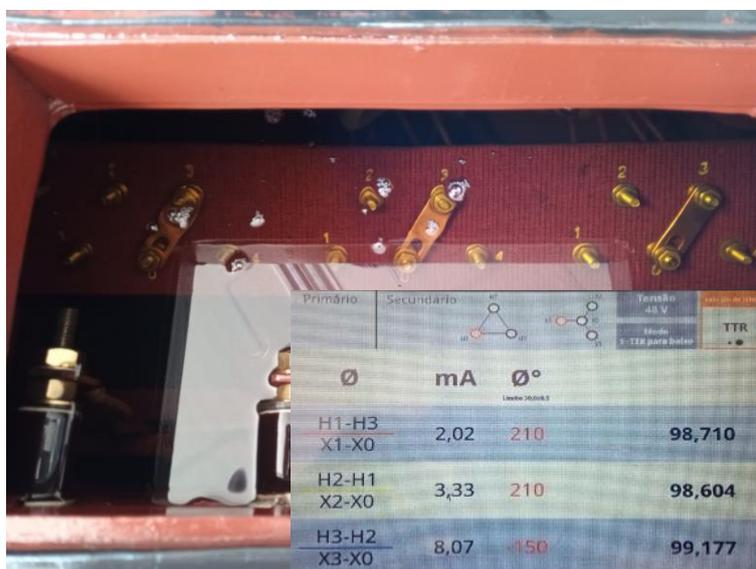


Figura 31 - Posição de TAP 0-3 (12600/220V)

Fonte: Autoria própria

Conforme podemos observar abaixo, ao realizarmos injeção de tensão 48 V, o equipamento registrou as seguintes relações de transformação:

$$\frac{H1-H3}{X1-X0} = 98,710$$

$$\frac{H2-H1}{X2-X0} = 98,604$$

$$\frac{H3-H2}{X3-X0} = 99,177$$



Figura 32 - Posição de TAP 0-4 (12000/220V)

Fonte: Autoria própria

Conforme podemos observar abaixo, ao realizarmos injeção de tensão 48 V, o equipamento registrou as seguintes relações de transformação:

$$\frac{H1-H3}{X1-X0} = 93,829$$

$$\frac{H2-H1}{X2-X0} = 93,684$$

$$\frac{H3-H2}{X3-X0} = 94,288$$

6.4.1.3 Resultado Geral – Planilha do Ensaio de Relação de Transformação

Desenvolvemos a planilha a seguir, para preenchimento durante o ensaio de relação de transformações. A planilha foi desenvolvida para que, seguindo as normas NBR 5356, da ABNT, e C57.12.00-2015, da IEEE, apresente o resultado de forma automática, a partir do preenchimento das leituras em todas as posições de TAP.

UNIFAAT										Ensaio de Relação de Transformação em Transformadores Trifásicos									
<input checked="" type="checkbox"/> 2 Enrolamentos					<input type="checkbox"/> 3 Enrolamentos														
<input type="checkbox"/> Auto-transformador					<input type="checkbox"/> Regulador														
Instituição UNIFAAT			Curso ENGENHARIA ELÉTRICA			Aplicação LABORATÓRIO			Data de Fabricação		N/D								
Modelo/Tipo TRIFÁSICO			Tensão de Saída 220			Massa total 268Kg			Diagrama Vetorial										
Potência kVA 15			Rel. Tensão 13800/220V			Tipo		Sob Carga		Delta/Estrela		x							
Nº de Série 2250			Fabricante TRANSVOLTS			Lado		Manual		Estrela/Delta									
								Alta Tensão		Y / Y ou D / D									
								Baixa Tensão											
Ligações		Primário	H3-H1	H1-H2	H2-H3	Tensões		Buchas											
Secundário		X1-X0	X2-X0	X3-X0	13.800		V. Ar	H1		H2		H3							
Fases		A	B	V	220		V. Br												
Nº Tap	Tensão no Tap	Valor Lido no Instrumento	Valor Lido no Instrumento	Valor Lido no Instrumento	Relação teórica	Erro %	Erro %	Erro %											
1	13.800	108,950	108,400	108,980	108,647	0,279	0,227	0,307											
2	13.200	103,520	103,450	104,020	103,923	0,388	0,455	0,093											
3	12.600	98,710	98,604	99,177	99,199	0,493	0,600	0,022											
4	12.000	93,829	93,684	94,288	94,475	0,684	0,838	0,198											
ENSAIO REPROVADO																			
VARIAÇÃO DE TRANSFORMAÇÃO ACIMA DE 0,5%																			
ANALISE DA ENGENHARIA																			
<input type="checkbox"/> APROVADO PARA ENERGIZAÇÃO <input checked="" type="checkbox"/> REPROVADO PAR ENERGIZAÇÃO					JUSTIFICATIVA														
Observações:																			

Figura 33 - Planilha para ensaios de relação de transformação em transformadores trifásicos

Fonte: Autoria própria

6.4.1.4 Ensaios de Relação de Transformação pelo Método do Voltímetro

Conforme descrito por Almeida, Cogo, Abreu, neste método de ensaio aplica-se uma tensão nos terminais de um dos enrolamentos do transformador, deixando o outro enrolamento aberto. O valor desta tensão deve ser igual ou inferior à tensão nominal do enrolamento.

O princípio deste método é alimentar o transformador com uma certa tensão e medi-la juntamente com a induzida no secundário. A leitura deve ser feita de forma simultânea com dois voltímetros (e TP's, se necessário). Ainda se recomenda que se faça um novo grupo de leituras permutando-se os instrumentos visando compensar seus eventuais erros. A média das relações obtidas desta forma é considerada como a do transformador.

Observe-se que em geral, por facilidade e segurança, a alimentação do transformador é feita pelo lado de TS (Tensão Superior) com níveis reduzidos de tensão em relação nominal do TAP considerado; isto acarreta dois problemas fundamentais, a saber:

- a) A fonte, na maioria dos casos, apresenta tensões desequilibradas, mascarando os resultados das medições;
- b) Se aplicados, por exemplo, três níveis distintos de tensões, mesmo balanceadas, podem resultar três valores diferentes de relação de transformação.

Em ambas as situações, os erros e incertezas descaracterizam os objetivos de se medir a relação de transformação.

Em primeiro caso é possível determinar-se uma relação de transformação média (K), a qual representa mais adequadamente a do transformador. Sugere-se que o seu cálculo seja feito da seguinte forma:

$$K = \frac{\frac{UH + UH0}{m}}{\frac{UX + UX0}{n}}$$

Onde:

$$UH = U(H1H2) + U(H1H3) + U(H2H3)$$

$$UX = U(X1X2) + U(X1X3) + U(X2X3)$$

Se a ligação do lado considerado for delta ou estrela com neutro inacessível:

$$UH0 = 0 \quad UX0 = 0 \quad m = 3 \quad n = 3$$

Se a ligação for estrela com neutro acessível, tem-se:

$$UH0 = U(H1H2) + U(H1H3) + U(H2H3) * \sqrt{3}$$

$$UX0 = U(X1X0) + U(X2X0) + U(X3X0) * \sqrt{3}$$

Tabela 5 - Resultados entre buchas

TAP /TENSÃO	H1H2	H1H3	H2H3	X1X2	X1X3	X2X3	X0X1	X0X2	X0X3	K
0-1 /13800	223,19	221,92	222,14	3,5597	3,5363	3,5555	2,0589	2,0715	2,0523	62,4758

Fonte: Autoria própria

Para a posição de TAP 0-1, temos os seguintes valores:

$$K = \frac{\frac{(U(H1H2) + U(H1H3) + U(H2H3)) + (UH0)}{m}}{(U(X1X2) + U(X1X3) + U(X2X3)) + ((U(X1X0) + U(X2X0) + U(X3X0)) * \sqrt{3})}{n}}$$

$$K = \frac{\frac{((223,19) + (221,92) + (222,14)) + (0)}{3}}{((3,5597) + (3,5363) + (3,5555)) + ((2,0589) + (2,0715) + (2,0523) * \sqrt{3})}{6}}$$

$$K = \frac{\frac{(667,25) + (0)}{3}}{(10,6515) + (10,7088)}{6}$$

$$K = \frac{222,4167}{3,56005}$$

$$K = 62,4758$$

Considerando o cálculo desenvolvido acima, a tabela completa com todas as medições e percorrendo os TAPs, fica da seguinte forma:

Tabela 6 - Relação TAP/Tensão entre as Buchas

TAP /TENSÃO	H1H2	H1H3	H2H3	X1X2	X1X3	X2X3	X0X1	X0X2	X0X3	K
0-1 /13800	223,19	221,92	222,14	3,5597	3,5363	3,5555	2,0589	2,0715	2,0523	62,4758
0-2 /13200	224,58	223,61	223,89	3,7550	3,7299	3,7501	2,1711	2,1816	2,1604	59,6979
0-3 /12600	224,58	223,27	223,82	3,9412	3,9152	3,9383	2,2723	2,2908	2,2675	56,8594
0-4 /12000	224,25	223,25	223,60	4,1466	4,1182	4,1485	2,3925	2,4108	2,3844	53,9844

Fonte: Autoria própria

Posterior ao cálculo das médias, realizadas para cada posição de TAP, é necessário calcular o erro (e):

Relembrando o cálculo da Relação Calculada, a partir dos dados de placa:

$$RC = \frac{\text{Tensão de entrada (placa)}}{\text{Tensão de saída (placa)}}$$

$$RC (\text{tap}0 - 1) = \frac{13800}{220}$$

$$RC (\text{tap}0 - 1) = 62,7272 V$$

Erro:

$$e = \frac{Re (K) - Rc}{Rc} * 100$$

$$e = \frac{62,4758 - 62,7272}{62,7272} * 100 = 0,401\%$$

Tabela 7 - Resultado dos testes de relação

Relação Calculada	Relação Encontrada (K)	Erro (e)	Resultado do Ensaio
62,7272	62,4758	0,40	Aprovado
60	59,6979	0,50	Aprovado
57,2727	56,8594	0,72	Reprovado
54,5454	53,9844	1,03	Reprovado

Fonte: Autoria própria

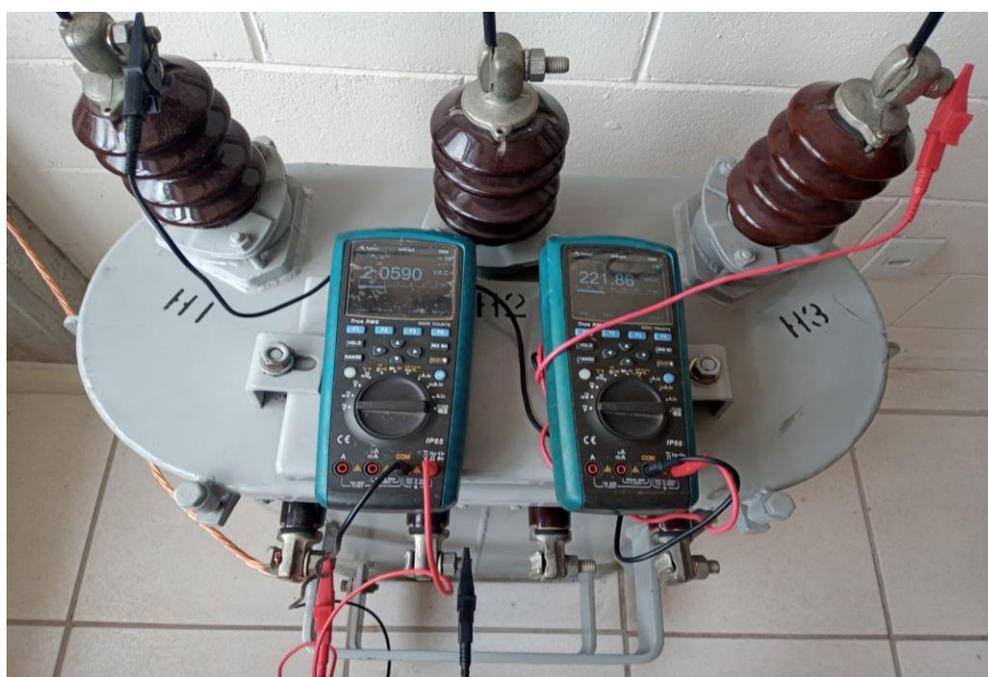


Figura 34 - Ensaio de relação de Transformação pelo Método do voltímetro

Fonte: Autoria própria

Os resultados indicam a consistência dos dados e, assim, a média (K) será considerada a relação de transformação dos TAPs. As normas NBR 5356, da ABNT, e C57.12.00-2015 [37], da IEEE, determinam que no âmbito da operação à vazio (sem carga), em que as tensões são medidas nas derivações do enrolamento com menor número de espiras, as tensões medidas devem estar dentro da faixa de 0,5% da tensão nominal prevista na placa de identificação do transformador. Desta forma, a coluna “ERRO %”, faz o cálculo considerando tal percentual e se o resultado superar 0,5%, o campo fica vermelho e o resultado do ensaio é “Reprovado”. Vale lembrar que

com apenas um dos valores fora da faixa estabelecida, é o suficiente para reprovar o transformador.

Dessa forma, considerando que não existe incerteza na tensão aplicada no enrolamento com maior número de espiras, então é possível afirmar que a tolerância também é de 0,5% na relação de transformação. Nesse caso, o equipamento de medição deve apresentar, no máximo, uma incerteza de 0,05% na medição da relação de transformação. Essa relação para a incerteza, a qual deve ter magnitude dez vezes inferior à tolerância, é tipicamente usada em ensaios de calibração e certificação. A referida norma ainda menciona que para enrolamentos conectados em estrela, essa tolerância é aplicada às tensões de fase e neutro, quando essa tensão não é explicitamente representada na placa de identificação do transformador, a tensão da fase medida deve ser calculada como a divisão da tensão entre fases por $\sqrt{3}$.

Constatamos que não há derivação de TAP 0/5, **não** existe tensão 11,4 kV. Neste caso, a informação indicada na placa de identificação do transformador está incoerente com suas especificações.

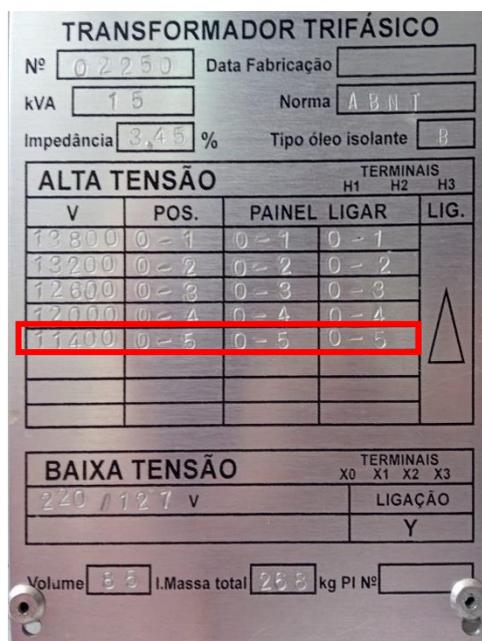


Figura 35 - Ausência do TAP 0-5

Fonte: Autoria própria

6.4.2 Ensaio de Resistência Ôhmica.

O ensaio é realizado em fábrica para garantir que o equipamento está de acordo com o projeto e para calcular perdas no condutor. No campo o ensaio é realizado para avaliar possíveis danos no enrolamento, como por exemplo, curtos-circuitos entre os enrolamentos e as espiras, circuitos abertos e problemas de contato.

O equipamento injeta a corrente no enrolamento, que ao medir a corrente e a tensão, o equipamento exibe o valor da resistência a cada segundo. Tal medição deve ser repetido para cada posição de TAP. Como o transformador utilizado não possui um comutador, foi necessário que para cada ensaio, abrir e alterar a posição de TAP. Procedimento semelhante ao realizado no ensaio anterior.

6.4.2.1 Procedimento de ensaio:

- 1) Confirmar todos os condutores desconectados das buchas do transformador.
- 2) Colocar a posição do TAP de derivação na menor posição 0-1.
- 3) Conectar os cabos do medidor de resistência ôhmica aos enrolamentos “H” e “X” do transformador.
- 4) Medir e registrar a temperatura ambiente. ³
- 5) Realizar o ensaio em todos os TAPs de ligação para cada enrolamento sob o teste, registrando os valores na planilha desenvolvida.
- 6) Repetir os passos de 03 a 05 para os demais enrolamentos.
- 7) Desconectar os cabos de ligação do medidor de resistência ôhmica ao transformador.
- 8) Limpar os terminais e condutores de interligação do transformador.

A resistência de cada enrolamento, os terminais entre os quais ela for medida e a temperatura dos enrolamentos devem ser registrados. A medição deve ser efetuada em corrente contínua. A resistência elétrica dos enrolamentos deve ser medida na derivação correspondente à tensão mais elevada. O comprador deve indicar as derivações adicionais para as quais o fabricante deve medir a resistência. Em todas as medições de resistência, cuidados devem ser tomados para se reduzirem ao mínimo os efeitos de auto-indutância. (ABNT NBR 5356-1:2007)

³ Foi considerado a temperatura do óleo igual a temperatura ambiente.

6.2.1.1 Esquemas de medição para as buchas de ALTA

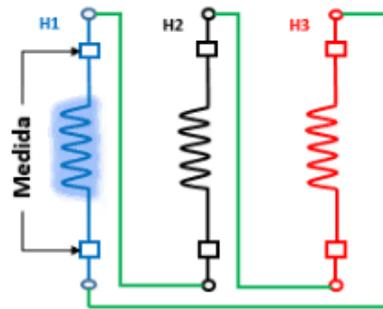


Figura 36 - Medição entre H1/H3 - Medição Bobina H1

Fonte: Autoria própria

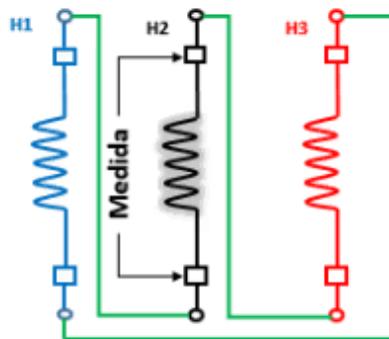


Figura 37 - Medição entre H1/H2 - Medição Bobina H2

Fonte: Autoria própria

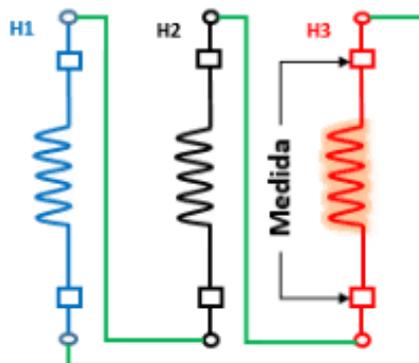


Figura 38 - Medição entre H2/H3 - Medição Bobina H3

Fonte: Autoria própria

6.2.1.2 Esquemas de medição para as buchas de Baixa

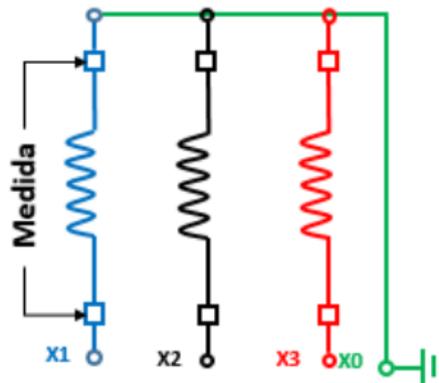


Figura 39 - Medição entre X0/X1 - Medição Bobina X1

Fonte: Autoria própria

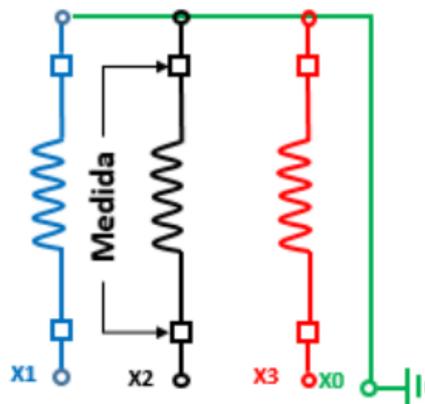


Figura 40 - Medição entre X0/X2 - Medição Bobina X2

Fonte: Autoria própria

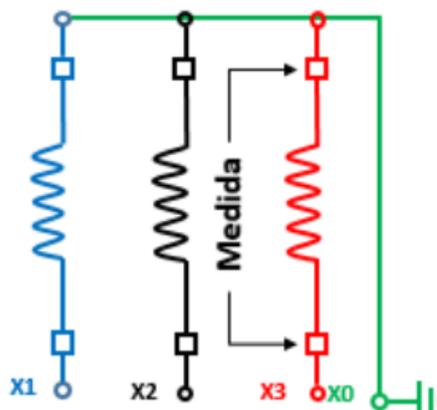


Figura 41 - Medição entre X0/X3 - Medição Bobina X3

Fonte: Autoria própria

6.4.2.2 O equipamento utilizado para Ensaio de Resistência Ôhmica Utilizando.

O modelo de equipamento RMO-TD On-Load Tap & Winding Resistance Analyzer foi concebido para a medição da resistência do enrolamento de elementos indutivos, e para a análise do comutador. A série RMO-TD é baseada na mais recente tecnologia, utilizando a tecnologia de comutação mais avançada disponível atualmente. A sua precisão é de 0,1% e potência até 60 Amperes. Gera corrente contínua verdadeira, sem ondulações, com controlo automático de contagem e um circuito de descarga.



Figura 42 - equipamento utilizado para Ensaio de Resistência Ôhmica Utilizando - RMO-TD
Fonte: Autoria própria

A RMO-TD injeta a corrente com um valor de alta voltagem de 55 V. Isto permite que o núcleo magnético seja rapidamente saturado e que a duração do teste seja a mais curta possível. Os três canais independentes permitem o teste simultâneo de 3 enrolamentos em série - primário, secundário e terciário. Há memória suficiente na RMO-TD para armazenar mil medições. Todas as medições são registadas com data e hora. O dispositivo está equipado com proteção térmica e de sobre-corrente. O RMO-TD tem a função de cancelar interferências eletrostáticas e eletromagnéticas em subestações de alta tensão. Isto é conseguido através de uma solução de filtragem patenteada aplicada na construção do hardware e na implementação do software de aplicação.

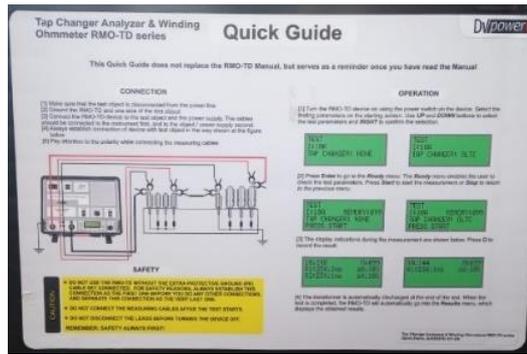


Figura 43 - Parte interna do equipamento - Quick Guide

Fonte: Autoria própria

Ensaio entre as buchas de ALTA (H1/H2) – Posição de TAP 0/1: Medição da bobina de H2.



Figura 44 - Ensaio entre as buchas de ALTA (H1/H2) – Posição de TAP 0/1

Fonte: Autoria própria

Ensaio entre as buchas de ALTA (H1/H3) – Posição de TAP 0/1: Medição da bobina de H1.



Figura 45 - Ensaio entre as buchas de ALTA (H1/H3) – Posição de TAP 0/1
Fonte: Autoria própria

Ensaio entre as buchas de ALTA (H2/H3) – Posição de TAP 0/1: Medição da bobina de H3.



Figura 46 - Ensaio entre as buchas de ALTA (H2/H3) – Posição de TAP 0/1
Fonte: Autoria própria

Ensaio entre as buchas de ALTA (H1/H2) – Posição de TAP 0/2: Medição da bobina de H2.



Figura 47 - Ensaio entre as buchas de ALTA (H1/H2) – Posição de TAP 0/2
Fonte: Autoria própria

Ensaio entre as buchas de ALTA (H1/H3) – Posição de TAP 0/2: Medição da bobina de H1.



Figura 48 - Ensaio entre as buchas de ALTA (H1/H3) – Posição de TAP 0/2
Fonte: Autoria própria

Ensaio entre as buchas de ALTA (H2/H3) – Posição de TAP 0/2: Medição da bobina de H3.



Figura 49 - Ensaio entre as buchas de ALTA (H2/H3) – Posição de TAP 0/2
Fonte: Autoria própria

Ensaio entre as buchas de ALTA (H1/H2) – Posição de TAP 0/3: Medição da bobina de H2.



Figura 50 - Ensaio entre as buchas de ALTA (H1/H2) – Posição de TAP 0/3
Fonte: Autoria própria

Ensaio entre as buchas de ALTA (H1/H3) – Posição de TAP 0/3: Medição da bobina de H3.



Figura 51 - Ensaio entre as buchas de ALTA (H1/H3) – Posição de TAP 0/3
Fonte: Autoria própria

Ensaio entre as buchas de ALTA (H2/H3) – Posição de TAP 0/3: Medição da bobina de H3.



Figura 52 - Ensaio entre as buchas de ALTA (H2/H3) – Posição de TAP 0/3
Fonte: Autoria própria

Ensaio entre as buchas de ALTA (H1/H2) – Posição de TAP 0/4: Medição da bobina de H2.



Figura 53 - Ensaio entre as buchas de ALTA (H1/H2) – Posição de TAP 0/4
Fonte: Autoria própria

Ensaio entre as buchas de ALTA (H1/H3) – Posição de TAP 0/4: Medição da bobina de H1.



Figura 54 - Ensaio entre as buchas de ALTA (H1/H3) – Posição de TAP 0/4
Fonte: Autoria própria

Ensaio entre as buchas de ALTA (H2/H3) – Posição de TAP 0/4: Medição da bobina de H3.



Figura 55 - Ensaio entre as buchas de ALTA (H2/H3) – Posição de TAP 0/4
Fonte: Autoria própria

Ensaio entre as buchas de BAIXA (X0/X1) – Posição de TAP 0/1: Medição da bobina de X1.



Figura 56 - Ensaio entre as buchas de BAIXA (X0/X1) – Posição de TAP 0/1
Fonte: Autoria própria

Ensaio entre as buchas de BAIXA (X0/X2) – Posição de TAP 0/1: Medição da bobina de X2.



Figura 57 - Ensaio entre as buchas de BAIXA (X0/X2) – Posição de TAP 0/1
Fonte: Autoria própria

Ensaio entre as buchas de BAIXA (X0/X3) – Posição de TAP 0/1: Medição da bobina de X3.



Figura 58 - Ensaio entre as buchas de BAIXA (X0/X3) – Posição de TAP 0/1
Fonte: Autoria própria

6.4.2.4 Correção da temperatura na realização do Ensaio de Resistência Ôhmica

Correção dos resultados para a temperatura de referência Segundo a NBR 5356-1 (2007), os valores das resistências ôhmicas dos enrolamentos devem ser referidos a uma temperatura de base. O valor da temperatura de referência é determinado por uma tabela existente nesta norma, apresentada aqui como Tabela 7. O valor da resistência ôhmica do enrolamento corrigido para a temperatura de referência é dado por.

Tabela 8 - Temperatura de referência

Limites de elevação de temperatura dos enrolamentos [°C]	Temperatura de referência [°C]
55	75
65	85
95	115

Fonte: NBR 5356-1,

Fórmula para correção de temperatura a 75°:

$$R_{75} = R_{med} \frac{(234,5 + 75^\circ)}{234,5 + T_{med}}$$

6.4.2.5 Análise dos resultados

Para transformadores que se tenha os dados de ensaio de fábrica (*databook*), deve-se comparar os valores de ensaio obtidos após correção, admitindo-se $\pm 5\%$ de variação. Também deve ser realizado essa avaliação para os valores entre os enrolamentos de mesmo lado (AT ou BT). Nos casos de transformadores onde não se tenha os dados de ensaio de fábrica, como no caso do transformador da UNIFAAT, deve-se comparar os valores de ensaio obtidos após correção, com os valores históricos do equipamento.

6.4.3 Ensaios de Resistência de Isolamento

É um ensaio geralmente é rápido e fácil de executar, sendo necessário somente equipamento bem comuns de se encontrar no mercado. Embora seja um ensaio simples, ele pode fornecer com antecedência deficiências no isolamento de determinado componente, que sem a devida atenção podem levar a uma falha potencial. Esses testes são úteis para verificar a qualidade do isolamento, não apenas quando um produto novo, mas também ao longo do tempo à medida que o produto é usado.

O ensaio tem por objetivo fazer a medição da resistência total entre dois pontos separados por isolamento elétrico. O teste, portanto, determina a eficácia do dielétrico (isolamento) em resistir ao fluxo de corrente elétrica.

6.4.3.1 Procedimento de ensaio⁴

- 1) Confirmar todos os condutores desconectados das buchas do transformador.
- 2) Curto circuitar todos os terminais pertencentes ao mesmo enrolamento do transformador.
- 3) Conectar os cabos do Megômetro aos enrolamentos do transformador.
- 4) Configurar o Megômetro para a tensão máxima disponível, por 10 minutos.⁵
- 5) Medir e registrar a temperatura ambiente.⁶
- 6) Iniciar o ensaio e registrar os valores obtidos após 30 segundos, 1 minuto e após estabilização ou a final dos 10 minutos.
- 7) Repetir os passos de 03 a 06 para os demais enrolamentos do transformador.
- 8) Desconectar os cabos do Megômetro dos enrolamentos do transformador.
- 9) Retirar os cabos de curto-circuito dos enrolamentos.
- 10) Limpar os terminais e condutores de interligação do transformador.

⁴ A resistência de isolamento deve ser medida antes dos ensaios dielétricos. Este ensaio não constitui critério para aprovação ou rejeição do transformador.

⁵ A tensão de ensaio não deve ser superior a tensão de isolamento do enrolamento.

⁶ Consideramos a temperatura do óleo igual a ambiente.

6.4.3.2 Ensaios de Isolamento DC utilizando o MEGGER:

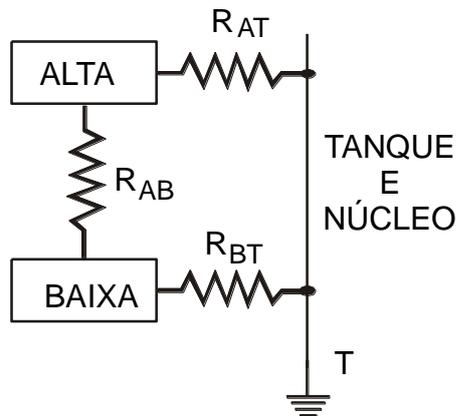


Figura 60 - Esquema resistivo de um transformador

Fonte: Autoria própria

As medições realizadas neste tipo de equipamentos são:

- Resistência de isolamento entre do enrolamento de Alta Tensão e a massa – RAT. Neste caso o terminal “*LINE*”-L do instrumento é conectado no enrolamento de alta tensão, o terminal “*EARTH*” – E na massa (terra) e o terminal “*GUARD*” – G no enrolamento de baixa tensão.
- Resistência de Isolamento entre o enrolamento de Baixa Tensão e a Massa – RBT. Seguindo o procedimento acima, ter-se-á: o terminal “L” conectado na Baixa Tensão, o terminal “E” na Massa (terra) e o terminal “G” na Alta Tensão.
- Resistência de Isolamento entre os Enrolamentos de Alta e Baixa Tensão – RAB. Do mesmo modo ter-se-á: o terminal “L” será conectado na Alta, o terminal “E” na Baixa e o terminal “G” na Massa.

Realização do curto entre as buchas de alta e baixa:



Figura 61 - Conexões de baixa curto-circuitada
Fonte: Autoria própria

O índice de polarização é utilizado para se avaliar quais níveis de umidade, poeira, e contaminações existentes no componente.

Índice de Polarização → Leitura Registrada em 10 Minutos dividida pela Leitura Registrada em 1 Minuto

Tabela 9 - Grau de polarização

Índice de Polarização			
Entre	0	1	Perigoso
Entre	1	1,5	Pobre
Entre	1,5	2	Questionável
Entre	2	3	Confiável
Entre	3	4	Bom
Maior que	4		Excelente

Fonte: Autoria própria

$$IA = \frac{(Leitura\ de\ 10\ minutos)}{(Leitura\ de\ 1\ minuto)}$$

O índice de absorção é utilizado para determinar o grau de contaminação já ocorrido no material isolante do componente.

Índice de Absorção → Leitura registrada em 1 Minuto Dividida pela Leitura Registrada em 30 Segundos

Tabela 10 - Grau de absorção

Índice de Absorção			
Entre	0	1	Perigoso
Entre	1	1,1	Pobre
Entre	1,1	1,25	Questionável
Entre	1,25	1,4	Confiável
Entre	1,4	1,6	Bom
Maior que	1,6		Excelente

Fonte: Autoria própria

$$IA = \frac{(Leitura\ de\ 1\ minuto)}{(Leitura\ de\ 30\ segundos)}$$

EXEMPLO: Imaginemos calcular os Índices de Absorção e Polarização de um motor elétrico. As leituras coletadas durante o ensaio são:

Tabela 11 - Tabela de resultados

Transformador de 2 Enrolamentos													
	Line	Earth	Guard	Isol	Tensão Aplic. (kV)	Valor Lido MΩ			Valor Corrigido a 20°			Índice de Absorção	Índice Polarizaçã
						30 seg	1 min	Estabil.	30 seg	1 min	Estabil.		
1	Alta	Carcaça	Baixa	RA	5	30300	32000	35300	37269	39360	43419	1,0561	1,1031
2	Alta	Baixa	Carcaça	RAB	5	38100	47200	54400	46863	58056	66912	1,2388	1,1525
3	Baixa	Carcaça	Alta	RB	0,5	61900	66000	73400	76137	81180	90282	1,0662	1,1121
4	Baixa	Alta	Carcaça	RBA	5	31000	38300	54200	38130	47109	66666	1,2355	1,4151

Fonte: Autoria própria

Analisando os valores lançados na tabela, podemos concluir que:

O índice de absorção calculado em está entres os índices classificados como “Pobre” e ”Questionável” (Resultados entre 1 e 1,25).

O índice de polarização calculado está no patamar classificado como “Pobre” (Resultado entre 1 e 1,5).

Execução da medição da resistência de isolamentos entre as bobinas de ALTA (Cabo *LINE* - Vermelho) e a CARCAÇA (Cabo *EARTH* – Preto), isolando as bobinas de BAIXA (cabo *GUARD* – Azul). O ensaio foi executado de acordo com o procedimento de ensaio, nos tempos respectivos 30 segundos, 60 segundos e 10 minutos, após estabilização da resistência de isolamento.

- Medição RAT (ALTA e CARCAÇA):

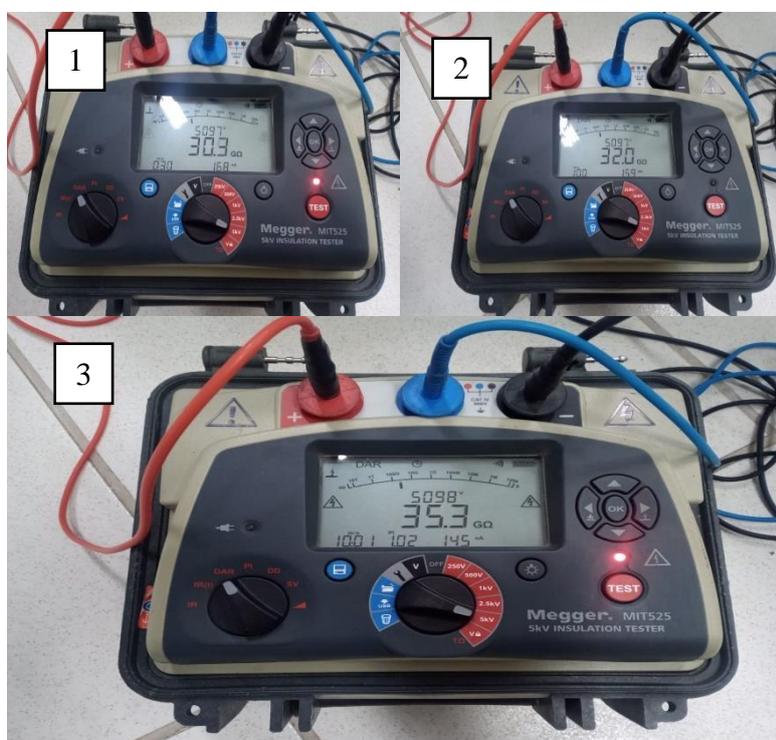


Figura 62 - Medição RAT; 1 - 30 segundos / 2 - 60 segundos / 3 - 10 minutos

Fonte: Autoria própria

A execução da medição da resistência de isolamentos entre as bobinas de ALTA (Cabo *LINE* - Vermelho) e a BAIXA (Cabo *EARTH* – Preto), isolando a CARCAÇA (cabo *GUARD* – Azul). O ensaio foi executado de acordo com o procedimento de ensaio, nos tempos respectivos 30 segundos, 60 segundos e 10 minutos, após estabilização da resistência de isolamento.

- Medição RAB (ALTA e BAIXA):

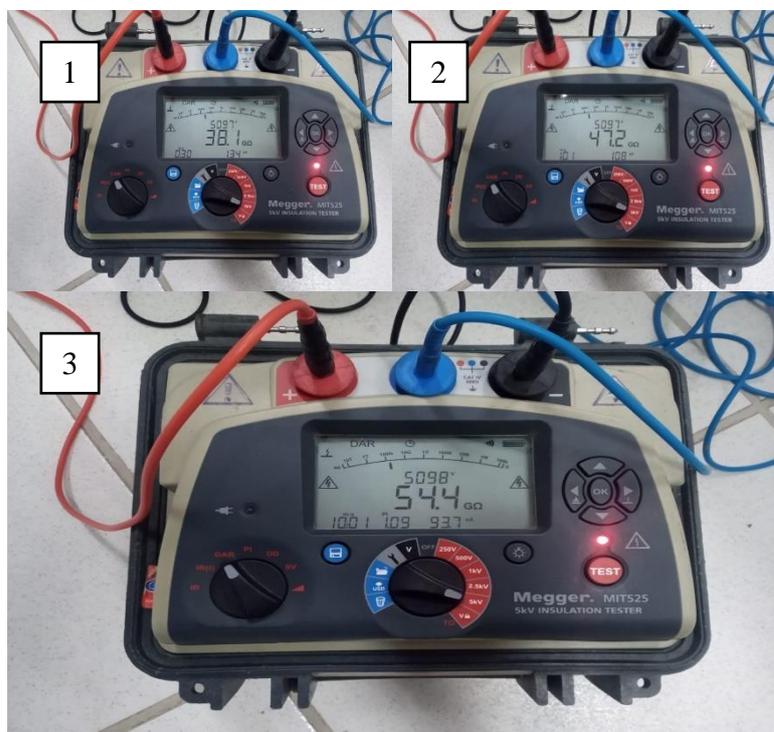


Figura 63 - Medição RAB; 1 - 30 segundos / 2 - 60 segundos / 3 - 10 minutos

Fonte: Autoria própria

Execução da medição da resistência de isolamentos entre as bobinas de BAIXA (Cabo *LINE* - Vermelho) e a CARCAÇA (Cabo *EARTH* – Preto), isolando a ALTA (cabo *GUARD* – Azul). O ensaio foi executado de acordo com o procedimento de ensaio, nos tempos respectivos 30 segundos, 60 segundos e 10 minutos, após estabilização da resistência de isolamento.

- Medição RBT (BAIXA e CARCAÇA):

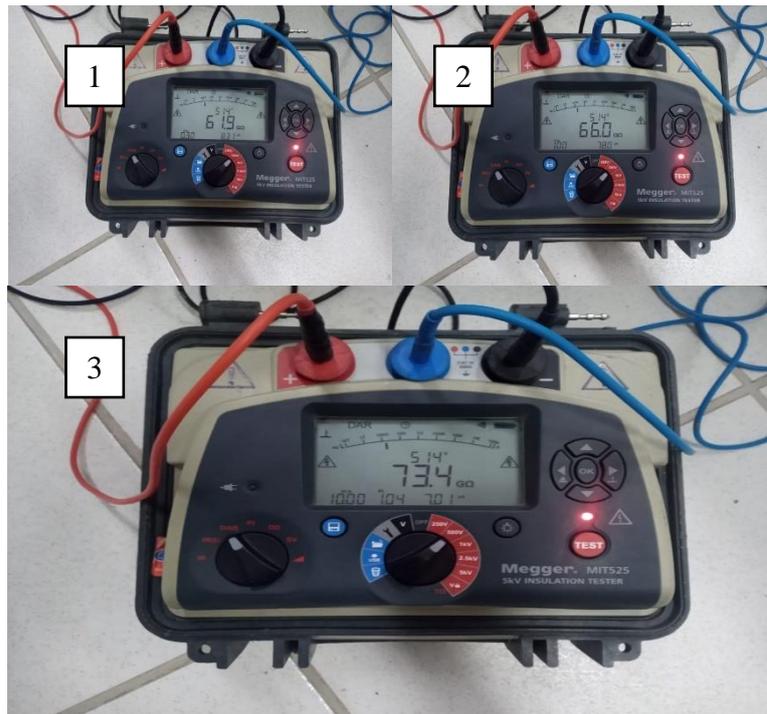


Figura 64 - Medição RBT; 1 - 30 segundos / 2 - 60 segundos / 3 - 10 minutos
Fonte: Autoria própria

Execução da medição da resistência de isolamentos entre as bobinas de BAIXA (Cabo *LINE* - Vermelho) e a ALTA (Cabo *EARTH* – Preto), isolando a CARÇAÇA (cabo *GUARD* – Azul). O ensaio foi executado de acordo com o procedimento de ensaio, nos tempos respectivos 30 segundos, 60 segundos e 10 minutos, após estabilização da resistência de isolamento.

- Medição RBA (BAIXA e ALTA):

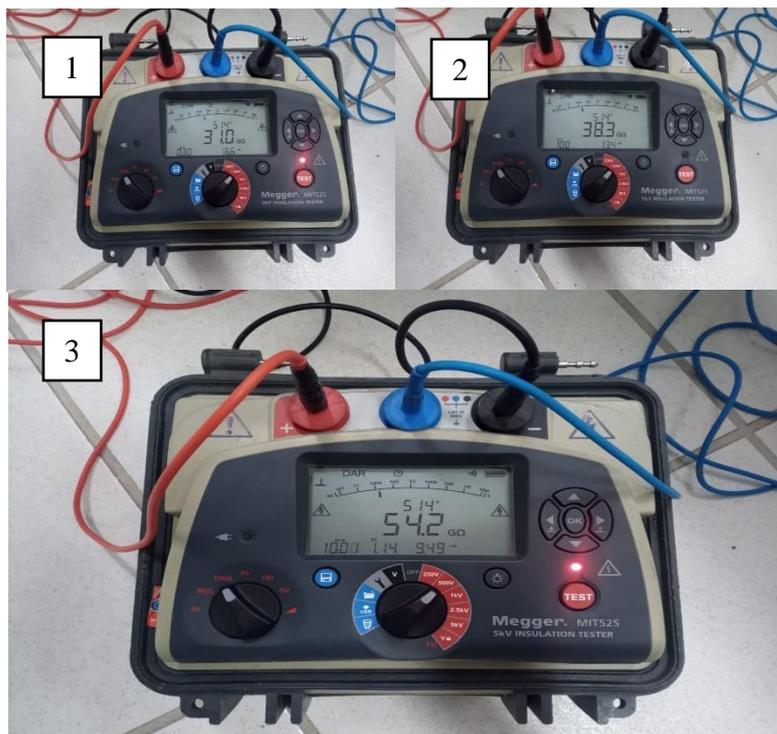


Figura 65 - Medição RBA; 1 - 30 segundos / 2 - 60 segundos / 3 - 10 minutos

Fonte: Autoria própria

Os ensaios foram realizados na temperatura informada abaixo:



Figura 66 - Temperatura e humidade no dia dos ensaios

Fonte: Autoria própria

6.5 LISTA DE EQUIPAMENTOS E FERRAMENTAS UTILIZADAS NOS ENSAIOS DO TRANSFORMADOR UNIFAAT.

Tabela 12 - Ferramentas Utilizadas

Qdt.	Ferramentas utilizadas
1	Chave combinada 19 ou Catraca com pito 19
1	Chave de fenda para borne
1	Alicate de corte
1	Mogômetro - MEGGER
1	Analisador de Enrolamento

Fonte: Autoria própria

6.6 LISTA DE EQUIPAMENTOS DE PROTEÇÃO INDIVIDUAL UTILIZADOS NOS ENSAIOS DO TRANSFORMADOR UNIFAAT.

Tabela 13 - Equipamentos de proteção individual utilizados

Qtd.	Equipamento de proteção Individual - EPI
1	Luva de latex
1	Óculos de proteção

Fonte: Autoria própria

6.7 ANÁLISE E CONCLUSÃO DO ESTUDO DE CASO

Neste trabalho foi descrito os processos envolvidos no comissionamento de um transformador de distribuição, existente no laboratório da UNIFAAT. Foi levado em consideração que ele é um dos principais equipamentos incluso dentro do sistema elétrico de potência.

A aclaração dos ensaios elétricos permitiu a compreensão dos detalhes descritos nas normas de referência e seus critérios estabelecidos, visando a efetiva aceitação dos equipamentos. Iniciamos o processo de comissionamento seguindo a norma ABNT NBR 5440:2014.

Através de uma inspeção externa realizada no transformador, constatou-se que existe uma pequena falha na pintura do tanque principal. Sendo assim, é necessário que seja feito um retoque com a mesma cor do transformador.

Durante a inspeção interna, verificou-se que o transformador não apresenta a ligação de TAP 0-5, equivalente à tensão primária 11400 V. Logo, é indicado a alteração da placa característica do transformador e retirada deste TAP de ligação, que se encontra incompatível com a realidade.

Em conformidade com a norma ABNT NBR 5356:2007, foram realizados os seguintes ensaios de rotina: resistência elétrica, de isolamento e relação de transformação do transformador trifásico da UNIFAAT.

Seguindo as recomendações da norma supracitada no início desta seção, foi realizada a leitura da relação de transformação para cada derivação do transformador, utilizando um equipamento de alta precisão chamado TTR. Os resultados das relações de tensão obtidas no ensaio e o erro apresentado destas, com relação aos valores calculados pelas informações da placa, são fornecidos na Figura 33. Os valores obtidos nas leituras dos TAP 0-1 (13800) e TAP 0-2 apresentaram valores satisfatórios e dentro dos limites estipulados pela norma, que especifica um erro de 0,5% entre o valor calculado e o medido. Já os TAP 0-3 e TAP-04 apresentaram valores insatisfatórios e acima do permitido por norma, conforme demonstrado na Figura 33, por este motivo as tensões de 11600V e de 11000V estão reprovadas para entrar em operação devido a detecção de alteração nos valores dos erros obtidos, tanto para o enrolamento central (H2-X2), quando para o enrolamento (H1X1). Essas alterações são provenientes de curto circuitos entre espiras, faz-se necessário a

desmontagem do equipamento e a retirada da parte ativa para a realização de uma inspeção detalhada nos respectivos enrolamentos.

Foi realizado posteriormente o ensaio de relação de transformação utilizando o método dos dois voltímetros, os resultados obtidos demonstram consistência nos valores e coerência entre os dois métodos de ensaios. Tanto no ensaio utilizando o TTR quando pelo método dos dois multímetros obteve-se valores insatisfatórios e reprobatórios para os TAP's que apresentam tensão nominal 11600V e 10000V, respectivamente as posições 0-3 e 0-4.

Através do ensaio elétrico de resistência de isolamento DC, busca-se detectar, diagnosticar e prevenir falhas de isolação que possam colocar em risco a integridade do equipamento quando colocado em operação, conforme os valores inseridos na Tabela 10. Obteve-se valores considerados insatisfatórios tanto para o índice de polarização quanto para o índice de absorção, nos três primeiros ensaios elétricos, o que indica uma possível presença de sujeira ou umidade no óleo isolante mineral. No entanto, este ensaio não constitui critério para aprovação ou rejeição do transformador, conforme descrito na NBR5356-2014. Todos os valores medidos de isolamento serviram para comparativos para as próximas medições e acompanhamento do grau de deterioração da isolação através de um futuro histórico. Para o ensaio de resistência elétrica dos enrolamentos, foi realizado a análise dos valores obtidos através da comparação entre as fases, pois não foi possível obter o *databook* do equipamento a ser ensaiado, para utilização dos valores obtidos em fábrica como referência.

Todos os valores obtidos, foram considerados aprovados e sem variação considerável entre fases.

6.8 LABORATÓRIO

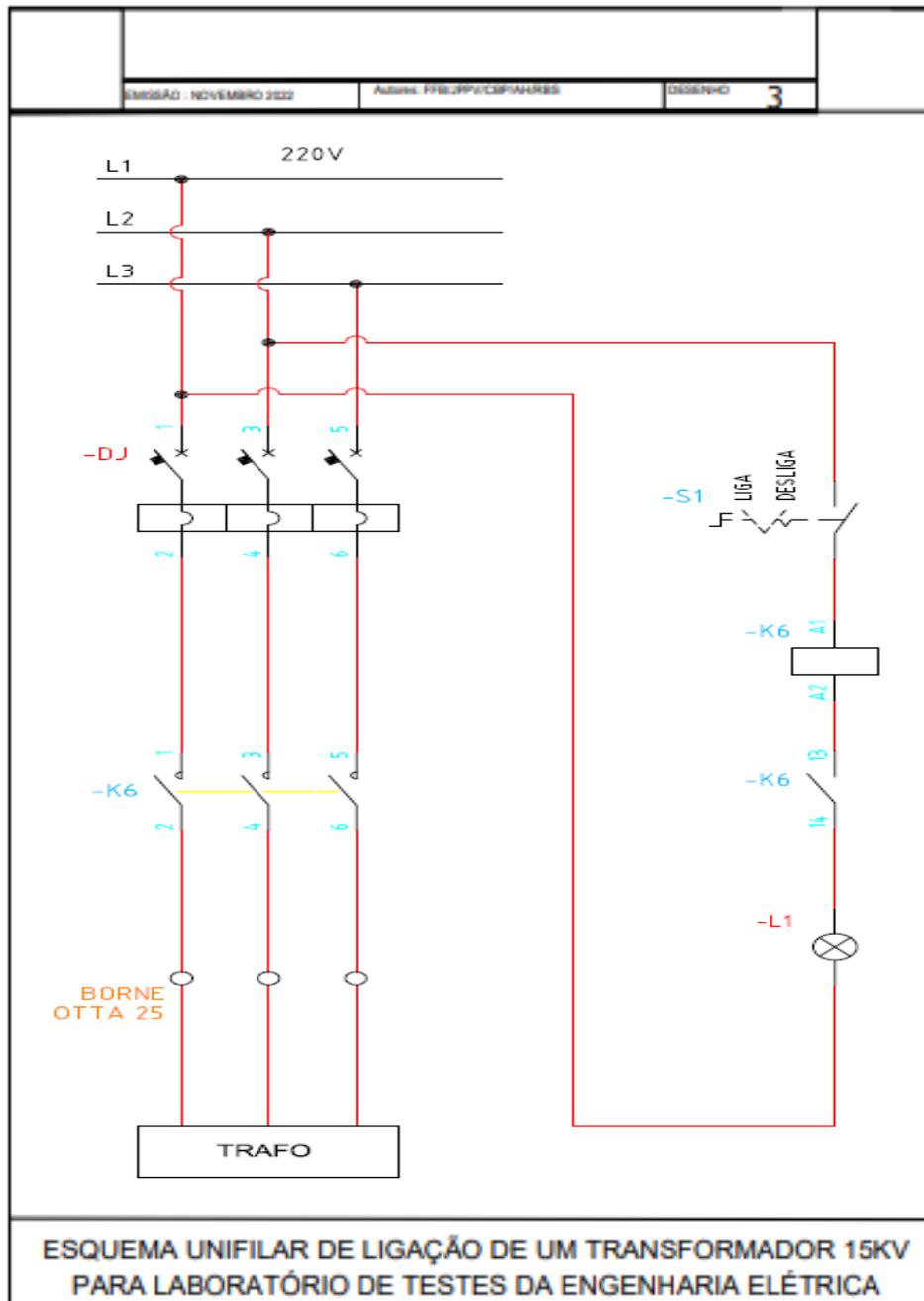
6.8.1 Estrutura



Figura 67 - Estrutura para ensaios

Fonte: Autoria própria

6.8.2 Diagrama Trifilar



Fonte: Autoria própria

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, Antonio Tadeu Lyrio de; COGO, João Roberto; ABREU, José Policarpo Gonçalves de. Transformadores. Itajubá [198-]a. Apostila do curso de transformadores da FUPAI.

American National Standard Institute. ANSI / IEEE C57.12.90-1987: test code for liquid-immersed distribution, power, and regulating transformers and guide for shortcircuit testing of distribution and power transformers. New York, 1987.

ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Boletim Clic Energia. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/centrais-de-conteudos/relatorios-e-indicadores/distribuicao>

ARANTES, J. G. Diagnóstico de falhas em transformadores de potência pela análise de gases dissolvidos em óleo isolante através de redes neurais. 2005. 115 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2005.

ARAUJO, Daniel Carrijo Polonio. Estudo de metodologia e técnicas para execução de ensaios de resposta em frequência em transformadores de potência. 2009. 220 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 5356-1: Transformadores de potência – Parte 1: Generalidades. 2007.

BECHARA, Ricardo. Análise de falhas em transformadores de potência. 2010. 102 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

DEL TORO, V. Fundamento de Máquinas Elétricas. 1ª ed. Rio de Janeiro, 2016.

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

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. IEC 60076: Power transformers: Part 1: General. Geneva, 2000.

KALITJUKA, T. Control of Voltage Source Converters for Power System Applications. Dissertação (Mestrado) - Norwegian University of Science and Technology, 2011. Disponível em: <http://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2:452318>.

KOSOW, I. Máquinas Elétricas e Transformadores. 11ª ed. São Paulo, 1995

MAMEDE FILHO, J. Manual de Equipamentos Elétricos. 4ª ed. Rio de Janeiro, 2015.

MARTIGNONI, Alfonso. Transformadores. 8. ed. São Paulo: Globo, 1991

STOCCO, M. B. C. Avaliação do potencial de aplicação de óleos vegetais como fluidos isolantes em transformadores de distribuição da rede elétrica. 2009. 129 f. Dissertação (Mestrado) - Ufpr, Curitiba, 2009.

SUZUKI, N. Y. Estudo de Controle e proteção para sistemas de transmissão HVDC multiterminal baseados em conversores modulares multiníveis. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

WILHELM, H. M.; TULIO, L.; UHREN, W. Produção e uso de óleos vegetais isolantes no setor elétrico. Engenharia, Curitiba, n. 592, p.120-124, 2009.

GRAINGER. John J.; STEVENSON, William D.. Power System analysis. 1 ed. 1994.

https://www.researchgate.net/figure/Ciclo-de-histerese-para-um-material-ferromagnetico_fig1_242095594

<https://energiahoje.editorabrasilenergia.com.br/abb-finaliza-entrega-de-transformadores-para-segundo-linhao-de-belo-monte/>

<https://monografias.brasilecola.uol.com.br/engenharia/sistema-de-transmissao-hvdc-corrente-continua-em-alta-tensao-conversores-multiniveis-modulares-mmc.htm>

https://www.researchgate.net/figure/Figura-11-Sistema-Eletrico-de-Potencia_fig1_331074300