



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO  
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO  
DEPARTAMENTO CAMPUS CARAÚBAS  
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

JORGE LUIZ DANTAS CRUZ JÚNIOR

**ENSAIOS REALIZADOS EM TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS COM  
ISOLAÇÃO A ÓLEO**

CARAÚBAS

2021

JORGE LUIZ DANTAS CRUZ JÚNIOR

**ENSAIOS REALIZADOS EM TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS COM  
ISOLAÇÃO A ÓLEO**

Monografia apresentada a Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Francisco das Chagas Barbosa de Sena

CARAÚBAS

2021

©Todos os direitos estão reservados à Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996, e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tornar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata, exceto as pesquisas que estejam vinculadas ao processo de patenteamento. Esta investigação será base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) seja devidamente citado e mencionado os seus créditos bibliográficos.

C955e Cruz Júnior, Jorge Luiz Dantas Cruz Júnior.  
ENSAIOS REALIZADOS EM TRANSFORMADORES  
TRIFÁSICOS COM ISOLAÇÃO A ÓLEO / Jorge Luiz Dantas  
Cruz Júnior Cruz Júnior. - 2021.  
42 f. : il.

Orientador: Francisco das Chagas Barbosa Sena  
Sena.

Monografia (graduação) - Universidade Federal  
Rural do Semi-árido, Curso de Engenharia  
Elétrica, 2021.

1. Transformadores. 2. Trifásicos. 3. Ensaio.  
4. Substação. 5. Elétrica. I. Sena, Francisco das  
Chagas Barbosa Sena, orient. II. Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade  
com AACR2 e os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Biblioteca Campus Caraúbas  
Bibliotecária: Dalvanira Brito Rodrigues  
CRB: 15/700

JORGE LUIZ DANTAS CRUZ JÚNIOR

**ENSAIOS REALIZADOS EM TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS COM  
ISOLAÇÃO A ÓLEO**

Monografia apresentada a Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Defendida em: 16 / novembro / 2021.

**BANCA EXAMINADORA**



Assinado de forma digital por  
FRANCISCO DAS CHAGAS BARBOSA DE  
SENA:00895009382  
Dados: 2021.11.16 09:26:30 -03'00'

---

Prof. Dr. Francisco das Chagas Barbosa de Sena - UFERSA  
Presidente

**LINCOLN ALEXANDRE  
PAZ SILVA:08221348457**

Assinado digitalmente por LINCOLN  
ALEXANDRE PAZ SI  
LVA:08221348457  
Data: 2021.11.16 09:30:03-03'00'

---

Prof. Me. Lincoln Alexandre Paz – UFERSA  
Membro

**SAMARA DE CAVALCANTE  
PAIVA:08424485432**

Assinado de forma digital por SAMARA  
DE CAVALCANTE PAIVA:08424485432  
Dados: 2021.11.16 10:06:14 -03'00'

---

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Sâmara de Cavalcante Paiva - UFERSA  
Membro

*ADEMI E MAGNÓLIA (In Memoriam).*

*OFEREÇO*

Primeiro a Deus e a minha família, que sempre me apoiaram e me ajudaram em todos os momentos.

*DEDICO*

A minha mãe Mabel e ao meu Padrasto Laércio, meus exemplos de dedicação e amor.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus por todas as bênçãos e sustento que me tem dado, pois até aqui me ajudou o Senhor.

Agradeço a minha família e em ao meu avô Ademi (In Memoriam) e a minha avó Magnólia (In Memoriam), por todo amor e ensinamentos.

Agradeço a minha mãe Mabel Ferreira e ao meu padrasto Laércio Delfino por todo carinho, amor, esforços e determinação.

Agradeço a minha noiva, amiga e companheira Suzyanne Lima por tornar minha vida melhor, ajudar e apoiar em todos os momentos.

Agradeço as minhas irmãs Camila Ismênia e Ester Ferreira que sempre me apoiaram e protegeram desde a infância. E ao meu sobrinho João Gabriel por tudo.

Agradeço aos Amigos/ Irmãos que a vida me deu, em especial eles: Anna Beathriz, Ayslan Garcia, Iatamara Cabral, Rafael, Thays, Wendell e Monnyck.

Agradeço aos irmãos que a UFERSA me deu, Alison Breno Diógenes Pinto, Matheus Amaral, Anderson Mateus, Dayane Oliveira e Lucas Clemente por todo o apoio e amizade em todos os momentos.

Agradeço a todos que me ajudaram diretamente e indiretamente para realização deste trabalho e especialmente ao Willams Aranda pela disponibilidade e ajuda para conclusão deste trabalho.

Agradeço ao meu orientador Chagas Sena pela paciência e por todos os conselhos acadêmicos, profissionais e pessoais por quem eu tenho grande admiração e respeito.

Deem graças em todas as circunstâncias, pois esta é a vontade de Deus para vocês em Cristo Jesus.

1 Tessalonicenses 5:18

## RESUMO

Os transformadores trifásicos apresentam papel de destaque no sistema de potência elétrica, sendo responsáveis pela compatibilização dos níveis de tensão desde a geração até o consumidor final. Buscando alcançar maior confiabilidade e segurança operacional, tais equipamentos devem ser submetidos a ensaios periódicos de modo a atestar a sua integridade física e boas condições de funcionamento. Nesse sentido, a Companhia Energética do Rio Grande do Norte (COSERN) prescreve em sua norma técnica DIS-036 (Fornecimento de Energia Elétrica em Média Tensão de Distribuição à Edificação Individual) exigências mínimas a serem atendidas pelos transformadores trifásicos de novas subestações elétricas, necessárias para aprovação do projeto desse tipo de instalação elétrica. Entretanto, verifica-se que tais ensaios e suas exigências normativas são pouco conhecidas no meio acadêmico, o que dificulta a atuação de novos profissionais nesse seguimento, especificamente, no projeto e/ou manutenção de subestações elétricas simplificadas. Assim, o presente trabalho desenvolveu um estudo bibliográfico baseado em normas ABNT, padrões concessionários e trabalhos acadêmicos objetivando reportar a fundamentação teórica, os procedimentos operacionais e os equipamentos utilizados na realização dos testes com transformadores trifásicos com isolamento a óleo.

**Palavras-chave:** Transformadores Trifásicos. Ensaio. Subestação Elétrica.



## ABSTRACT

Three-phase transformers play a prominent role in the electrical power system, being responsible for the compatibility of voltage levels from generation to the final consumer. Seeking to achieve greater reliability and operational safety, such equipment must undergo periodic tests in order to certify its physical integrity and good operating conditions. In this sense, the Energy Company of Rio Grande do Norte (COSERN) prescribes in its technical standard DIS-036 (Fornecimento de Energia Elétrica em Média Tensão de Distribuição à Edificação Individual) minimum requirements to be met by three-phase transformers of new electrical substations, necessary for approval of the project of this type of electrical installation. However, it appears that such tests and their regulatory requirements are little known in academia, which makes it difficult for new professionals to work in this area, specifically, in the design and/or maintenance of simplified electrical substations. Thus, the present work developed a bibliographical study based on ABNT norms, concessionary standards and academic works aiming to report the theoretical foundation, the operational procedures and the equipment used in the tests with three-phase transformers with oil insulation.

**Keywords:** Three-Phase Transformer. Essay. Electrical Substation

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                        |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1- Transformador Trifásico. ....                                                                                | 18 |
| Figura 2- Modelo de placa de identificação de um transformador trifásico isolado a óleo. ....                          | 20 |
| Figura 3- Esquema elétrico de ligações para medição de perdas a vazio.....                                             | 21 |
| Figura 4- Equivalente monofásico para o ensaio de transformador trifásico. ....                                        | 22 |
| Figura 5- As impedâncias do circuito equivalente de um transformador.....                                              | 22 |
| Figura 6- Diagrama de ligação para ensaio de perdas a vazio e corrente de excitação, pelo método dois Wattímetro. .... | 23 |
| Figura 7- Diagrama de ligação para ensaio de perdas a vazio e corrente de excitação, pelo método três Wattímetro. .... | 24 |
| Figura 9- Equivalente monofásico para o ensaio de curto-circuito de transformador trifásico                            | 25 |
| Figura 10- Ensaio de tensão suportável à frequência industrial. ....                                                   | 27 |
| Figura 11- Cuba de medidor de rigidez dielétrica com eletrodos.....                                                    | 29 |
| Figura 12- Descrição do painel frontal. ....                                                                           | 30 |
| Figura 13- Esquema de ligação do megômetro. ....                                                                       | 31 |
| Figura 14- Medição de parâmetros para o comissionamento do teste.....                                                  | 32 |

## LISTA DE TABELAS

|                                                                                                                                              |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1- Dados dos Transformadores Trifásicos 15 kV - Isolação a Óleo.....                                                                  | 34 |
| Tabela 2 -Valores de perdas, corrente de excitação e tensão de curto-circuito para transformadores trifásicos com tensão máxima de 15kV..... | 35 |
| Tabela 3- Característica do óleo isolante após o contato com o equipamento. ....                                                             | 36 |
| Tabela 4-Tolerância nos valores de ensaios. ....                                                                                             | 37 |
| Tabela 5- Condições para ensaios .....                                                                                                       | 38 |
| Tabela 6- Resultados possíveis para o índice de Absorção. ....                                                                               | 38 |

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

|        |                                                                            |
|--------|----------------------------------------------------------------------------|
| ABNT   | Associação Brasileira de Normas Técnica                                    |
| AT     | Alta Tensão                                                                |
| BT     | Baixa Tensão                                                               |
| IEEE   | Institute of Electrical and Electronic Engineers                           |
| MT     | Média Tensão                                                               |
| CA     | Corrente Alternada                                                         |
| CC     | Corrente contínua                                                          |
| COSERN | Companhia Energética do Rio Grande do Norte Empresa de Pesquisa Energética |

## SUMÁRIO

|                                                             |           |
|-------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1. INTRODUÇÃO .....</b>                                  | <b>14</b> |
| 1.1 OBJETIVOS .....                                         | 15        |
| 1.1.1 OBJETIVO GERAL .....                                  | 15        |
| 1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....                            | 15        |
| 1.2 METODOLOGIA .....                                       | 16        |
| 1.3 MOTIVAÇÃO .....                                         | 16        |
| <b>2. REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>                         | <b>17</b> |
| 2.1 TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS .....                        | 17        |
| 2.2 DADOS DA PLACA .....                                    | 18        |
| 2.3 ENSAIO A VAZIO.....                                     | 20        |
| 2.4 ENSAIO DE CURTO-CIRCUITO .....                          | 24        |
| 2.5 TENSÃO DE CURTO-CIRCUITO A 75°C .....                   | 26        |
| 2.6 TENSÃO SUPORTÁVEL NOMINAL À FREQUÊNCIA INDUSTRIAL.....  | 27        |
| 2.7 RIGIDEZ DIELÉTRICA.....                                 | 28        |
| 2.8 RESISTÊNCIA DE ISOLAMENTO E ÍNDICE DE POLARIZAÇÃO ..... | 29        |
| 2.9 REFERÊNCIAS NORMATIVAS.....                             | 32        |
| <b>3. VALORES ADMISSÍVEIS NOS ENSAIOS.....</b>              | <b>34</b> |
| <b>4. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>                         | <b>39</b> |
| <b>5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>                  | <b>40</b> |

## 1. INTRODUÇÃO

Em um mundo globalizado, surge a necessidade do aumento de produção de energia, isso porque essa desempenha papel estratégico para o desenvolvimento social e econômico de um país. Nesse cenário, os transformadores são itens fundamentais, pois possibilitam a geração, transmissão e distribuição de energia elétrica em níveis compatíveis com a aplicação e com menores custos.

As falhas nos transformadores podem ocasionar interrupções no fornecimento de energia, gerando dificuldades no setor industrial e sociedade de forma geral. Por esse motivo, é imperativo assegurar a qualidade de tais equipamentos.

De acordo com Silva (2015), as companhias de energia elétrica, setor industrial e consumidores possuem interesses em estudos e métodos para diminuição de custos, aumento da confiabilidade e maior longevidade da vida útil dos seus componentes, objetivando reduzir custos com manutenções corretivas e/ou preventivas, tempo médio entre falhas e revitalização de transformadores, o que pode ser verificado através de ensaios técnicos específicos.

Nesse contexto, a Companhia Energética do Rio Grande do Norte (COSERN), pertencente ao grupo Neoenergia, estabelece requisitos mínimos, fornecidos através de laudo técnico, desenvolvidos através de ensaios específicos, a serem apresentadas junto a esta distribuidora por ocasião da solicitação de ligação de subestação simplificada a rede primária de distribuição. Os transformadores para esse tipo de ligação devem ser ensaiados e duas vias do laudo final devem ser entregues a Distribuidora, quando do pedido de ligação (DIS-NOR-036, 2020). Tais laudos devem conter no mínimo as seguintes informações:

- Dados de Placa: nome do fabricante; número de série; potência nominal; tensão nominal primária e secundária e data de fabricação;
- Valores de perdas em vazio e corrente de excitação;
- Valores de perdas em carga e totais;
- Tensão de curto-circuito a 75°C;
- Tensão suportável nominal à frequência industrial;
- Rigidez dielétrica do líquido isolante (valor mínimo de 35 kV / 2,54 mm).

Os dados anteriormente destacados são mandatórios para aprovação ou não do tipo de ligação solicitada, devendo serem fornecidos por laboratórios oficiais ou reconhecidos pelo governo ou fabricantes cadastrados como fornecedores da própria Distribuidora. Destaca-se

ainda que, segundo a DIS-NOR-036, os laudos devem ser conclusivos quanto a concordância dos parâmetros analisados com relação aos requisitos das normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

Apesar das informações citadas anteriormente serem decisivas na aceitação do projeto solicitado, é comum o seu desconhecimento por profissionais inexperientes que atuam como projetistas de subestações simplificadas e/ou desenvolvem serviços de manutenção nesse tipo de instalação. Tal desconhecimento pode implicar em atrasos na aprovação do projeto pela concessionária, atraso na implantação do projeto final, redução de vida útil e/ou de segurança do transformador.

Como evidenciado, os ensaios realizados com transformadores trifásicos isolados a óleo são de grande importância para garantir a qualidade e segurança de seu funcionamento. Através deles, é possível atestar a integridade física e boas condições de uso deste equipamento. Entretanto, esses ensaios e suas exigências normativas são pouco conhecidas no meio acadêmico. Isso dificulta a atuação de novos profissionais nesse seguimento, principalmente no de manutenção.

Assim, o presente trabalho utilizou um estudo bibliográfico acerca dos tipos de ensaios que podem ser realizados para atestar a qualidade e segurança do funcionamento de transformadores trifásico com isolamento a óleo, suas metodologias e equipamento necessários. Tais informações poderão ser conhecidas e difundidas entre alunos de cursos de Engenharia Elétrica e profissionais que desejem atuar no setor de projeto e, principalmente, de manutenção de subestações simplificadas.

## 1.1 Objetivos

### 1.1.1 Objetivo geral

- Detalhar os ensaios utilizados para caracterizar a qualidade e segurança dos transformadores trifásicos com isolamento a óleo, com foco naqueles que fornecem as informações solicitadas pela DIS-NOR-036 para ligação de subestação simplificada.

### 1.1.2 Objetivos específicos

Para alcançar o objetivo geral, propõe-se os seguintes objetivos específicos:

- Apresentar as normas ABNT que definem os procedimentos metodológicos e ensaios utilizados para obter as informações solicitadas pelo padrão concessionária DIS-NOR-036;
- Resumir os valores referência definidos por normas ABNT para as informações solicitadas pelo padrão concessionária DIS-NOR-036;
- Detalhar os tipos de ensaios utilizados para obter as informações solicitadas pelo padrão concessionária DIS-NOR-036;
- Especificar os procedimentos e metodologias dos ensaios solicitados pelo padrão concessionária DIS-NOR-036.

## 1.2 Metodologia

O estudo aqui proposto abordará ensaios utilizados para caracterizar a qualidade e segurança dos transformadores trifásicos com isolação a óleo, com foco naqueles utilizados para obter as informações solicitadas pela DIS-NOR-036 para ligação de subestação simplificada a rede de distribuição de média tensão.

Ao longo do trabalho, será desenvolvido um trabalho bibliográfico afim de resumir informações capazes de satisfazer o objetivo geral do presente trabalho. Para tanto, serão analisadas normas ABNT e outras literaturas que contemplem a temática aqui proposta.

Para atingir os objetivos apresentado no presente trabalho, será utilizada pesquisa exploratória. Para tanto, serão analisados normas técnicas, padrões concessionários, trabalhos de conclusão de curso e outros materiais pertinentes.

## 1.3 Motivação

O desenvolvimento do presente trabalho possibilitará a concatenação de informações acerca dos tipos de ensaios que podem ser realizados para atestar a qualidade e segurança do funcionamento de transformadores trifásico com isolação, suas metodologias e equipamento necessários. Tais informações poderão ser resumidas e difundidas entre os alunos de cursos de Engenharia Elétrica e entre profissionais que desejem atuar no setor de projeto e, principalmente, de manutenção de subestações simplificadas.



## 2. Referencial teórico

Neste capítulo será apresentado a revisão da literatura técnica contemplando as características básicas e elementos constituintes dos transformadores trifásicos com isolamento a óleo, os ensaios solicitados pela DIS NOR-036 para transformadores isolados a óleo, os métodos e procedimentos mais utilizados de acordo com normas e literaturas especializada nesta temática.

### 2.1 Transformadores trifásicos

Atualmente, a maioria dos sistemas de transmissão e distribuição de energia elétrica são em Corrente Alternada (CA) trifásico. Nesse sistema, os transformadores trifásicos permitem o ajuste do nível de tensão de acordo com as necessidades energéticas. De acordo com Martignoni (1991), este componente possui princípio de funcionamento baseado na variação temporal do fluxo magnético entre os terminais de seus enrolamentos.

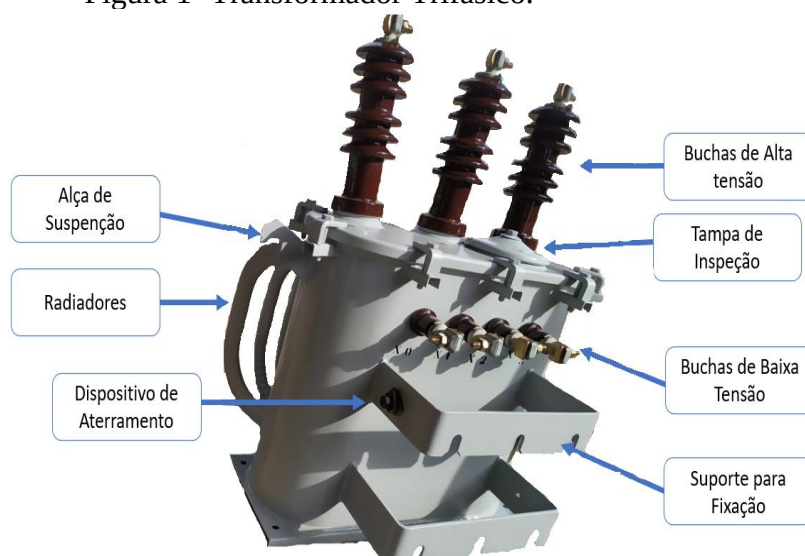
Os transformadores trifásicos não são dispositivos de conversão eletromecânica de energia, uma das principais diferenças das máquinas elétricas. Os transformadores alteram os níveis de tensão e corrente entre seus enrolamentos primário e secundário, mas mantendo a frequência do sinal de entrada inalterada. Destaca-se que os enrolamentos desse equipamento são eletricamente isolados, sendo conectados magneticamente através de um fluxo magnético comum, ou de acoplamento. O campo magnético é o meio que acopla e transfere energia entre os enrolamentos do transformador.

No cenário ideal de funcionamento de um transformador trifásico não há perdas, o fator de potência é constante, a potência no enrolamento primário é transferida integralmente para o enrolamento secundário e a tensão aplicada entre os terminais do enrolamento primário é igual a tensão induzida entre estes terminais. No entanto, no cenário real existem perdas, pode-se destacar as perdas no núcleo, rotação dos domínios magnéticos consequentemente aumento na temperatura, por histerese e perdas devido a resistência das bobinas e relutância dos núcleos. Neste contexto a potência no primário será maior que a potência entregue no secundário.

A figura 1 mostra um transformador trifásico. Os terminais de Alta Tensão (AT) ou buchas de AT, como normalmente é conhecido, são conectados à rede elétrica primária de distribuição de energia da concessionária. Já os terminais de Baixa Tensão (BT) ou buchas de BT, diferente das de AT, serão conectadas ao circuito alimentado secundário, em que o quarto terminal representa o ponto de ligação com neutro transformador, o qual deve ser

equipotencializado. destaca-se que o tanque do transformador contém, além de óleo isolante, todos os seus estruturais, como enrolamentos, derivações e núcleo magnético. Vale salientar que os radiadores são de extrema importância a manutenção da vida útil do transformador, pois mantem a sua temperatura dentro de níveis aceitáveis de funcionamento devido ser responsável para circulação do óleo.

Figura 1- Transformador Trifásico.



**Fonte:** Autoria própria, 2021.

As alças de suspensão são utilizadas quando para fazer o içamento do transformador para locomoção ou até mesmo fixação em poste. O suporte de fixação é utilizado para fixar o transformador no poste.

Por fim, destaca-se que a tampa de inspeção do transformador trifásico deve sempre ser mantida fechada e bem vedada. Ela só poderá ser aberta quando o mesmo estiver desligado, durante atividades de manutenção e com o devido cuidado para não haver contaminação do óleo por materiais líquidos e/ou particulados, o que poderá prejudicar a rigidez dielétrica do óleo isolante.

## 2.2 Dados da placa

A placa de identificação de um transformador contém uma série de informações que resumem as características físicas e elétricas. Segundo a ABNT NBR 5356-1/2007, a placa de identificação do transformador deve ser resistente às intempéries e fixada em posição visível.

Além disso, deve apresentar nos mínimos as seguintes informações, gravadas de forma indelével:

- a) Tipo de transformador
- 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;
- h) Frequência nominal;
- i) Tensões nominais (em V ou kV) e faixa de derivações;
- j) Correntes nominais;
- k) Diagrama e símbolo de ligação;
- l) Impedância de curto-circuito, valor medido em percentagem;
- m) Sistema de resfriamento;
- n) Massa total;
- o) Massa de óleo isolante;
- p) Limite de elevação de temperatura;
- q) Tipo de óleo isolante;
- r) Massa da parte ativa;
- s) Número do manual de instruções;
- t) Vazão, para transformadores resfriados à água.

A Figura 2 apresenta o modelo de placa de um transformador trifásico isolado a óleo definido pela NBR 5356-1. O material utilizado na fabricação da placa deve possuir proteção contra corrosões, sendo fixado através de rebites. A placa também contém as informações do tipo e volume do líquido isolante, informações importantes para identificar possíveis vazamentos de óleo.

Figura 2- Modelo de placa de identificação de um transformador trifásico isolado a óleo.

|                            |                                      |                              |
|----------------------------|--------------------------------------|------------------------------|
| Nome e Dados do Fabricante |                                      |                              |
| Número de Série            | Data de Fabricação                   |                              |
| Potência                   | Indicação da NBR                     |                              |
| Impedância                 | Tipo do Óleo Isolante                |                              |
| Tensões Nominais AT        | Diagrama de Ligação dos Enrolamentos |                              |
| Tensões Nominais BT        | Diagrama Fasorial                    |                              |
| Volume do Líquido Isolante | Massa Total do Transformador         | N° da Placa de identificação |

**Fonte:** Adaptado de ABNT NBR 5356-1, 2007.

O número de série do transformador é de suma importância para o controle e melhor relação entre o proprietário do transformador e o fabricante. A faixa de tensão AT e a posição do TAP, permite o controle da relação de transformação do transformador de acordo com o nível de tensão da rede primária.

A seguir, são apresentados os principais parâmetros que atestam as boas condições de funcionamento de um transformador trifásico com isolação a óleo.

### 2.3 Ensaio a vazio

No ensaio de perdas em vazio, a corrente terá um comportamento diferente de uma senoide, esse comportamento ocorre devido a histerese magnética sofrida pelo material que compõe o núcleo magnético do transformador. Porém, as perdas em vazio e a corrente de excitação devem ser referidas à tensão senoidal pura (SOUZA, 2013).

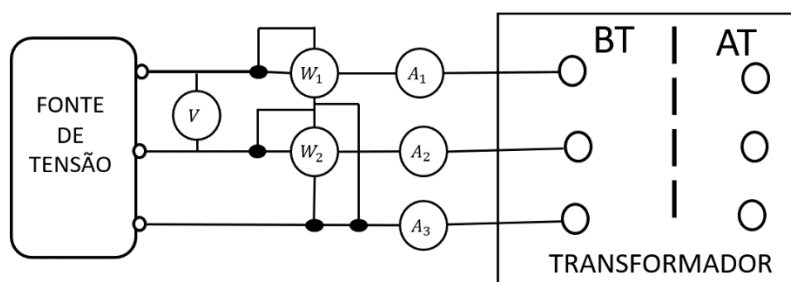
As principais finalidades da análise da operação em vazio de um transformador é determinar o nível de corrente no ensaio, perdas no núcleo devido histerese e correntes parasitas (ou correntes de Foucault), e a resistência e reatância no ramo de magnetização (ABNT NBR 5356-1, 2007).

De acordo com a ABNT NBR 5356-1 (2007), a perda por histerese é função ao máximo valor da densidade do fluxo, que está relacionado ao valor médio da tensão de alimentação. Já a perda por correntes de Foucault é função do valor eficaz da tensão de entrada.

Para a realização do ensaio a vazio algumas condições devem ser observadas, são elas: o transformador deve ser alimentado com sua tensão e frequência nominais; e os enrolamentos não utilizados durante o ensaio deverão ser deixados em circuito aberto (ABNT NBR 5356-1, 2007).

Como abordado anteriormente, a perda em vazio é causada devido a histerese e corrente de Foucault, sendo função do comportamento da tensão de alimentação. Na Figura 3, será mostrado o esquema elétrico de ligação para realização do teste, nota-se que o teste é realizado no lado de BT (Baixa Tensão) do transformador. Onde  $W_1$  e  $W_2$  são os Wattímetros que medem a potência.  $A_1, A_2$  e  $A_3$  amperímetros para a verificação da corrente em cada fase e V representa o voltímetro.

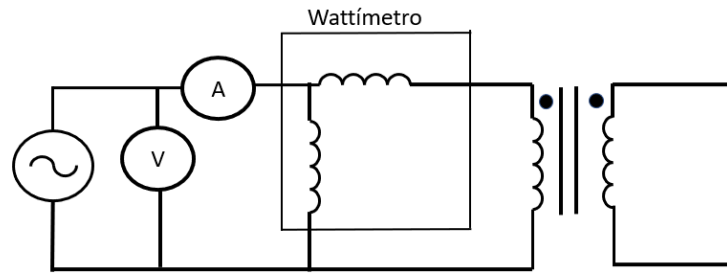
Figura 3- Esquema elétrico de ligações para medição de perdas a vazio



**Fonte:** Adaptado de Souza, 2013.

A Figura 4, mostra o equivalente monofásico para o ensaio de um transformador trifásico. A imagem evidencia a forma de ligação do Wattímetro, Amperímetro e Voltímetro. Esses equipamentos indicarão os valores de tensão, corrente e potência durante o ensaio.

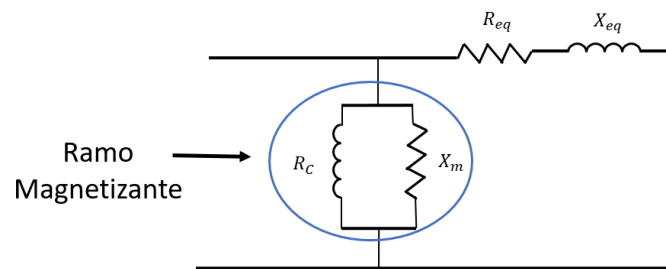
Figura 4- Equivalente monofásico para o ensaio de transformador trifásico.



**Fonte:** Adaptado de Champman,2013.

Portanto, conforme abordado anteriormente, com os valores de tensão, corrente e potência já obtidos através do voltímetro, amperímetro e wattímetro. Deve-se calcular alguns parâmetros conforme a Figura 5 que evidencia a impedância no ramo de magnetização e consequentemente as perdas obtidas no ensaio a vazio.

Figura 5- As impedâncias do circuito equivalente de um transformador



**Fonte:** Adaptado de Champman,2013.

Conforme a Figura 5, partindo do princípio que os valores durante o ensaio a vazio da corrente ( $I_{CA}$ ), tensão ( $V_{CA}$ ) e potência ( $P_{CA}$ ) são conhecidos, mediante o uso dos equipamentos citados anteriormente, os parâmetros do ramo de magnetizante,  $I_m$  (corrente de magnetização),  $R_C$  e  $X_m$  (Resistência e Reatância do ramo magnetizante) poderão ser calculados através das Equações 1 e 2.

$$R_C = \frac{V_{CA}^2}{P_{CA}} \quad (1)$$

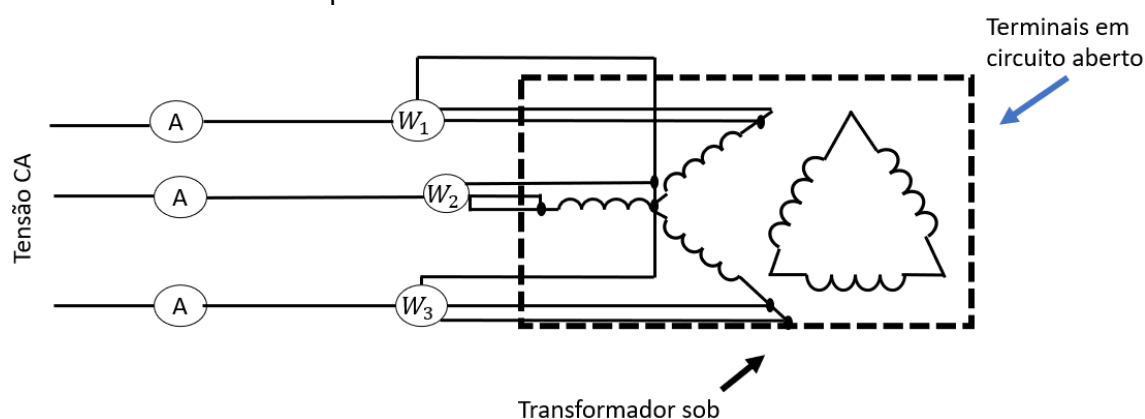
$$X_m = \frac{V_{CA}}{I_m} \quad \text{onde} \quad I_m = \sqrt{I_{CA}^2 - \left[ \frac{V_{CA}}{R_{eq}} \right]^2} \quad (2)$$

Destaca-se que, normalmente, a realização desse ensaio de menor tensão transformador devido a facilidade de se obter menores níveis de tensão CA

Segundo a ABNT NBR 5356-1 (2007), os seguintes métodos podem ser utilizados para determinar as perdas em vazio e corrente de excitação de transformadores trifásicos: método dois wattímetros; e método três wattímetro.

Como ilustrado na Figura 6, no método dos dois Wattímetros, são utilizados, dois wattímetros, três amperímetros e fontes de tensão, sendo, durante o ensaio, aplicada a tensão e frequência nominais do enrolamento ensaiado.

Figura 6- Diagrama de ligação para ensaio de perdas a vazio e corrente de excitação, pelo método dois Wattímetro.

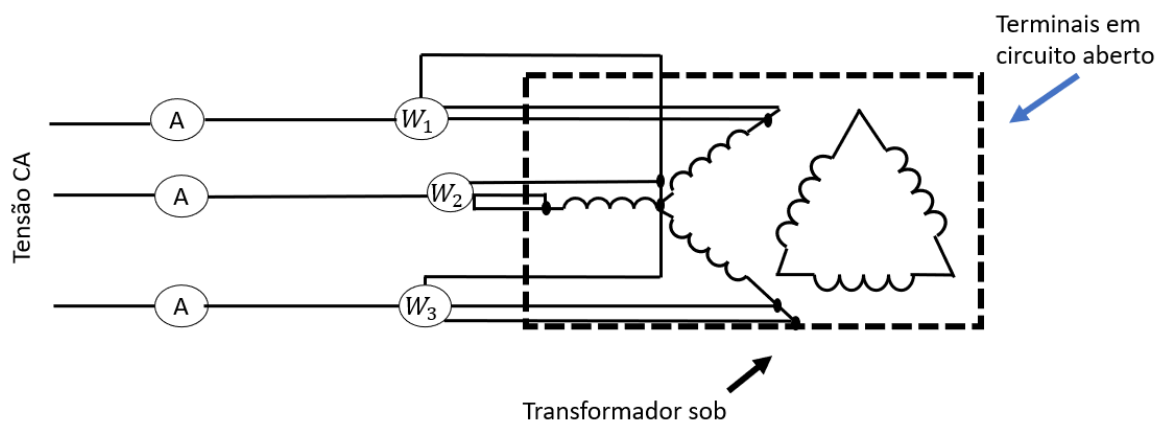


**Fonte:** Adaptado da ABNT NBR 5356-1, 2007

Destaca-se que o método utilizando os dois wattímetros requer que o ensaio seja dividido em pelo menos três etapas, obtendo a leitura com o par de wattímetros em três fases distintas. Para estimar as perdas em vazio, deve realizar a média aritmética da soma dos resultados obtidos.

A Figura 7 ilustra o esquema de ligação do método de medição através de três wattímetros. Neste método, a soma das medições registradas irá representar as perdas em vazio do transformador analisado.

Figura 7- Diagrama de ligação para ensaio de perdas a vazio e corrente de excitação, pelo método três Wattímetro.



Fonte: Adaptado da ABNT NBR 5356-1, 2007.

Durante este ensaio, a corrente a vazio possui baixo valor, os enrolamentos do secundário (lado normalmente usados para realização do ensaio) apresentam baixa resistência. Portanto, é habitual o uso do wattímetro com boa precisão para calcular as perdas no núcleo. (KOSOW, 2015).

## 2.4 Ensaio de curto-circuito

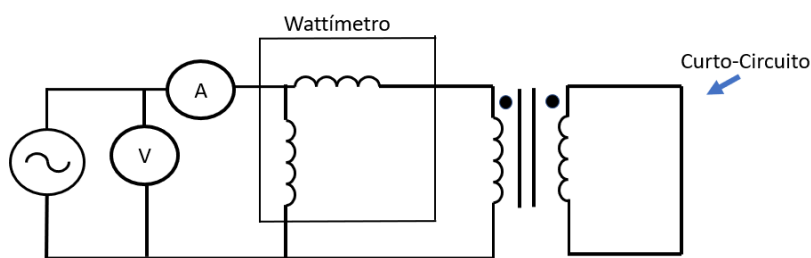
Assim como no ensaio anterior, o ensaio de curto-circuito requer que sejam medidos, simultaneamente, os valores de corrente, tensão e da potência ativa do enrolamento ensaiado. Diferente do ensaio em vazio, este ensaio necessita cuidado seja dado ao tempo de sua realização. As medições devem ser efetuadas rapidamente para que não ocorra grandes elevações de temperaturas nos enrolamentos do transformador que podem gerar erros significativos nas medições e degradação da isolamento dos enrolamentos (CARDOSO, 2005).

Assim como no ensaio a vazio, o de curto circuito utiliza amperímetros, volímetros e wattímetros para medição de grandezas elétricas que auxilia no cálculo das perdas de curto-circuito.

Para melhor análise do transformador trifásico, é realizado um equivalente monofásico para melhor visualização e análise elétrica conforme mostrado na imagem a seguir. Como mencionado anteriormente, são necessários alguns equipamentos de medição para obtenção de algumas grandezas elétrica como corrente, tensão e potência de curto-circuito.



Figura 8- Equivalente monofásico para o ensaio de curto-circuito de transformador trifásico



**Fonte:** Adaptado de Champman, 2013.

Devido a facilidade de se lidar com níveis de tensões mais baixas e de utilizar equipamentos de BT para medições dessas grandezas elétricas. Com o auxílio dos equipamentos já mostrados anteriormente, após a obtenção da corrente, tensão e potência são realizadas o cálculo com as equações a seguir para se obter a perda de curto-circuito.

$$R_{eq} = \frac{P_{cc}}{I_{cc}^2} \quad (3)$$

$$X_{eq} = \sqrt{Z_{eq}^2 - R_{eq}^2} \text{ onde, } Z_{eq} = \frac{V_{cc}}{I_{cc}} \quad (4)$$

Os valores das perdas em cargas estão vinculados ao carregamento do transformador. Portanto, é fundamental definir certo ponto de funcionamento, possibilitando assim precisar as perdas nos enrolamentos do lado primário e secundário. O ponto de funcionamento referido no teste deve coincidir com o desempenho nominal do transformador (CARDOSO, 2005).

Neste ensaio, existe uma relação entre as perdas e o carregamento do transformador, por isso há necessidade de aplicar uma tensão pré-definida com uma fonte tensão ajustada na faixa entre 2% a 10% da tensão nominal (ABNT NBR 5356-1:2007). O nível baixo de tensão de ensaio deve-se ao fato de um dos enrolamentos está em curto-circuito, o que implica no aumento acentuado do nível de corrente no enrolamento ensaiado, fazendo com que o mesmo alcance o valor de corrente nominal para um nível baixo de tensão.

Conforme a ABNT NBR 5356-1(2007), a determinação da impedância de curto-circuito e as perdas em cargas de um par de enrolamentos deverão seguir os seguintes requisitos: frequência nominal; aplicação de tensão com comportamento senoidal aos terminais; e aplicação de curto-circuito aos terminais do enrolamento não ensaiado. A corrente de alimentação deverá ser maior ou igual a 50 % da nominal.

Os condutores para curto-circuitar os terminais ensaiados do transformador não deverá ter a seção transversal inferior aos seus terminais e seus comprimentos os mais curtos possíveis (CARDOSO, 2005)

É importante informar que, como a temperatura é um fator importante na realização desse ensaio, deve-se realizar duas medições da temperatura, antes e depois do ensaio, e considerar a média aritmética das duas na emissão de laudo técnico (SIMÃO, 2020).

## 2.5 Tensão de curto-circuito a 75°C

Este ensaio objetiva determinar se o transformador funcionará normalmente quando estiver sujeito à elevadas temperaturas. Vale destacar que, em seu pleno funcionamento normal, os transformadores operam em elevadas temperaturas quando toma como referência a temperatura ambiente devido. Essa elevação de temperaturas deve-se as perdas ôhmicas nos enrolamentos e perdas por histerese e correntes parasitas no núcleo, que se manifestam sob a forma de calor. Em sua operação normal, os transformadores trabalham em uma faixa de temperatura que assegura sua integridade física (ABNT NBR 5356-2: 2007).

O método mais preciso para a verificação das condições térmicas de um transformador trifásico é o de carga efetiva, pois é o que mais se aproxima do funcionamento pleno do transformador, porém, este procedimento é inviável em laboratório, pois o transformador teria que ser colocado em operações normais. O método mais usado para esta verificação é o método de curto-circuito (OLIVEIRA; COGO; ABREU, 1984).

O ensaio de tensão de curto-circuito a 75°C, deve ser realizado colocando um dos enrolamentos em curto e aplicando a tensão nominal nos outros enrolamentos. Pode-se dividir o ensaio em duas etapas, a primeira referente ao aquecimento do óleo e a segunda referente ao aquecimento dos enrolamentos. As perdas obtidas no ensaio deverão ter valores compatíveis com as condições normais de operação do transformador (OLIVEIRA; COGO; ABREU, 1984).

De acordo com Cardoso (2005), para a realização deste ensaio são necessárias as seguintes condições:

- A realização do teste deverá ser um local sem correntes de ar;
- A medição da temperatura deverá ser realizada por pelo menos 3 termômetros ao redor do transformador com a distância entre um a dois metros;
- Não se aplica a correção da temperatura se o ambiente estiver entre 10°C a 40°C.

As condições devem ser mantidas até haver um constante valor de temperatura da superfície do óleo. Para ser realizado por completo o ensaio, a temperatura no topo do óleo não deverá aumentar no período de 1 hora, o ensaio deve ser continuado até haver um equilíbrio térmico (CARDOSO,2005).

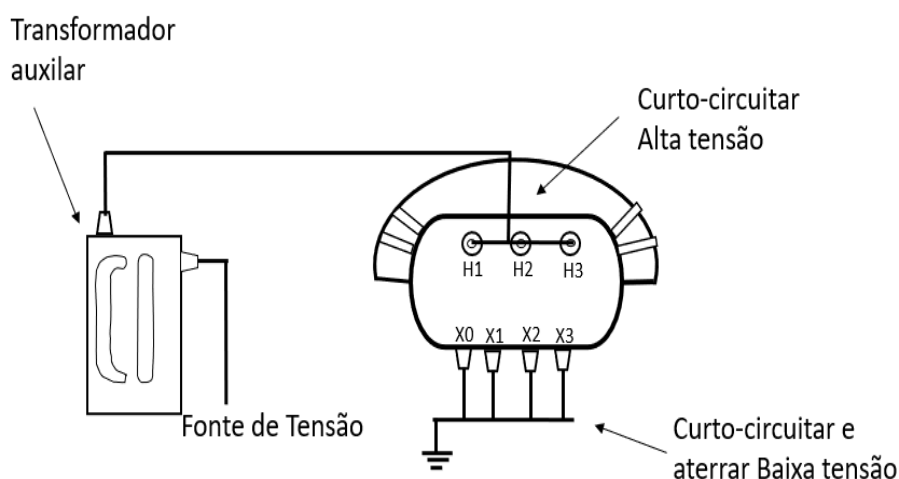
## 2.6 Tensão suportável nominal à frequência industrial

Esse ensaio permite avaliar o nível de isolamento entre as bobinas de alta, baixa e massa do transformador. O ensaio possui curta duração e resume-se em aplicar uma tensão com o valor nominal aos terminais de isolação (OLIVEIRA; COGO; ABREU, 1984).

Também conhecido como ensaio de tensão aplicada, a duração do ensaio é de um minuto e o resultado é aceitável quando não ocorrer nenhum colapso da tensão de ensaio (ABNT NBR 5356-3, 2007).

No ensaio de tensão suportável à frequência industrial, é necessário utilizar um transformador auxiliar, conforme mostrado na figura a seguir. A fonte de tensão é ligada no lado secundário do transformador auxiliar e os primários do transformador auxiliar e o que está submetido ao teste conectados. As buchas de BT do transformador testado devem estar curto-circuitadas e aterradas.

Figura 9- Ensaio de tensão suportável à frequência industrial.



Fonte Adaptado de ILTECH, 2020

Como mostrado na Figura 10, os terminais primários do transformador são postos em curto-circuito e seus terminais secundário e massa metálicas são equipotencializadas através de

um eletrodo de aterramento. Além disso, a alimentação do transformador sob ensaio é realizada através de um segundo transformador (ILTECH, 2020).

O transformador é considerado aprovado nesse ensaio se não ocorrer descargas disruptivas na isolação. Quando o teste não pode ser realizado nas condições descritas anteriormente (por exemplo com transformadores com inconformidades na isolação), o ensaio poderá ser executado com frequências maiores e com menor duração, sendo que tais parâmetros deverão estar contido nas normas do equipamento (ABNT NBR 6939, 2018).

## 2.7 Rigidez dielétrica

A rigidez dielétrica representa o valor máximo de tensão elétrica que pode ser aplicado a um dado material dielétrico sem que suas propriedades elétricas sejam alteradas, isto é, sem que o material passe a conduzir. Portanto, a rigidez é o valor máximo que determinado material suporta até deixar de ser isolante e passar a ser condutor (MOREIRA, 2000).

O óleo isolante utilizado em transformadores deve apresentar características como boa fluidez, capacidade de atuar em elevadas temperaturas e alta rigidez dielétrica. Além da função de isolação elétrica, o óleo também desempenha a função de agente de transferência do calor proveniente de perdas no núcleo e enrolamentos para as paredes do tanque. Outro aspecto importante, é que o óleo é um bom indicador do funcionamento dos demais componentes que se encontram imersos no mesmo (SILVA, 2015).

O óleo isolante de um transformador deve apresentar rigidez dielétrica apropriada aos níveis de demanda elétrica impostas em pleno funcionamento do transformador. A presença de teor de água e de partículas no óleo reduzem drasticamente a sua rigidez dielétrica (SOUZA, 2018).

O método mais utilizado para o teste de rigidez dielétrica no Brasil consiste em dois eletrodos imerso no óleo a ter a sua rigidez verificada. Para a validação do teste a temperatura deverá ser estabilizada entre 25°C a 35°C. Além disso, a cuba e os eletrodos devem estar secos e bem limpos antes de serem preenchidas com o óleo, isso evitará imprecisões e distorções dos resultados.

Na Figura 12, mostra a cuba onde parte do óleo do transformador é colocado para realização. Como mencionado anteriormente, a cuba e os eletrodos devem estar em aptos para a realização do teste, também é de suma importância não haver contaminação ou algum agente poluidor como umidade ou poeira se misture ao óleo, podendo inviabilizar o teste.

Figura 10- Cuba de medidor de rigidez dielétrica com eletrodos



Fonte CORRÊA JUNIOR, 2010

De acordo com ABNT NBR 6869 (1989), a cuba deve ser transparente e com volume de óleo efetivo entre 300 e 900 ml. Os materiais utilizados para fabricação dos eletrodos deverão ser aço inoxidável, cobre, bronze ou latão, com aproximadamente 25 mm de diâmetro e 3,2 mm de espessura, os eletrodos devem ser distanciados entre si 2,5 mm. O ensaio consiste na aplicação de tensão com frequência de 60 Hertz nos eletrodos, e a tensão de ruptura é determinada no momento em que um arco franco ocorrer entre os eletrodos.

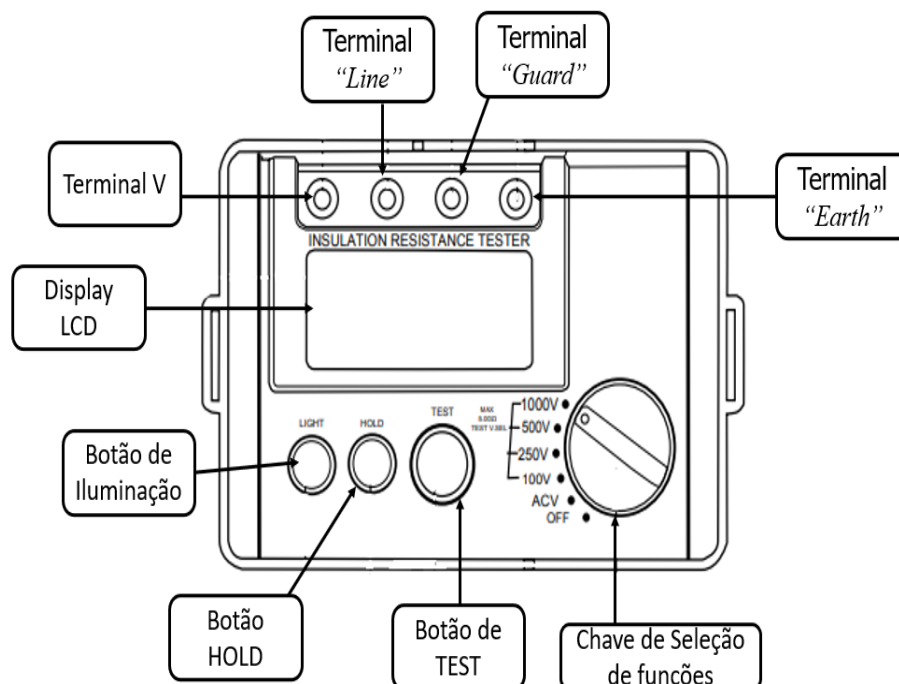
Por fim, informa-se que o valor mínimo de tensão que promove o rompimento da rigidez dielétrica de um material é denominado de tensão de ruptura. Naturalmente, o valor de ruptura não deve ser atingido para os níveis de tensão considerados normais, isso garante segurança ao funcionamento do transformador quando em operação (OLIVEIRA; COGO; ABREU, 1984).

## 2.8 Resistência de isolamento e índice de polarização

Apesar de não ser uma exigência da DIS NOR-036, o ensaio de resistência de isolamento é fundamental para certificar a segurança e funcionamento dos transformadores trifásicos. Este ensaio está entre os mais usuais em manutenções preventivas. Através dele, é possível verificar o nível de isolamento dos elementos isolantes e estruturas do equipamento analisado, nesse caso, o transformador trifásico.

A Figura 12 ilustra um Megômetro digital e seus principais componentes, equipamento que permite medir a resistência de isolação, possibilitando detectar falhas de isolação em equipamentos elétricos.

Figura 11- Descrição do painel frontal.



**Fonte:** Adaptado de MINIPA, 2012.

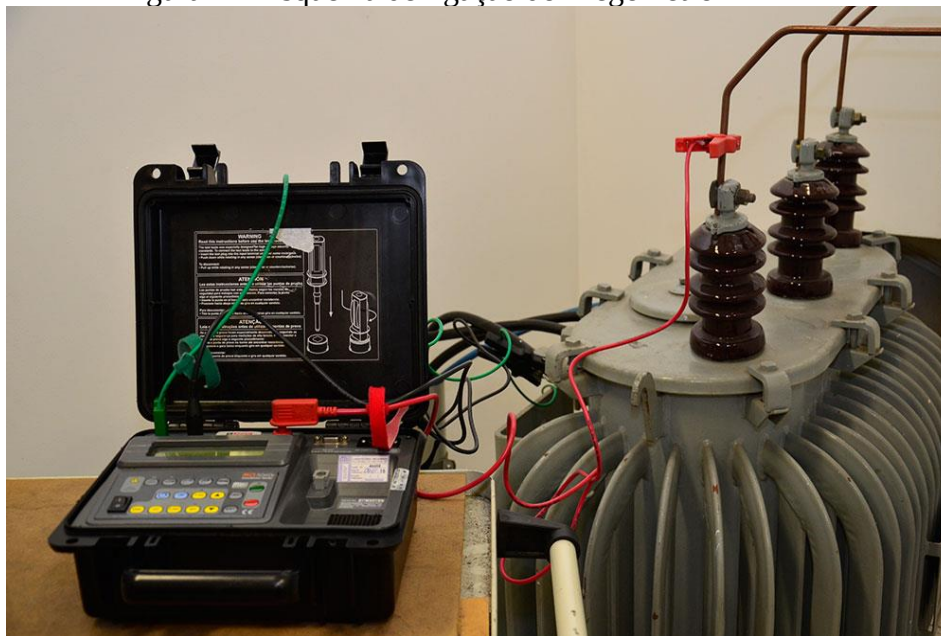
O princípio de funcionamento do Megômetro baseia-se na geração e aplicação de uma tensão CC, que alcança níveis de até 5000 V, entre dois pontos do equipamento analisado. Com isso, através da medição do fluxo de corrente ele é capaz de especificar, através da lei de Ohm, o valor de resistência entre os pontos analisados. Destaca que, em geral, o Megômetro pode, dependendo do modelo, realizar medições de resistência de isolação que variam entre mega ohm até giga ohm (ALMEIDA,2020).

Quando aplicado a análise de transformadores com níveis de tensões de 13,8 e 34,5 kV, o Megômetro deve apresentar tensão de saída de 10 kV CC (Corrente Contínua). Em geral, esse equipamento é composto por três terminais, dois com a função de excitação (normalmente, nas cores vermelha e preta) denominados de “*Line*” e “*Earth*” e o terminal guarda “*Guard*” (normalmente, na cor verde) (ENDLICH LEITE, 2017).

A Figura 13 mostra um dos diagramas de ligação para realização do teste. Devido ao longo período para realização desse teste, é necessário o profissional que irá realizar o teste certificar as condições do megaohmímetro, para não haver problemas com os resultados e haver

grandes diferenças nas condições naturais do ambiente como umidade e temperatura. Percebe-se na imagem que o *Line* está conectado ao primário e *Earth* no secundário. O aterramento é desconectado para o equipamento mensurar apenas o isolamento do transformador.

Figura 12- Esquema de ligação do Megômetro.



Fonte CORRÊA JUNIOR, 2010

Antes do ensaio, é necessário realizar algumas ações para posteriormente fazer o comissionamento do transformador, as principais são: verificar se o transformador a ser testado está totalmente desenergizado; inspecionar a existência de trincas; verificar a placa de identificação do transformador, aterrar o tanque e realizar a limpeza dos isoladores. Após inspeção, é necessário desconectar as ligações existentes nos terminais de AT e BT do transformador, inclusive as ligações de equipotencialização. Também é necessário medir a temperatura e umidade relativa do ar existentes no local de ensaio.

Segundo a ABNT NBR 5356-1 (2007), o transformador deverá permanecer 3 horas desenergizado antes do teste, estabelecendo a temperatura média do óleo é a mesma dos enrolamentos. É necessário realizar 03 medições no período de 10 minutos, a primeira com 30 segundos de duração, a segunda com 01 minutos e a última no final do período estabelecido.

A Figura 14 ilustra a verificação de resistência de isolamento de um transformador trifásico de distribuição. Durante o ensaio, foram utilizados equipamentos além do Megômetro, foram medidos o tempo de realização do ensaio, temperatura e umidade.

Figura 13- Medição de parâmetros para o comissionamento do teste.



Fonte: Autoria própria, 2021

A Equação 5 representa o índice de polarização, determinado como a razão entre as medições das resistências de isolamento após 10 minutos e 1 minuto. Este ensaio é de suma importância para verificar a condição de isolação entre os enrolamentos, e desses para a terra.

$$I_p = \frac{R_{10s}}{R_1} \quad (5)$$

Onde.

$I_p$  o índice de polarização;

$R_{10s}$  Valor da Resistência de enrolamento após 10 minutos;

$R_1$  Valor da resistência de enrolamento após 1 minuto.

Por ser um ensaio importante e usual, deve-se manter o registro dos laudos com os valores de resistência verificados. Assim, pode-se acompanhar a progressão desses valores com o tempo de uso dos equipamentos, identificando se o mesmo ainda apresenta valores adequados.

## 2.9 Referências normativas

Neste tópico são apresentadas todas as normas utilizadas para a elaboração do presente trabalho:



- NBR 5356-1, 2007: transformador de potência parte I: Generalidades.
- NBR 5356-2, 2007: Transformador de potência parte II: Aquecimento.
- NBR 5356-3, 2007: Transformador de potência parte III: níveis de isolamento, ensaios dielétricos e espaçamentos externos em ar.
- NBR 5440, 2014: Transformadores para redes aéreas de distribuição- requisitos.
- NBR 6869, 1989: Líquidos isolantes elétricos - Determinação da rigidez dielétrica.
- NBR 6939, 2018: Coordenação do isolamento - procedimento.
- DIS NOR-036, 2020: Fornecimento de Energia Elétrica em Média Tensão de Distribuição à Edificação Individual.

A seguir, são abordados os valores de referência utilizados para atestar a boa qualidade do transformador trifásico com isolação a óleo. Os dados apresentados foram extraídos das normas da ABNT e DIS NOR-036, sendo resumidos em tabelas para facilitar a identificação das faixas de valores admissíveis para os dados coletados nos ensaios abordados no presente trabalho.

### 3. Valores admissíveis nos ensaios

A COSERN estabelece faixas de valores admissíveis para alguns ensaios solicitados para o comissionamento de transformadores trifásicos com isolamento a óleo. A Tabela 1, retirada da DIS NOR-036, apresenta os valores de corrente de excitação, perda em vazio, perdas totais e tensão de curto-circuito para transformadores com potências nominais entre 15 até 300 kVA.

Tabela 1- Dados dos Transformadores Trifásicos 15 kV - Isolação a Óleo

| Dados de Transformadores Trifásicos 15 kV - ABNT NBR 5440/2014 |                      |                      |           |                        |                          |                      |                          |          |      |
|----------------------------------------------------------------|----------------------|----------------------|-----------|------------------------|--------------------------|----------------------|--------------------------|----------|------|
| Pot.Nom<br>(KVA)                                               | Corr Primária<br>(A) | Corr. Secundária (A) |           | Corr. Excitação<br>(%) | Perda em<br>vazio<br>(W) | Perdas<br>totais (W) | Tensão de curto-circuito |          |      |
|                                                                |                      | 220/127 V            | 380/220 V |                        |                          |                      | Min.                     | NBR 5440 | Máx  |
| 15                                                             | 0,63                 | 39,36                | 22,79     | 4,0                    | 85                       | 410                  | 3,24                     | 3,50     | 3,76 |
| 30                                                             | 1,26                 | 78,73                | 45,58     | 3,6                    | 150                      | 695                  |                          |          |      |
| 45                                                             | 1,88                 | 118,09               | 68,37     | 3,2                    | 195                      | 945                  |                          |          |      |
| 75                                                             | 3,14                 | 196,82               | 113,95    | 2,7                    | 295                      | 1.395                |                          |          |      |
| 112,5                                                          | 4,71                 | 295,24               | 170,93    | 2,5                    | 390                      | 1.890                |                          |          |      |
| 150                                                            | 6,28                 | 393,65               | 227,90    | 2,3                    | 485                      | 2.335                | 4,16                     | 4,50     | 4,84 |
| 225                                                            | 9,41                 | 590,47               | 341,85    | 2,1                    | 650                      | 3.260                |                          |          |      |
| 300                                                            | 12,55                | -                    | 455,80    | 1,9                    | 810                      | 4.080                |                          |          |      |

Fonte DIS NOR-036

Conforme visto na Tabela 1, a norma DIS NOR-036, 2020 define valores para alguns parâmetros como corrente de excitação, perda em vazio e totais. A corrente de excitação representa o valor de corrente de excitação do ramo magnetizando do transformador, podendo sendo dividida nas correntes de perda e de magnetização do núcleo do transformador (UMANS, 2014). A corrente de magnetização é igual ao valor de corrente primária do transformador quando o mesmo opera sem carga (ou em vazio) com tensão nominal em seu primário (OLIVEIRA; COGO; ABREU, 1984).

Como visto no Capítulo anterior, as perdas em vazio do Transformador se resumem nas perdas no núcleo de ferro e que se caracterizam pelas perdas produzidas pelas correntes Parasitas ou de Foucault e pela Histerese Magnética, portanto, essas perdas representam quando o transformador não está operando com carga. As perdas totais equivalem a soma das perdas em vazio e as perdas em cargas.

A Tabela 2 apresenta valores de referência para transformadores trifásicos isolados a óleo. Tais valores contidos na tabela foram retirados da ABNT NBR 5440 são utilizados para

o cálculo das perdas em vazio, perdas totais, corrente de excitação e tensão de curto-circuito. Estes valores são utilizados em subestação simplificada.

Tabela 2 -Valores de perdas, corrente de excitação e tensão de curto-circuito para transformadores trifásicos com tensão máxima de 15kV.

| Transformadores com tensão nominal de 10kV |            |                |             |                       |                          |
|--------------------------------------------|------------|----------------|-------------|-----------------------|--------------------------|
| Potência do transformador kVA              | Eficiência | Perda em vazio | Perda total | Corrente de excitação | Tensão de curto-circuito |
|                                            | Nível      | W              | W           | %                     | %                        |
| 15                                         | A          | 45             | 265         | 4                     | 3,5                      |
|                                            | B          | 50             | 290         |                       |                          |
|                                            | C          | 60             | 330         |                       |                          |
|                                            | D          | 75             | 370         |                       |                          |
|                                            | E          | 85             | 410         |                       |                          |
| 30                                         | A          | 75             | 445         | 3,6                   |                          |
|                                            | B          | 90             | 495         |                       |                          |
|                                            | C          | 110            | 560         |                       |                          |
|                                            | D          | 130            | 630         |                       |                          |
|                                            | E          | 150            | 695         |                       |                          |
| 45                                         | A          | 100            | 610         | 3,2                   |                          |
|                                            | B          | 115            | 670         |                       |                          |
|                                            | C          | 140            | 760         |                       |                          |
|                                            | D          | 170            | 855         |                       |                          |
|                                            | E          | 195            | 945         |                       |                          |
| 75                                         | A          | 150            | 895         | 2,7                   |                          |
|                                            | B          | 175            | 990         |                       |                          |
|                                            | C          | 215            | 1125        |                       |                          |
|                                            | D          | 255            | 1260        |                       |                          |
|                                            | E          | 295            | 1395        |                       |                          |
| 112,5                                      | A          | 195            | 1210        | 2,5                   |                          |
|                                            | B          | 230            | 1340        |                       |                          |
|                                            | C          | 285            | 1525        |                       |                          |
|                                            | D          | 335            | 1705        |                       |                          |
|                                            | E          | 390            | 1890        |                       |                          |
| 150                                        | A          | 245            | 1500        | 2,3                   |                          |
|                                            | B          | 285            | 1655        |                       |                          |
|                                            | C          | 350            | 1880        |                       |                          |
|                                            | D          | 420            | 2110        |                       |                          |
|                                            | E          | 485            | 2335        |                       |                          |
| 225                                        | A          | 330            | 2100        | 2,1                   |                          |
|                                            | B          | 380            | 2315        |                       |                          |
|                                            | C          | 470            | 2630        |                       |                          |
|                                            | D          | 560            | 2945        |                       |                          |
|                                            | E          | 650            | 3260        |                       |                          |
| 300                                        | A          | 410            | 2610        | 1,9                   |                          |
|                                            | B          | 475            | 2885        |                       |                          |
|                                            | C          | 585            | 3275        |                       |                          |
|                                            | D          | 700            | 3670        |                       |                          |
|                                            | E          | 810            | 4060        |                       |                          |

**Fonte:** ABNT NBR 5440, 2014.

As Tabelas 1 e 2 resumem os valores aceitáveis de parâmetros específicos permitidos aos transformadores trifásicos isolados a óleo, a serem utilizado no fornecimento de energia elétrica em Média Tensão (MT) de distribuição em edificações individuais, a não observância desses valores pode resultar na reprovação da solicitação de ligação. É importante destacar que os valores disponibilizados na DIS-NOR-036 estão de acordo com a NBR 5440 (2014), que

trata sobre transformadores para redes aéreas de distribuição, percebe-se que os valores da DIS NOR-036 correspondem aos valores da norma.

O ensaio de tensão de curto-circuito a 75°C deve apresentar valores próximos aos quando comparado aos ensaios de carga total e em vazio, logo os valores destes ensaios deverão ser conhecidos para melhor análise

Diferente dos ensaios abordados anteriormente, o ensaio de tensão suportável à frequência industrial não possui faixa de valores para mensurar o comportamento do transformador quando está submetido ao teste, sendo considerado satisfatório quando não ocorre nenhuma grande alteração na tensão de ensaio. Logo, pode-se afirmar que este é um ensaio com caráter mais qualitativo do que quantitativo.

O ensaio de rigidez dielétrica também é abordado na DISNOR-036, sendo usado para verificar a capacidade dielétrica do óleo isolante quando submetidos a tensões elétricas. Este ensaio é o único solicitado pela concessionária que mostra diretamente a qualidade do óleo utilizado no transformador. A Tabela 4 mostra valores admissíveis, unidade de medição e norma da ABNT que regula o ensaio de rigidez dielétrica dos óleos vegetal e mineral usados em transformadores trifásicos.

O ensaio de rigidez dielétrica é normalizado pela ABNT NBR 6869, 1989. Esta norma possui o objetivo de prescrever o método para determinar a rigidez dielétrica. Na realização do ensaio, a magnitude do ensaio deverá ser a tensão eficaz, este ensaio não é considerado parâmetro para qualidade da fabricação do óleo, mas mostra o nível de contaminação por água ou outros agentes poluentes.

Tabela 3- Característica do óleo isolante após o contato com o equipamento.

| Característica do óleo                  | Unidade | Vegetal   |           | Mineral   |           |
|-----------------------------------------|---------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|                                         |         | ABNT NBR  | Valor     | ABNT NBR  | Valor     |
| Rigidez dielétrica (eletrodo de calota) | KV      | 6869      | $\geq 45$ | 6869      | $\geq 45$ |
| Rigidez dielétrica (eletrodo de disco)  | KV      | IEC 60156 | $\geq 30$ | IEC 60156 | $\geq 30$ |

Fonte ABNT NBR 5440, 2014.

A ABNT NBR 5440 (2014) apresenta os valores de referência para as características elétricas do óleo isolante do tipo vegetal e mineral. Ela abrange também os ensaios de eletrodo de calota e eletrodo de disco que podem ser usados para obtenção da rigidez dielétrica desses óleos. Vale destacar que os ensaios contidos na Tabela 4 são rotineiros em atividades de manutenção, sendo importante o arquivamento dos valores obtidos para acompanhamento da vida útil do transformador, permitindo verificar a necessidade ou não de manutenção corretiva ou de substituição do transformador, visando o funcionamento satisfatório e seguro desse equipamento.

Tabela 4-Tolerância nos valores de ensaios.

| <b>Características especificadas</b>          | <b>Tolerância</b> |
|-----------------------------------------------|-------------------|
| Impedência de curto-circuito dos enrolamentos | $\pm 7,5 \%$      |
| Perdas em vazio                               | $\pm 10 \%$       |
| Perdas totais                                 | $\pm 6 \%$        |
| Relação de tensão em qualquer                 | $\pm 0,5 \%$      |
| Corrente de excitação                         | $\pm 20 \%$       |

**Fonte** ABNT NBR 5440, 2014.

As principais normas ABNT utilizadas neste trabalho foram: NBR 5356 (2007) e NBR 5440 (2014). A ABNT NBR 5356 é constituída por oito partes, mais utilizadas para a realização dos ensaios abordados neste trabalho e pela DIS NOR-036 são: a parte 1 que possui o título generalidades, a parte 2 aborda aspectos importantes na elevação de temperatura e os ensaios que assegura o funcionamento dos transformadores em elevadas temperaturas e tem como título Aquecimento. Aborda os níveis de isolamento e o principal ensaio encontrado nesta parte é o de tensão suportável à frequência industrial. A norma ABNT NBR 5440 (2014) aborda os parâmetros para transformadores para redes de distribuição, as normas apresentadas neste trabalho foram elaboradas de modo a assegurar o pleno funcionamento dos transformadores.

A Tabela 5 evidencia os ensaios normalmente realizados em transformadores trifásicos com isolamento a óleo e as respectivas normas ABNT que tratam sobre as metodologias de ensaios aplicáveis ao mesmo.

Tabela 5- Condições para ensaios

| <b>Descrição</b>                                | <b>Método do Ensaio</b> |
|-------------------------------------------------|-------------------------|
| Impedância de curto-circuito e perdas em cargas | ABNT NBR 5356-1         |
| Perdas em vazio e corrente de excitação         | ABNT NBR 5356-1         |
| Tensão suportável à frequência industrial       | ABNT NBR 5356-3         |
| Elevação da temperatura                         | ABNT NBR 5356-2         |
| Ensaio do óleo isolante                         | ABNT NBR 5440           |

**Fonte** ABNT NBR 5440, 2014.

Ao longo da pesquisa bibliográfica, verificou-se a ausência de valores admissíveis para o ensaio de resistência de isolamento e índice de absorção em normas da ABNT e concessionárias. Apesar de ser um ensaio com grande utilização em transformadores, os valores para análise dos índices de polarização foram encontrados na norma internacional IEEE 43-2013. Verificou-se que os valores do índice para transformadores pouco diferem dos valores de referência usados para analisar motores elétricos. A Tabela 6 apresenta os valores de referência para o ensaio de índice de polarização.

Tabela 6- Resultados possíveis para o índice de Absorção.

| <b>Índice de Polarização</b> |     |     |              |
|------------------------------|-----|-----|--------------|
| 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:** IEEE Std-43, 2013.

#### **4. Considerações finais**

Os transformadores trifásicos são utilizados em inúmeras aplicações e responsáveis pelo fornecimento de energia em níveis de tensões requeridas por inúmeros clientes. Apesar de ser um equipamento normalmente estudado em cursos de Engenharia Elétrica e Eletrotécnicos, os ensaios aplicáveis a verificação da qualidade desse equipamento são, normalmente, desconhecidos pelos futuros profissionais que pretendem atuar desenvolvendo projetos de subestações ou em atividades de manutenção envolvendo esse tipo de ambiente.

Assim, o presente trabalho apresentou os ensaios utilizados para caracterizar a qualidade e segurança dos transformadores trifásicos com isolamento a óleo, em especial aqueles que fornecem as informações solicitadas pela DIS-NOR-036 para ligação de subestação simplificada.

Ao longo do presente trabalho, buscou-se identificar os ensaios utilizados no comissionamento de transformadores trifásicos isolados a óleo, identificando material científico e normativo que contemplar-se tal aplicação. Destaca-se que a realização desses ensaios fornece informações que atestam a qualidade da energia fornecida aos consumidores e evita interrupções desnecessárias.

## 5. Referências bibliográficas

ABNT NBR 5356-1: Associação Brasileira de Normas Técnicas, **TRANSFORMADOR DE POTÊNCIA PARTE I: GENERALIDADES**, 2007

ABNT NBR 5356-2: Associação Brasileira de Normas Técnicas, **TRANSFORMADOR DE POTÊNCIA PARTE II: AQUECIMENTO**, 2007.

ABNT NBR 5356-3: Associação Brasileira de Normas Técnicas, **TRANSFORMADOR DE POTÊNCIA PARTE III: NÍVEIS DE ISOLAMENTO, ENSAIOS DIELÉTRICOS E ESPAÇAMENTOS EXTERNOS EM AR**, 2007.

ABNT NBR 5440: Associação Brasileira de Normas Técnicas, **TRANSFORMADORES PARA REDES AÉREAS DE DISTRIBUIÇÃO- REQUISITOS**, 2014.

ABNT NBR 6939: Associação Brasileira de Normas Técnicas, **COORDENAÇÃO DO ISOLAMENTO - PROCEDIMENTO**, 2018.

ALMEIDA, Augusto César Albuquerque de. Relatório de estágio - Eletro Farias. 2020. 39f. (Relatório de Estágio Supervisionado) Curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica, Centro de Engenharia Elétrica e Informática, Universidade Federal de Campina Grande - Paraíba - Brasil, 2020. Disponível em: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/20890>

CARDOSO, B. P. **EFICIÊNCIA DE TRANSFORMADORES DE DISTRIBUIÇÃO**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Itajubá – 2005.

CHAPMAN, S. J. **FUNDAMENTOS DE MÁQUINAS ELÉTRICAS**. 5. ed. Porto Alegre: AMGH, 2013. 700p.

CORRÊA JÚNIOR, **COMISSIONAMENTO DE TRANSFORMADORES 13.8/500 kV DA USINA HIDRELÉTRICA DE TUCURUÍ** 2010. 111 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica. Universidade Federal do Pará, 2010.



ENDLICH Leite, Soni **ENSAIOS DE COMISSONAMENTO DE TRANSFORMADOR - UMA PROPOSTA DE PADRONIZAÇÃO DE PROCEDIMENTO/** Endlich Leite, Soni. - Rio de Janeiro: UFRJ/ Escola Politécnica, 2017.

IEEE Standard 43: *Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Electric Machinery, 2nd Edition*, IEEE, 2013.

ILTECH, Innovative Transformers. **LABORATÓRIOS DE ENSAIOS: EXPECTATIVAS E REALIDADE.** Disponível em: <http://iltech.com.br/blog/laboratorios-de-ensaios-expectativas-e-realidade/>. Acesso em: 14 de out. 2021.

KOSOW, I. **MÁQUINAS ELÉTRICAS E TRANSFORMADORES.** Editora Globo. 1986.

MARTIGNONI, Alfonso. **Transformadores.** 8ª edição. Editora Globo. São Paulo, 1991.

MINIPA, **MEGÔMETRO DIGITAL Digital Insulation Tester Megômetro Digital MI-2552.** 2012

MOREIRA, Rogério José Ramos. **DIELÉTRICOS LÍQUIDOS: UM PARALELO ENTRE NORMAS E FENÔMENOS FÍSICOS.** 2000. 123 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade de São Paulo, 2000.

OLIVEIRA, José Carlos; COGO, João; ABREU, José Policarpo. **TRANSFORMADORES TEORIA E ENSAIOS.** 1.ed. Itajubá: Edgard Blucher, 1984. v. 1, 188 p.

OSTERMANN, Roberto. **DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE GERENCIAMENTO DE TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA INSTALADOS NO SISTEMA DE TRANSMISSÃO DA COMPANHIA ESTADUAL DE ENERGIA ELÉTRICA.** 2006. 194 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006. Disponível em: <http://tede2.pucrs.br/tede2/handle/tede/3010> >. Acesso em: 30 out 2021

PAULINO, Marcelo. **ENSAIOS DE RESISTÊNCIA DE ISOLAMENTO E DE RIGIDEZ DIELÉTRICA.** 2014. Disponível em: <https://www.osetoreletrico.com.br/wp->

[content/uploads/2014/08/ed-102\\_Fasciculo\\_Cap-VII-Manutencao-de-transformadores.pdf](#). Acesso em: 12 out. 2021

SILVA, Paulo Roberto da. **OTIMIZAÇÃO DO PROJETO DE TRANSFORMADORES DE DISTRIBUIÇÃO QUE EMPREGAM NÚCLEO AMORFO E ÓLEO VEGETAL ISOLANTE**. 82 p Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Maria, RS, 2015.

SIMÃO, Pollyana Holanda. **ANÁLISE DE PERDAS DE TRANSFORMADORES À VAZIO NA REDE DE DISTRIBUIÇÃO DA COSERN**. 57 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, , Mossoró, 2020

SOUZA, Lucas Arruda de. **TÉCNICAS PREDITIVAS DE MANUTENÇÃO ELÉTRICA EM TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA**. 2018. 110 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Ufrj, Rio de Janeiro, 2018.

UMANS, S. D. **Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley**. 7. ed. Porto Alegre: AMGH, 2014. 708 p.