

**FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA
CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

NICOLAS SOUTO DOS SANTOS REIS

**METODOLOGIA PARA O CÁLCULO DAS FORÇAS EXERCIDAS EM
UM TRANSFORMADOR SOBRE CURTO-CIRCUITO**

**VOLTA REDONDA
2020**

**FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA
CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**METODOLOGIA PARA O CÁLCULO DAS FORÇAS EXERCIDAS EM
UM TRANSFORMADOR SOBRE CURTO-CIRCUITO**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Elétrica do UniFOA como requisito à obtenção do título de bacharel em engenharia elétrica.

Aluno:

Nicolas Souto dos Santos Reis

Orientador: Prof. D. Sc. Hélio de Paiva Amorim
Júnior

**VOLTA REDONDA
2020**

FOLHA DE APROVAÇÃO

Aluno:
Nicolas Souto dos Santos Reis

Título da monografia: METODOLOGIA PARA O CÁLCULO DAS FORÇAS
EXERCIDAS EM UM TRANSFORMADOR SOBRE CURTO-CIRCUITO

Orientador:
Prof. D. Sc. Hélio de Paiva Amorim Júnior

Banca Avaliadora:

Professor Orientador
Hélio de Paiva Amorim Júnior, Doutor, UniFOA

Professor Avaliador
Edson de Paula Carvalho, Mestre, UniFOA

Professor Avaliador
Péricles Guedes Alves, Doutor, UniFOA

DEDICATÓRIA

Aos familiares, amigos, namorada e aos profissionais que me auxiliaram nesta caminhada acadêmica.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente a Deus por ter me iluminado nesta difícil trajetória, e me guiou para o sucesso. Ao orientador D. Sc. Hélio de Paiva Amorim Júnior, que acreditou em mim desde o começo, e me proporcionou a oportunidade de trabalhar em uma instituição de excelência, o CEPEL. Ao Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL), local no qual obtive experiência única, e jamais serão esquecidos os ensinamentos lá aprendidos. Em especial, um agradecimento aos meus companheiros de laboratório Cristiano Sobreira Xavier, Cláudio Cerqueira Siqueira, Marcelo Guimarães Rodrigues e Mário Melo Gonçalves.

RESUMO

O sistema elétrico de potência (SEP) é um sistema que consiste de três etapas, a geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. Nestas etapas muitos equipamentos são usados de forma intensa, e um deles é o transformador. O transformador possui uma característica de elevar ou abaixar tensões ou correntes, e neste trabalho o objeto de teste é um transformador de potência, tendo em vista sua classificação, observa-se que há diversos outros tipos de transformadores, que se diferem desde a funcionalidade até suas características físicas, também abordadas brevemente neste trabalho. Observa-se que, de acordo com o mencionado acima, os transformadores possuem intenso uso, e também são usados bem próximos de grandes circulações de pessoas e por este motivo devem fornecer grande segurança, para isso ensaios normalizados internacionalmente são efetuados nos equipamentos presentes do SEP, ensaios de rotina, de tipo e especiais mais precisamente em transformadores. Para o objeto de teste será aplicado o ensaio de suportabilidade a curto-circuito de acordo com a IEC 60076-5, com fonte monofásica e trifásica, e ao final dos ensaios serão verificados as análises medidas nos divisores de tensão, derivador de corrente e dos dinamômetros instalados entre os enrolamentos do transformador e suportes fixos.

Palavras chaves: curto-circuito; transformador; forças.

ABSTRACT

The electrical power system is a system that consists of three stages, the generation, transmission and distribution of electrical energy. In these stages, a lot of equipment is used intensively, and one of them is the transformer. The transformer has a characteristic of raising or lowering voltages or currents, and in this work the test object is a power transformer, in view of its classification, it is observed that there are several other types of transformers, which differ from functionality to its physical characteristics, also briefly addressed in this work. It is observed that, according to the above, the transformers have intense use, and are also used very close to large circulations of people and for this reason they must provide great safety, for this reason internationally standardized tests are carried out on the electrical power system present equipment, routine, type and special tests more precisely on transformers. For the test object, the short-circuit withstand test in accordance with IEC 60076-5, with single-phase and three-phase source, will be applied. At the end of the tests, the analyzes measured on the voltage dividers, current shunt and dynamometers between the windings of the transformer and fixed supports.

Key words: short-circuit; transformers; forces.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 Objetivo	14
1.2 Metodologia	14
1.3 Descrição	14
2 TRANSFORMADOR DE POTÊNCIA	16
2.1 Introdução e importância	16
2.2 Descrição	16
2.3 Forma construtiva	18
2.4 Tipos de núcleo	20
2.5 Tipos de enrolamentos	21
2.6 Tipos de Isolantes	22
2.6.1 Isolação sólida	22
2.6.2 Líquido isolante	23
2.7 Transformador Real	23
3 CURTO-CIRCUITO	26
3.1 Estresses eletromecânico e tipos de falhas em transformadores	30
3.2 Falhas devido a Forças Radiais	33
3.3 Falhas devido a Forças Axiais	37
4 ENSAIOS EM TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA	41
4.1 Condições gerais para os ensaios de rotina, tipo e especiais	41
4.2 Ensaios de rotina	42
4.3 Ensaio de tipo	43
4.4 Ensaios Especiais	43
4.4.1 Ensaio de Capacidade de resistir a curtos-circuitos	44
5 METODOLOGIA PARA MEDIR AS FORÇAS DINÂMICAS CAUSADAS POR CURTOS-CIRCUITOS EM TRANSFORMADORES	49
5.1 Equipamentos usados e arranjo do circuito	49
5.1.1 Transformador de Potência	52
5.1.2 Transformador de Corrente	53
5.1.3 Transmissor e receptor óptico	53
5.1.4 Dinamômetro	54

5.1.5 Divisor de corrente	55
5.1.6 Divisor de tensão.....	56
5.1.7 Fibra Ótica.....	57
6 PESQUISA EXPERIMENTAL.....	59
7 CONCLUSÃO.....	65
8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	66

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Trafo elementar alimentando carga colocada em seu secundário.....	18
Figura 2 – Esquema de um Trafo de núcleo envolvido monofásico (a) Vista superior (b) Vista Frontal.....	19
Figura 3 – Esquema de um Trafo de núcleo envolvente monofásico (a) Vista superior (b) Vista Frontal.....	20
Figura 4 – Enrolamento concêntrico ou tubular.....	21
Figura 5 – Enrolamento intercalado	22
Figura 6 – Modelo de um transformador real	24
Figura 7 – Circuito monofásico.....	27
Figura 8 - Forma de onda da corrente durante um curto-circuito	28
Figura 9 – Esforços eletrodinâmicos que atuam sobre enrolamentos durante um curto-circuito.....	31
Figura 10 – Regra de Fleming.....	32
Figura 11 – Força exercida pelo campo magnético entre dois condutores	33
Figura 12 – Forças Radiais sobre os enrolamentos em alta e baixa tensão	34
Figura 13 - Falhas em transformadores devido a força radial: (a) “Curvatura forçada” (forced buckling); (b) “Curvatura livre” (free Buckling).....	35
Figura 14 – Forças Axiais sobre os enrolamentos em alta e baixa tensão	38
Figura 15 - Falhas em transformadores devido a força axial: (a) Curvatura dos condutores (Bending); (b) Inclinação dos condutores (Tilting).	38
Figura 16 – circuito com fonte monofásica em H1xH3.....	49
Figura 17 – circuito com fonte monofásica em H2xH1	50
Figura 18 – circuito com fonte monofásica em H3xH2.....	50
Figura 19 – circuito com fonte trifásica H1xH2xH3.....	51
Figura 20 – Dinamômetro digital de tração e compressão	54
Figura 21 - Ampliando a escala de um instrumento com uma resistência de derivação ou "shunt"	55
Figura 22 – Divisor de corrente	56
Figura 23 – Divisor de tensão misto	57
Figura 24 – Detalhes de uma fibra ótica.....	58
Figura 25 – Transformador a seco	59

Figura 26 – Esquema para ensaio vista frontal	62
Figura 27 – Esquema com vista lateral	63
Figura 28 - Especificação do dinamômetro	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Temperaturas de referência	42
Tabela 2 – Valores máximos admissíveis para temperatura média de cada enrolamento após o curto-circuito	46
Tabela 3 – Valores para o fator $K \times \sqrt{2}$	47
Tabela 4 – Impedâncias de curto-circuito.....	48
Tabela 5 – Aplicações com fonte monofásica	51
Tabela 6 – Aplicações com fonte trifásica	52

LISTA DE SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

Al – Alumínio

AN - Air Natural

AT - Alta Tensão

BT - Baixa Tensão

CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Elétrica

CST – Controle Secundário de Tensão

GNO - Grão Não Orientado

GO - Grão Orientado

IEC - International Electrotechnical Commission

LT - Linha de Transmissão

NBR – Norma Técnica

SEP - Sistema Elétrico de Potência

TC - Transformador de Corrente

TP - Transformador de Potencial

1 INTRODUÇÃO

O Sistema elétrico de potência tem a função de fornecer energia elétrica adequada e com qualidade para usuários, sejam eles grandes ou pequenos. Para que a energia elétrica chegue as indústrias, residências, lojas entre outros, ela passa por um longo caminho após o processo de geração da energia, este processo é denominado de transmissão e durante este processo a energia precisa ser constantemente transformada com a finalidade de adequar aos diferentes tipos de distribuição.

A transformação da energia para seus diferentes níveis, altos ou baixos, é feita por equipamentos elétricos chamados de transformadores de potência e estes, como qualquer outro equipamento elétrico, precisam garantir o funcionamento sem apresentar defeitos e operar em tempo integral com segurança, independente das adversidades apresentadas no meio externo, e por sua vez, devem suportar a demais surtos também existentes na linha que alimenta o transformador. (COSTA, 2011)

Para garantir que o equipamento não ocasionará um possível acidente causado por um surto de tensão ou de corrente na linha que o alimenta, é estabelecido por norma internacional, que os transformadores de potência devem passar por ensaios que simulam estes distúrbios afetando-os diretamente, e por fim, caso não sofram nenhum tipo de deformação e não apresentam nenhum perigo decorrente das adversidades do meio externo, são validados para serem usados nas linhas de geração, transmissão de distribuição, além também, da comercialização dos mesmos. Um desses ensaios, é o ensaio de suportabilidade de curto circuito, determinado pela norma internacional IEC 60076-5 Ability to withstand short-circuit (2006) e pela NBR 5356-5, e diz que transformadores de potência devem ser colocados ao ensaio de capacidade de suportar à um curto-circuito antes de um fabricante liberá-lo para sua comercialização. Transformadores trifásicos devem ser alimentados por uma fonte trifásica. Se isto não for possível, uma alimentação monofásica pode ser usada. Para enrolamentos ligados em triângulo, a alimentação monofásica deve ser conectada entre os dois vértices do triângulo, e a tensão durante o ensaio tem que ser igual à tensão entre fases durante um ensaio trifásico.

Para enrolamentos ligados em estrela, a tensão monofásica é aplicada entre um terminal de linha e os outros dois terminais de linha interligados (NBR 5356-5:2015).

1.1 Objetivo

Este estudo tem como objetivo criar um método para verificar e comparar os esforços dinâmicos ou até mesmo possíveis deformações recorrentes dos ensaios de suportabilidade de curto circuito em transformadores de potência, com alimentação trifásica e monofásica e avaliar se o ensaio feito com a fonte de alimentação monofásica leva o transformador ao seu máximo potencial de esforços dinâmicos como diz a norma internacional IEC 60076-5.

1.2 Metodologia

Para desenvolvimento e realização do projeto, será feito um planejamento teórico para parametrizar os diferentes níveis do ensaio a ser feito no transformador e futuramente aplicar na prática a metodologia e então verificar e analisar os valores medidos nos equipamentos de medição, e posteriormente realizar um comparativo entre as diferentes fontes de alimentação, através de medidores ligados diretamente ao transformador.

1.3 Descrição

Os conceitos gerais de um transformador de potência podem ser encontrados no capítulo 2 com os respectivos temas: Introdução e importância, descrição, forma construtiva, tipos de núcleos, tipos de enrolamentos, tipos de isolamentos, e no capítulo 3 sobre estresses eletromecânicos e tipos de falhas em transformadores. No capítulo 4 é especificado, com poucos detalhes, os ensaios realizados nos transformadores de potência e suas importâncias e possui os seguintes temas: Condições gerais para os ensaios de rotina, tipo e especial, ensaios de rotina, ensaios de tipo e ensaios especiais. É descrito brevemente a respeito dos equipamentos usados para medição das forças, tensão e corrente no capítulo 5. O ensaio de suportabilidade de curto-circuito em transformadores de potência, usado para o desenvolvimento da pesquisa e o método para analisar curtos-circuitos em

sistema elétricos de potência é descrito com mais detalhes no capítulo 4.4.1 de acordo com as normas internacionais vigentes. O teste realizado pode ser visto no capítulo 6, tendo sua conclusão no capítulo 7.

2 TRANSFORMADOR DE POTÊNCIA

2.1 Introdução e importância

O transformador é um equipamento extremamente essencial e importante no sistema elétrico e nos respectivos circuitos existentes no SEP. Servindo basicamente para modificar níveis de tensão e de corrente elétrica, porém mantendo a potência elétrica quase que constante o tempo todo, o transformador tem seu papel fundamental na sociedade operando desde pequenos valores de transformação, para sinais em aparelhos eletrônicos residenciais, até grandes e potentes valores, para sinais em sistemas de geração, transmissão e distribuição (CARVALHO, 2011).

Os transformadores operam de acordo com a lei de Faraday-Neumann-Lenz, ou seja, os conceitos de indução eletromagnética. O equipamento foi criado em 1831 por Michael Faraday. Sua estrutura construtiva é simples, possuindo peças móveis e podendo ter diferentes tamanhos de acordo com a potência desejada (UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA, 20?).

Estes equipamentos são largamente usados em diversas áreas, seja na geração ou transmissão de energia elétrica, ou mesmo em pequenos consumidores, como lojas e residências (CHAPMAN, 2013).

Após longos anos de estudo, diversos tipos de transformadores foram desenvolvidos, e possuem muitas semelhanças entre si, porém todos com suas peculiaridades e objetivos. Um desses tipos é o transformador de potência, no qual será o foco do trabalho em questão.

Outros importantes tipos também citados neste trabalho são os transformadores de corrente, que servem como proteção e como medição, sendo este último emprego utilizado na pesquisa.

2.2 Descrição

Como citado acima, os transformadores são utilizados para elevar ou abaixar os níveis de tensão e de corrente, e esta relação pode ser feita de acordo com sua construção. A relação pode ser descrita abaixo:

Sua característica física é composta por um núcleo que possui dois ou mais enrolamentos sendo usualmente chamados de primário e secundário, e sua relação de transformação pode ser dado pelo número de espiras. Para determinar o valor transformado, deve-se levar em consideração também o fluxo magnético, que flui através da superfície do núcleo, e os valores de entrada (valores aplicados no primário do transformador). Podemos observar isso com a lei de Faraday abaixo:

Dado o número de voltas N_1 da bobina 1 e N_2 o número de voltas da bobina 2. Temos então:

$$E_1 = -N_1 \frac{d\Phi_B}{dt} \quad (2.2.a)$$

Como a tensão de entrada é conhecida e o fluxo magnético é igual nas duas bobinas, coloca-se em 2.2.b:

$$E_2 = -N_2 \frac{d\Phi_B}{dt} = N_2 \frac{E_1}{N_1} \quad (2.2.b)$$

E a razão entre as tensões depende somente da razão entre o número de voltas das bobinas, nota-se em 2.2.c:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (2.2.c)$$

É importante citar que diversos defeitos e problemas podem envolver o equipamento internamente e externamente, e qualquer componente citado anteriormente pode ser a causa deles. Alguns desses defeitos serão citados mais a frente neste trabalho, e por isso todos os dados de operação, manutenção e do projeto devem ser consultados a fim de verificar, analisar ou evitar as possíveis falhas proveniente de esforços dinâmicos causados por um curto-circuito que é o tipo de falha mais relevante.

Tendo em vista os valores discutidos neste tópico, abaixo é possível analisar todas as características citadas, e melhor compreender seu espaço de atuação.

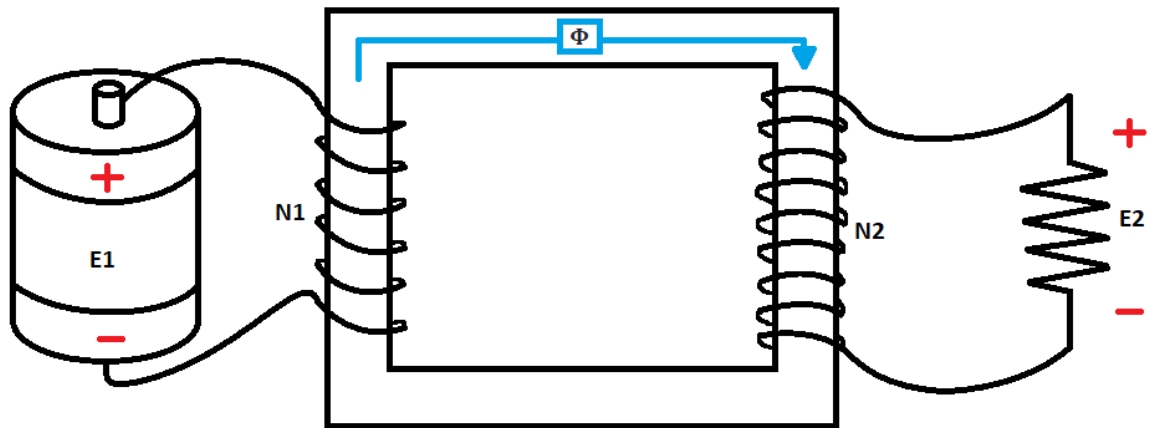


Figura 1 - Trafo elementar alimentando carga colocada em seu secundário
Fonte: Autor

Onde:

E_1 = Tensão de entrada

N_1 = Número de espiras do primário

Φ = Fluxo magnético

N_2 = Número de espiras do secundário

E_2 = Tensão de saída

2.3 Forma construtiva

A forma construtiva pode ser definida como:

A fase de construção e montagem do transformador é uma das mais importantes. Cada fabricante possui uma forma particular para a sua construção, mas os aspectos básicos são essencialmente os mesmos, o que nos permite definir um padrão construtivo.

A primeira consideração a ser feita num projeto de transformadores é seu desempenho elétrico, que consiste em definir a sua relação de tensões, sua potência nominal, e, conseqüentemente, a quantidade de fluxo magnético necessário para satisfazer o projeto (SILVA e ALVES, 2009).

Na fabricação dos transformadores, algumas características construtivas podem ser observadas. Uma delas é quanto ao núcleo, já que o mesmo pode ser

visto de duas maneiras, com núcleo sendo envolvido pela bobina, ou com o núcleo envolvendo as bobinas, mais usualmente chamados de núcleo envolvido e núcleo envolvente. A diferença basicamente é o custo de fabricação e sua eficiência, sendo o último mais caro, porém mais eficiente. Nas figuras 2 e 3 podemos ver basicamente como é cada um dos tipos.

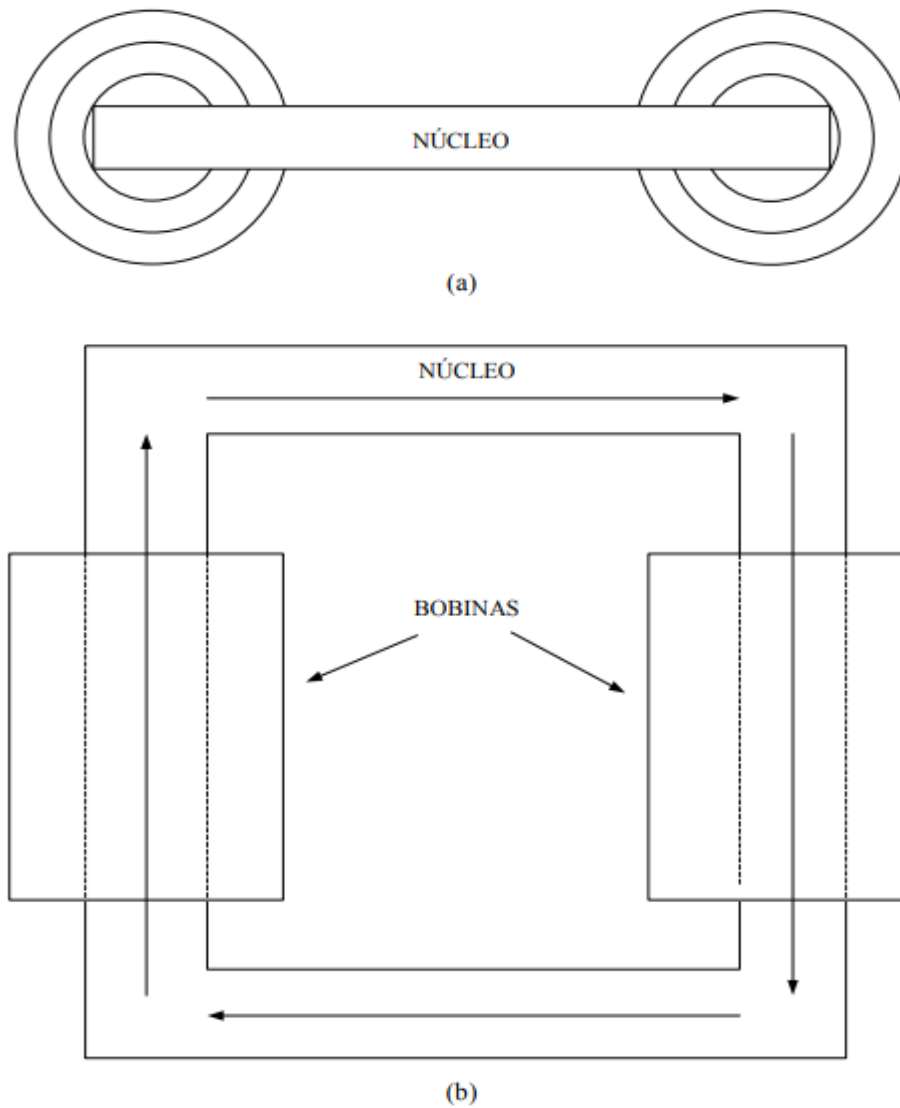


Figura 2 – Esquema de um Trafo de núcleo envolvido monofásico (a) Vista superior (b) Vista Frontal
Fonte: (SILVA e ALVES, 2009)

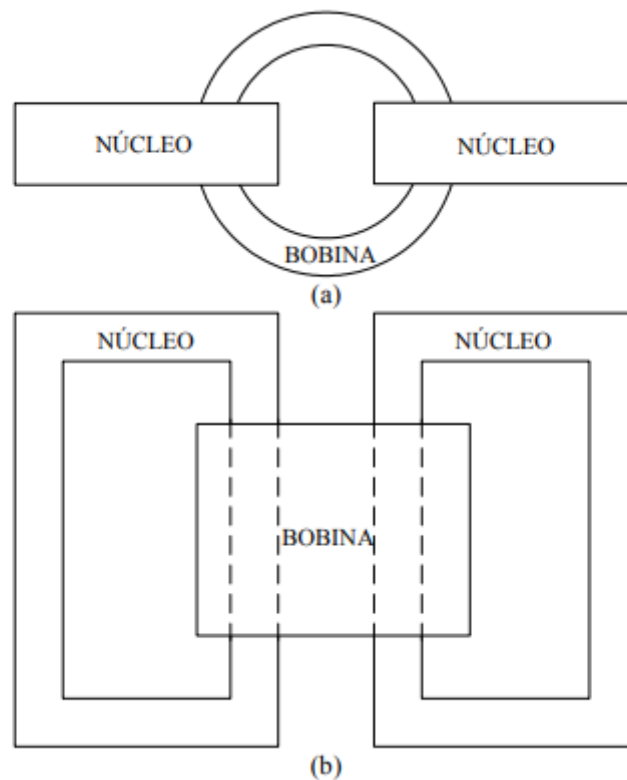


Figura 3 – Esquema de um Trafo de núcleo envolvente monofásico (a) Vista superior (b) Vista Frontal
 Fonte: (SILVA e ALVES, 2009)

2.4 Tipos de núcleo

O núcleo tem como função servir de superfície para a circulação do fluxo magnético, e para isso diversos materiais e formatos são utilizados para se obter o melhor caminho para o fluxo (ANTÔNIO FERREIRA, 2011).

Os materiais usados nos transformadores são chamados de materiais macios, e os mais utilizados são as ligas de aço, especialmente o aço baixo carbono, aço-silício não orientado e aço silício GO.

O aço baixo carbono é usado hoje em dia apenas no núcleo de pequenos motores, devido a sua baixa resistividade, aumentando assim as perdas no núcleo fabricados com este material.

Desenvolvido em 1900 o aço-silício de GNO se tornou, na época, o principal material utilizado nas máquinas elétricas, porque a junção do silício ao ferro aumentou em grande escala os valores da resistividade elétrica e da permeabilidade elétrica. Passado algum tempo, foi desenvolvido o aço-silício com grãos orientados, e assim aumentou ainda mais a resistividade elétrica e a permeabilidade magnética,

e se tornou o material principal na fabricação de núcleos de transformadores (ANTÔNIO FERREIRA, 2011).

2.5 Tipos de enrolamentos

Assim como no núcleo do transformador, os enrolamentos podem ter diferentes tipos quanto a sua construção e material utilizado. Geralmente os materiais mais utilizados hoje em dia é o alumínio e o cobre eletrolítico e o formato encontrado nos transformadores é o concêntrico ou intercaladas.

Bobinas fabricadas de forma concêntrica, os enrolamentos de alta e baixa tensão são encontrados um dentro do outro, separadas por um material isolante. Este tipo de configuração diminui consideravelmente a dispersão do fluxo magnético. São usadas na grande maioria dos transformadores de distribuição e transmissão (GALVÃO, 2014).

Já nos enrolamentos intercalados, as bobinas são divididas em camadas no sentido axial, intercalando com alta tensão e baixa tensão.

A escolha para o tipo de enrolamento se dá por diversos motivos, seja pela rigidez mecânica para suportar curto-circuito, perdas no enrolamento e custo de fabricação.

Abaixo, nas figuras 4 e 5, podemos ver os exemplos referente as diferentes disposições dos enrolamentos:

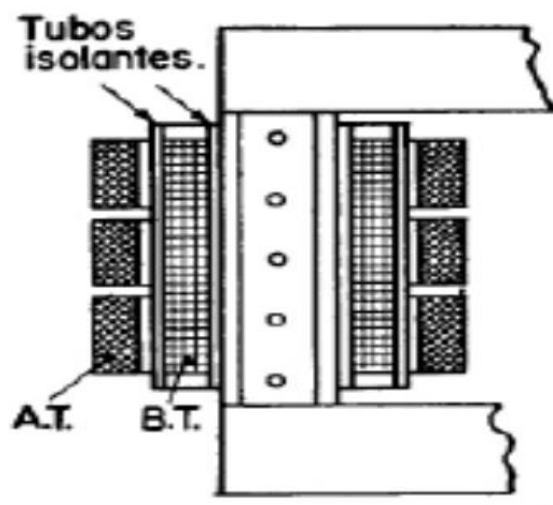


Figura 4 – Enrolamento concêntrico ou tubular

Fonte: (GALVÃO, 2014)

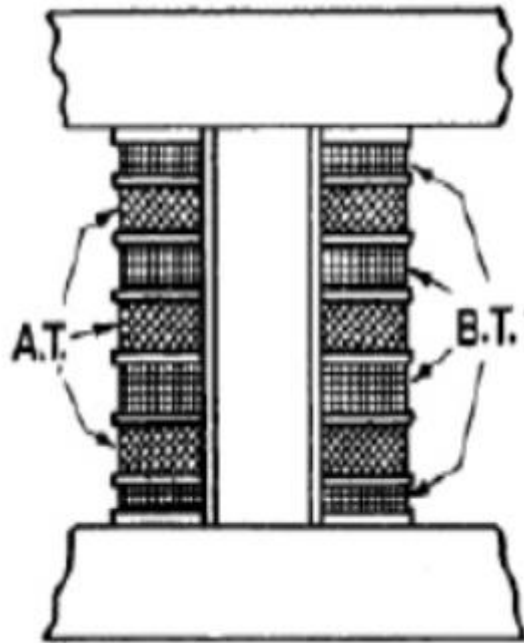


Figura 5 – Enrolamento intercalado
Fonte: (GALVÃO, 2014)

2.6 Tipos de Isolantes

O isolamento nos transformadores pode ser do tipo seco ou com líquido isolante. Isolamento das peças internas e externas é de extrema importância física nos transformadores, pois com eles é possível evitar curtos-circuitos entre condutores dos enrolamentos, serve também para isolar o enrolamento da carcaça do transformador, além do mais, para dispersão térmica auxiliando para evitar perdas elétricas e magnéticas, pois o aquecimento excessivo do núcleo é causado pelas correntes de Foucault (THIAGO, 2019).

Existem diversos materiais e tipos de isolantes, podendo ser líquido ou sólido. Abaixo serão citados alguns tipos de ambos mais usados na fabricação dos transformadores.

2.6.1 Isolação sólida

O principal material sólido utilizado é o papel e o papelão, produzidos através da celulose. As cadeias celulósicas são divididas em amorfas (cerca de 30%) e

crystalinas (cerca de 70%) e a junção de ambas formam microfibrilhas e estas por fim se tornam fibras, e é com isso que o papel possui alta resistividade mecânica.

Muitos defeitos ou perdas no rendimento das máquinas se dão por conta do mal funcionamento ou estado dos isolantes sólidos, que visto o que foi citado acima, são de extrema importância para o melhor funcionamento das máquinas elétricas. A degradação da celulose pode se dar por hidrólise, ação da água sobre o papel, por oxidação, e por pirólise, que é o aumento da temperatura do papel (THIAGO, 2019).

2.6.2 Líquido isolante

Sendo o mais utilizado e obtido através do petróleo, o óleo isolante mineral é um hidrocarboneto, e existem três tipos sendo eles os hidrocarbonetos parafínicos, hidrocarbonetos naftênicos e hidrocarbonetos aromáticos, todos possuindo algumas diferenças em suas composições químicas, porém todos altamente estáveis e com baixa viscosidade para sua melhor função dielétrica e transmissão de calor. Além do mais os líquidos isolantes devem possuir baixa atividade química pelo motivo do líquido não poder agredir os materiais em contato com o mesmo (COLLARES LAURENTINO, 2003).

2.7 Transformador Real

Para um transformador real, diversos fatores devem ser considerados, entre eles a resistência dos enrolamentos, a permeabilidade magnética limitada e a dispersão do fluxo magnético causando as correntes de Foucault. Podemos citar também a existência de componentes harmônicas e a saturação do núcleo (KOSOW, 2005).

Estão presentes nos transformadores duas perdas constantes, perda por corrente parasita e perda por histerese, essas perdas se dão quando um material magnético é submetido a uma magnetização.

Quando um transformador é submetido a uma alimentação no seu primário uma corrente flui no circuito primário quando não há nada ligado em seu secundário, essa corrente é usualmente chamada de corrente de excitação, e esta pode ser dividida em 2 partes são elas perdas no núcleo e magnetização. Abaixo podemos analisar as perdas totais no núcleo em 2.7.a (AMORIM, Thiago 2017).

$$P_N = P_H + P_P \quad (2.7.a)$$

Onde:

P_N = Perdas totais no núcleo (W)

P_H = Perdas por histerese (W)

P_P = Perdas por corrente parasita (W)

Podemos observar na figura 6 um modelo de circuito equivalente de um transformador.

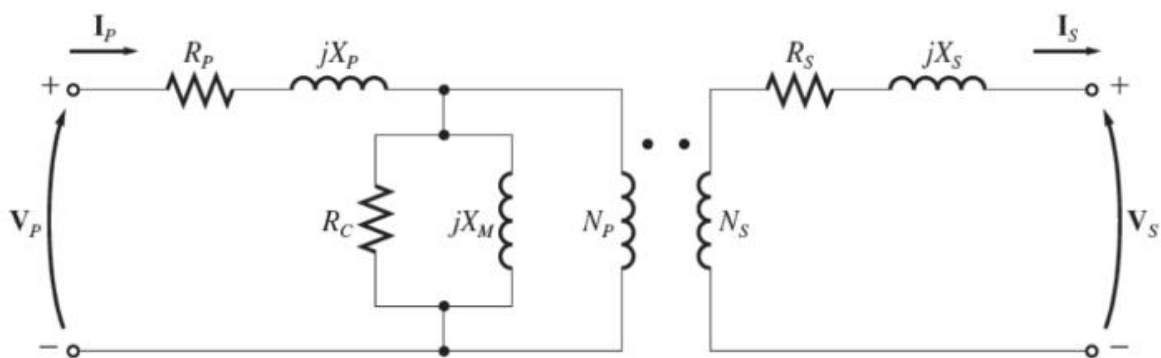


Figura 6 – Modelo de um transformador real

Fonte: (CHAPMAN, 2013)

É importante notar que os componentes vistos na figura 6 causam queda de tensão logo conclui-se que a tensão de entrada (V_p) é maior que a tensão no enrolamento primário, e com isso a relação de transformação de tensão primária para secundária não é exatamente proporcional ao número de espiras somente.

Com a magnitude do fluxo magnético com limite de um quarto do período e a alimentação de entrada sendo tensão alternada, a forma da onda se dá pelo quociente entre o valor eficaz e o valor médio. A equação final é observada em 2.7.b. (CHAPMAN, 2013)

$$E = 4,44 f N B_{m\acute{a}x} A \quad (2.7.b)$$

Onde:

E = Tensão induzida no enrolamento (V)

f = Frequência (Hz)

N = Número de espiras no primário

$B_{m\acute{a}x}$ = Densidade de fluxo máxima (T)

A = Área do núcleo do transformador (m^2)

3 CURTO-CIRCUITO

Curto-circuito pode ser definido como um efeito acima do normal da passagem da corrente elétrica em um circuito devido à queda brusca da impedância. Como definição mais clara, podemos citar que um contato entre condutores sob potenciais diferentes, configura-se como um curto-circuito. Tal contato pode ser direto (franco ou através de impedância) ou indireto (através de arco voltaico) (GOMES, 2012).

As causas mais frequentes da ocorrência de curtos-circuitos em sistemas de potência são: Descargas atmosféricas, falhas em cadeias de isoladores, envelhecimento de materiais, ação do ambiente (vento etc.), queda de árvore sobre linhas aéreas entre outros (GOMES, 2012).

O curto-circuito pode ser classificado em três tipos: Curto-circuito trifásico, curto-circuito monofásico (fase-terra) e curto-circuito bifásico (fase-fase, fase-fase-terra).

O tipo de falta mais grave, é o trifásico, porém é o menos provável, devido à condição de proporcionar maiores níveis de corrente de curto-circuito, considera-se esta como a pior hipótese e a que deve ser adotada, para os cálculos de adequabilidade dos transformadores projetados em relação à sustentação aos esforços dinâmicos (AMORIM, Thiago 2017).

Nas ocorrências de falta que englobam transformadores de potência, ao se efetuar a análise, devem ser relevados os modelos correspondentes (núcleo envolvido ou núcleo envolvente) e o tipo de fechamento nos enrolamentos.

É definida como falta assimétrica o somatório da componente contínua e da componente alternada da corrente no instante em que é aplicado a tensão sobre uma carga é isto acontece devido ao ângulo da tensão no instante da aplicação. Na figura 7 é possível analisar um circuito monofásico para demonstração da função 3.1.a no domínio do tempo.

$$E(t) = Ri(t) + L \frac{di(t)}{dt} \quad (3.1.a)$$

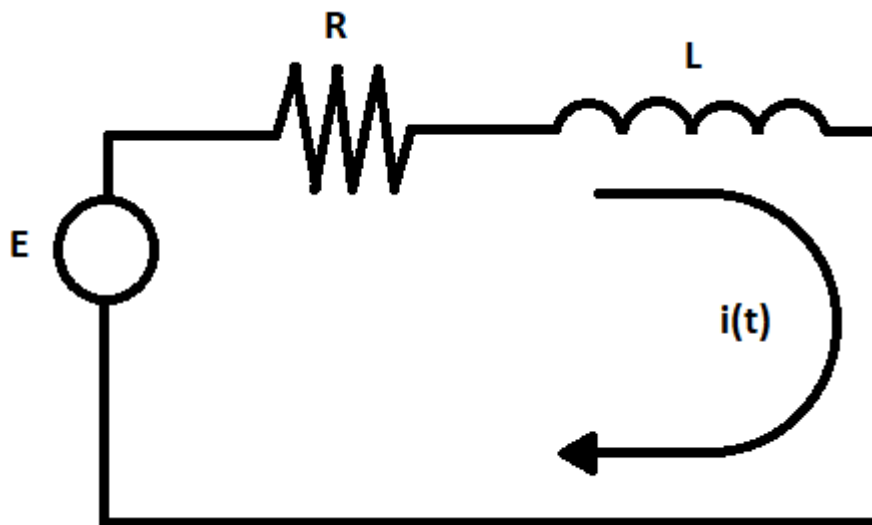


Figura 7 – Circuito monofásico
Fonte: Autor

Onde:

E = Tensão ($V_m \cdot \sin(\omega t + \alpha)$)

R = Resistência

L = Indutância

$i(t)$ = Corrente em função do tempo

Solucionando-se a equação diferencial ordinária, a corrente de curto-circuito no domínio do tempo é determinada pela equação em 3.1.b.

$$i(t) = \sqrt{2}|I_{cc_s}| \left[\sin(\omega t + \alpha - \theta) + \sin(\alpha - \theta) e^{-\frac{R}{L}t} \right] \quad (3.1.b)$$

As componentes alternada e contínua da corrente podem ser definidas pelas fórmulas 3.1.c e 3.1.d respectivamente. É importante ressaltar que o ângulo da impedância do curto-circuito e o tempo que ocorre a falta são extremamente relevantes para calcular o valor da magnitude do curto-circuito.

$$I_{AC}(t) = \sqrt{2}|I_{cc_s}| \sin(\omega t + \alpha - \theta) \quad (3.1.c)$$

$$I_{DC}(t) = \sqrt{2}|I_{cc_s}| \sin(\alpha - \theta) e^{-\frac{R}{L}t} \quad (3.1.d)$$

Onde:

$I_{AC}(t)$ = Corrente transitória (A)

$I_{DC}(t)$ = Corrente de regime permanente (A)

I_{CC_S} = Corrente de curto-circuito (A)

ω = Frequência angular (radianos/s)

α = Ângulo de tensão

θ = Ângulo de impedância

R = Resistência (Ω)

L = Indutância (H)

Somando as componentes transitória e permanente obtém-se a resultante da corrente de curto-circuito assimétrico, podendo ser visto na figura 8.

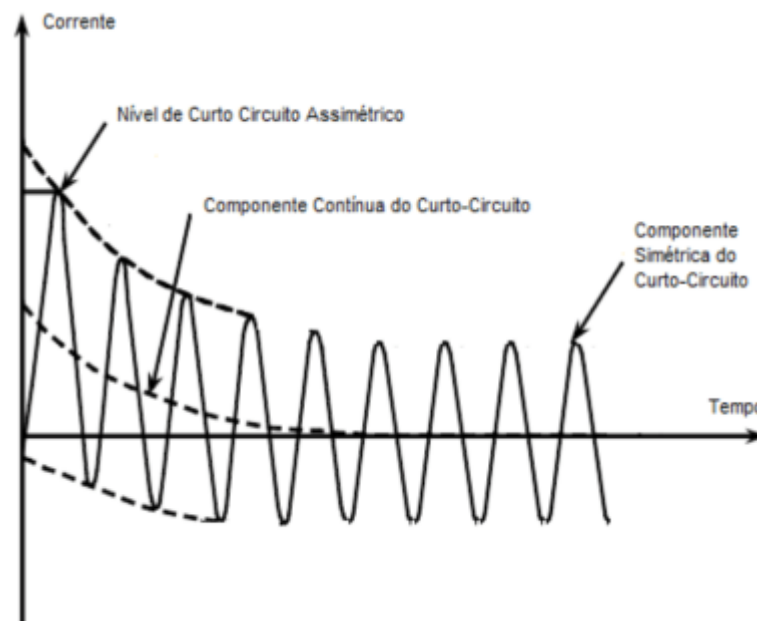


Figura 8 - Forma de onda da corrente durante um curto-circuito

Fonte: (SKM SYSTEMS ANALYSIS, 2006)

Para analisar os tipos de curtos-circuitos, os sistemas trifásicos são divididos em sistemas equilibrados com circuitos de sequência positiva, negativa e zero. A fim de facilitar os cálculos para descobrir a magnitude do curto-circuito, as impedâncias

da linha de transmissão, dos reatores, cabos e transformadores não variam com o tempo. Ao considerar que todo o sistema é ideal e não sofre alterações com o tempo, portanto somente a sequência positiva proporciona uma situação real (GOMES, 2012).

Abaixo as equações referem-se ao método das componentes simétricas, também conhecida como teorema de Fortescue.

Expressão analítica para um sistema polifásico desequilibrado em termos de tensão é dado, sendo os valores 0,1 e 2 representados respectivamente por sequência zero, positiva e negativa por 3.2.a (GOMES, 2012):

$$\begin{aligned}
 \overline{V}_a &= \overline{V}_a^0 + \overline{V}_a^1 + \overline{V}_a^2 + \dots + \overline{V}_a^i + \dots + \overline{V}_a^{n-1} \\
 \overline{V}_b &= \overline{V}_b^0 + \overline{V}_b^1 + \overline{V}_b^2 + \dots + \overline{V}_b^i + \dots + \overline{V}_b^{n-1} \\
 \overline{V}_c &= \overline{V}_c^0 + \overline{V}_c^1 + \overline{V}_c^2 + \dots + \overline{V}_c^i + \dots + \overline{V}_c^{n-1} \\
 &\cdot \\
 &\cdot \\
 &\cdot \\
 \overline{V}_n &= \overline{V}_n^0 + \overline{V}_n^1 + \overline{V}_n^2 + \dots + \overline{V}_n^i + \dots + \overline{V}_n^{n-1}
 \end{aligned} \tag{3.2.a}$$

No sistema trifásico 3.2.b:

$$\begin{aligned}
 \overline{V}_a &= \overline{V}_a^0 + \overline{V}_a^1 + \overline{V}_a^2 \\
 \overline{V}_b &= \overline{V}_b^0 + \overline{V}_b^1 + \overline{V}_b^2 \\
 \overline{V}_c &= \overline{V}_c^0 + \overline{V}_c^1 + \overline{V}_c^2
 \end{aligned} \tag{3.2.b}$$

Coloca-se todas as tensões em função de apenas uma, no exemplo foi colocado a fase A, e para isso é necessário uma correção da defasagem entre as fases podendo ser observado em 3.2.c (GOMES, 2012):

$$\begin{aligned}
\overline{V}_a &= \overline{V}_a^0 + \overline{V}_a^1 + \overline{V}_a^2 \\
\overline{V}_b &= \overline{V}_a^0 + a^2 \overline{V}_a^1 + a \overline{V}_a^2 \\
\overline{V}_c &= \overline{V}_a^0 + a \overline{V}_a^1 + a^2 \overline{V}_a^2
\end{aligned} \tag{3.2.c}$$

Onde:

$$a = 1 \angle 120^\circ$$

Na forma matricial em 3.2.d:

$$\begin{bmatrix} \overline{V}_a \\ \overline{V}_b \\ \overline{V}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \overline{V}^0 \\ \overline{V}^1 \\ \overline{V}^2 \end{bmatrix} \tag{3.2.d}$$

A fim de obter as sequencias em função do sistema balanceado faz-se o inverso da segunda matriz observado em 3.2.e (GOMES, 2012):

$$\begin{bmatrix} \overline{V}^0 \\ \overline{V}^1 \\ \overline{V}^2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \overline{V}_a \\ \overline{V}_b \\ \overline{V}_c \end{bmatrix} \tag{3.2.e}$$

3.1 Estresses eletromecânicos e tipos de falhas em transformadores

Transformadores de potência estão sujeitos a diversas falhas, seja por falta de manutenção nos seus isoladores, por ações adversas na linha de transmissão e o mais importante por um curto-circuito, que no geral, causam intensos esforços

mecânicos internamente e externamente ao transformador. Tais falhas podem inutilizar a máquina ou causar graves acidentes e por isso devem ser calculados seus potenciais ofensivos sobre o transformador.

As forças internas e externas podem ser dadas em duas, forças radiais e forças axiais, e ambas podem causar danos irreversíveis ao transformador ou outro equipamento ligado a ele. (JUNIOR A. J. P, SARAIVA, *et al.*, 2011)

Esforços causados por curto-circuito é no geral o mais importante e para melhor compreensão do comportamento e de como se manifestam é preciso rever conceitos da Lei de Ampère, fluxo disperso e força magnética. Uma análise pode ser vista na figura 9 com relação a ação das forças incidentes em um transformador submetido a um curto-circuito. (MASCHIO, MEDEIROS, *et al.*, 20?).

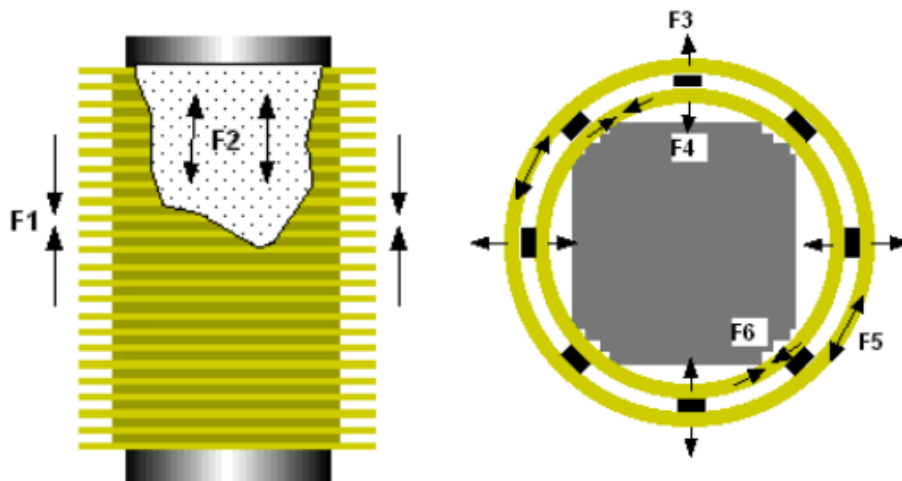


Figura 9 – Esforços eletrodinâmicos que atuam sobre enrolamentos durante um curto-circuito

Fonte: (BECHARA, 2010)

Sendo:

F1 = Compressão Axial

F2 = Expansão Axial

F3 e F5 = Expansão Radial

F4 e F6 = Compressão Radial

Possibilitando, a partir de uma corrente, calcular o campo magnético, a lei de Ampère correlaciona proporcionalmente a corrente circulante em um condutor com a

magnitude do campo que o envolve devido a presença da corrente elétrica. A lei de Ampère para o caso imerso em vácuo é dada em 4.a (JUNIOR A. J. P, SARAIVA, *et al.*, 2011).

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \cdot \vec{I}_{env} \quad (4.a)$$

É importante notar que o conhecimento da direção da corrente e do campo magnético é fundamental, e usa-se a regra de Fleming para isso, podendo ser visto na figura 10.

Onde:

μ_0 = Permeabilidade magnética

\vec{B} = Campo magnético

\vec{I}_{env} = Corrente circulante

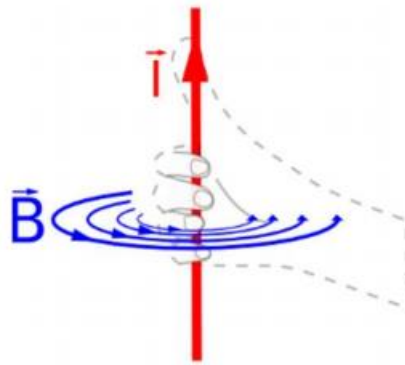


Figura 10 – Regra de Fleming
Fonte: (MASCHIO, MEDEIROS, *et al.*, 20?)

Considerando um transformador real, o fluxo magnético criado pela corrente de fase nos enrolamentos não consegue manter conexão total com o núcleo do transformador e isso gera uma dispersão do campo magnético e se tratando de transformadores o fluxo disperso por um enrolamento afeta outro enrolamento e vice versa. E com a presença do campo magnético sobre a corrente, uma força magnética surge (MASCHIO, MEDEIROS, *et al.*, 20?).

A magnitude da força magnética consiste na velocidade das partículas, da quantidade de carga de cada partícula e do campo magnético, expresso pela equação 4.b (MASCHIO, MEDEIROS, *et al.*, 20?).

$$\vec{F} = q \cdot \vec{v} \times \vec{B} \quad (4.b)$$

Deve-se considerar também a força entre dois condutores com corrente circulante imersos em fluxo magnético contrário representado pela figura 11.

Onde:

\vec{F} = Força magnética

q = Quantidade de carga

\vec{v} = Velocidade das partículas

\vec{B} = Campo magnético

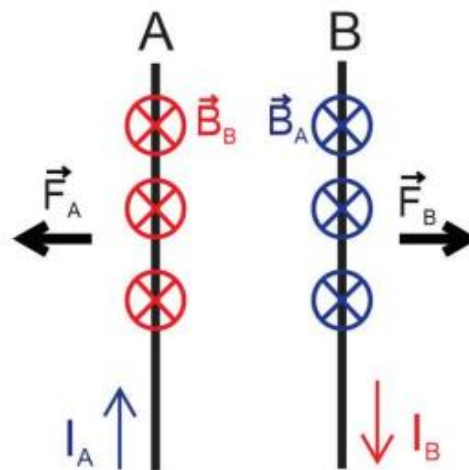


Figura 11 – Força exercida pelo campo magnético entre dois condutores

Fonte: (MASCHIO, MEDEIROS, *et al.*, 20?)

3.2 Falhas devido a Forças Radiais

Considerando que o fluxo pode se dispersar de forma axial uma força radial surge e conseqüentemente infere sobre os enrolamentos do transformador. Para melhor análise deve-se considerar as características físicas do equipamento, já que para um núcleo envolvido a propensão dos esforços eletrodinâmicos é comprimir o

enrolamento interno e expandir o enrolamento externo. Com essa força, algumas falhas podem ocorrer e são chamadas de Forced Bucking (Curvatura Forçada) e Free Bucking (Curvatura Livre).

Na figura 12 é possível visualizar as forças atuando sobre os enrolamentos e na figura 13 existem 2 enrolamentos que sofreram das falhas citadas acima (MASCHIO, MEDEIROS, *et al.*, 20?).

Onde:

⊙ = Significa que a corrente está “saindo”

⊗ = Significa que a corrente está “entrando”

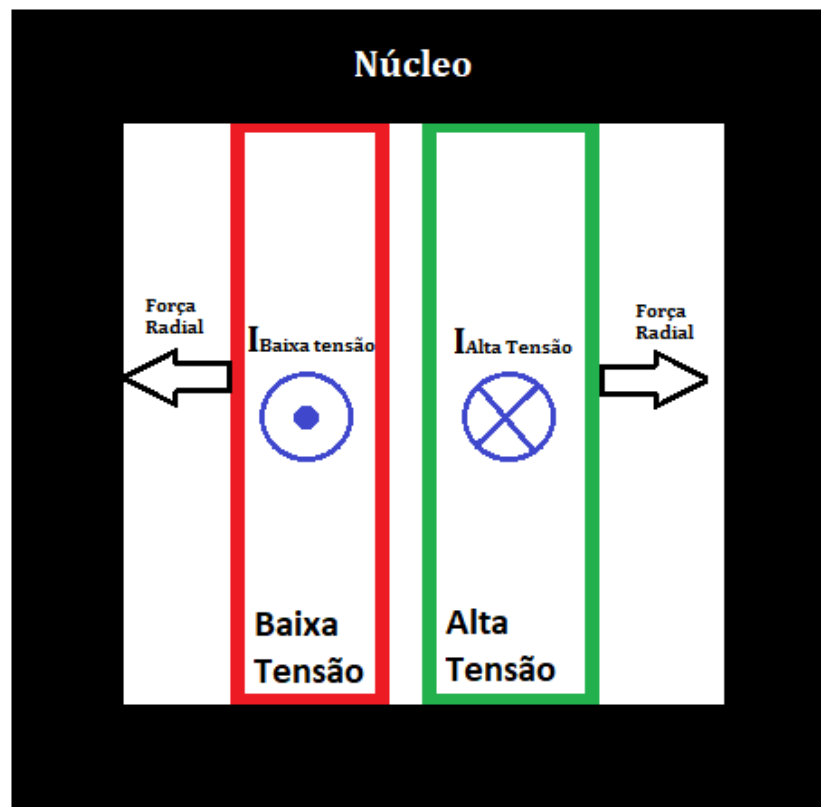


Figura 12 – Forças Radiais sobre os enrolamentos em alta e baixa tensão
Fonte: Autor

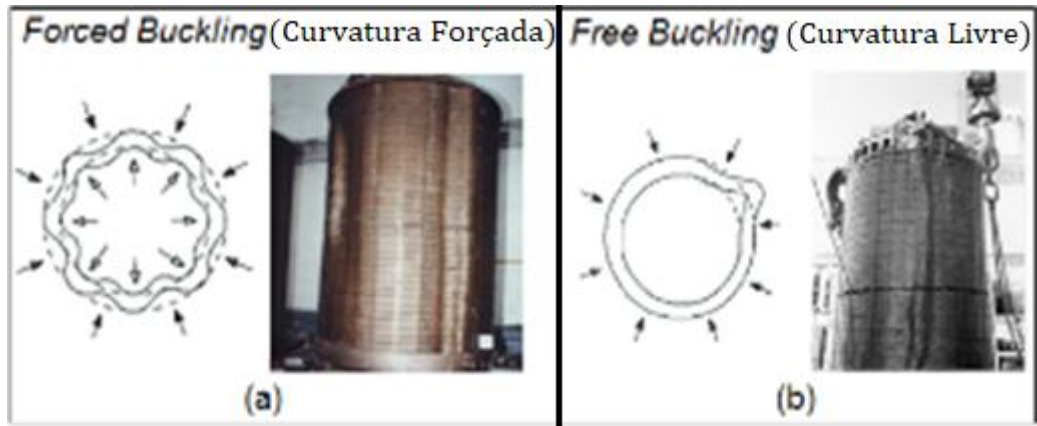


Figura 13 - Falhas em transformadores devido a força radial: (a) “Curvatura forçada” (forced buckling); (b) “Curvatura livre” (free Buckling).

Fonte: (JUNIOR A. J. P, SARAIVA, *et al.*, 2011)

Para fim de cálculo , com base na expressão das forças de Lorentz, relaciona-se que a densidade de força em um volume da bobina é igual ao produto vetorial da densidade da corrente pela densidade do fluxo. Esta expressão pode ser vista em 4.1.a (JUNIOR A. J. P, SARAIVA, *et al.*, 2011).

$$\vec{f} = \vec{J} \times \vec{B} \quad (4.1.a)$$

Onde:

$$\vec{f} = \text{Densidade volumétrica de força magnética [N/m}^3 \text{]}$$

$$\vec{J} = \text{Densidade superficial de corrente [N/m}^2 \text{]}$$

$$\vec{B} = \text{Densidade de fluxo magnético de dispersão [T].}$$

Para análise, será adotado um transformador com enrolamento concêntrico, e em 4.1.b e 4.1.c é observado a equação referente à força radial total e média sobre um enrolamento, respectivamente (JUNIOR A. J. P, SARAIVA, *et al.*, 2011).

$$Fr = \frac{2\pi^2(nI_{max})^2 D_m}{h} 10^{-7} [\text{N}] \quad (4.1.b)$$

$$F_{rmed} = \frac{2\pi(nI_{max})^2 D_m}{h} 10^{-7} [\text{N}] \quad (4.1.c)$$

Além disso , é possível calcular a força radial distribuída em cada espira retirando de 4.1.c o diâmetro do enrolamento e é expressa por 4.1.d (JUNIOR A. J. P, SARAIVA, *et al.*, 2011).

$$F_{rad-dist} = \frac{2\pi.n.I_{max}^2}{h} 10^{-7} [\text{N}] \quad (4.1.d)$$

Tendo conhecimento de como calcular a força radial o estresse médio pode ser calculado também, relacionando a força radial distribuída multiplicada pelo diâmetro do enrolamento sobre duas vezes a seção transversal do condutor em metro quadrado, expressa em 4.1.e (JUNIOR A. J. P, SARAIVA, *et al.*, 2011).

$$\sigma_{r-medio} = \frac{F_{rad-dist} \cdot D_m}{2 \cdot a_c} [\text{N}/\text{m}^2] \quad (4.1.e)$$

Voltando agora para análise das falhas, anexando o conhecimento das expressões acima , correlaciona-se o estresse radial ao efeito buckling.

Em 4.1.f é determinado a equação para o estresse crítico em enrolamentos sem suportes axiais, chamado de free buckling (JUNIOR A. J. P, SARAIVA, *et al.*, 2011).

$$\sigma_{crit-free-buckling} = \frac{E \cdot e^2}{D_m^2} [\text{N}/\text{m}^2] \quad (4.1.f)$$

Para os enrolamentos que possuem suportes axiais outra falha, e já descrito acima e observado pela figura 13, é apresentada, chamada de efeito forced buckling. a equação referente a magnitude do estresse forced buckling é visto em 4.1.g e o valor médio em 4.1.h (JUNIOR A. J. P, SARAIVA, *et al.*, 2011).

$$\sigma_{crit-forced-buckling} = \frac{E(\delta) \cdot (x \cdot e^2) \cdot Esp_a^2}{12 D_m^2} \left[\frac{\text{N}}{\text{m}^2} \right] \quad (4.1.g)$$

$$\sigma_{medio-buckling} = \frac{F_{rad-dist} \cdot L_{ax}^2}{2 \cdot b \cdot e^2} \text{ [N/m}^2\text{]} \quad (4.1.h)$$

Onde:

n = Número de espiras do enrolamento.

h = Altura do enrolamento [m].

D_m = Diâmetro do enrolamento [m].

I_{max} = Máxima corrente de curto-circuito [A].

a_c = Seção transversal do condutor [m²].

E = Elasticidade do material [N/m²]

e = Dimensão radial do condutor [m].

$E(\delta)$ = Módulo de elasticidade incremental ao valor crítico [N/m²].

x = Constante do fabricante para espessura equivalente do condutor.

Esp_a = Quantidade de suportes axiais.

L_{ax} = Distância entre os suportes axiais [m].

b = Dimensão axial do condutor [m].

3.3 Falhas devido a Forças Axiais

Tendo a mesma ideia da força radial, a axial difere-se em alguns pontos, sendo eles, surgir a partir do fluxo radial e conseqüentemente o efeito sobre os enrolamentos é contrário, ou seja, passa a comprimir uns aos outros. Levando em consideração essas forças atuantes, observado na imagem 14, diferentes falhas podem acontecer no transformador, o bending e o tilting e podem ser notados no exemplo da figura 15 (JUNIOR A. J. P, SARAIVA, *et al.*, 2011).

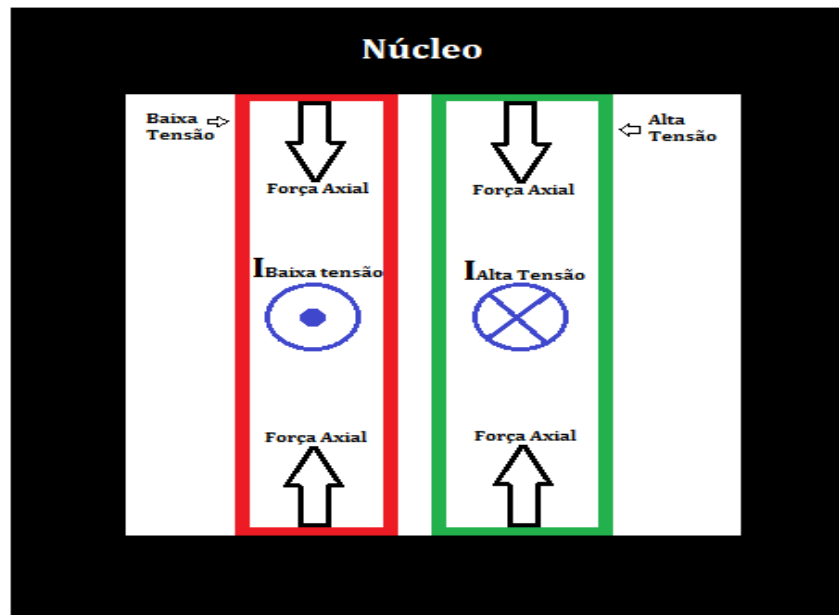


Figura 14 – Forças Axiais sobre os enrolamentos em alta e baixa tensão
Fonte: Autor

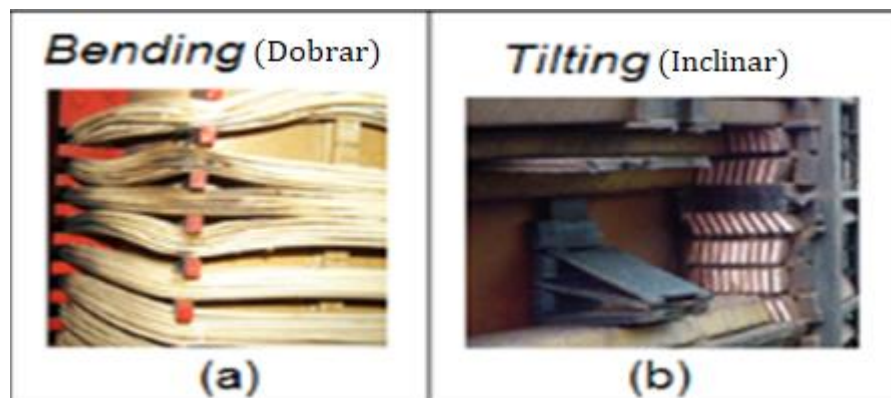


Figura 15 - Falhas em transformadores devido a força axial: (a) Curvatura dos condutores (Bending); (b) Inclinação dos condutores (Tilting).
Fonte: (JUNIOR A. J. P, SARAIVA, *et al.*, 2011)

Analisando o efeito do fluxo radial sobre os enrolamentos, a força axial causada é menos precisa quanto aos cálculos do que a força radial, porém ainda muito importante de ser verificada. Visto na figura 14, nota-se que a força compressiva atua em ambos enrolamentos, e o somatório delas é dada por 4.2.a (JUNIOR A. J. P, SARAIVA, *et al.*, 2011)

$$F_{cTotal} = \frac{2\pi^2 \cdot (nI_{max})^2 D_{mt} \cdot 10^{-7}}{h^2} \left[d_0 + \frac{d_i + d_e}{3} \right] [N] \quad (4.2.a)$$

Uma importante informação é que de acordo com estudos e testes os estresses nas extremidades da bobina são quase iguais, sendo expressa por 4.2.b.

$$F_a = 0,366 \cdot q \cdot F \cdot \log\left(\frac{1+4 \cdot d_1^2}{w^2}\right) [\text{N}] \quad (4.2.b)$$

As equações 4.2.c e 4.2.d referem-se respectivamente a largura do ducto do transformador e a força F da equação 4.2.b.

$$d_1 = d_0 + \frac{1}{3}(d_i + d_e) [\text{m}] \quad (4.2.c)$$

$$F = \frac{2\pi^2 \cdot (nI_{\max})^2 \cdot D_m t}{h} 10^{-7} [\text{N}] \quad (4.2.d)$$

De acordo com as expressões acima, é possível calcular analiticamente os estresses citados no início deste capítulo, causados pelas forças começando pelo efeito bending quando usados espaçadores radiais visto em 4.2.e.

$$\sigma_{ax-bending} = \frac{F_{ax-dist} \cdot L_{rad}^2}{2 \cdot e \cdot b^2} [\text{N}/\text{m}^2] \quad (4.2.e)$$

Da mesma forma usado na força radial, axial também se distribui ao longo da bobina podendo ser visto em 4.2.f.

$$F_{ax-dist} = \frac{F_a}{\pi \cdot D_m} \quad (4.2.f)$$

Por fim, pode-se calcular o limite de carga que os enrolamentos podem sofrer , tendo em 4.2.g e 4.2.h as equações para os condutores sem isolamento e em 4.2.i para enrolamentos com isolamento.

$$F_{ax-crit} = \frac{k_m \cdot \pi \cdot E \cdot a_c \cdot b}{3 \cdot D_m} [\text{N}] \quad (4.2.g)$$

$$\sigma_{ax-crit} = \frac{E.b^2}{3.D_m^2} [\text{N}/\text{m}^2] \quad (4.2.h)$$

$$\sigma_{ax-crit} = \frac{E.b^2}{14.R^2} + \frac{Esp_r.s.c.e^2}{12.\pi.R.b^2} [\text{N}/\text{m}^2] \quad (4.2.i)$$

Onde:

D_{mt} = Diâmetro médio do transformador [m].

d_0 = Ducto do transformador [m].

d_i = Espessura radial do enrolamento interno [m].

d_e = Espessura radial do enrolamento externo [m].

q = Fração do ampère-espira total em um enrolamento.

w = Dimensão axial do condutor com sua isolação [m].

d_1 = Largura equivalente do ducto do transformador [m].

L_{rad} = Distância entre os suportes radiais [m].

k_m = Quantidade média de condutores em cada disco do enrolamento.

R = Raio do enrolamento [m].

Esp_r = Quantidade de espaçadores radiais.

s = Largura dos espaçadores radiais [m].

c = Módulo equivalente de elasticidade do papel isolante [N/m²].

4 ENSAIOS EM TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA

Em virtude da magnitude da importância dos transformadores no sistema de potência mundial, várias normas foram criadas para estabelecer padrões de segurança e de classificação para eles com a finalidade de uma maior confiabilidade da produção e da comercialização do equipamento. Conhecidos como ensaios em fábrica, estes são subdivididos em três partes, chamadas de ensaios de rotina, ensaios de tipo e ensaios especiais.

4.1 Condições gerais para os ensaios de rotina, tipo e especiais

Para início, os transformadores são diferenciados em três categorias, e são elas:

Categoria I: Até 2.500 kVA

Categoria II: 2.501 até 100.000 kVA

Categoria III: Acima de 100.000 kVA

Algumas condições devem obrigatoriamente ser consideradas ao fazer os ensaios, e estas condições são dadas a partir da norma IEC 60076-1 e sua NBR correspondente, NBR 5356-1.

As condições são:

- Estar em temperatura ambiente entre 10°C e 40°C;
- Se possuir água de resfriamento no ensaio, esta não pode exceder a temperatura de 30°C;
- Todos os acessórios que influenciam no funcionamento pleno do equipamento devem estar instalados durante o ensaio;
- Transformadores com enrolamento derivado devem estar conectados a derivação principal, a menos que tenha um acordo diferente entre comprador e fabricante;
- Os ensaios devem ser feitos sobre condição nominal do equipamento.

Além do mais, quando solicitado que os ensaios tenham seus resultados corrigidos, para transformadores a óleo usa-se a tabela 1 e para transformadores a seco usa-se a norma ABNT NBR 10295.

Tabela 1 – Temperaturas de referência

Limites de elevação de temperatura dos enrolamentos Método de variação da resistência °C	Temperatura de referência °C
55	75
65	85
95	115

Fonte: ABNT NBR 10295

4.2 Ensaios de rotina

De acordo com as normas NBR 5356 e NBR 10295, os ensaios de rotina devem ser feitos em todas as unidades produzidas. Os ensaios de rotina têm como objetivo verificar qualquer irregularidade nos enrolamentos, contatos, soldas, núcleo etc. Abaixo está listado os itens referentes as normas citadas:

- Medição da resistência dos enrolamentos;
- Medição da relação de transformação e polaridade e verificação do deslocamento angular e sequência de fases;
- Medição da impedância de curto-circuito e das perdas em carga;
- Medição das perdas em vazio e corrente de excitação;
- Ensaios dielétricos de rotina;
- Ensaios de comutador de derivações em carga, quando aplicável;
- Medição da resistência de isolamento; 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;
- Verificação do funcionamento dos acessórios;
- Ensaios de óleo isolante para transformadores de tensão nominal $\geq 72,5$ kV, ou potência ≥ 5 MVA;
- Verificação da espessura e aderência da pintura da parte externa de transformadores com U_m 242 kV.

4.3 Ensaio de tipo

Para os ensaios de tipo, apenas uma unidade da produção é usada, e a partir dela, usa-se como referência para as outras unidades de produção idêntica aos valores nominais e à construção da unidade usada. Os ensaios podem ser validados mesmo em unidades que apresentam pequenos desvios dos valores nominais ou alguma outra característica, porém deve estar em acordo entre fabricante e comprador. A norma que serve de referência para os ensaios de rotina é a NBR 5356, e seus itens estão mencionados abaixo:

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

4.4 Ensaios Especiais

Já para os ensaios especiais, configura-se como ensaios outros que não seja ensaio de rotina ou de tipo. No geral, estes ensaios são solicitados entre acordo do comprador e fabricante. Abaixo se encontram os itens referentes a norma NBR 5356 para ensaios especiais:

- Ensaios dielétricos especiais;
- 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;
- Determinação do nível de ruído audível;
- 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 ($\text{tg } \delta$) da isolação (medição do fator de potência do isolamento). Estes são valores de referência para comparação com medições de 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 de papel;
- Medição do ponto de orvalho; Levantamento da curva de saturação e medição da reatância em núcleo em ar do enrolamento.

Para o caso, o ensaio de suportabilidade a curto-circuito é comumente utilizado, além disso é o foco de pesquisa para o projeto deste trabalho. Com isso, citaremos a seguir as informações referente a este ensaio.

4.4.1 Ensaio de Capacidade de resistir a curtos-circuitos

Este ensaio tem por finalidade verificar a capacidade de transformadores a suportar curtos-circuitos, tendo em vista que os transformadores devem ser projetados para suportar tais surtos sem danos aos efeitos citados em decorrência do curto-circuito. A norma diz que, caso não seja possível fazer o ensaio com fonte trifásica, uma fonte monofásica pode ser usada, e para o cálculo, usa-se a quantidade de ensaios descrito na tabela 5, que se encontra na página 50 deste trabalho. Diz-se ainda na norma que para enrolamentos em triângulo a alimentação monofásica deve ser ligada nos vértices do triângulo e a tensão entre fases do ensaio trifásico, e para um enrolamento em estrela a alimentação monofásica deve ser conectada entre um terminal de linha e os outros dois terminais interligados.

Nota-se que a tensão monofásica tem que ser igual a $\sqrt{\frac{3}{2}}$ vezes a tensão entre fases do ensaio trifásico.

De acordo com a NBR 5356-5 2015, a corrente de curto-circuito não pode exceder a 25 vezes o valor da corrente nominal do enrolamento em questão.

Para o ensaio o valor da corrente de curto-circuito simétrica é dado em 5.4.1.a:

$$I = \frac{U}{\sqrt{3} \times (Z_t + Z_s)} \text{ (A)} \quad (5.4.1.a)$$

Onde Z_s é a impedância de curto-circuito do sistema, conforme 5.4.1.b:

$$Z_s = \frac{U_s^2}{S} \quad (5.4.1.b)$$

Onde:

U_s = Tensão nominal fase-fase do sistema em kV

S = Potência aparente trifásica de curto-circuito do sistema

Z_t = Impedância de curto-circuito do transformador

Z_s = Impedância de curto-circuito do sistema

U = Tensão nominal em kV

I = Corrente de curto-circuito simétrico

A duração da corrente de curto-circuito para a medição da capacidade térmica é de dois segundos, salvo exceções combinadas entre comprador e fabricante. Os valores máximos admissíveis em cada enrolamento podem ser vistos na tabela 2.

Tabela 2 – Valores máximos admissíveis para temperatura média de cada enrolamento após o curto-circuito

Tipo de transformador	Temperatura do sistema de isolamento °C	Temperatura máxima °C	
		Cobre	Alumínio
Imerso em óleo	105 (A) ^a e 120 (E) ^a	250	200
Seco	105 (A) ^a	180	180
	120 (E) ^a	250	200
	130 (B) ^a	350	200
	155 (F) ^a	350	200
	180 (H) ^a	350	200
	220	350	200

^a Classe.

Fonte: ABNT NBR 5356-5

O valor de crista da corrente também deve seguir aos padrões definidos pela NBR 5356-5, e nela diz que a corrente deve ser mantida com o máximo de assimetria na fase que está sob ensaio, sendo a magnitude da primeira crista do ensaio assimétrico calculada através de 5.4.1.c

$$\hat{I} = I \times K \times \sqrt{2} \text{ (A)} \quad (5.4.1.c)$$

Onde:

\hat{I} = Valor de crista da corrente assimétrica de curto-circuito

$$K \times \sqrt{2} = \text{Fator } X/R$$

Sendo que I é definida por 5.4.1.a, e o fator X/R ou $K \times \sqrt{2}$ deve-se empregar a partir da tabela 3.

Tabela 3 – Valores para o fator $K \times \sqrt{2}$

X/R	1	1,5	2	3	4	5	6	8	10	14
$k \times \sqrt{2}$	1,51	1,64	1,76	1,95	2,09	2,19	2,27	2,38	2,46	2,55

Fonte: ABNT NBR 5356-5

É importante ressaltar que valores entre 1 e 14 de X/R podem ser determinados através de interpolação linear. Para valores maiores que 14 o fator de assimetria é 1,8 e 1,9 para transformadores de classificação II e III respectivamente.

Para obtenção dos valores da corrente de curto-circuito, necessita-se de alimentar o equipamento de ensaio com ângulos exatos e para isso usa-se uma chave síncrona.

Os dados resultantes possuem tolerância, sendo o valor médio quadrático simétrico não pode exceder em $\pm 10\%$, já para o valor assimétrico não ultrapassar em $+5\%$ e para a tensão aplicada em no máximo $+15\%$ do valor nominal.

O ajuste dos parâmetros de ensaio também é normalizado, com isso, primeiramente deve-se calibrar o circuito de ensaio diminuindo para 70% dos parâmetros de corrente a fim de verificar o funcionamento adequado do circuito, sendo esta calibração não contada para o número de ensaios que será definido a partir da categoria do transformador.

De acordo com a norma NBR 5356-5, para transformadores monofásicos das categorias I e II, devem ser feitos três ensaios. Recomenda-se que para transformadores monofásicos com derivações, os ensaios sejam divididos entre os comutadores com a maior relação de tensão, na derivação nominal, e a última na derivação de menor relação de tensão.

Já para transformadores trifásicos das categorias I e II, devem ser feitos nove ensaios, ou seja, três para cada fase do transformador. Recomenda-se que para transformadores trifásicos com derivações, dos nove ensaios totais, três ensaios na derivação com maior relação de tensão, três ensaios na derivação nominal, e três ensaios na derivação de menor relação de tensão.

Por fim, para transformadores da categoria III, as posições das derivações e o número de ensaios, deve ser estabelecido entre fabricante e comprador, porém recomenda-se para transformadores monofásicos três ensaios com derivação na

posição idêntica a das categorias I e II, e para transformadores trifásicos nove ensaios com derivações nas posições idênticas as categorias I e II.

A duração do curto-circuito deve seguir o estipulado pela norma, sendo 0,5s para transformadores da categoria I, e 0,25s para transformadores da categoria II e III. O tempo pode ter uma tolerância de $\pm 10\%$.

Durante as aplicações, registros da tensão aplicada e da corrente devem ser feitos por oscilogramas, além da superfície do transformador ensaiado ficar sob supervisão de vídeo. Também deve-se verificar as reatâncias de curto-circuito e as impedâncias dos enrolamentos e devem estar de acordo com a tabela 4.

Após o término do ensaio, a superfície do transformador deve ser inspecionada, a fim de verificar possíveis anormalidades além da reatância de curto-circuito não pode exceder em 2% dos valores originais para transformadores de categoria I com enrolamentos circulares concêntricos, e 7,5% para enrolamentos não circulares, concêntricos. Para um resultado satisfatório o equipamento não pode ter nenhum indício de descargas elétricas interna e também não podem apresentar nenhum defeito em sua parte ativa, como deslocamento de chapas, conexões ou estrutura de suporte, além também, de deformações nos enrolamentos.

Tabela 4 – Impedâncias de curto-circuito

Impedância de curto-circuito à corrente nominal	
Potência Nominal (Kva)	Impedância mínima de curto-circuito(%)
Até 630	4,0
631 a 1250	5,0
1251 a 2500	6,0
2501 a 6300	7,0
6301 a 25000	8,0
25001 a 40000	10,0
40001 a 63000	11,0
63001 a 100000	12,5
Acima de 100000	> 12,5

Fonte: NBR 5356-5, adaptado pelo (AUTOR)

5 METODOLOGIA PARA MEDIR AS FORÇAS DINÂMICAS CAUSADAS POR CURTOS-CIRCUITOS EM TRANSFORMADORES

5.1 Equipamentos usados e arranjo do circuito

Para se obter os valores desejados para conclusão deste trabalho, serão usados diversos equipamentos para aferição das variáveis elétricas e da força exercida sobre o transformador. As ligações podem ser feitas com fonte monofásica e fonte trifásica, sendo decidido entre fabricante e comprador do transformador.

Abaixo está descrito o arranjo feito no laboratório de alta potência do CEPEL, e exclusivamente usado para o ensaio de suportabilidade a curto-circuito em transformadores de potência, no qual, já dito anteriormente, foi o foco deste trabalho.

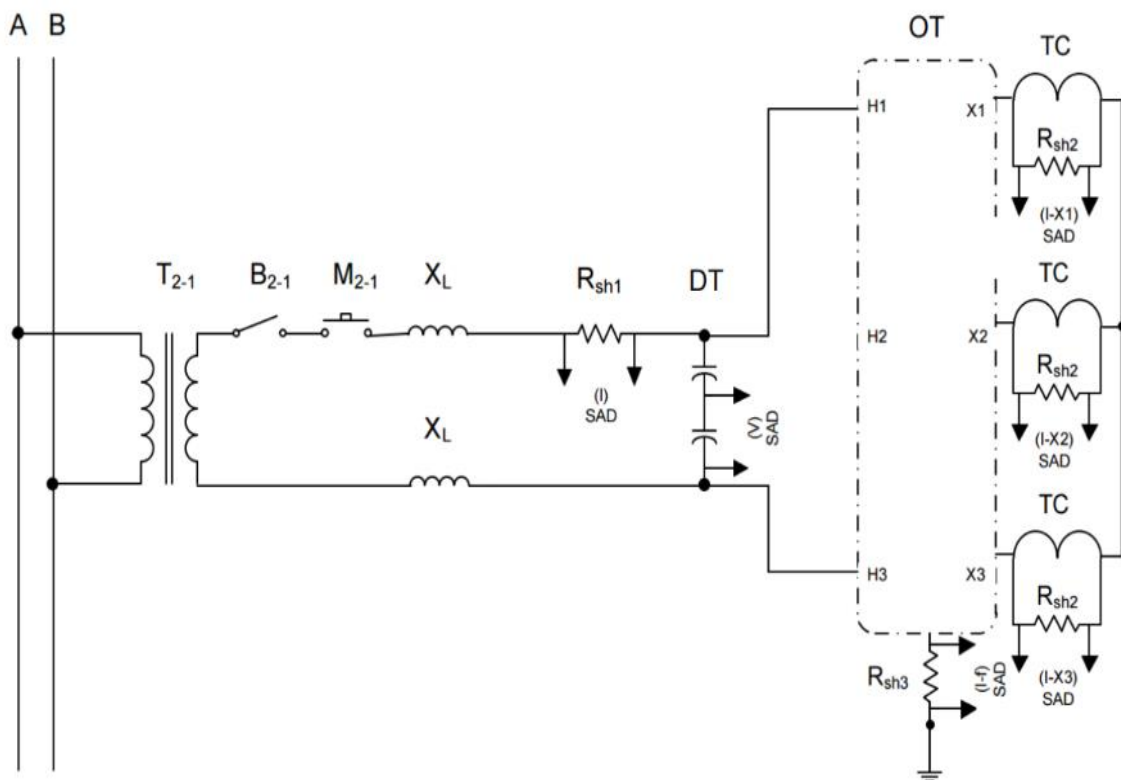


Figura 16 – circuito com fonte monofásica em H1xH3
Fonte: CEPEL (2017)

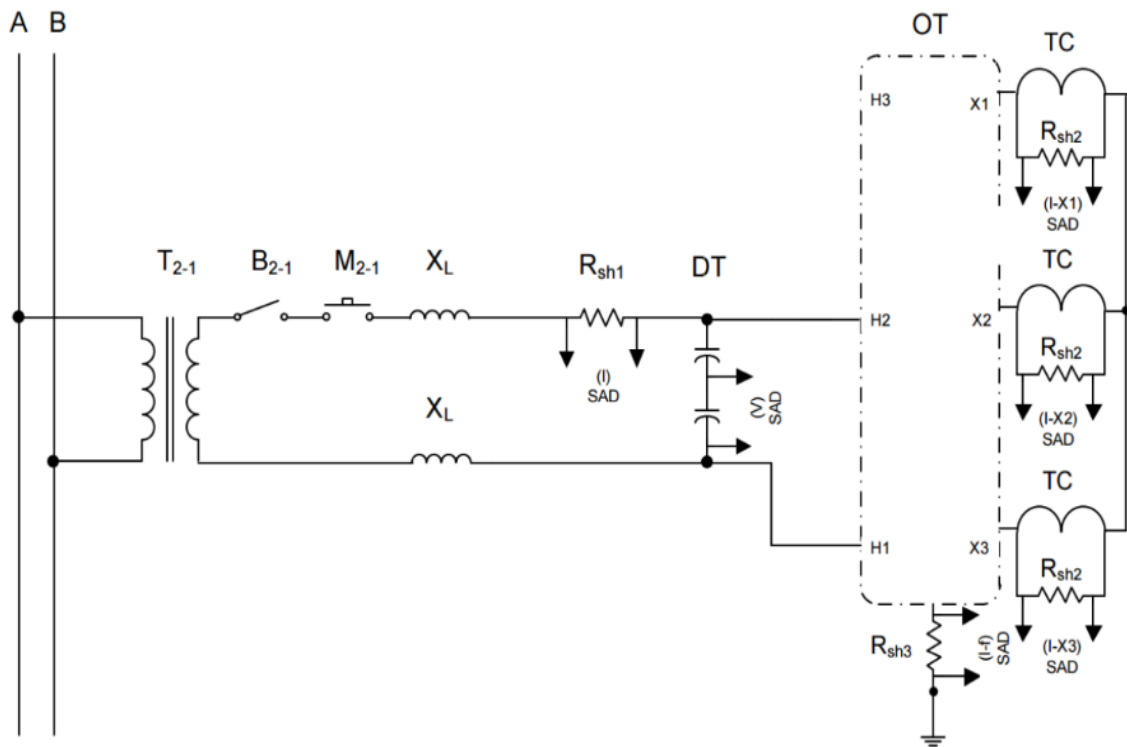


Figura 17 – circuito com fonte monofásica em H2xH1
Fonte: CEPEL (2017)

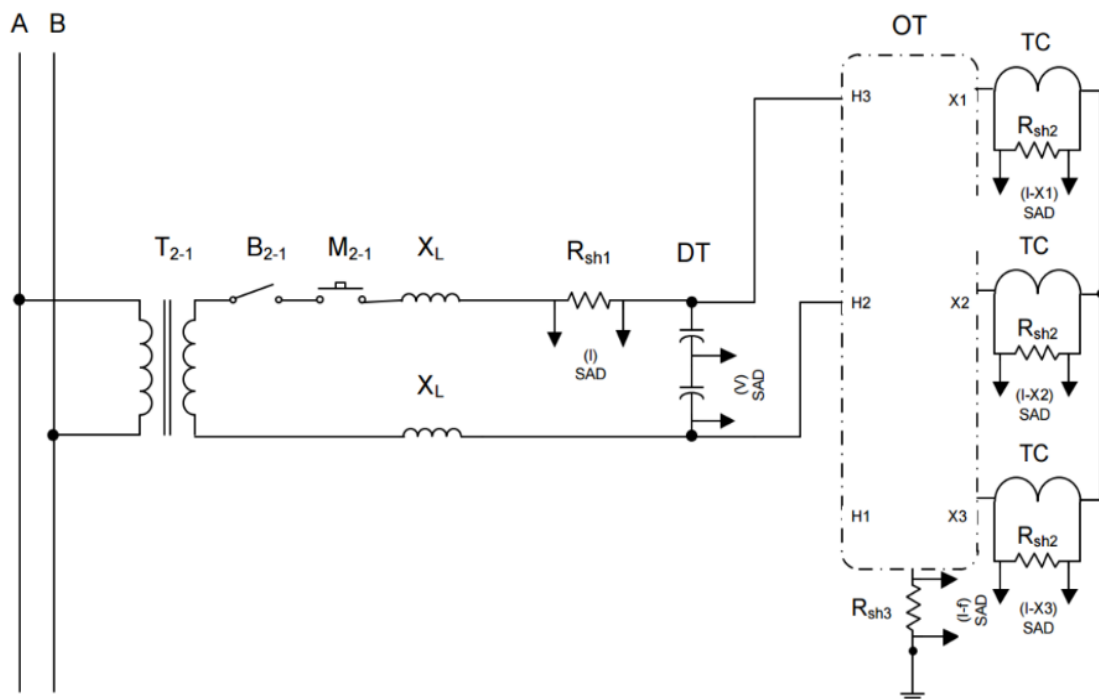


Figura 18 – circuito com fonte monofásica em H3xH2
Fonte: CEPEL (2017)

Sendo para as seqüências monofásicas com seus ângulos e níveis de corrente definidos pela tabela 5.

Tabela 5 – Aplicações com fonte monofásica

Terminais	Ângulos adequados	Nível de corrente
H1-H3	0°	50%
H1-H3	+180°	
H2-H1	0°	
H2-H1	+180°	
H3-H2	0°	
H3-H2	+180°	

Fonte: (AMORIM JUNIOR, 2017)

Na figura 19 o circuito é feito com fonte trifásica.

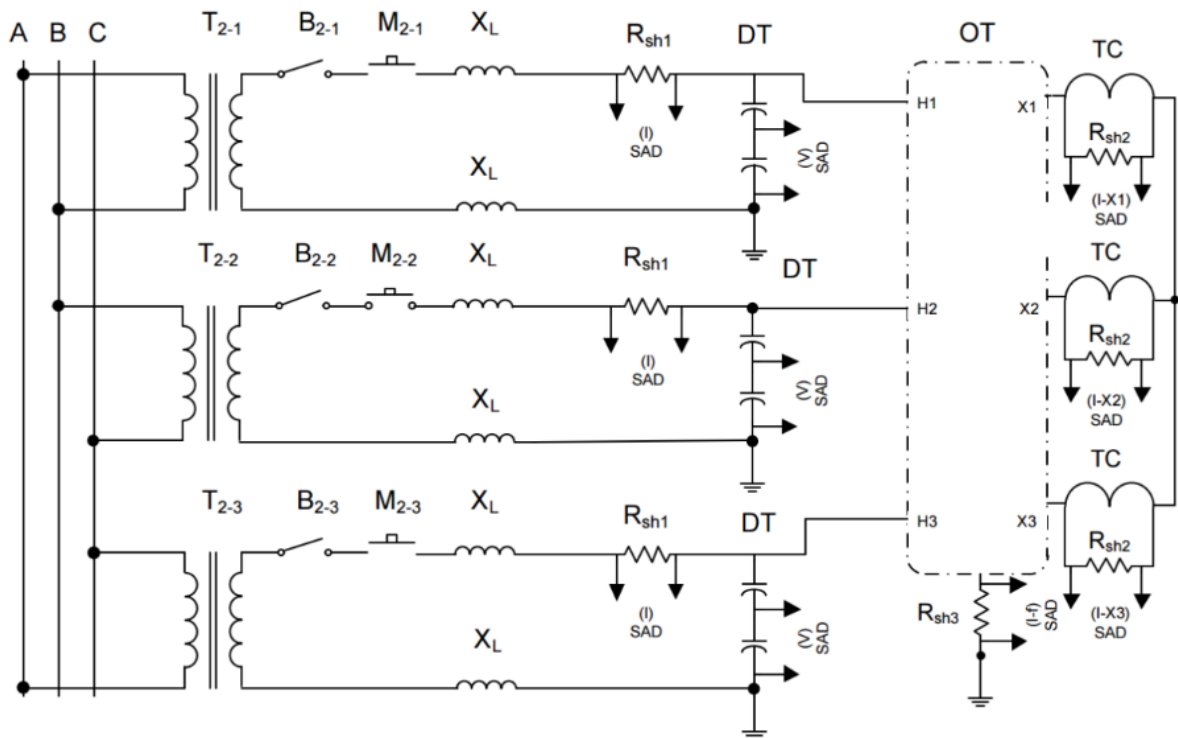


Figura 19 – circuito com fonte trifásica H1xH2xH3
Fonte: CEPEL (2017)

Onde:

T_{2-n} = Transformador de curto-circuito

B_{2-n} = Disjuntor para interrupção

M_{2-n} = Chave síncrona para estabelecimento

X_L = Reator de curto-circuito

R_{sh1} = Derivador de corrente

DT = Divisor de tensão

OT = Objeto de teste

TC = Transformador de corrente

Sendo as aplicações para fonte trifásica de acordo com a tabela 6.

Tabela 6 – Aplicações com fonte trifásica

Terminais	Ângulos adequados	Nível de corrente
H1-H2-H3	0°	50%
H1-H2-H3	+60°	
H1-H2-H3	-220°	
H1-H2-H3	0°	75%
H1-H2-H3	+60°	
H1-H2-H3	-220°	
H1-H2-H3	0°	100%
H1-H2-H3	+60°	
H1-H2-H3	-220°	

Fonte: (AMORIM JUNIOR, 2017)

Todos os equipamentos devem ser calibrados regularmente conforme norma exercida sobre cada um, para que não tenha nenhum tipo de erro sobre os valores resultantes dos ensaios

Dentro deste capítulo será falado um pouco sobre cada um dos referidos equipamentos a serem usados no experimento desejado. Todos são de profunda importância para obtenção exata dos resultados.

5.1.1 Transformador de Potência

O transformador de potência (TP) é utilizado na medição abaixando o nível de tensão para ser aplicado ao circuito, que precisa de uma escala de tensão mais baixa. O TP é conectado ao circuito primário (entrada), aonde será medido, e no secundário é conectado o dispositivo de medição de tensão e ao circuito a ser aplicado a tensão.

Os TP's são considerados especiais, pois possuem uma ótima relação de transformação (RT), devido a sua fabricação e razão entre as espiras do enrolamento primário e secundário.

5.1.2 Transformador de Corrente

Assim como no transformador de potência, os transformadores de corrente também são muito utilizados para medição. O princípio é o mesmo usado no transformador de potência, ou seja, o objetivo do equipamento é de reduzir o nível de corrente para ser lido por um transmissor, e em seguida entregar o sinal para o instrumento de medição.

O transformador de corrente (TC) é conectado em série com o circuito no qual a corrente será medida, e o secundário é conectado aos instrumentos de medição de corrente. O TC ideal é quando qualquer condição do primário é reproduzida no secundário com exata relação de transformação, sendo assim, não teria perdas nos enrolamentos e no núcleo, sem corrente de excitação de magnetização do núcleo, a corrente no secundário estaria defasada exatamente em 180° da primária.

Para os casos de curto-circuito, que foi o foco do trabalho, não é preciso uma exatidão na transformação da corrente, pois a corrente de curto irá ocasionar o TC em uma saturação do núcleo, e isso fará com que os instrumentos de proteção estejam protegidos da corrente de curto-circuito.

5.1.3 Transmissor e receptor óptico

São equipamentos de alta precisão e muito importante para o laboratório onde está sendo feito a pesquisa, devido aos altos valores de corrente e tensão aplicados sobre os equipamentos de teste, os equipamentos de medição não podem sofrer com as induções magnéticas do circuito elétrico.

O objetivo do transmissor óptico é basicamente de converter o sinal elétrico em sinal óptico para a fibra. Sua característica construtiva é dada por um modulador óptico, fonte óptica e um acoplador de canal.

O papel do receptor óptico é de transformar o sinal óptico em sinal elétrico. Sua característica construtiva se dá por um fotodetector, fonte de energia, demodulador óptico. É de suma importância, assim como o transmissor, pois os dois servem para a transmissão dos sinais, o mais perto do ideal possível.

5.1.4 Dinamômetro

O dinamômetro tem por finalidade medir a força exercida por um determinado equipamento. O princípio de funcionamento se dá pela deformação de uma estrutura, muitos dinamômetros constituem de molas para isso, e a deformação é fruto da ação da força sobre o instrumento de medição, que por sua vez, indica a magnitude da força incidente.

Atualmente existem diversos tipos de dinamômetros no mercado, tanto digital como analógico. Para este trabalho será adotado o dinamômetro digital de tração e compressão, podendo ser visto na imagem 20 um exemplo dele. Este tipo mede as forças que comprimem suas extremidades, e a magnitude da força é mostrada no painel digital. O dinamômetro de tração e compressão se mostra ideal para realização do ensaio.



Figura 20 – Dinamômetro digital de tração e compressão
Fonte: (PCE INSTRUMENTS UK: TEST INSTRUMENTS)

O dinamômetro em questão possui sua célula de carga externamente, sendo conectada ao corpo através de um cabo sensor, transmitindo o estresse causado

pela célula para o dinamômetro. Os valores medidos amostrados são exibidos como um valor instantâneo, bem como em um gráfico através de um software diretamente do dinamômetro.

As medições podem ser armazenadas na memória interna ou transmitidas via interface USB com o software incluído, com no máximo 800 Hz como medição ao vivo.

A função PEAK Hold permite congelar o valor mais alto medido no dinamômetro até que esse valor seja excedido ou apagado.

O dinamômetro oferece a opção de armazenar dois valores limites, que são comparados continuamente com o valor instantâneo. Ao exceder ou cair abaixo desses limites, um sinal no display do dinamômetro, bem como uma reação via interfaces externas, pode ser utilizado, por exemplo, para o controle de uma máquina de teste.

5.1.5 Derivador de corrente

Os derivadores de corrente, também conhecidos como shunt, é um dispositivo de precisão, utilizado para medir corrente elétrica em um circuito, é conhecido também como resistor de derivação. É bastante utilizado para expandir a escala de medição do instrumento.

O resistor shunt é ligado em paralelo com o instrumento de medição e com isso amplia-se a escala dele. Pode-se observar na figura 21.

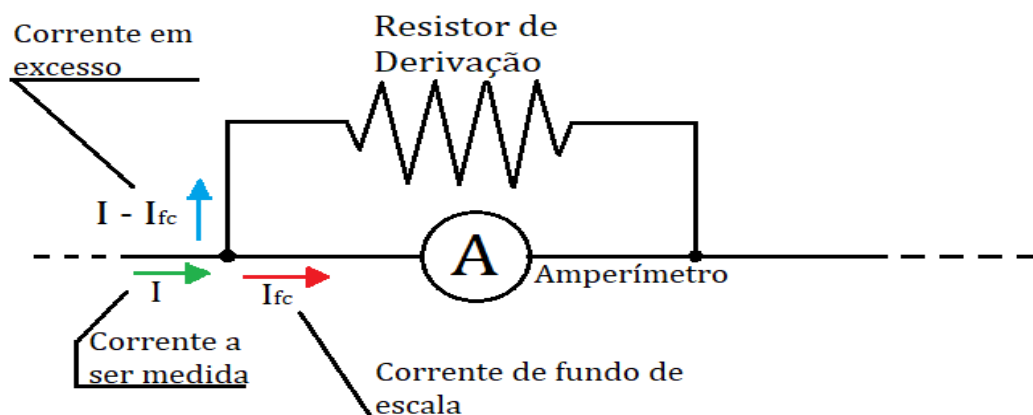


Figura 21 - Ampliando a escala de um instrumento com uma resistência de derivação ou "shunt"

Fonte: (FERNANDES DE LIMA, 2016), adaptado pelo AUTOR (2020)

O circuito base do divisor de corrente possui dois resistores em paralelo, em que 2 é a carga e o 1 é o próprio divisor. Pode ser visto na imagem 22.

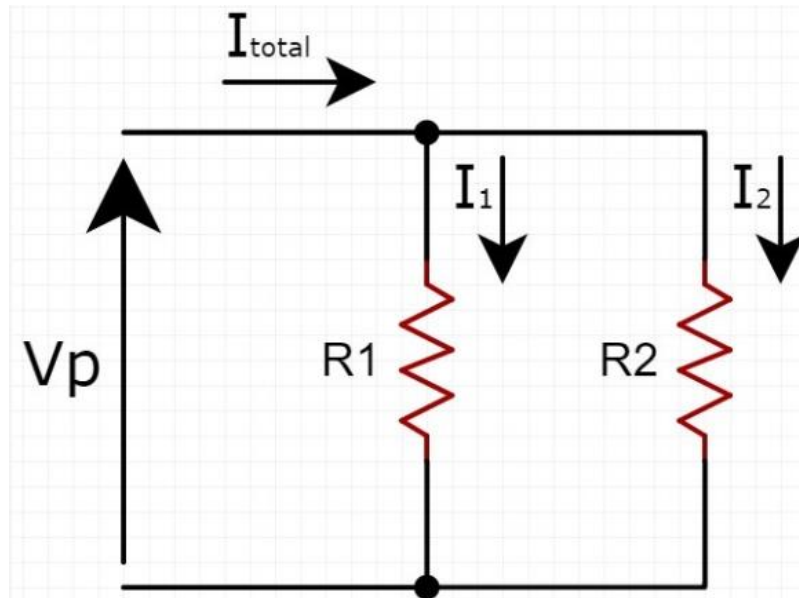


Figura 22 – Divisor de corrente
Fonte: (GUIMARÃES DE SOUZA, 2017)

Para análise de I_1 e I_2 usa-se a equação 6.1.5.a e 6.1.5.b.

$$I_1 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot I_{total} \quad (6.1.5.a)$$

$$I_2 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot I_{total} \quad (6.1.5.b)$$

5.1.6 Divisor de tensão

Os divisores de tensão servem basicamente para amainar a magnitude da tensão, com isso um sinal com uma tensão mais fraca é recebido, dos divisores, por um sistema de medição. Vale ressaltar que é necessário compensar o valor reduzido para que o valor se apresente certo. Esta compensação é feita por um fator de escala.

Existem três tipos de divisores, sendo eles, divisor de tensão puramente capacitivo, puramente resistivo ou misto (com capacitor e resistor). Nota-se que todos se diferenciam quanto ao tempo de resposta e fator de escala, e para isso necessita-se analisar o ensaio a ser empregado por eles.

Na imagem 23 é possível ver a forma construtiva dos divisores mistos, mas não sendo muito diferente dos outros dois tipos, sendo diferenciado basicamente pela parte ativa, como mostrado na imagem.

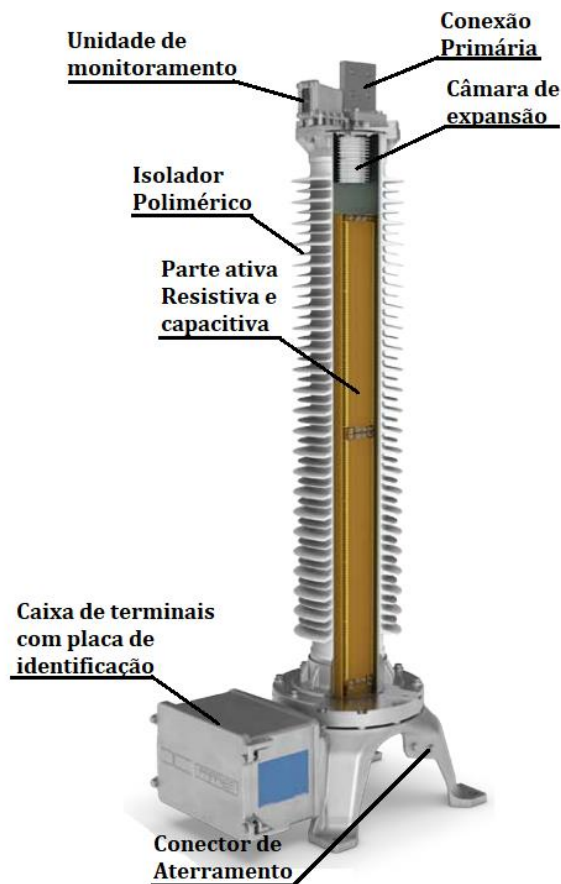


Figura 23 – Divisor de tensão misto

Fonte: (PFIFFNER DO BRASIL LTDA, 2020), adaptado pelo AUTOR (2020)

5.1.7 Fibra Ótica

A fibra ótica é frequentemente utilizada para transmissão de sinais entre os equipamentos de medição, e por sua precisão e principalmente por ser imune a interferências eletromagnéticas, é utilizado no laboratório onde foi feita esta pesquisa.

Existem dois tipos de fibras óticas, são elas a fibra ótica monomodo e multimodo. A grande diferença entre elas é o volume de sinais que podem transmitir, sendo a monomodo capaz de apenas um sinal e a multimodo vários sinais ao mesmo tempo. Vale ressaltar que a monomodo por sua vez, pode transmitir o sinal em longos alcances sem perder o rendimento, sendo o contrário para a multimodo. Em questões de custo, o da monomodo é mais elevado em comparação a multimodo.

Na figura 24 podemos observar sua forma construtiva simples, e se nota que uma grande desvantagem deste tipo de cabo, é sua fragilidade e seu alto custo.

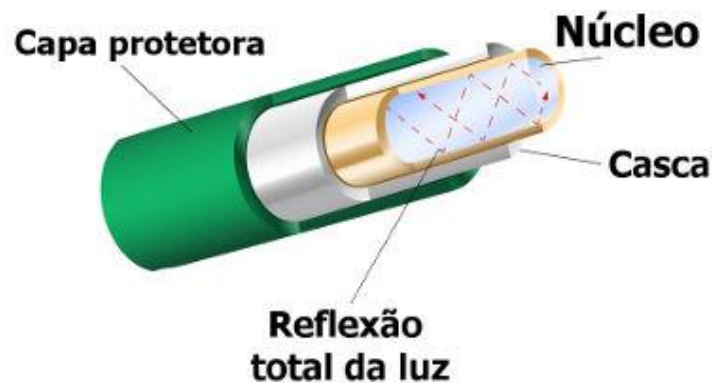


Figura 24 – Detalhes de uma fibra ótica

6 PESQUISA EXPERIMENTAL

Para a pesquisa será considerado todos os equipamentos ideais para melhor se encaixar aos valores desejados. Todo o procedimento encontrado neste capítulo refere-se à realização futura do ensaio, pois, em decorrência de problemas não pode ser realizado o ensaio com a metodologia criada neste conteúdo.

O objeto de ensaio em questão é um transformador à seco, ilustrado na figura 25 e tem suas especificações abaixo:

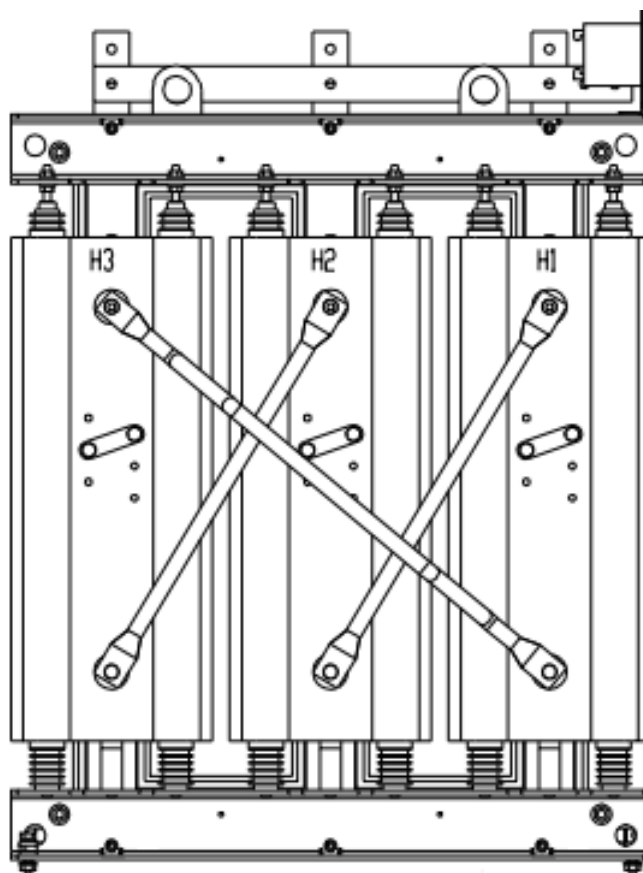


Figura 25 – Transformador a seco
Fonte: (WEG S.A. - HEADQUARTERS, 2020)

Potência de base = 112.5 kVA

Tensão nominal AT 13.8 kV

Tensão nominal BT 0.22 kV

Grau de Proteção IP-00

Forma construtiva Seco

NBI (AT) = 95.0 kV

Norma NBR 5356-11

Frequência 60.0 Hz

Grupo ligação WT Dyn1

Fase = Trifásico

Instalação = Abrigado

Altitude máxima de instalação = 1000.0 m

Atmosfera Não agressiva

Temperatura ambiente máxima 40.0 °C

Fator K = K1

Tipo Comutação = CST

Taps -4x0.6 kV

Classe temperatura material isolante = F (155 °C)

Refrigeração = AN

Material dos condutores AT/BT = Al/Al

Elevação temperatura dos enrolamentos média = 100.0 °C

Elevação de temperatura dos enrolamentos no ponto mais quente = 115.0 °C

Impedância de curto-circuito a 120°C = 5.0 %

Perdas em vazio = 0.6 kW

Perdas totais = 3.15 kW

Corrente de excitação = 3.3 %

Nível de ruído = 58.0 dB

Descargas parciais = 10.0 pC

Os ensaios de rotina e tipo antecedem a qualquer tipo de ensaio especial, porém iremos adotar os valores como sendo ideais, ou seja, especificados pelo fabricante. O ensaio de curto-circuito em transformadores de potência terá diversas grandezas medidas, de acordo com as normas que o sustentam, sendo elas a NBR 5356-1 e NBR 5356-5.

Tendo em vista o conhecimento das perdas totais e perdas em vazio teremos as perdas em carga nominal, visto em 7.a:

$$\text{Perdas nominais em carga} = \text{Perdas totais} - \text{Perdas em vazio} \quad (7.a)$$

E de acordo com as fórmulas 7.b e 7.c têm-se os valores de Resistência de curto-circuito e Reatância de curto-circuito, sendo assim, possível calcular os valores de assimetria para a corrente de curto-circuito.

$$R_{cc}\% = \frac{\text{Perdas nominais em carga}}{\text{Potência de base}} \quad (7.b)$$

$$X_{cc}\% = \sqrt{Z_{cc}\%^2 - R_{cc}\%^2} \quad (7.c)$$

Onde:

$R_{cc}\%$ = Resistência de curto-circuito (pu)

$X_{cc}\%$ = Reatância de curto-circuito (pu)

$Z_{cc}\%$ = Impedância de curto-circuito (pu)

As grandezas medidas em cada aplicação são:

- Correntes de curto-circuito nos terminais AT e BT do transformador ensaiado
- Tensões de linha em AT
- Indutância no circuito AT
- Forças mecânicas

As forças mecânicas serão medidas através de dinamômetros de tração e compressão instalados no transformador ensaiado sendo sustentados por suportes fixos ao chão. O transformador será do tipo a seco para melhor análise das forças atuantes diretamente nos enrolamentos. Todas as aplicações (com fonte monofásica e trifásica) serão feitas no tempo de 500ms \pm 10% de acordo com a norma NBR 5356-5. A figura 26 demonstra o esquema adotado como ideal.

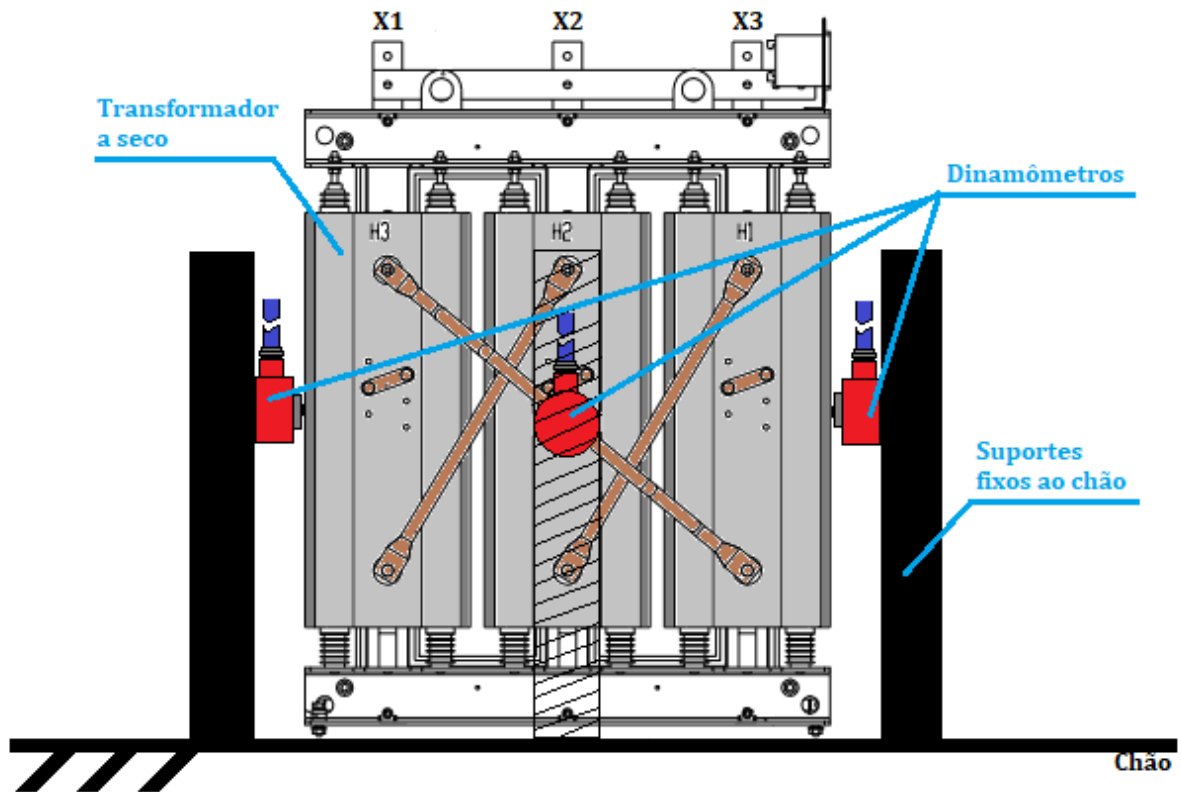


Figura 26 – Esquema para ensaio vista frontal
 Fonte: (WEG S.A. - HEADQUARTERS, 2020), adaptado pelo AUTOR (2020)

Onde:

X1, X2, X3 = Terminais AT

H1, H2, H3 = Terminais BT

Nota: Há um quarto dinamômetro instalado na parte traseira do transformador e na figura 27 está sendo evidenciado outros três dinamômetros instalados na parte superior do transformador nos três enrolamentos, sendo interligados ao teto por um tubo. No total foram usados 7 dinamômetros.

As ligações respeitarão a figura 16, 17, 18 e 19, e as aplicações com fonte monofásica e trifásica respeitarão as tabelas 5 e 6.

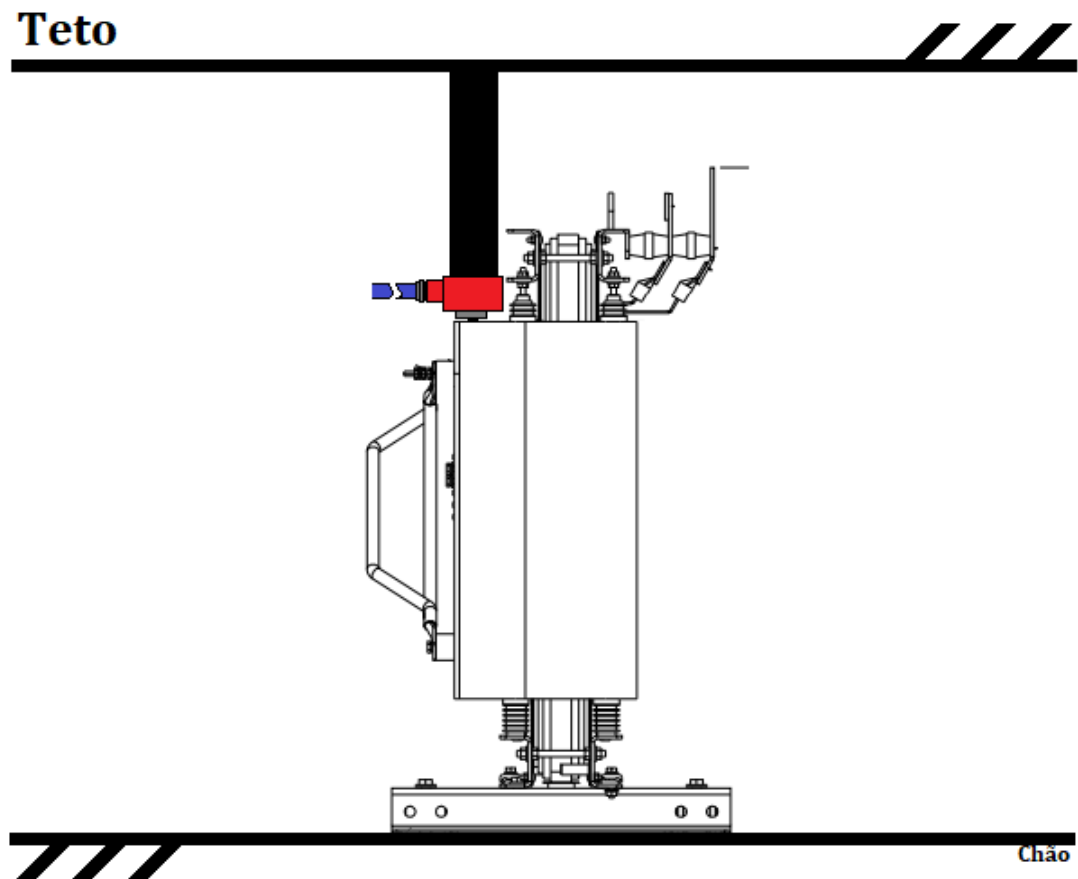


Figura 27 – Esquema com vista lateral

Fonte: (WEG S.A. - HEADQUARTERS, 2020), adaptado pelo AUTOR (2020)

As especificações do dinamômetro se encontram abaixo na figura 28, lembrando, que para o experimento, consideramos o equipamento que mais se encaixa com os parâmetros desejados, e com valores de medição mais parecidos com os calculados de acordo com as fórmulas analíticas:

Especificação	Valor			
	PCE-DFG NF 0,5K	PCE-DFG NF 1K	PCE-DFG NF 2K	PCE-DFG NF 50K
Max.	0 ... 500 N	0 ... 1.000 N	0...2.000 N	0...50.000 N
Resolução	0,05 N	0,1 N	0,2 N	0,05 kN
Peso da célula	18 g	18 g	58 g	92 g
Conexão	3 m / Hirschmann ELST 5012 PG7			
Célula	Aço Inoxidável 17-4PH / IP 65			
Dimensões do dispositivo	162 x 82 x 41 mm			
Peso do dispositivo	325 g			

Figura 28 - Especificação do dinamômetro

Fonte: (PCE INSTRUMENTS UK: TEST INSTRUMENTS), adaptado pelo AUTOR

(2020)

De acordo com a monografia apresentada por Thiago Amorim, ele obteve as relações dos esforços dinâmicos em transformadores sobre curto-circuito através de acelerômetros, que basicamente medem as vibrações (AMORIM JUNIOR, 2017).

Para um melhor desempenho e para uma melhor análise, neste caso, foram usados dinamômetros, a fim de se obter uma melhor relação para com os esforços dinâmicos, tendo em vista que, o dinamômetro como já citado, mede as forças em newtons aplicadas a ele, com isso podemos estabelecer relações com os cálculos analíticos apresentados no capítulo 3 .

7 CONCLUSÃO

Em virtude dos fatos mencionados e de acordo com os métodos analíticos, nota-se que os transformadores sobre efeito do curto-circuito, sofrem bastante com os estresses dinâmicos, sendo as características físicas também muito afetadas, como por exemplo, os enrolamentos, barramentos entre outros.

Entende-se que com a metodologia aplicada ao ensaio, os valores identificados pelos dinamômetros em questão (usados no teste deste trabalho) darão uma melhor análise sobre os efeitos das forças, sendo possível estruturar em conjunto com o teste realizado pelo Thiago Amorim com os acelerômetros, uma base mais forte sobre os efeitos das faltas em transformadores, de forma mais real. Nota-se que atualmente o uso de softwares é usado para o cálculo destas forças, porém ainda há uma imprecisão, já que para a realidade, algumas condições não são atendidas pelos softwares.

A partir dos futuros dados coletados, um novo estudo se faz necessário, que seria correlacionar os valores indicativos nos ensaios com fontes monofásica e trifásica, e assim, tornar possível demonstrar a diferença entre o ensaio feito com a fonte monofásica e trifásica. Se de fato houver uma comprovação de que a aplicabilidade do ensaio com fonte monofásica inferir menos esforços sobre o transformador, entende-se que não seja ideal para a realização com ensaio o uso deste tipo de fonte, já que se encontraria menos eficiente para a verificação de suportabilidade a curto-circuito. Com isso, cabe uma reflexão sobre a igualdade do ensaio com ambas as fontes, referidas pela norma IEC 60076-5. Considera-se que todos os ensaios devem ser feitos a todos os tipos de transformadores, de forma que, tenha-se uma análise completa.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMORIM JUNIOR, T. **Análise dos esforços dinâmicos em transformador de potência trifásico submetido a curto-circuito com fonte monofásica e trifásica.** Dissertação (Dissertação em Engenharia Elétrica) - UniFOA. Volta Redonda, p. 183. 2017.

ANTÔNIO FERREIRA, C. **Desenvolvimento de núcleos para transformadores monofásicos de baixa potência pela metalurgia do pó.** Dissertação (Dissertação em mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, p. 64. 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR5356-1: TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA - PARTE 1: GENERALIDADES.** Rio de Janeiro. 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR5356-5: Transformadores de potência - Parte 5: Capacidade de resistir a curtos-circuitos.** Rio de Janeiro. 2015.

BECHARA, R. **Análise de falhas de transformadores de potência.** Dissertação (Dissertação para mestrado) - USP. São Paulo, p. 102. 2010.

CARVALHO, G. **Máquinas Elétricas - Teorias e ensaios.** 4^a. ed. São Paulo: Érica Ltda., 2011.

CHAPMAN, S. J. **Fundamentos de Máquinas Elétricas.** Tradução de Anatólio LASCHUK. 5^a. ed. [S.l.]: AMGH, 2013. 700 p.

COLLARES LAURENTINO, A. **Estudo do Comportamento da Oxidação de Óleo Mineral.** Universidade Federal de Santa Catarina. Santa Catarina, p. 30. 2003.

COSTA, J. **Notas de aula sobre equipamentos elétricos em subestações.** Brasília. 2011.

FERNANDES DE LIMA, G. Instrumentos Elétricos de Medição Parte II. **slideplayer**, 2016. Disponível em: <<https://slideplayer.com.br/slide/10170799/>>. Acesso em: 15 Abril 2020.

GALVÃO, H. Transformadores. **slideshare**, 2014. Disponível em: <<https://pt.slideshare.net/heitorgalvao1/transformadores-33547619>>. Acesso em: 22 Dezembro 2019.

GOMES, F. V. Análise de Sistemas Elétricos de Potência. **ufjf**, 2012. Disponível em: <https://www.ufjf.br/flavio_gomes/files/2012/11/Aula-14_ENE005.pdf>. Acesso em: 12 Março 2020.

GUIMARÃES DE SOUZA, F. Divisor de corrente. **mundoprojetado**, 2017. Disponível em: <<http://mundoprojetado.com.br/divisor-de-corrente/#more-996>>. Acesso em: 05 Fevereiro 2020.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 60076-11 Power transformers - dry-type transformers**. Geneva. 2004.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 60096-5 Power transformers - Part 5: Ability to withstand short circuit**. Geneva. 2006.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 60076-1 Power transformers - Part 1: General**. Geneva. 2011.

JUNIOR A. J. P, et al. **Análise dos esforços eletromecânicos em transformadores causados por curtos-circuitos**. Uberlândia. 2011.

KOSOW, I. L. **Máquinas Elétricas e transformadores**. 9ª. ed. São Paulo: Globo 1993, 2005.

MASCHIO, G. et al. **Análise de esforços de curto-circuito em transformadores empregando o método de elementos finitos**. Santa Maria. 20?

OLIVEIRA, P. **Análise para Transformadores de corrente para medição**. Dissertação (Metrologia para a Qualidade Industrial) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, p. 135. 2001.

PCE INSTRUMENTS UK: TEST INSTRUMENTS. Dynamometer PCE-DFG NF 50K Incl. ISO Calibration Certificate. **pce-instruments**. Disponível em: <https://www.pce-instruments.com/english/measuring-instruments/test-meters/dynamometer-pce-instruments-dynamometer-pce-dfg-nf-50k-incl.-iso-calibration-certificate-det_5886294.htm?_list=kat&_listpos=31>. Acesso em: 17 Fevereiro 2020.

PIFFNER DO BRASIL LTDA. Divisor capacitivo resistivo de tensão. **Pfiffner**, 2020. Disponível em: <https://www.pfiffner.com.br/fileadmin/user_upload/Produktprospekt_HS-ROF_PT_WEB.pdf>. Acesso em: 03 Novembro 2019.

SILVA, D.; ALVES, D. **Transformadores de potência - Teoria e aplicação tópicos essenciais**. Dissertação (Dissertação em engenharia elétrica) - UFRJ. Rio de Janeiro, p. 201. 2009.

SKM SYSTEMS ANALYSIS. **Inc. Power Tools for Windows – A Fault Reference Manual – Electrical Engineering Analysis Software for Windows**. Manhattan. 2006.

THIAGO. O sistema de isolamento de um transformador de potência. **awstrom**, 2019. Disponível em: <<http://home.awstrom.com.br/o-sistema-de-isolamento-de-um-transformador-de-potencia-parte-1/>>. Acesso em: 08 Março 2020.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA. Aspectos gerais de sistema de distribuição. **feis.unesp**, 20? Disponível em: <https://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariaeletrica/apostila_sdee_01.pdf>. Acesso em: 11 Maio 2020.

WEG S.A. - HEADQUARTERS. Transformador Seco 112.5kVA 13.8/0.22kV
CST IP-00 AN. **weg**, 2020. Disponível em:
<<https://www.weg.net/catalog/weg/BR/pt/Gera%C3%A7%C3%A3o%2C-Transmiss%C3%A3o-e-Distribui%C3%A7%C3%A3o/Transformadores-a-Seco/Pequeno-%28At%C3%A9-300kVA%29/Transformador-Seco-112-5kVA-13-8-0-22kV-CST-IP-00-AN/p/14908878>>. Acesso em: 8 Outubro 2019.