



Universidade Federal
de Campina Grande

Centro de Engenharia Elétrica e Informática
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

FILIPPE LUCENA MEDEIROS DE ANDRADE

**AVALIAÇÃO DOS ESTRESSES MECÂNICOS NOS
ENROLAMENTOS DE TRANSFORMADORES**

Campina Grande, Paraíba.
Fevereiro de 2016

FILIPPE LUCENA MEDEIROS DE ANDRADE

AVALIAÇÃO DOS ESTRESSES MECÂNICOS NOS
ENROLAMENTOS DE TRANSFORMADORES

*Dissertação submetida à Coordenação do
Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Elétrica da Universidade Federal de Campina
Grande como parte dos requisitos necessários
para a obtenção do grau de Mestre em Ciências
no Domínio da Engenharia Elétrica.*

Área de concentração: Processamento de energia.

Orientador:
Prof. Edson Guedes da Costa, D. Sc.

Campina Grande, Paraíba.
Fevereiro de 2016

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

- A553a Andrade, Filipe Lucena Medeiros de.
- Avaliação dos estresses mecânicos nos enrolamento de transformadores / Filipe Lucena Medeiros de Andrade. – Campina Grande, 2016.
- 55 f. : il. color.
- Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Engenharia Elétrica e Informática, 2016.
- "Orientação: Prof. D.Sc. Edson Guedes da Costa".
- Referências.
1. Transformadores de Corrente. 2. Transformadores - Enrolamento. 3. Von Mises. 4. Estresse Mecânico. 5. Curto-Circuito. I. Costa, Edson Guedes da. II. Título.
- CDU 621.314.224(043)

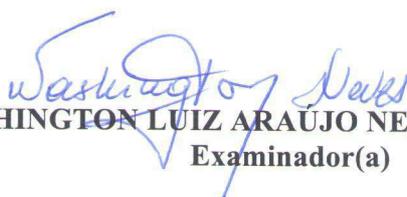
**"AVALIAÇÃO DOS ESTRESSES MECÂNICOS NOS ENROLAMENTOS DE
TRANSFORMADORES"**

FILIPE LUCENA MEDEIROS DE ANDRADE

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 22/02/2016



EDSON GUEDES DA COSTA, D.Sc., UFCG
Orientador(a)



WASHINGTON LUIZ ARAÚJO NEVES, Ph.D., UFCG
Examinador(a)



TARSO VILELA FERREIRA, D.Sc., UFCG
Examinador(a)



EDGAR ROOSEVELT BRAGA FILHO, D.Sc., UFCG
Examinador(a)

CAMPINA GRANDE - PB

Dedico este trabalho a minha mãe Lenita, ao meu pai Agrinaldo e as minhas irmãs Rafaella e Izabella, por todo o apoio, carinho e até mesmo repreensões, que sempre tiveram o intuito de ajudar a tornar o homem que sou. Muito obrigado.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus ter me dado a vida e por ter colocado na minha vida todas essas pessoas que agradeço imensamente.

Aos meus pais, Agrinaldo e Lenita, e aos meus irmãs, Rafaella e Izabella, devo esse trabalho a vocês, que conseguiram me suportar, me apoiar e me dar força em momentos que, nem eu mesmo faria isso por mim.

Aos meus avós, Iraci, Lustrinha e Silvino, que sempre serão referenciais de honra e dignidade na minha vida

Aos meus familiares, pela torcida incessante.

Aos meus amigos de patos que sempre me apoiaram e me fizeram sorrir mesmo à distância. Também agradeço aos meus amigos pós graduandos do Laboratório de Alta Tensão pelas conversas, cafés e ideias que levarei para o resto da minha vida.

De forma especial, agradeço a Jalberth com quem desenvolvi este trabalho e que soube me escutar durante todas as fases deste projeto e sobre outras tantas coisas que conversamos.

Ao meu orientador e amigo, Tarso Vilela e Edson Guedes, por todo o apoio, ajuda e conselhos durante toda a graduação.

Ao professor João Batista do Departamento de Engenharia Mecânica que tanto nos ajudou no desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço profundamente a todos do Laboratório de Alta Tensão, onde me “criei” durante a universidade.

Agradeço a todos os educadores que de alguma forma contribuíram para a construção de quem sou hoje.

*Quem quiser ser líder deve ser primeiro servidor. Se você
quiser liderar, deve servir. Jesus Cristo*

RESUMO

Existe uma carência de metodologias e ferramentas robustas para se avaliar os efeitos dos esforços eletromecânicos decorrentes das elevadas correntes transitórias sobre os equipamentos. Assim, este trabalho tem como objetivo estudar os esforços eletromecânicos decorrentes das correntes de curto circuito nos enrolamentos de transformadores, além de analisar a proximidade de falha dos enrolamentos por meio da comparação de dois critérios de falha mecânica, o critério da máxima tensão e o critério de Von Mises. Os esforços foram estudados em dois transformadores, um monofásico de 75 MVA e outro trifásico de 180 MVA. A partir dos resultados obtidos, constatou-se que a modelagem baseada no método dos elementos finitos, em comparação à formulação analítica, é o método mais adequado para determinação das forças eletromagnéticas. Além disso, verificou-se que a representação gráfica, em 3D, dos enrolamentos dos transformadores é necessária para determinação correta dos esforços eletromecânicos, uma vez que a geometria influencia diretamente na determinação dos esforços. Por fim, constatou-se que o critério de Von Mises é mais adequado para avaliar a proximidade de falha mecânica dos enrolamentos, em razão de utilizar mais parâmetros para a tomada de decisão, tornando-o mais exato. Pelo exposto, e pelas comparações apresentadas para os transformadores estudados, conclui-se que as comparações realizadas e verificações obtidas nesta dissertação podem ser generalizadas para outros transformadores. Possibilitando, assim, uma análise mais adequada sobre os esforços eletromecânicos ocorrentes nos transformadores de potência.

Palavras-chave: Transformador, enrolamento, Von Mises, estresse mecânico, curto-circuito.

ABSTRACT

There is a lack of robust methodologies and tools to evaluate the effects of electromechanical efforts caused by high transient currents on transformers. Thus, this work aims to study electromechanical efforts caused by short-circuit currents through transformer windings, as well as to analyze the windings failure proximity by comparing two mechanical failure criteria: the maximum tension criterion and the Von Mises criterion. Mechanical efforts were studied for two cases, a single-phase 75 MVA transformer and a three-phase 180 MVA transformer. It was found that modeling based on the Finite Element Method, compared to analytical formulation, is the more appropriate for determining electromagnetic forces in transformer. Furthermore, it was found that a 3D graphic representation of the transformer windings is necessary for a correct determination of electromechanical efforts, since the geometry directly influences the effort configuration. Finally, it was found that the Von Mises criterion is more appropriate to evaluate the windings failure proximity, since this criterion uses more parameters for decision-making, which makes it more accurate. It is concluded that the comparisons and verifications obtained in this work can be generalized to other transformers. Enabling a more appropriate analysis of electromechanical efforts that occur in large power transformers.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Origem das falhas em transformadores de subestações convencionais e de usinas geradoras;.....	3
Figura 2- Deformações e danos na isolação causados pela passagem de corrente de curtos circuitos.	3
Figura 3 - Resposta da corrente de curto circuito com fator de assimetria 1,8.....	8
Figura 4 – Linhas de fluxo magnético de dispersão e FE nos enrolamentos do transformador.....	9
Figura 5 - Curva tensão-deformação	12
Figura 6–Representação bidimensional do critério de Von Mises para estado plano de tensão de duas principais não nulas.	14
Figura 7 - Modelo gráfico em 3D do T75.....	28
Figura 8 - Corrente de curto circuito– T75.....	29
Figura 9-Densidade de força eletromagnética na direção axial em (a) 3D e (b) 2D – T75.	29
Figura 10 – Densidade de força eletromagnética na direção radial em (a) 3D e (b) 2D - T75.	30
Figura 11 - Estresse de VonMises, em 3D, sobre o enrolamento (a) interno, (b) externo -T75.	33
Figura 12- Estresse de Von Mises sobre os enrolamentos em 2D - T75.	33
Figura 13- Estresses principais e de Von Mises para o enrolamento interno do T75.	35
Figura 14- Estresses principais e de Von Mises para o enrolamento externo do T75.	35
Figura 15–Modelo gráfico em 3D do T180.....	37
Figura 16 - Corrente de curto circuito no (a) enrolamento externo e (b) enrolamento interno– T180.	38
Figura 17-Densidade de força eletromagnética na direção axial em (a) 3D e (b) 2D – T180.	39
Figura 18 – Densidade de força eletromagnética na direção radial em (a) 3D e (b) 2D - T180.	39
Figura 19 - Estresse de VonMises, em 3D, sobre o enrolamento (a) interno, (b) externo–T180.....	42
Figura 20- Estresse de Von Mises sobre os enrolamentos em 2D - T180.	42
Figura 21-Estresses principais e de Von Mises para os enrolamentos internos das fases A, B e C, respectivamente, do transformador T180.	43
Figura 22- Estresses principais e de Von Mises para os enrolamentos externos das fase A, B e C, respectivamente, do transformador T180.	44
Figura 23- Detalhamento das dimensões do, em milímetro, do Transformador monofásico 75 MVA.....	54
Figura 24- Detalhamento das dimensões do, em milímetro, do Transformador trifásico de 180 MVA.....	55

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

SE	Subestação
FE	Forças Eletromagnéticas
EM	Estresses Mecânicos
MEF	método dos Elementos Finitos
2D	Duas Dimensões
3D	Três Dimensões
$I_{cc}(t)$	Corrente de curto circuito no tempo t
V_{RMS}	Valor eficaz da tensão
R	Resistência do circuito da entrada da instalação até o ponto onde ocorreu o curto circuito
X	Reatância do circuito da entrada da instalação até o ponto onde ocorreu o curto circuito
L	Indutância correspondente à reatância X
S	Potência aparente
α	Ângulo da fase da tensão no instante em que ocorre o curto circuito
φ	Defasagem entre tensão e corrente
ω	Frequência angular
$Z\%$	Impedância percentual do transformador
I_{sim}	Valor de pico da componente simétrica da corrente de curto circuito
I_{asim}	Valor de pico da componente assimétrica da corrente de curto circuito
f_i	Fator de assimetria
r, ϕ e z	Representativos das direções dos vetores unitários em coordenadas cilíndricas
B_r	Componente radial da densidade de fluxo magnético de dispersão
B_z	Componente axial da densidade de fluxo magnético de dispersão
A	Potencial magnético
μ_0	Permeabilidade magnética
N	Número de espiras do enrolamento
I	Corrente elétrica
H_w	Altura do enrolamento

F	Força eletromagnética
B	Densidade de fluxo magnético de dispersão
F_r	Componente na direção radial da força eletromagnética
F_z	Componente na direção axial da força eletromagnética
l	Comprimento
dV	Elemento de volume diferencial
J	Densidade de corrente elétrica
D_m	Diâmetro médio do enrolamento
F_0	Valor de pico da força eletromagnética
σ	Estresse mecânico
A_F	Área em que a força está sendo aplicada
E_0	Módulo de elasticidade
ε	Deformação
S_y	Limite de escoamento
n	Vetor de estresse mecânico
σ_1, σ_2 e σ_3	Estresses principais
δ	Símbolo de Kronecker
σ'	Estresse de Von Mises
σ_{crit}	Estresse crítico
h	Espessura radial do enrolamento
R_m	Raio médio do enrolamento
n_c	Número de ciclos
a_f e b_f	Parâmetros da curva S-N
σ_{f0}	Limite de fadiga da curva S-N básica
k_s	Coefficiente de acabamento superficial
k_t	Coefficiente de tamanho
k_f	Coefficiente de fiabilidade
k_T	Coefficiente de temperatura
η	Coefficiente de segurança
T75	Transformador de 75 MVA
T180	Transformador de 100 MVA
EI	Enrolamento interno
EE	Enrolamento externo

SUMÁRIO

1	Introdução.....	1
1.1	Motivação	4
1.2	Objetivos.....	5
1.3	Estrutura do trabalho.....	5
2	Fundamentação teórica	7
2.1	Corrente de curto circuito	7
2.2	Forças eletromagnéticas.....	8
2.3	Forças radiais	10
2.4	Forças axiais	10
2.5	Estresses mecânicos	11
2.6	Critério de falha mecânica	13
2.7	Teoria da máxima tensão mecânica	13
2.8	Critério de Von Mises	14
2.9	Método dos elementos Finitos	15
3	Revisão bibliográfica	17
4	Metodologia.....	24
5	Resultados	28
5.1	Transformador T75	28
5.2	Comparação entre a modelagem analítica e computacional das forças eletromagnéticas.....	28
5.3	Comparação dos esforços eletromecânicos utilizando-se simulações em 2D e 3D	32
5.4	Comparação entre os critérios de Von Mises e de máxima tensão mecânica	34
5.5	Resultado do T180	37
5.6	Comparação entre a modelagem analítica e computacional das forças eletromagnéticas.....	37
5.7	Comparação dos esforços eletromecânicos utilizando-se simulações em 2D e 3D	41
5.8	Comparação entre os critérios de Von Mises e de máxima tensão mecânica	43
6	Conclusões.....	47
6.1	Trabalhos futuros	48
	Referências	50
	Anexo 1	54

1 INTRODUÇÃO

Os transformadores são os equipamentos mais caros e estratégicos dentro dos sistemas de transmissão e distribuição, sendo utilizados para propiciar a utilização da energia elétrica de forma adequada pelos consumidores, nos diversos níveis de tensão, e garantir a possibilidade de transmissão de energia a grandes distâncias com perdas reduzidas.

Os transformadores de potência são projetados e fabricados levando em consideração as características do ponto de instalação, tais como: impedância do sistema, potência do ponto de instalação, altitude, dentre outros. Portanto, no caso de falhas ou da necessidade de substituição, não são equipamentos disponíveis comercialmente em curto prazo de tempo.

As falhas em transformadores impactam diretamente no sistema elétrico provocando a interrupção do fornecimento da energia elétrica e diminuição dos índices de qualidade das concessionárias de setor elétrico. Pelo lado da oferta, a necessidade de reparo, ou até mesmo substituição de um transformador defeituoso, afeta financeiramente as concessionárias, tanto pela falta de faturamento como pelas penalizações dos órgãos reguladores ou por medidas judiciais. Desta forma, as concessionárias buscam permanentemente a minimização da ocorrência de falhas em transformadores e, assim, utilizando os conceitos da manutenção preditiva, determinar com exatidão o momento adequado para a sua substituição.

Por outro lado, com o aumento constante da demanda de energia elétrica, o número de transformadores instalados e os níveis de carregamento têm aumentado consideravelmente nos últimos anos, aumentando-se, assim, o número de falhas nos transformadores. Além do aumento da carga, podem-se elencar outros pontos que propiciaram a elevação do número de falhas nos transformadores, sendo estes:

- O envelhecimento dos transformadores instalados, já que logo depois de fabricados os transformadores apresentam, normalmente, uma boa suportabilidade térmica, dielétrica, química e mecânica. Contudo, com o tempo, estas características de suportabilidade são reduzidas, a ponto que

o transformador não seja mais capaz de suportar os esforços para os quais foi dimensionado;

- As Leis 866/1993 (lei da licitação) e 10.520/2002 (lei do pregão eletrônico) que determinaram o preço do equipamento como variável final do processo de compra dos transformadores. Essas leis originaram uma busca contínua pela diminuição do custo por parte dos fabricantes, ocasionando a diminuição da margem de segurança dos transformadores;
- A entrada de equipamentos oriundos da China que acentuaram, ainda mais, os efeitos causados pela Lei 866/1993 e Lei 10.520/2002.

Com o propósito de garantir a correta aquisição dos transformadores de potência, as empresas do setor elétrico utilizam como principais referências técnicas: a NBR-5356/2012 - Transformadores de potência normatizada pela Associação Brasileira de Normas técnicas (ABNT); os anexos técnicos dos Editais de Leilão da ANEEL, no caso de empreendimentos de concessão; e o Submódulo 2.3 do Procedimento de Rede do ONS, como requisitos mínimos para transformadores e para subestações e seus equipamentos (XAVIER, 2015).

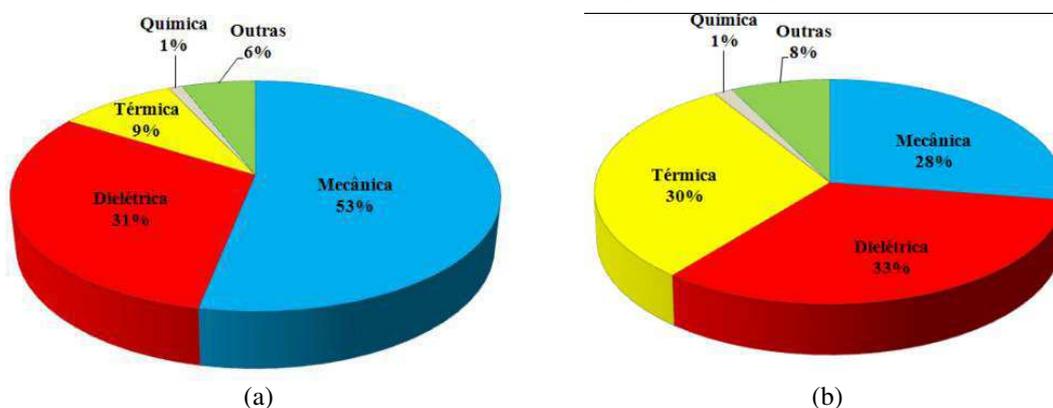
Em uma análise histórica, apesar do extremo cuidado na fase de projeto, a prática tem mostrado um número elevado de ocorrências de falhas nos primeiros anos de vida do transformador, o que se traduz em prejuízos para as empresas do setor energético (REIS, 1997). Isso ocorre principalmente do uso de aproximações e premissas por muitos projetistas, os quais podem conduzir a resultados imprecisos (SALON, LAMATTINA e SIVASUBRAMANIAM, 2000).

No entanto, o objetivo de satisfazer às exigências atualmente impostas pelas concessionárias e pelas normas vigentes, os fabricantes estão aperfeiçoando as técnicas de fabricação, como também, investindo em projetos de transformadores mais detalhados, de modo a melhorar a confiabilidade desses equipamentos sem a elevação dos custos.

Com o intuito de verificar as origens das falhas ocorrentes em transformadores de subestação (SE) convencional e transformadores de usinas geradoras, o Cigré (1983) realizou um estudo com diversas concessionárias do mundo, cujos resultados estão ilustrados na Figura 1. Na Figura 1 é possível observar que mais de 50% das falhas em transformadores são de origem mecânica ou dielétrica. As falhas mecânicas estão correlacionadas às falhas em comutadores sob carga, visto a grande demanda de sua utilização, e aos esforços mecânicos ocorrentes nos enrolamentos. Já as falhas dielétricas estão diretamente ligadas à redução da suportabilidade da isolação. Porém, todas essas

falhas estão correlacionadas à passagem de altas correntes transitórias, que dão origem às deformações e deslocamentos nos enrolamentos do transformador.

Figura 1 - Origem das falhas em transformadores de subestações convencionais e de usinas geradoras;
(a) Origem de falhas de transformadores de SE convencionais. População: 31.031 unidades-ano;
(b) Origem de falhas de transformadores de SE de usinas geradoras. População: 2335 unidades-ano.



Fonte: Adaptado de Cigré (1983) e Rosentino (2010).

Desta forma, deformações e deslocamentos, que são oriundos das Forças Eletromagnéticas (FE) e dos Estresses Mecânicos (EM), promovem danos no sistema de isolamento e na estrutura mecânica dos enrolamentos, podendo resultar em falhas de origens dielétricas e mecânicas, como os ilustrados na Figura 2, onde é possível visualizar a deformação mecânica dos enrolamentos, como também, a deterioração da isolamento dos enrolamentos decorrentes dos EM.

Figura 2– Deformações e danos na isolamento causados pela passagem de corrente de curtos circuitos.



Fonte: ABB Brasil (2015).

Em regime normal de operação, as FE e os EM são de baixas amplitudes e normalmente não ocasionam problemas. Contudo, na ocorrência de curtos circuitos, as FE e os EM têm seu valor aumentado, visto que as FE são diretamente proporcionais à

intensidade de corrente elevada ao quadrado, aumentando significativamente o risco de danos aos transformadores.

Dado o grande número de falhas, conforme relatado no trabalho do Cigré (1983), os trabalhos que se propõem a estudar a distribuição das FE e dos EM em transformadores de potência, e seus impactos, são de grande importância. Pesquisas com este foco podem contribuir em uma larga faixa de interesse, isto é, desde a fase de projeto até a manutenção dos transformadores.

Em relação aos EM, no decorrer da pesquisa verificou-se que a literatura sobre transformadores utiliza apenas um critério mecânico, o critério da máxima tensão, para avaliar a proximidade de falhas nos enrolamentos dos transformadores. Este critério considera que os esforços ocorrem de modo individual, o que não condiz com a realidade. A literatura de Engenharia Mecânica relata a existência de diversos critérios, dentre esses, o critério de Von Mises, o qual considera a existência de esforços combinados (BRANCO, 1985).

Pelo exposto, esta proposta de trabalho foi concebida com o objetivo de comparar dois critérios de falha mecânica, Von Mises e máxima tensão mecânica. Os dois critérios de falha estão amparados em relações matemáticas que prevejam as condições de início da deformação plástica nos enrolamentos dos transformadores. Assim, o objetivo é fornecer mais um parâmetro para ser empregado durante a fase de projeto dos transformadores.

1.1 MOTIVAÇÃO

A pesquisa do Cigré (1983) evidencia um número considerável de falhas provenientes de deformações e deslocamentos nos enrolamentos dos transformadores. Entretanto, há uma carência de metodologias e ferramentas robustas para se avaliar os efeitos dos EM decorrentes das elevadas correntes transitórias sobre os transformadores (CIGRE, 2002; AZEVEDO, 2007).

Uma ferramenta robusta no monitoramento e conseqüentemente na prevenção das falhas provenientes dos EM é a adoção do monitoramento *online* por meio de fibras ópticas dos transformadores. No entanto, esta solução encontra limitações de ordem

financeira, devido ao alto custo da sua implantação e também à inviabilidade do seu uso em transformadores já construídos.

Por outro lado, com o aumento da capacidade de processamento dos computadores, as simulações computacionais apresentaram-se como uma alternativa economicamente viável para a avaliação dos efeitos dos EM, já que seria possível estimar os EM sofridos pelos enrolamentos baseando-se nos dados das correntes de curto circuito ocorrentes nos enrolamentos dos transformadores. As simulações, também, apresentaram-se como uma maneira de obter uma solução mais precisa, frente à modelagem analítica, dos EM durante a fase de projeto dos transformadores de potência.

Adicionalmente, por meio de simulações computacionais, pode-se avaliar a aplicabilidade de outro critério de falha mecânica, de modo a tornar os projetos dos transformadores ainda mais criteriosos.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo desta dissertação é comparar as vantagens e desvantagens do critério da máxima tensão mecânica, amplamente utilizado na literatura de transformadores, com o critério Von Mises, que é consolidado na Engenharia Mecânica. Adicionalmente, busca-se verificar os efeitos das FE e dos EM decorrentes da passagem de um curto circuito pelos enrolamentos de transformadores por meio de simulações computacionais.

São ainda buscados os seguintes objetivos específicos:

- i. Comparação dos resultados oriundos das simulações computacionais das FE com a formulação analítica;
- ii. Comparação dos resultados das simulações em 2D e 3D dos esforços eletromecânicos;
- iii. Comparação e identificação das vantagens e desvantagens dos dois critérios de falha mecânica, de modo a avaliar o adequado para ser utilizado durante a fase de projeto do equipamento.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Após a Introdução, o trabalho segue conforme destacado nos parágrafos a seguir.

No Capítulo 2 será apresentada uma fundamentação teórica para auxiliar o leitor no entendimento do tema deste trabalho, fornecendo informações sobre corrente de curto circuito, FE, EM e Método dos Elementos Finitos (MEF), com ênfase no foco da pesquisa.

O Capítulo 3 descreve a revisão bibliográfica sobre os principais resultados das pesquisas reportadas na literatura, que abordam estudos das FE e dos EM oriundos de correntes transitórias.

No Capítulo 4 será descrita a metodologia proposta, enfatizando os detalhes da modelagem, simulação, coleta de resultados e cálculos analíticos.

Posteriormente, no Capítulo 5 serão descritos os resultados da pesquisa, bem como considerações acerca dos mesmos.

No Capítulo 6 são apresentadas as conclusões acerca dos resultados obtidos e as sugestões para trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste Capítulo será apresentada a fundamentação teórica necessária para auxiliar o leitor no entendimento do tema proposto, fornecendo informações sobre corrente de curto circuito, FE, EM e MEF.

2.1 CORRENTE DE CURTO CIRCUITO

Um curto-circuito consiste em um contato entre condutores sob potenciais diferentes. O contato pode ser direto (franco ou através de impedância) ou indireto (através de arco voltaico).

Os curtos circuitos podem ser de quatro tipos: monofásicos, bifásicos, bifásicos para a terra e trifásicos. Tipicamente, os curtos circuitos monofásicos são os mais frequentes e os curtos circuitos trifásicos mais severos ao sistema.

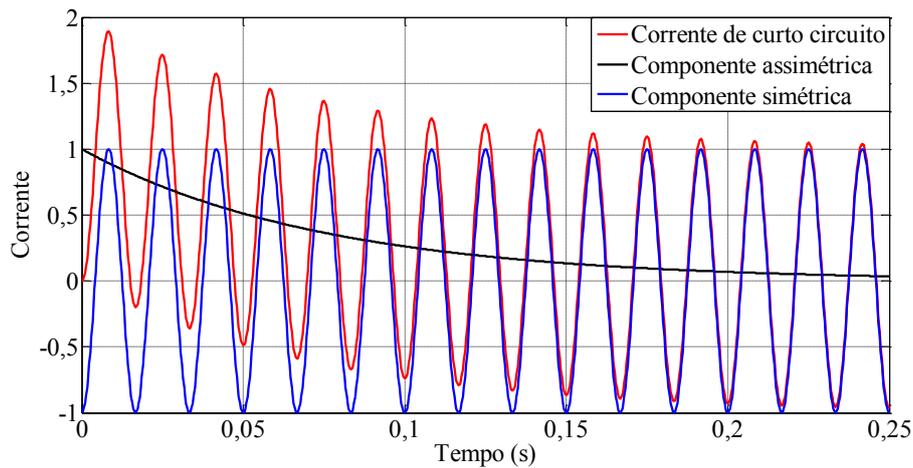
A amplitude da corrente de curto circuito depende da impedância equivalente vista do ponto do curto circuito e da potência aparente. Assim, a corrente de curto circuito do transformador pode ser aproximada pela equação (1) (IEEE STD 551, 2006; IEC, 2000; ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1993), na qual a contribuição da impedância do sistema é desconsiderada.

$$I_{cc}(t) = -\frac{\sqrt{2} \cdot S}{V_{RMS} \cdot Z\%} \text{sen}(\alpha - \varphi) \cdot e^{-\frac{R}{L}t} + -\frac{\sqrt{2} \cdot S}{V_{RMS} \cdot Z\%} \cdot \text{sen}(\omega \cdot t + \alpha - \varphi). \quad (1)$$

Na expressão (1), I_{cc} é a corrente de curto circuito do transformador; V_{RMS} é a tensão nominal do transformador; R é a resistência interna; S é a potência aparente do transformador, L é a indutância; $Z\%$ é a impedância percentual do transformador; α é o ângulo de fase em que ocorre o curto circuito; φ é a defasagem entre tensão e corrente e ω é a frequência angular.

Partindo da expressão (1), verifica-se que a corrente de curto circuito do transformador é composta pela soma de duas componentes, sendo uma simétrica, que corresponde à resposta em regime permanente; e a outra assimétrica, que é uma corrente transitória, como ilustrado na Figura 3.

Figura 3 - Resposta da corrente de curto circuito com fator de assimetria 1,8.



Fonte: Elaborada pelo autor.

O valor de pico da componente simétrica da corrente de curto circuito é expresso por (2), isto é, a máxima corrente de curto circuito em regime permanente.

$$I_{Sim} = \frac{\sqrt{2} \cdot V_{RMS}}{\sqrt{R^2 + X^2}} \quad (2)$$

O valor máximo da corrente de curto circuito, apresentada na Figura 3, pode ser determinado por meio da expressão (3).

$$I_{Assim} = f_i \times I_{Sim} \quad (3)$$

Na expressão (3), I_{Assim} é o valor de pico da corrente de curto circuito considerando a componente assimétrica (componente CC), f_i é o valor do fator de assimetria e I_{Sim} é o valor de pico componente simétrica da corrente de curto circuito.

O valor do fator de assimetria varia de acordo com a relação da resistência e da reatância interna do transformador. Este valor é, geralmente, fornecido pelo fabricante ou, então, encontrado nas normas já destacadas neste trabalho (IEEE STD 551, 2006; IEC, 2000).

Após esta breve explanação sobre a corrente de curto circuito, serão apresentados os fundamentos das FE.

2.2 FORÇAS ELETROMAGNÉTICAS

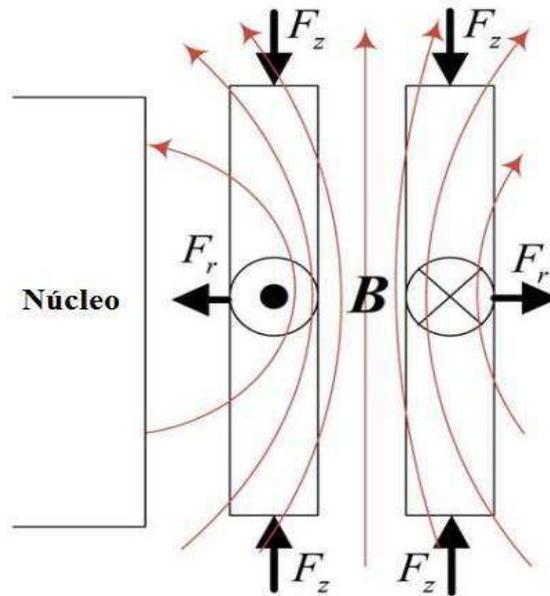
De maneira geral, as FE nos transformadores são dadas pela expressão básica da força de Lorentz, expressada por (4), na qual as forças são oriundas da relação entre a

densidade de fluxo magnético de dispersão e a densidade superficial de corrente presente nos enrolamentos do transformador.

$$F = J \times B \quad (4)$$

Na expressão (4), F é a força de Lorentz sobre os enrolamentos do transformador; B é a densidade de fluxo magnético de dispersão e J é a densidade superficial de corrente nos enrolamentos. Os comportamentos das linhas de fluxo magnético de dispersão e das FE estão ilustrados na Figura 4.

Figura 4 – Linhas de fluxo magnético de dispersão e FE nos enrolamentos do transformador



Fonte: Adaptado de Zhang e outros (2014);

Na Figura 4, pode-se observar que as forças radiais são compressivas no enrolamento interno e trativas no enrolamento externo, enquanto as forças axiais são sempre compressivas em ambos os enrolamentos. Visto que as forças são resultados de um produto vetorial, a densidade de fluxo magnético de dispersão axial originará as forças radiais, enquanto as forças axiais serão oriundas da densidade de fluxo magnético de dispersão radial. Desta forma, as FE sobre os enrolamentos são expressas por (5):

$$F = J \times B_R + J \times B_Z \quad (5)$$

Na expressão (5), B_Z é a densidade de fluxo magnético de dispersão axial e B_R é a densidade de fluxo magnético de dispersão radial. As componentes nas direções radial e axial da densidade de fluxo magnético de dispersão são expressas por (6):

$$B_r = -\frac{\partial A_\varphi}{\partial z}, \quad B_z = \frac{1}{r} \frac{\partial r A_\varphi}{\partial r} \quad (6)$$

Na expressão (6), r , φ e z são representativos dos vetores unitários em coordenadas cilíndricas; B_r e B_z são as componentes radial e axial da densidade de fluxo magnético de dispersão, respectivamente e A é o vetor potencial magnético.

2.3 FORÇAS RADIAIS

A força radial, descrita por (FRONTIN, 2013), é uma função da corrente e da componente axial da densidade de fluxo magnético de dispersão, expressa por (7):

$$F_{Rad} = \frac{B_z}{2} \cdot N \cdot I \cdot \frac{D_{med}}{2}. \quad (7)$$

Na expressão (7), F_{Rad} é a força radial no enrolamento; N é o número de voltas; I é a corrente que passa no enrolamento e D_{med} é o diâmetro médio do enrolamento. Sendo a densidade de fluxo magnético de dispersão, B_z , dada por (8):

$$B_z = \mu_0 \cdot \frac{N \cdot I}{H_w}. \quad (8)$$

Na expressão (8), μ_0 é permeabilidade magnética e H_w é a altura do enrolamento.

Em um arranjo equilibrado de dois enrolamentos, como ilustrado na Figura 4, a força radial é máxima onde a indução magnética é máxima, isso ocorre no meio do enrolamento. As principais solicitações das componentes radiais das FE são: compressão do enrolamento interno, tração do enrolamento externo e deterioração da isolamento.

2.4 FORÇAS AXIAIS

A força axial, descrita por (FRONTIN, 2013), é uma função da corrente e da componente radial da densidade de fluxo magnético de dispersão, dada por (9):

$$F_{ax} = 2 \cdot \pi \cdot \frac{N \cdot I}{H_w} \cdot \frac{D_{med}}{2} \cdot \int_{z_0}^z B_R(z) \cdot dz. \quad (9)$$

Na expressão (9), F_{ax} é a força axial nos enrolamentos.

Como as forças axiais são máximas nas extremidades superiores e inferiores dos enrolamentos, suas principais solicitações são: compressão axial excessiva dos enrolamentos, tombamento e colapso axial dos enrolamentos, deslocamento axial de espiras, flexão axial de condutores entre calços radiais dos enrolamentos e deterioração da isolamento.

Como já mencionado, as formulações analíticas das FE são baseadas em inúmeras simplificações, contudo, apresentam boas estimativas dos esforços eletromagnéticos. Entretanto, vale lembrar que essa formulação pode necessitar de ajustes, de modo que é recomendado que as forças axiais sejam determinadas utilizando métodos numéricos (YUM-QIU, JING-QIU e ZI-HONG, 1990).

A partir das FE são gerados os EM nos enrolamentos do transformador, que são apresentados a seguir.

2.5 ESTRESSES MECÂNICOS

Nesta seção é apresentada uma fundamentação básica acerca dos estresses mecânicos sofridos pelos enrolamentos.

Quando uma força atua sobre certo elemento gera uma tensão mecânica, ou estresse mecânico, que é expressa por (10):

$$\sigma = \frac{F}{A_f}. \quad (10)$$

Na expressão (10), σ é o estresse mecânico; F é a força que atua sobre o elemento e A_f é a área transversal sobre a qual a força atua. O EM dará origem a extensão ou compressão do comprimento do elemento, que é chamado deflexão e é dada pela relação (11).

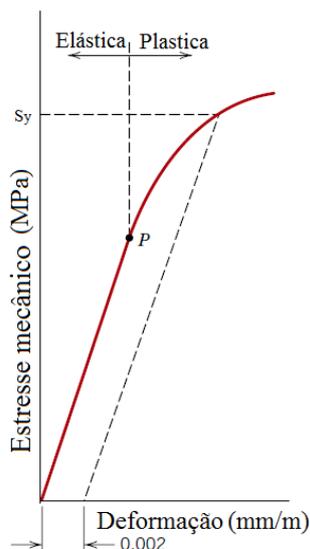
$$l - l_0. \quad (11)$$

Em (11), l é o comprimento após a aplicação da força e l_0 é o comprimento inicial. Logo a deformação, ε , é calculada por:

$$\varepsilon = \frac{l - l_0}{l_0}. \quad (12)$$

Segundo Callister (2009), um modo de analisar os materiais sobre sua suportabilidade mecânica é observando a curva tensão-deformação do material, que relaciona os EM com deformação sofrida pelo material, que é ilustrada, genericamente, na Figura 5.

Figura 5 - Curva tensão-deformação



Fonte: Adaptado do Callister (2009).

Na Figura 5 é possível observar o ponto P , que é denominado limite elástico do material. O ponto P representa o limite entre a deformação elástica e deformação plástica. Sendo assim, se um material sofre um estresse mecânico superior ao limite elástico, julga-se que o material sofrerá uma deformação plástica, ou seja, que terá uma deformação permanente quando o estresse for removido. Contudo, se o estresse for inferior a esse limite, nenhuma deformação será observada quando a força for removida, considera-se, assim, que material sofre uma deformação elástica.

O intervalo linear entre o zero e o limite de elástico fornece uma relação linear conhecida como lei de Hooke, a qual é expressa em (13) (SHINGLEY, MISCHKE e BUDYNAS, 2005):

$$\sigma = E.\varepsilon. \quad (13)$$

Em que E é a constante de proporcionalidade chamada de módulo de Young ou módulo de elasticidade do material. Esta é a medida de rigidez mecânica de um material.

No entanto, ensaios em laboratório mostraram que a medição exata do limite de elástico não é trivial, já que o início da deformação plástica ocorre em níveis microscópicos. Como consequência, uma convenção foi estabelecida, na qual se deve construir uma linha reta paralela à porção elástica da curva com um especificado deslocamento, geralmente 0,2% (CALLISTER, 2009). O ponto no qual a reta corta a curva tensão-deformação é denominado limite de escoamento, como ilustrado na Figura 5 e representado pelo símbolo S_y .

Quando se analisam os transformadores, constata-se que os fabricantes geralmente fornecem o limite de escoamento que foi utilizado durante a fase projeto, que depende do tipo de material e do arranjo dos condutores. Os valores geralmente utilizados são os de 0,2% de estresse de prova (valor do estresse resultante para um alongamento de 0,2% do material durante o ensaio de tensão-deformação). Por questão de segurança, também é comum utilizar somente 80% deste valor (CIGRE, 2002).

Segundo o Crigé (2002), dependendo do transformador, alguns fabricantes utilizam 85% do valor de 0,1% do estresse de prova como limite de escoamento (CIGRE, 2002).

2.6 CRITÉRIO DE FALHA MECÂNICA

Os critérios de falha mecânica são teorias que tentam prever as condições sob as quais se inicia a deformação plástica, ou falha, quando o material é submetido a uma carga externa. Os critérios, estudados neste trabalho são a teoria da tensão máxima e a teoria da energia de distorção, também conhecida por critério de Von Mises.

2.7 TEORIA DA MÁXIMA TENSÃO MECÂNICA

A teoria da máxima tensão mecânica é o critério mais simples e direto para análise de falha mecânica, sendo utilizado atualmente pelos fabricantes e estudado nos principais trabalhos presentes nas referências bibliográficas. Nele é estabelecido que a falha ocorre apenas quando a máxima tensão principal (σ_1) atinge o valor do limite de escoamento (S_y), como expresso por (14), sendo n é o fator de segurança.

$$\sigma_1 \geq \frac{S_y}{n}. \quad (14)$$

Por outro lado, os estresses são analisados individualmente, não levando em consideração a composição dos estresses radiais e axiais que acontecem mutualmente nos enrolamentos do transformador. Além disso, na literatura, o critério da máxima tensão mecânica não é indicado para materiais dúcteis (BRANCO, 1985).

2.8 CRITÉRIO DE VON MISES

O critério de Von Mises afirma que ocorrerá falha se o estresse sobre o elemento, no caso o estresse de Von Mises, for maior que o limite de escoamento do material, conforme é expresoado por (15) (MISES, 1913). Segundo Shingley, Mischke e Budynas (2005), este critério de falha é o mais adequado para materiais dúcteis, no qual o cobre é classificado.

$$\sigma' \geq S_y . \quad (15)$$

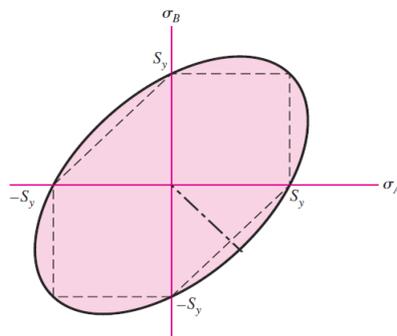
Em (15), σ' é o estresse de Von Mises, que é dado por:

$$\sigma' = \left[\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2} \right]^{1/2} . \quad (16)$$

Conforme destacado anteriormente, os σ são os EM e 1, 2 e 3 referem-se às direções espaciais, sempre $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$.

Considerando os problemas nos quais há duas tensões principais, o critério de Von Mises é resumido no gráfico apresentado na Figura 6 (SHINGLEY, MISCHKE e BUDYNAS, 2005) que mostra a região de segurança para o critério de Von Mises. Esta região segurança determina que se um par de EM (σ_1 e σ_2) estiverem dentro da elipse de Von Mises não ocorrerá falha mecânica no material.

Figura 6–Representação bidimensional do critério de Von Mises para estado plano de tensão de duas principais não nulas.



Fonte: Shingley, Mischke e Budynas (2005)

A abordagem de analisar os esforços de modo combinado é o grande diferencial do critério de Von Mises, uma vez que o componentes mecânico sofre esforços tanto na

direção radial quanto na direção axial. Estes esforços acontecem mutuamente nos componentes mecânicos, não podendo, assim, serem analisados separadamente. Além disso, o critério da máxima tensão é indicado para materiais que apresentam grande rigidez como característica (BRANCO, 1985), classificação na qual o cobre não se inclui.

2.9 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

O MEF foi inicialmente desenvolvido para análise de estruturas, no final dos anos 60 começou a ser utilizado para resolução de problemas envolvendo fenômenos eletromagnéticos. A análise de um problema qualquer pelo MEF envolve quatro etapas: discretização do domínio em número finito de sub-regiões ou elementos; obtenção das equações que regem o elemento; conexão de todos os elementos do domínio e resolução do sistema de equações obtido (SADIKU, 2004).

A discretização de um problema consiste na representação abstrata da região, equipamento ou corpo que se deseja analisar, e na subdivisão desta representação em um número finito de elementos. (FERREIRA, 2007). Os elementos finitos são ligados entre si por pontos comuns dos subdomínios, chamados de nós. Esse conjunto de subdomínios, resultante da discretização, é chamado de malha.

Com a malha e seus respectivos nós obtidos, soluções aproximadas são introduzidas no interior de cada elemento. Essas soluções são expressas como funções dos valores que as incógnitas assumem nos nós, sendo as funções chamadas de função de interpolação e as incógnitas do problema designadas de grau de liberdade. As incógnitas do problema passam a ser os valores das variáveis de campo nos pontos nodais, que é dependente da ordem, do número de elementos e do número de variáveis dependentes do problema.

Dependendo da natureza do problema, após a discretização, o modelo matemático regente é representado por um número finito de equações diferenciais ordinárias ou de equações algébricas, cuja resolução numérica conduz aos valores das incógnitas nodais. Uma vez determinadas as incógnitas, os valores das variáveis de campo no interior dos elementos podem ser avaliados empregando-se funções de interpolação (AZEVEDO, 2007).

Apesar de apresentar soluções aproximadas, a exatidão do MEF pode ser melhorada com o refinamento da malha. Existe um nível ótimo de refinamento que

proporciona uma solução mais próxima da realidade com um esforço computacional razoável. Há, no entanto, um limite para o número de elementos, a partir do qual os erros de arredondamento se acumulam de tal forma que um aumento do número de elementos não traz uma melhora na exatidão (FERREIRA, 2007).

Atualmente, o emprego de *softwares* baseados no MEF facilitam a resolução de problemas, uma vez que o usuário não precisa ter um conhecimento profundo do método. Entretanto, deve-se ter conhecimento a respeito dos fenômenos físicos envolvidos no problema, para que avaliações errôneas não sejam realizadas. Os *softwares* proporcionam um conjunto de ferramentas para resolução de problemas em 1D, 2D e 3D e seus funcionamentos são baseados nos seguintes módulos:

- Pré-processamento: Nessa etapa é necessário realizar a representação gráfica, informar as condições de contorno, as propriedades dos materiais e os procedimentos de simulação (físicas) inerentes aos problemas, e realizar a geração das malhas;
- Processamento: resolução de problemas: Etapa a qual é realizada integralmente pelo *software*. Na etapa de processamento os cálculos devem ser realizados de acordo com as escolhas feitas na etapa de Pré-processamento;
- Pós-processamento: Essa etapa se caracteriza por obtenção, observação e interpretação os resultados obtidos.

Com a apresentação das informações a respeito das falhas em transformadores, corrente de curto circuito, forças eletromagnéticas, estresses mecânicos, critérios de falha mecânica, critérios de falhas mecânicas e método dos elementos finitos, pode-se entender e comentar sobre a maioria das principais pesquisas desenvolvidas a respeito dos estudos dos esforços eletromecânicos nos enrolamentos de transformadores, assim como está apresentado a seguir.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são apresentados os principais resultados das pesquisas e estudos de casos reportados na literatura, abordando estudos dos esforços eletromagnéticos e mecânicos oriundos de correntes transitórias.

Em 1950, Gibbs mostrou que as forças entre espiras de um mesmo enrolamento de um transformador são de atração. Por outro lado, as forças entre as espiras de enrolamentos distintos são de repulsão, se as correntes que circulam em ambos enrolamentos tiverem sentidos opostos. Estes efeitos estarão sempre presentes quando o transformador está em operação, independentemente do regime de funcionamento.

Em 1966, Waters publicou um livro no qual determinou a formulação analítica dos esforços eletromagnéticos oriunda da passagem de um curto circuito nos enrolamentos de transformadores. Ele ainda demonstrou a influência de diversos arranjos de tapes e os esforços adicionais devido às derivações. No livro, ele ainda descreveu diversos fenômenos correlacionado a transformadores. O livro pode considerado uma referência para determinação analítica das FE.

Nos trabalhos de Ayers e outros (1974) e (1975) foram utilizados métodos para medição e cálculo de FE nos enrolamentos de transformadores. Os autores destacam que utilizaram um transformador de teste para realizar as medições. Os trabalhos vêm servindo de base para entendimento da metodologia a ser utilizada na medição das FE nos enrolamentos de transformadores. Entretanto, a medição das FE não é trivial, uma vez que na época requeria um transformador cujo projeto fosse significativamente alterado para realização das medições.

Em 1980, Patel demonstrou que curtos circuitos provocam instabilidade axial nos enrolamentos de transformadores. Além disso, no trabalho é mostrado que existe um esforço limite para o enrolamento, destacando que a determinação das FE e dos esforços limites deve ser considerada, durante a fase de projeto do equipamento.

Yun-Qiu e outros (1990) determinaram as expressões analíticas das FE, na direção radial e axial, tomando como base o comportamento dinâmico da corrente de curto circuito. Mostraram que as forças eletromagnéticas têm três componentes: uma na frequência fundamental, uma de segunda harmônica e uma não oscilatória. Os autores constataram que as fórmulas convencionais utilizadas para se efetuar cálculos de forças

podem necessitar de ajustes. Sendo recomendado que as forças axiais sejam determinadas utilizando métodos numéricos. O trabalho pode ser considerado um marco para o entendimento do comportamento dinâmico das FE, ampliando ainda mais o campo de estudo para pesquisadores que o sucederam no tema.

Em 1998, Najdenkoskie e Monov apresentaram um estudo com o objetivo determinar a ação das FE, utilizando simulações em 2D, em um transformador de potência, quando da ocorrência de um curto circuito trifásico. Utilizando o MEF, concluíram que as forças axiais são mais expressivas nas extremidades superior e inferior do enrolamento, enquanto as forças radiais acarretam estresses trativos no enrolamento externo e compressivo no enrolamento interno. Os resultados são meras confirmações das conclusões obtidas por Gibbs em 1950.

No ano de 2000, Salon, Lamattina e Sivasubramaniam apresentaram um trabalho sobre FE em transformadores de distribuição e, também utilizando o MEF. Eles, concluíram que a saturação do núcleo não tem impacto direto na FE dos enrolamentos, e que, para cálculo das forças, existe uma boa correlação entre resultados obtidos com a modelagem 2D e 3D. A última afirmação é muito importante para este trabalho de dissertação, visto que validou as simulações em 3D.

Em 2001, Wang e Butler apresentaram um estudo de falhas relacionadas com curtos circuitos interno em um transformador de distribuição. Baseado nos resultados experimentais, eles observaram que simulações baseadas no MEF fornecem uma boa estimativa para cálculos de FE. No trabalho, também foi apresentado uma metodologia de monitoramento *on-line* para transformadores de distribuição. A adoção do monitoramento *on-line* dos transformadores seria de grande valia para prevenção de falhas. No entanto, a adoção, encontra limitações de ordem financeira, visto o alto custo da sua implantação, como já relatado neste trabalho.

Em 2003, Bartley apresentou um trabalho no qual descreveu os principais tipos de falha em transformadores, os métodos de monitoramento e seus respectivos diagnósticos. Com isso, concluiu não existir uma formulação básica para falhas em transformadores, sendo na época, o monitoramento contínuo a melhor forma de prevenção das falhas.

Avezedo, em 2007, baseado nas equações analíticas para FE e EM, realizou um estudo da distribuição de campo e das FE, utilizando os MEF, em um transformador. No trabalho, ela realizou uma comparação entre os resultados, analítica e computacional, e verificou que os resultados oriundos do MEF se revelaram mais confiáveis, tendo em

vista as aproximações necessárias para o desenvolvimento da formulação analítica. Por fim, a autora verificou o comportamento dinâmico das FE utilizando módulos do *software* ATP que se baseiam em cálculos analíticos. Todas as simulações realizadas no trabalho foram em 2D, contudo o trabalho norteou vários estudos realizados nos anos seguintes.

Em 2008, Franzen e Karlsson apresentaram um estudo que identificou as falhas nas principais partes integrantes de um transformador, listou os eventos que cada falha e por fim, eles apresentaram um estudo estocástico para determinação do risco de falha nos transformadores. No seu estudo, os autores evidenciaram a importância da correlação entre os EM e os danos suportados pelos enrolamentos dos transformadores.

Em 2008, Strac, Kelemem e Zarko apresentaram um trabalho com o objetivo de comparar: as forças eletromagnéticas em enrolamento tipo I e tipo U; os resultados das simulações usando o método de Rabin em 2D e o método dos elementos finitos em 3D; e a influência do modelo elíptico frente ao modelo cilíndrico. O artigo, enfatiza que a modelagem 2D oferece uma boa estimativa das FE no enrolamento, tanto na direção radial quando na direção axial, muito próximo do obtido com a modelagem 3D. Os autores concluíram que a modelagem 3D somente é necessária quando são requisitados cálculos muito precisos e detalhados. Ainda observaram que não existem grandes diferenças entre os resultados da modelagem cilíndrica para elíptica, sendo que última requer um esforço computacional mais elevado.

Em 2009, Hongkui e outros, apresentaram um estudo das FE tendo como base às correntes de *inrush*, simulações tridimensionais por MEF. Eles mostraram a orientação e estimativa da amplitude das FE, com também, uma comparativo com a distribuição de forças causadas pela corrente de curto circuito.

No trabalho de Rosentino (2010), foi realizado comparativo das FE entre a modelagem analítica e os resultados fornecidos pelo *software* FEMM, baseados no MEF e modelagem 3D. Nas simulações foram replicando as simulações realizadas por Azevedo em 2007, que havia utilizado simulações com modelagem 2D. Complementarmente, o autor realizou um estudo bibliográfico sobre diversos motivos de falhas em transformadores e seus métodos de diagnósticos, suas conclusões foram de encontro com o trabalho de Franzen e Karlsson datado de 2008.

Com o propósito de validar as simulações, em 2011, Saraiva realizou uma comparação de FE e de EM entre a modelagem analítica, simulações baseadas no MEF e resultados obtidos em laboratório. No trabalho foi verificado, também, a mudança de parâmetros do transformador devido às deformações oriundas dos EM. Por fim, a autora

dissertou sobre as técnicas tradicionais de avaliação de falhas em transformadores. Contudo, Saraiva simulou apenas metade do transformador, justificando tal decisão devido à simetria do transformador e a restrição da capacidade de processamento existente.

Em 2011, Faiz, Ebrahimi e Abu-Elhajja calcularam as FE, radiais e axiais, devido às correntes de curto circuito e de *inrush*, nas superfícies dos enrolamentos de baixa e alta tensão do transformador. Baseando-se no MEF e utilizando modelagem em 2D e 3D, eles concluíram que as FE no enrolamento interno são de maior intensidade na superfície interna, enquanto, no enrolamento externo as forças são maiores na superfície externa. As simulações foram realizadas sobre as superfícies dos enrolamentos, não podendo, assim, caracterizar como propagação das forças nos enrolamentos dos transformadores.

Em 2012, Ahn e outros estimaram os estresses mecânico devido à corrente de curto circuito em um transformador monofásico a seco de 50 kVA. Baseando-se na modelagem dos enrolamentos em forma de disco e no MEF, realizaram simulações eletromagnéticas e mecânicas separadamente. Eles concluíram que estimativas dos esforços eletromecânicos utilizando o MEF é adequado para projetos estruturais de transformadores. No trabalho, as simulações foram realizadas separadamente, o que não condiz com a realidade, mas diminui consideravelmente o esforço computacional.

Em 2013, Guimarães apoiou-se na metodologia analítica para determinação da amplitude das FE encontradas em transformadores, em decorrência dos fenômenos transitórios causados durante a energização de transformadores. Ele realizou simulações no domínio do tempo para as mesmas circunstâncias, tomando como base o MEF e modelagem 3D. Por fim, ele validou os resultados com os obtidos em ensaios em laboratório. No seu trabalho, ele ainda apresentou uma metodologia para determinação do tempo de vida útil do transformador, baseado no critério de fadiga.

Em 2014, Ebrahimi e outros propuseram um modelo analítico para o cálculo das forças radiais e axial no enrolamento de baixa e alta tensão em transformadores de potência com núcleo envolvido. O modelo proposto inclui considerações da característica não linear do núcleo, da corrente parasita e do ciclo de histerese. Para certificar os resultados obtidos pelo modelo analítico, realizaram simulações computacionais, em 2D, baseadas no MEF. Eles concluíram que pode-se obter resultados precisos e com menor número de entradas, se for considerado o laço de histerese na modelagem do método aplicando para calcular a densidade do fluxo de fuga.

Em 2014, Haijun Zhang e outros apresentaram um trabalho sobre comportamento dinâmico de um transformador de potência. Usando o critério de Von Mises e o MEF. Eles mostraram resultados, em 3D, que refletem os efeitos de pré-carga para o comportamento dinâmico dos estresses mecânicos, apresentaram também o deslocamento dos enrolamentos quando da ocorrência de curto circuito e as propriedades não lineares dos enrolamentos. Contudo, os autores não mostraram nenhuma conclusão dos resultados, devendo ressaltar que no trabalho os procedimentos de simulação (físicas) eletromagnéticas e mecânicas foram trabalhados em separado, de tal forma que os deslocamentos causados pelas FE não influenciavam nos cálculos do fluxo de dispersão, o que não é fidedigno à realidade.

Em 2015, Bakshi e Kulkarni, baseados no fato das falhas devido à flambagem (*buckling*) serem comuns nos enrolamentos internos dos transformadores, apresentaram um trabalho no qual demonstraram uma formulação para determinação do estresse mecânico, ocorrente no enrolamento interno do transformador durante o curto circuito. De modo a validar o resultado, valor de estresse foi comparada com o resultado obtidos por simulações computacionais baseadas no MEF. Contudo, para utilização da formulação demonstrada se faz necessário a realização de simulações computacionais para obtenção das forças eletromagnéticas ocorrentes durante o curto circuito. Ainda torna-se necessário o uso de métodos numéricos para solucionar a formulação descrita no trabalho. Os autores concluíram que formulação apresenta resultados promissores, contudo carecem de estudos mais profundos. Visto que ocorrência de esforços mecânicos desenvolvidos durante o processo de enrolamento e/ou os efeitos transitórios, seja durante o processo transitório de fabricação ou devido aos efeitos cumulativos causados pelos curtos circuitos, não são considerados na formulação, o que pode levar a resultados imprecisos.

Em 2015, Geissler e Leibfried apresentaram um estudo acerca dos esforços mecânicos ocorrentes no papel isolantes que envolve os enrolamentos do transformador de potência. Usando o critério da máxima tensão e o MEF, eles realizaram simulações computacionais em 3D e nas quais variaram o número de camadas dos enrolamentos e o grau de envelhecimento do papel isolante. Assim, concluíram que o nível de suportabilidade mecânica do papel está diretamente correlacionado ao seu nível de envelhecimento, a espessura radial dos condutores e ao número de camadas do enrolamento.

Em 2015, Daneshmand e Heydari apresentaram uma topologia para enrolamentos de transformadores trifásicos com bobinas supercondutoras (HTS) e realizaram uma comparação com outras três topologias existentes. Baseado no MEF, realizaram simulações eletromagnéticas, mecânicas e térmicas na condição nominal de operação e na ocorrência de curto circuito, nas quais mostraram que a topologia híbrida, proposta no trabalho, apresenta menores perdas e menores forças eletromecânicas. Contudo, na análise térmica, a topologia híbrida resultou em maiores gradientes de temperatura durante a ocorrência de falhas. Apoiado no fato que os esforços mecânicos são um dos parâmetros mais importantes para os transformadores HTS, visto que esse tipo de transformador não pode operar com altas correntes se os enrolamentos estiverem deformados. Os autores concluíram que a magnitudes das forças mecânicas ocorrentes no transformador podem ser alterados apenas mudando a topologia dos enrolamentos e a topologia híbrida apresenta-se como um boa opção para estes tipo transformadores. Ainda concluíram que a escolha da topologias dos enrolamentos dos transformadores HTS dependem das prioridades de projeto e das suas condições de trabalho.

Em 2015, Bakshi apresentou um estudo sobre a deformação plástica dos enrolamentos de um transformador quando submetido a esforços eletromecânicos ocasionados para a pior condição de curto circuito. No trabalho, o autor emprega a expressão proposta por Vecchio (2010) para determinar o estresse crítico do enrolamento. Com o valor do estresse crítico do enrolamento, Bakshi determina o estresse de Von Mises no enrolamento e compara os dois valores encontrados. A partir da comparação e emprego do critério de critério de Von Mises, o autor informa se o enrolamento falhou plasticamente. Adicionalmente, o autor destaca que é importante estimar os esforços eletromecânicos suportáveis pelos enrolamentos durante a fase de projeto dos transformadores, para tentar minimizar a ocorrência de falhas plásticas no equipamento.

Pela revisão apresentada, constata-se que o estudo das FE está consolidado, porém os estudos dos EM, que se iniciaram por voltas dos anos 2000, vêm sendo aprimorado. Isto se deve ao aumento da capacidade de processamento dos computadores e o aperfeiçoamento dos *softwares* dedicados. Uma motivação para o uso de simulações computacionais é o alto custo do estudo experimental dos esforços eletromecânicos em transformadores.

Na tentativa de aprimorar os estudos, esta dissertação se baseia em simulações computacionais e busca comparar duas metodologias (Von Mises e máxima tensão mecânica) para análise de falhas mecânicas, com o propósito de avaliar a metodologia

mais adequada a ser empregada durante a fase de projeto do transformador, assim como melhorar as técnicas de fabricação e aumentar a margem de segurança contra falhas mecânicas no equipamento.

Na Tabela I está apresentado um resumo das principais contribuições das referências citadas neste capítulo. Assim como a contribuição do autor deste trabalho.

Tabela I. Contribuições das pesquisas.

Pesquisadores	Contribuições				
	EE	2D	3D	CF	AC
Gibbs (1950)	X				
Waters (1966)	X				
Ayers e outros (1974) e (1975)	X				
Patel (1980)	X				
Yun-Qiu e outros (1990)	X	X			
Najdenkoski e Manov (1998)	X	X			
Salon e outros (2000)		X	X		
Wang e Butler	X	X			
Azevedo (2007)	X	X		X	
Strac e outros (2008)		X	X		
HongKui e outros (2009)	X	X	X		
Rosentino (2010)	X	X		X	
Saraiva (2011)	X		X	X	
Faiz e outros (2010)	X	X	X		
Ahn, et al(2012)			X	X	
Guimarães (2013)	X		X		
Zhang e outros (2014)			X	X	
Ebrahimi, et al (2014)	X	X			
Bakshi e Kulkani (2015)		X		X	
Daneshmand e Heydari (2015)			X	X	
Geissler e Leibfried(2015)			X	X	
Bakshi(2015)	X			X	
Este trabalho	X	X	X	X	X

1. Destacaram a modelagem analítica das FE.
2. Destacaram modelagem computacional, no domínio 2D, dos esforços eletromecânicos (2D).
3. Destacaram modelagem computacional, no domínio 3D, dos esforços eletromecânicos (3D).
4. Destacaram a utilização de critérios de falha mecânica nos enrolamentos de transformadores (CF).
5. Destacaram a análise de mais de um critério de falha mecânicas (AC)

4 METODOLOGIA

Neste capítulo é apresentada a metodologia proposta para realização deste trabalho, enfatizando-se a modelagem, simulação, coleta de resultados e cálculos analíticos.

Este trabalho de dissertação foi desenvolvido dentro de um projeto de P&D da Chesf-Eletróbrás em parceria com a Universidade Federal de Campina Grande e a Universidade Federal de Itajubá.

O trabalho será realizado baseado na modelagem em 2D e 3D de dois projetos de transformadores, cujas características construtivas estão apresentadas na Tabela II.

Tabela II. Características construtivas.

		T75	T180
Transformadores		T75	T180
Potência (MVA)		75	180
Número de fases		1	3
Número de espiras	Enrolamento interno	115	320
	Enrolamento externo	667	675
Relação de transformação (kV/kV)		22/127	Δ 69/230Y
Impedância Percentual (%)		23,5	13,24
Altura dos enrolamentos (mm)	Enrolamento interno	1521	1990
	Enrolamento externo	1496,2	1910
Diâmetro médio (mm)	Enrolamento interno	994	985
	Enrolamento externo	1557	1272
Área da seção transversal do fio de cobre (mm²)	Enrolamento interno	583	861,46
	Enrolamento externo	229	575,4
Espessura radial (mm)	Enrolamento interno	70	84
	Enrolamento externo	113	106
Largura do núcleo (mm)		4320	4095
Altura do núcleo (mm)		3418	3870
Largura da janela (mm)		840	780
Altura da janela (mm)		1850	2230

Com auxílio de ferramenta *Computer Aided Design* (CAD), os dois transformadores serão modelados graficamente de acordo com a Tabela II, os desenhos dos transformadores, com suas devidas cotas, estão no Anexo I.

Com os transformadores devidamente modelados, será utilizado o *software Comsol Multiphysics*® para realizar as simulações computacionais e obtenção como saída a estimativa das FE e dos EM. Para tanto, a simulação deve ser baseada em três etapas de processamento, que são: etapa de pré-processamento, etapa de processamento e etapa de pós-processamento.

No pré-processamento é necessário informar as condições de contorno, as propriedades dos materiais e os procedimentos de simulação (físicas) inerentes aos problemas. No caso proposto, serão utilizados os procedimentos (físicas) eletromagnético e mecânica.

A permeabilidade magnética, permissividade elétrica, e condutividade são dados de entrada para física eletromagnética; e o módulo de elasticidade e razão de Poisson para caracterização da física da mecânica. Ressalta-se que, neste trabalho, os materiais utilizados serão cobre, para os enrolamentos, e ferro silício, para o núcleo. Além das propriedades dos materiais, torna-se necessário fornecer, como dados de entrada, o número de voltas, os parâmetros da forma de onda da corrente de curto circuito nos enrolamentos de baixa e alta tensão e a dimensão do cobre utilizado nos enrolamentos. As informações estão disponíveis na Tabela II.

O último passo da etapa de pré-processamento é dimensionar a malha de cálculo (*mesh*) para resolução do problema. A versão do programa utilizado disponibiliza oito pré-configurações de refinamento de malha e a escolha do grau de refinamento vai depender do balanço entre desempenho computacional (uso de malha extremamente grosseira) e da necessidade de resultados com maior precisão (malha extremamente fina). Como o transformador se apresenta como um problema de geometria complexa torna-se necessário a utilização da ferramenta de dimensionamento de malha de cálculo manual. E desse modo representar bem as áreas ou contornos do transformador com mais detalhes sem refinamento da malha nas outras regiões, reduzindo-se assim, o esforço computacional e aumentando a precisão dos resultados.

Uma vez concluída a etapa de pré-processamento, dar-se-á início a fase de processamento, a qual é realizada integralmente pelo *software*. Na etapa de processamento os cálculos devem ser realizados de acordo com a escolha do procedimento de simulação (físicas) e as condições de contorno, já informadas. No estudo proposto neste trabalho, será utilizada a física (procedimento de simulação) eletromagnética e mecânica, possibilitando a determinação fluxo magnético, fluxo de dispersão, forças eletromagnéticas, estresses mecânicos e deslocamentos.

A etapa de pós-processamento se caracteriza por obter, observar e interpretar os resultados obtidos. Na etapa de pós-processamento, o *software* processa e armazena uma grande quantidade de informações, possibilitando, assim, diversas análises. Quando se utiliza como parâmetro de entrada o pico da corrente de curto circuito, na etapa de pós-processamento, permite-se as análises das distribuições das FE e dos EM nos enrolamentos dos transformadores. Adicionalmente, quando se utiliza uma corrente de curto circuito de duração 250 ms, conforme recomendado pela norma NBR 5380, obtém-se da etapa de pós-processamento a resposta temporal dos EM.

Pelo exposto, os estudos e as análises das FE e dos EM, de forma didática, devem ser baseados nos seguintes pontos:

- Elaboração dos modelos gráficos em 2D e 3D dos transformadores em software CAD, cujas características construtivas sejam fidedignas as apresentadas na Tabela II (Etapa de pré-processamento);
- Fornecimento dos parâmetros da forma de onda da corrente de curto circuito do enrolamento primário e secundário do transformador (Etapa de pré-processamento);
- Realização das simulações da resposta eletromecânica do transformador, unindo a física eletromagnética e mecânica, à aplicação de uma corrente curto circuito durante o período de 250 ms, conforme a norma NBR 5380 (Etapa de processamento);
- Determinação, por meio de simulações computacionais, das FE nos enrolamentos no ponto máxima corrente de curto circuito (Etapa de pós-processamento);
- Comparação dos resultados das FE obtidos via simulação com a modelagem analítica encontrada em diversos trabalhos relatados na revisão bibliográfica (Etapa de pós-processamento);
- Determinação dos estresses principais, na direção radial e axial, e os estresses de Von Mises no ponto máxima corrente de curtos circuitos por meio de simulações computacionais (Etapa de pós-processamento);
- Comparação das respostas temporal dos dois estresses mecânicos, Von Mises e Estresses principais. As respostas temporais são correspondentes à aplicação da corrente de curto circuito durante 250 ms.

- Análises das respostas gráficas das simulações e o estabelecimento das vantagens e desvantagens dos critérios de Von Mises e da máxima tensão (Etapa de pós-processamento).

Com a apresentação dos procedimentos indicados para desenvolvimento da avaliação dos esforços eletromecânicos nos enrolamentos de transformadores, puderam-se obter resultados que servem para analisar tecnicamente as FE e os EM. Desta maneira, as análises e discussões dos resultados obtidos, por meio da aplicação dos procedimentos supracitados, estão apresentados no capítulo a seguir.

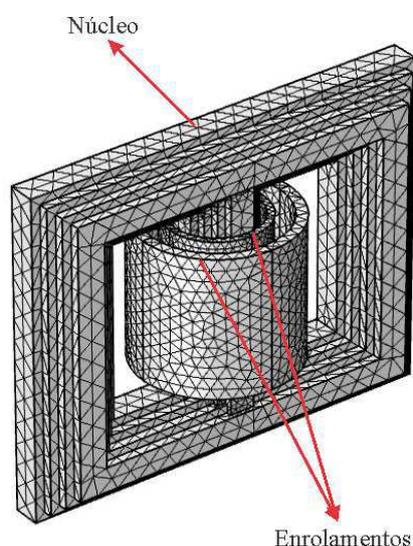
5 RESULTADOS

Nesta seção são apresentados e discutidos os resultados obtidos na pesquisa.

5.1 TRANSFORMADOR T75

Com auxílio de ferramenta *Computer Aided Design (CAD)* e dos dados contidos na Tabela II, o transformador T75 foi modelado e está apresentado na Figura 7.

Figura 7 - Modelo gráfico em 3D do T75.

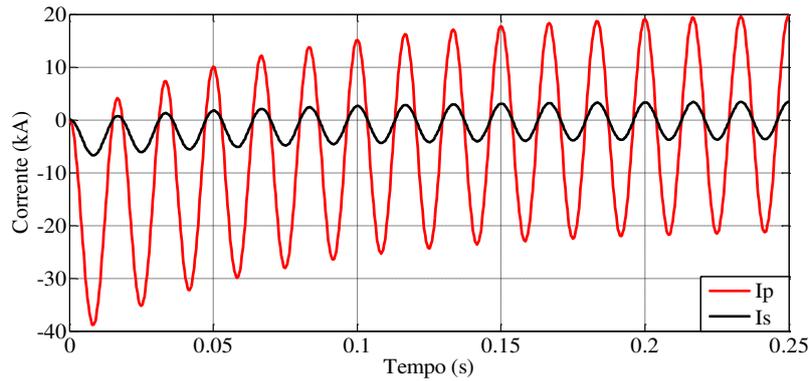


5.2 COMPARAÇÃO ENTRE A MODELAGEM ANALÍTICA E COMPUTACIONAL DAS FORÇAS ELETROMAGNÉTICAS

Com o objetivo de analisar a distribuição das FE e realizar uma comparação entre a modelagem analítica e computacional das forças eletromagnéticas, foram realizadas simulações computacionais e os cálculos analíticos.

A forma de onda da corrente de curto circuito foi obtida utilizando-se o equacionamento apresentados na Seção 2.1 e dos dados apresentados na Tabela II, como entrada de dados no *software*. Como resultado tem-se as formas de onda das correntes de curto circuito do enrolamento de baixa e alta tensão, para o transformador T75, as quais são apresentadas na Figura 8. Nesta figura, I_p é a corrente no enrolamento interno e I_s é a corrente no enrolamento externo.

Figura 8 - Corrente de curto circuito- T75.



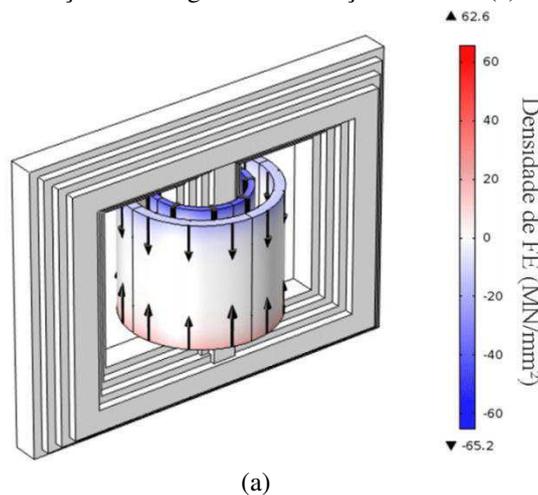
Fonte: Elaborada pelo autor.

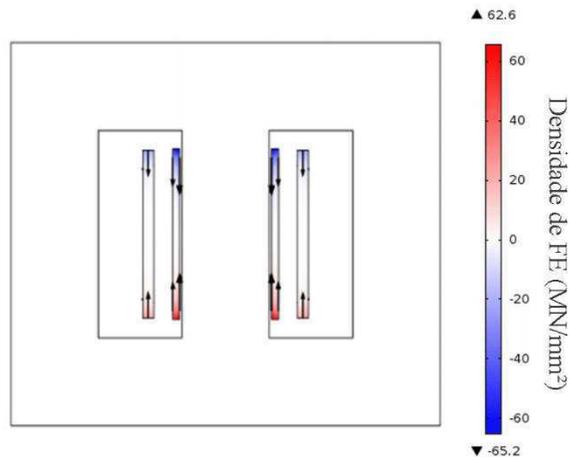
Considerando que uma corrente de curto circuito monofásico foi introduzida nos enrolamentos do transformador T75 e considerando o fator de assimetria de 1,9 que representa o caso em que os EM serão maiores no transformador.

A corrente de curto circuito, ilustrada na forma de onda da Figura 8, produziu as FE nos enrolamentos do transformador. Para a estimativa das FE, utilizou-se o modelo gráfico e procedimento de simulação (física) magnético do Comsol. A representação gráfica das FE estão apresentadas nas Figura 9(a) e (b) para as representações da densidade de força eletromagnética na direção axial em 3D e 2D, respectivamente. Nas Figura 10 a) e b) estão ilustradas a densidade de força eletromagnética na direção radial em 3D e 2D, respectivamente.

Na Figura 9 constata-se que as forças axiais são compressivas em ambos os enrolamentos. Na Figura 10 constata-se que as forças radiais são compressivas no enrolamento interno e trativas no enrolamento externo. As constatações estão consolidadas na literatura, contudo os resultados das simulações servem de validação e treinamento.

Figura 9-Densidade de força eletromagnética na direção axial em (a) 3D e (b) 2D – T75.

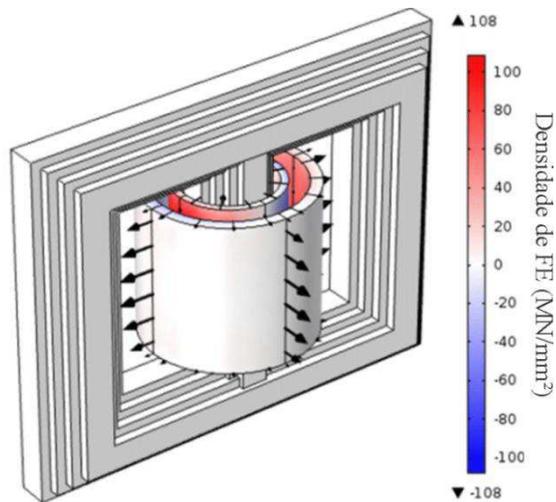




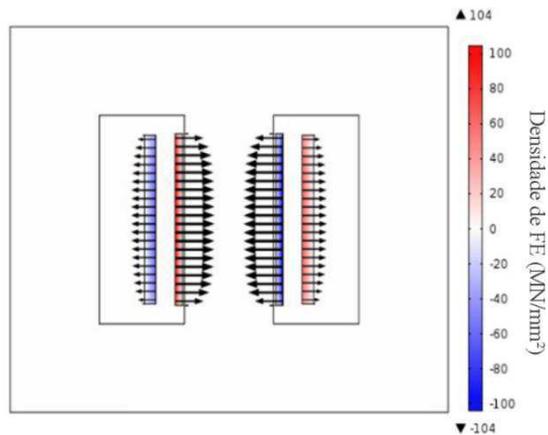
(b)

Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 10 – Densidade de força eletromagnética na direção radial em (a) 3D e (b) 2D - T75.



(a)



(b)

Fonte: Elaborada pelo autor.

Na Figuras 9 e 10 é possível observar, por meio da escala de cores, que a FE na modelagem 2D é muito próxima da observada na modelagem 3D, tanto na força radial quanto na força axial. Este resultado se encontra em concordância com a modelagem

analítica, na qual a geometria do enrolamento não influencia diretamente no valor da FE, nos enrolamentos dos transformadores.

Na Tabela III são apresentados os resultados da modelagem analítica (MA) e da modelagem computacional (2D e 3D) e os respectivos erros, calculados em relação à MA. O erro em relação à MA é considerado como referência em diversos estudos na literatura, embora grande parte dos estudos atuais evidencie para o MEF como mais adequado para realizar os cálculos das FE medias nos enrolamentos.

Tabela III. Comparação entre as forças axiais e radiais em relação à MA.

	Forças radiais		Forças axiais	
	EI (MN)	EE (MN)	EI (MN)	EE (MN)
MA	25,9	4,2	41,7	5,4
Simulação 2D	23,9	4,7	35,9	3,8
Simulação 3D	22,2	5,2	36,9	4,4
Erro MA-2D	8%	12%	14%	30%
Erro MA-3D	14%	24%	12%	20%

Ainda assim, ao se comparar os resultados apresentados na Tabela III, verifica-se que os resultados fornecidos pelo *software* para forças radiais apresentam pequenos erros em relação aos apresentados pela MA. Portanto, conclui-se que a modelagem do transformador foi satisfatória, tanto na simulação computacional no domínio 2D quanto no 3D.

Contudo, ao observar os resultados para forças axiais, verifica-se que os erros dos resultados da modelagem em 3D em relação à MA se aproximaram dos 30%. Isso acontece devido à MA admitir várias premissas, com o objetivo de simplificar a modelagem e torna-la algebricamente solucionável. Entre as premissas utilizadas na modelagem analítica podem-se destacar:

- A densidade de fluxo magnético de dispersão radial é distribuída uniformemente em toda a extensão do enrolamento do transformador;
- A altura do enrolamento é muito maior que o diâmetro do mesmo.

Tais premissas não podem ser aplicadas ao transformador T75. Assim, a MA conduz a resultados imprecisos. Erros de ordem semelhantes foram encontrados nos

trabalhos de Yun-Qiue (1990), Azevedo (2007), Rosentino (2010) e Guimarães (2013), os quais se propuseram a comparar a modelagem em 2D e 3D com a MA. Pelo exposto, é recomendável o uso do MEF para a determinação das FE, em especial para determinação das forças axiais, pois o MEF calcula as FE utilizando o produto vetorial entre a densidade de corrente de curto circuito e a densidade de fluxo magnético de dispersão nos enrolamentos dos transformadores.

De forma complementar, na Tabela IV são apresentados os resultados da modelagem analítica (MA) e da modelagem computacional (2D e 3D) e os respectivos erros, calculados em relação à modelagem 3D.

Tabela IV. Comparação entre as forças medias axiais e radiais em relação à 3D

	Forças radiais		Forças axiais	
	EI (MN)	EE (MN)	EI (MN)	EE (MN)
MA	25,9	4,2	41,7	5,4
Simulação 2D	23,9	4,7	35,9	3,8
Simulação 3D	22,2	5,2	36,9	4,4
Erro 3D-MA	17%	19%	13%	23%
Erro 3D-2D	8%	10%	3%	14%

5.3 COMPARAÇÃO DOS ESFORÇOS ELETROMECCÂNICOS

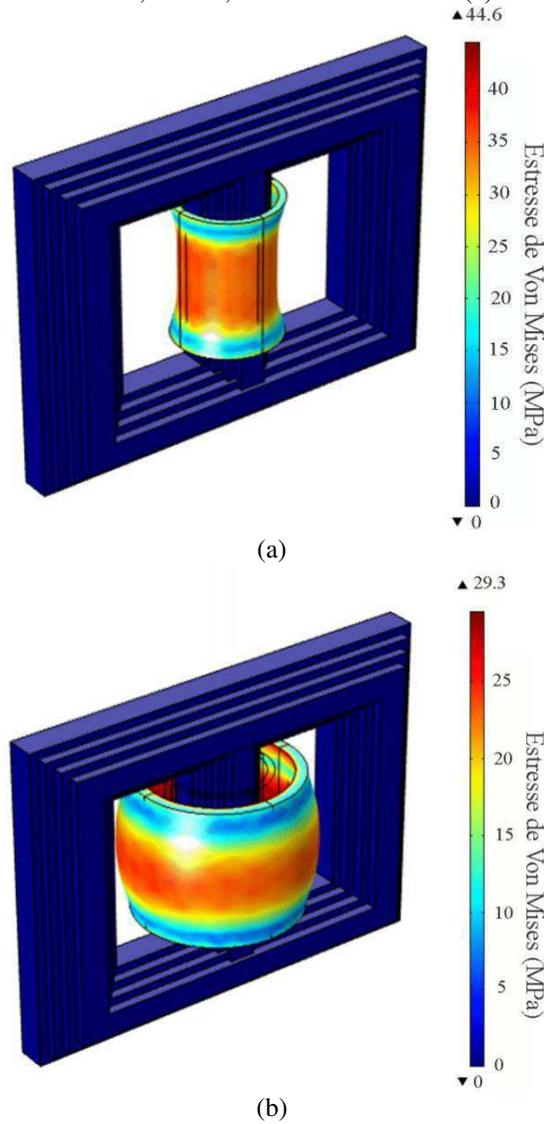
UTILIZANDO-SE SIMULAÇÕES EM 2D E 3D

Simulações computacionais dos esforços eletromecânicos, no transformador T75, foram realizadas com o objetivo de realizar uma comparação entre as simulações computacionais em 2D e 3D.

A atuação das FE sobre os enrolamentos do transformador e resultam nos EM. Assim, para determinação dos EM utilizou-se o modelo gráfico do transformador e o procedimento de simulação (física) magnético e mecânico do *software*. Nas Figuras 11 (a) e (b) estão ilustradas a representação gráfica em 3D do estresse de Von Mises, ampliados em 1000 vezes, para o enrolamento interno e externo, respectivamente e na

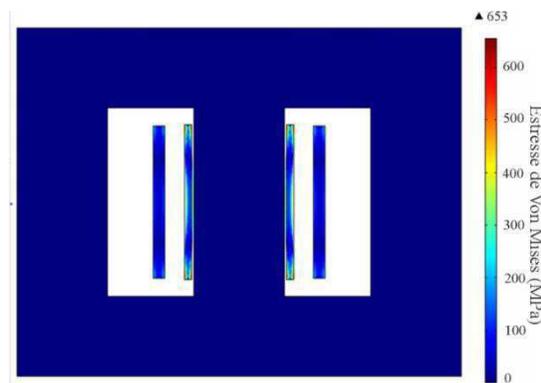
Figura 12 está ilustrada a representação gráfica do estresse de Von Mises, ampliados em 10 vezes, em 2D.

Figura 11 - Estresse de Von Mises, em 3D, sobre o enrolamento (a) interno, (b) externo -T75.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 12- Estresse de Von Mises sobre os enrolamentos em 2D - T75.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Ao observar as escalas de cores nas Figuras 11 e 12, verifica-se que as intensidades dos EM são diferentes entre as modelagens 2D e 3D. Isto acontece devido à geometria de representação dos enrolamentos influenciar diretamente nos cálculos dos EM. Na modelagem 2D, os cálculos dos EM são realizados considerando que os enrolamentos possuem uma geometria em forma de barras, assim, a sua representação difere da modelo real dos enrolamentos. Na modelagem 3D os cálculos são baseados na geometria de tubos que condiz com os enrolamentos cilíndrico que modelam os enrolamentos dos transformadores de forma mais realista. Pelos resultados, conclui-se a necessidade da modelagem 3D para determinação dos EM nos enrolamentos de transformadores.

5.4 COMPARAÇÃO ENTRE OS CRITÉRIOS DE VON MISES E DE MÁXIMA TENSÃO MECÂNICA

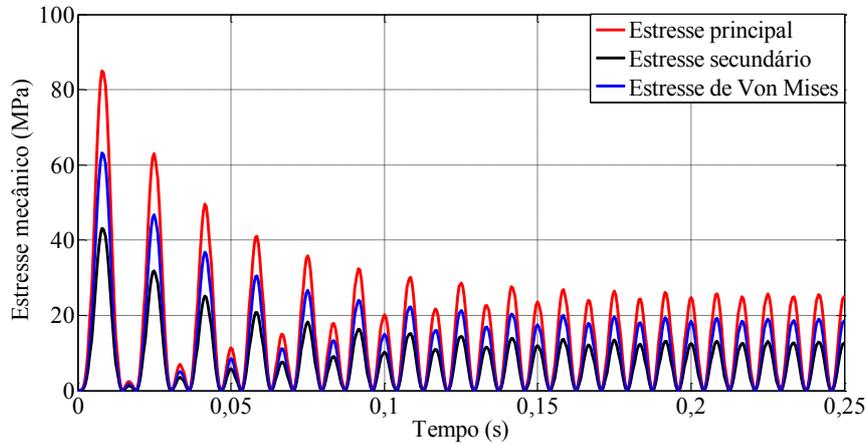
Com o objetivo de realizar uma comparação entre o critério de Von Mises e o critério da máxima tensão mecânica, foram realizadas simulações computacionais, baseadas no MEF.

Como descrito na revisão bibliográfica, existem diversos critérios de falhas mecânicas. Dentro todos os critérios existentes, a literatura sobre transformadores utiliza o critério de máxima tensão para analisar a proximidade de falha mecânica nos enrolamentos dos transformadores. Contudo, este critério não é indicado para materiais dúcteis, conseqüentemente não é adequado para o uso em cobre. Além disso, o critério de máxima tensão considera apenas o estresse principal (σ_1), o que não condiz com os esforços reais, pois os estresses mecânicos no transformador acontecem de forma combinada, estresse principal e secundário. Sendo assim, a literatura da Engenharia Mecânica indica o critério de Von Mises como o critério mais adequado na análise de esforços em materiais dúcteis. O critério Von Mises permite a análise dos estresses principais (σ_1, σ_2 e σ_3) de forma combinada, conforme ocorre nos transformadores.

Como intuito de comparar o critério Von Mises e o critério de máxima tensão, foram utilizados o modelo gráfico do transformador e simulações computacionais no domínio do tempo. Para tanto, um curto circuito com duração de 250 ms no transformador T75 serviu de dado de entrada no Comsol e os esforços mecânicos foram simulados. A resposta temporal dos estresses de Von Mises e dos estresses principais para o

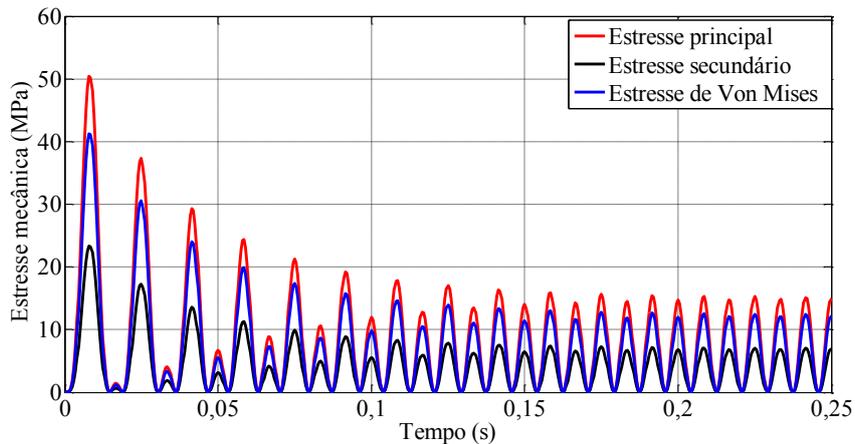
enrolamento interno são apresentados na Figura 13. Na Figura 14 são apresentados a resposta temporal dos estresses de Von Mises e dos estresses principais para o enrolamento externo

Figura 13- Estresses principais e de Von Mises para o enrolamento interno do T75.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 14- Estresses principais e de Von Mises para o enrolamento externo do T75.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Na Figura 13 é possível observar que o estresse principal, em vermelho, é maior que 80 MPa. A literatura indica que o limite de escoamento do cobre é de 70 Mpa. Assim, o critério de máxima tensão mecânica indicaria que o enrolamento teria deformado plasticamente, ou seja, uma falha mecânica teria ocorrido. Já o estresse secundário, em preto, é inferior ao limite de escoamento, o que não indica falha mecânica.

O critério de Von Mises é representado em azul na Figura 13. Ele combina os estresses principais e secundário e produz uma amplitude máxima de 63 MPa, que é menor que o limite de escoamento do cobre. Logo, este critério indica que não ocorreria falha nos enrolamentos dos transformadores.

Para o enrolamento externo, o estresse principal é representado em vermelho na Figura 14 e produz uma amplitude máxima de 50 MPa. O critério de máxima tensão mecânica indica que o enrolamento não teria uma falha mecânica, pois o estresse principal é menor que o limite de escoamento do cobre. Já o estresse secundário, em preto, é inferior ao limite de escoamento e também não indica falha mecânica.

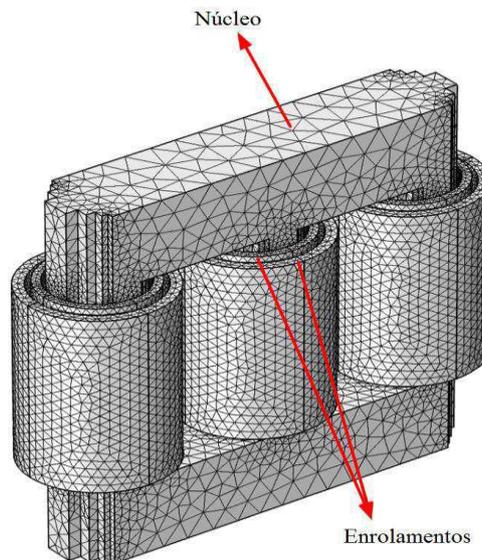
O critério de Von Mises é representado em azul na Figura 14. Ele combina os estresses principal e secundário e produz uma amplitude máxima de 41 MPa, que é menor que o limite de escoamento do cobre. Logo, este critério indica que não ocorreria falha nos enrolamentos dos transformadores.

Pelas análises dos critérios de Von Mises e da máxima tensão para o enrolamento interno, verifica-se que a falha mecânica não ocorre, apesar do critério de máxima tensão mecânica indicar a falha mecânica. A não ocorrência da falha é justificada pelo baixo valor do estresse secundário. Este estresse não é considerado nos cálculos do critério da máxima tensão.

5.5 RESULTADO DO T180

Com auxílio de ferramenta CAD (*Computer Aided Design*) e dos dados contidos na Tabela II, o transformador T180 foi modelado e está apresentado na Figura 15.

Figura 15–Modelo gráfico em 3D do T180.



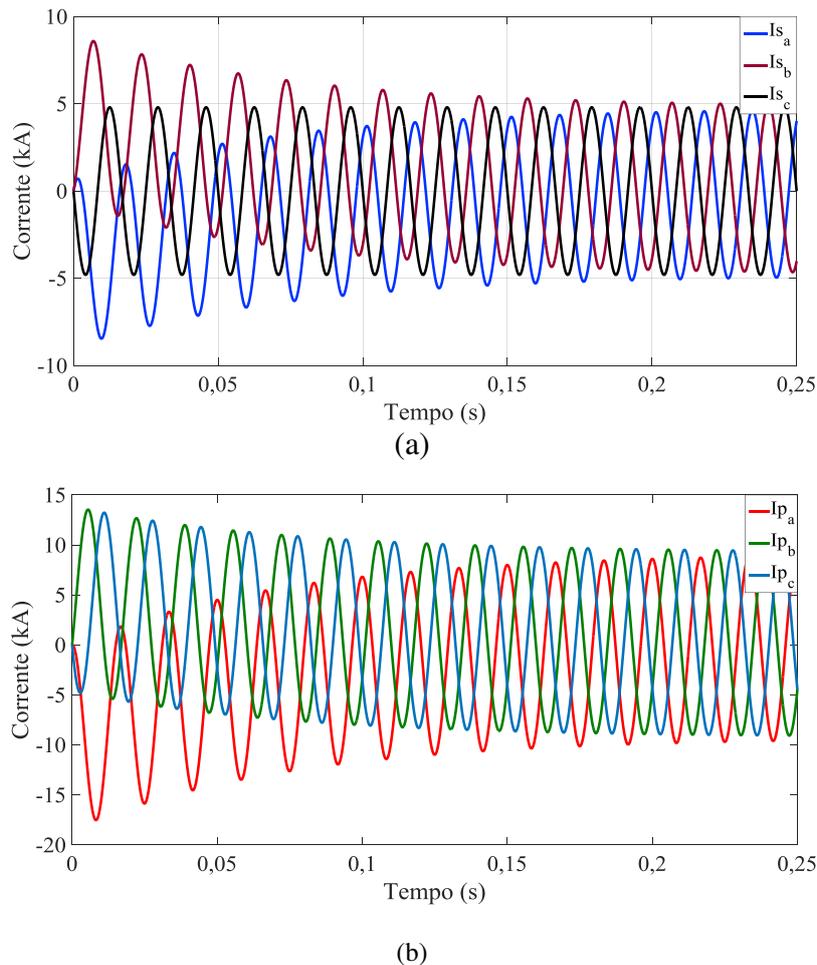
Fonte: Elaborada pelo autor.

5.6 COMPARAÇÃO ENTRE A MODELAGEM ANALÍTICA E COMPUTACIONAL DAS FORÇAS ELETROMAGNÉTICAS

Com o objetivo, análogo ao do transformador T75, de analisar a distribuição das FE e realizar uma comparação entre a modelagem analítica e computacional das forças eletromagnéticas, foram realizadas simulações computacionais e os cálculos analíticos.

A forma de onda da corrente de curto circuito foi obtida utilizando-se o equacionamento apresentados na Seção 2.1 e os dados apresentados na Tabela II, e utilizados como entrada de dados no *software*. Como resultado, tem-se as formas de onda das correntes de curto circuito dos enrolamentos de baixa e alta tensão, para o transformador T180, as quais são apresentadas na Figura16 (a) e (b). Na figura 16 (a) são ilustradas as correntes no enrolamento interno, e na Figura 16 (b) são as correntes no enrolamento externo.

Figura 16 - Corrente de curto circuito no (a) enrolamento externo e (b) enrolamento interno– T180.

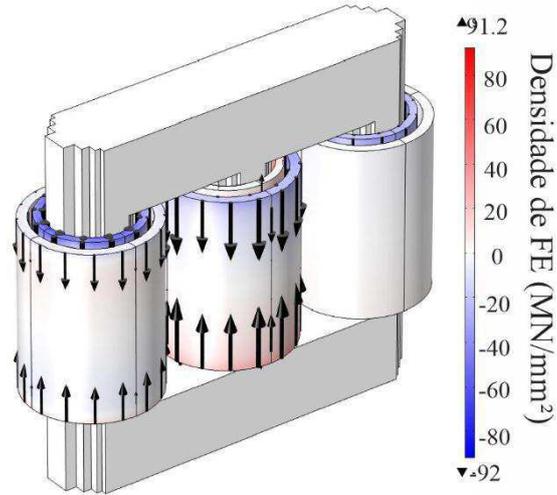


Fonte: Elaborada pelo autor.

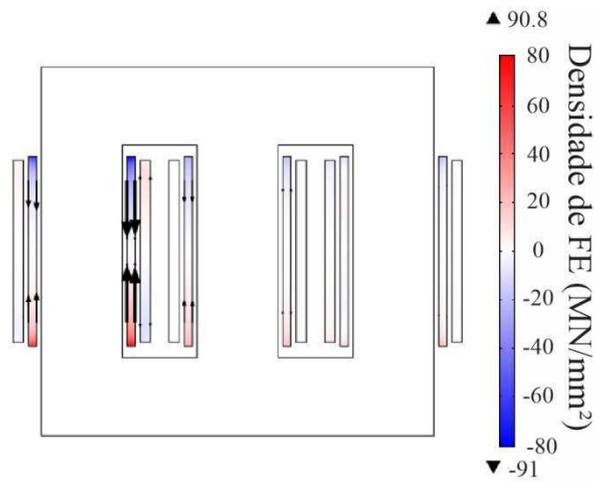
As correntes de curto circuito, ilustradas na Figura 16, produziram as FE nos enrolamentos do transformador, que foram estimadas utilizando o modelo gráfico e o procedimento de simulação (física) magnético do Comsol. A representação gráfica das FE, para o instante de tempo igual a 0,008 s, estão apresentadas nas Figura 17 (a) e (b) para as representações da densidade de força eletromagnética na direção axial em 3D e 2D, respectivamente. Nas Figura 18 a) e b) estão ilustradas a densidade de força eletromagnética na direção radial em 3D e 2D, respectivamente.

Na Figura 17 constata-se que as forças axiais são compressivas em ambos os enrolamentos. Já na Figura 18 constata-se que as forças radiais são compressivas no enrolamento interno e trativas no enrolamento externo. Este resultados consolidam o que foi apresentado para o transformador monofásico T75 e confirmam as constatações estão relacionadas na referência bibliográficas deste trabalho.

Figura 17-Densidade de força eletromagnética na direção axial em (a) 3D e (b) 2D – T180.



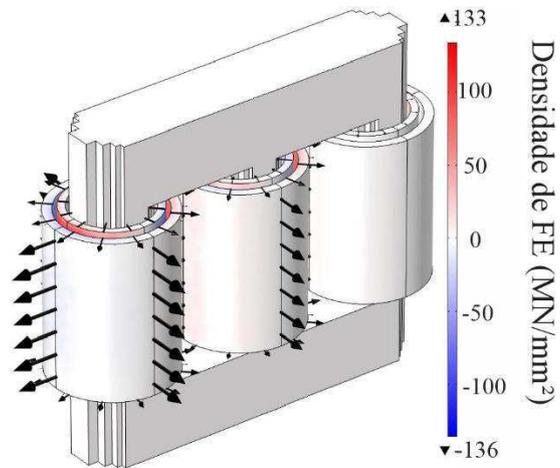
(a)



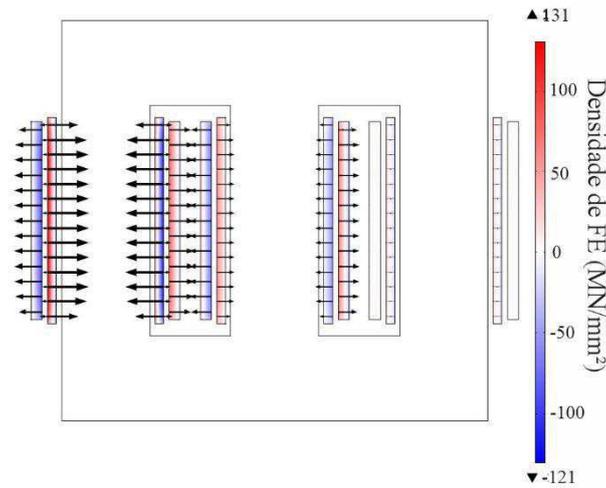
(b)

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 18 – Densidade de força eletromagnética na direção radial em (a) 3D e (b) 2D - T180.



(a)



(b)

Fonte: Elaborada pelo autor.

Na Figuras 17 e 18 é possível observar, por meio da escala de cores, que a FE na modelagem 2D é muito próxima da observada na modelagem 3D, tanto na força radial quanto na força axial. Este resultado se encontra em concordância com a modelagem analítica, na qual a geometria do enrolamento não influencia diretamente no valor médio das forças eletromagnéticas nos enrolamentos dos transformadores.

Na Tabela V são apresentados os resultados da modelagem analítica (MA) e da modelagem computacional (2D e 3D) para fase B do transformador e os respectivos erros, calculados em relação à modelagem 3D, visto que esta é a modelagem mais adequada, conforme discutido nos resultados do transformador T75.

Tabela V. Comparação entre as forças médias nas direções axiais e radiais para diferentes modelagens para o transformador T180.

	Forças radiais		Forças axiais	
	Ei (MN)	Ee (MN)	Ei (MN)	Ee (MN)
MA	24,6	32,9	7,5	1,9
Simulação 2D	25,7	33,9	8,2	2,3
Simulação 3D	27,0	36,5	8,9	2,6
Erro 3D-MA	9%	10%	15%	27%
Erro 3D-2D	5%	7%	8%	13%

Ainda assim, ao se comparar os resultados apresentados na Tabela V, verifica-se que os resultados fornecidos pelo *software* em 2D e pela MA para forças radiais apresentam pequenos erros em relação aos apresentados utilizando a 3D. Portanto, conclui-se que a modelagem do transformador é plenamente satisfatória.

Contudo, ao observar os resultados para forças axiais, verifica-se que os erros dos resultados da modelagem em MA em relação à 3D se aproximaram dos 27%. Consoante com as mesmas justificativas apresentadas quando da análise do transformador T75. Visto MA admitir várias premissas, com o objetivo de simplificar a modelagem e torna-la algebricamente solucionável. Entre as premissas utilizadas na modelagem analítica podem-se destacar:

- A densidade de fluxo magnético de dispersão radial é distribuída uniformemente em toda a extensão do enrolamento do transformador;
- A altura do enrolamento é muito maior que o diâmetro do mesmo.

Com os resultados obtidos no transformador T180, confirma-se que é recomendável o uso do MEF para a determinação das FE, em especial para determinação das forças axiais, pois o MEF calcula as FE utilizando o produto vetorial entre a densidade de corrente de curto circuito e a densidade de fluxo magnético de dispersão nos enrolamentos dos transformadores.

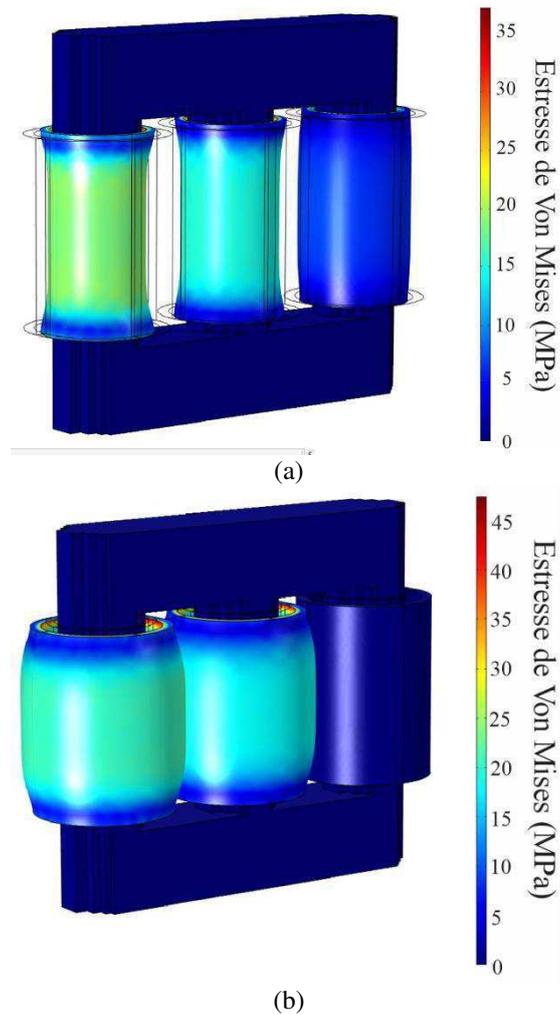
5.7 COMPARAÇÃO DOS ESFORÇOS ELETROMECCÂNICOS

UTILIZANDO-SE SIMULAÇÕES EM 2D E 3D

Simulações computacionais dos esforços eletromecânicos, no transformador T180, foram realizadas com o objetivo de realizar uma comparação entre as simulações computacionais em 2D e 3D.

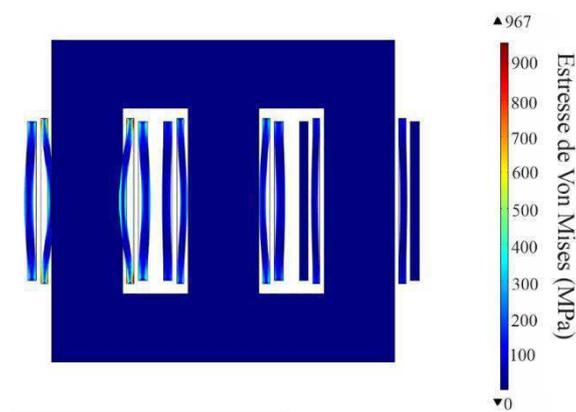
Analogamente ao T75, para determinação dos EM utilizou-se o modelo gráfico do transformador e o procedimento de simulação (física) magnético e mecânico do *software*. Nas Figuras 19 (a) e (b) estão ilustradas a representação gráfica em 3D do estresse de Von Mises, ampliado em 1800 vezes, para o enrolamento interno e externo, respectivamente e na Figura 20 está ilustrada a representação gráfica do estresse de Von Mises, ampliado em 10 vezes, em 2D.

Figura 19 - Estresse de VonMises, em 3D, sobre o enrolamento (a) interno, (b) externo-T180.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 20- Estresse de Von Mises sobre os enrolamentos em 2D - T180.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Ao observar as escalas de cores nas Figuras 19 e 20, verifica-se que as intensidades dos EM são diferentes entre as modelagens 2D e 3D. Isto acontece devido à mesma justificativa apresentada para o transformador T75. Na modelagem 2D, os cálculos dos

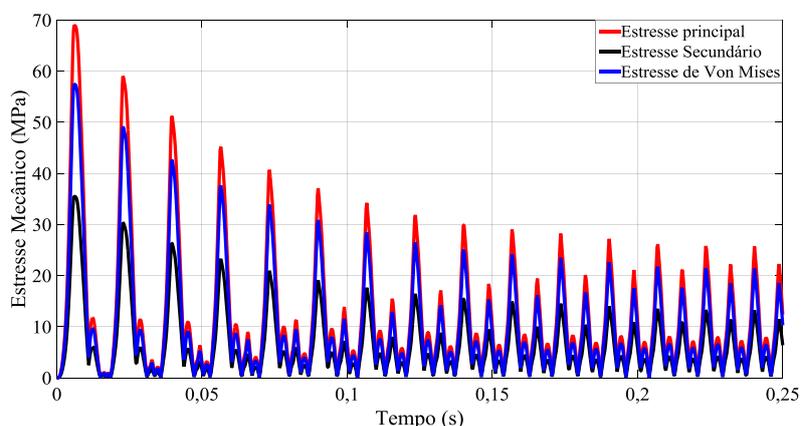
EM são realizados considerando que os enrolamentos possuem uma geometria em forma de barras, assim, a sua representação difere da modelo real dos enrolamentos. Na modelagem 3D, os cálculos são baseados na geometria de tubos que condiz com os enrolamentos cilíndrico que modelam os enrolamentos dos transformadores de forma mais realista. Pelos resultados, conclui-se pela necessidade da modelagem 3D para determinação dos EM nos enrolamentos de transformadores.

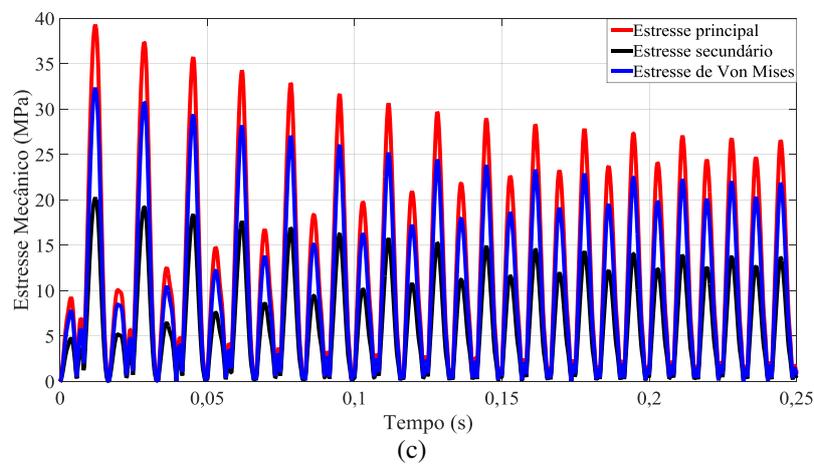
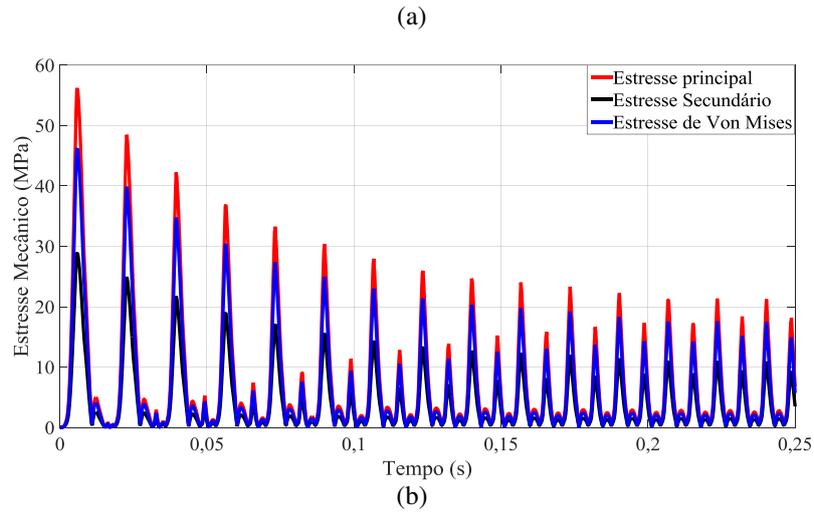
5.8 COMPARAÇÃO ENTRE OS CRITÉRIOS DE VON MISES E DE MÁXIMA TENSÃO MECÂNICA

Com o objetivo de confrontar a comparação, realizada para o transformador T75, entre o critério de Von Mises e o critério da máxima tensão mecânica, foram realizadas simulações computacionais, baseadas no MEF.

Como intuito de comparar o critério Von Mises e o critério de máxima tensão, foram utilizados o modelo gráfico do transformador e simulações computacionais no domínio do tempo. Um curto circuito com duração de 250 ms (conforme a norma NBR 5380) no transformador T75 serviu de dado de entrada no Comsol, permitindo assim, a simulação dos esforços mecânicos. A resposta temporal dos estresses de Von Mises e dos estresses principais para os enrolamento internos das fases A, B e C são apresentados, respectivamente, na Figura 21 (a), (b) e (c). Na Figura 22 (a), (b) e (c) são apresentados a resposta temporal dos estresses de Von Mises e dos estresses principais para o enrolamento externo das fases A, B e C, respectivamente.

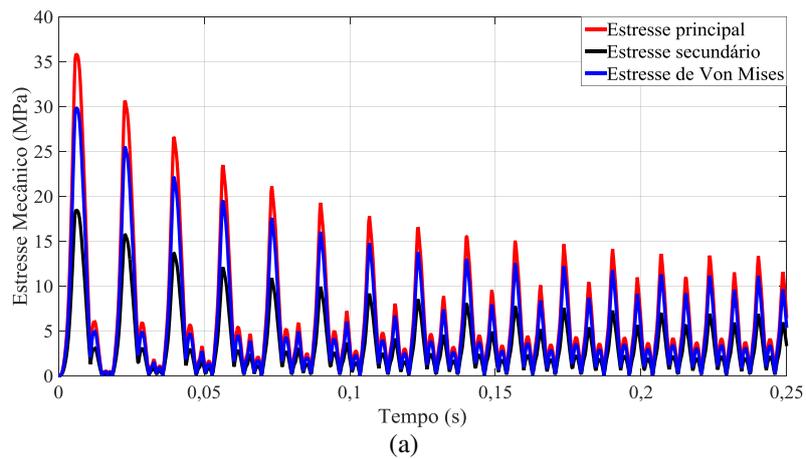
Figura 21-Estresses principais e de Von Mises para os enrolamentos internos das fases A, B e C, respectivamente, do transformador T180.

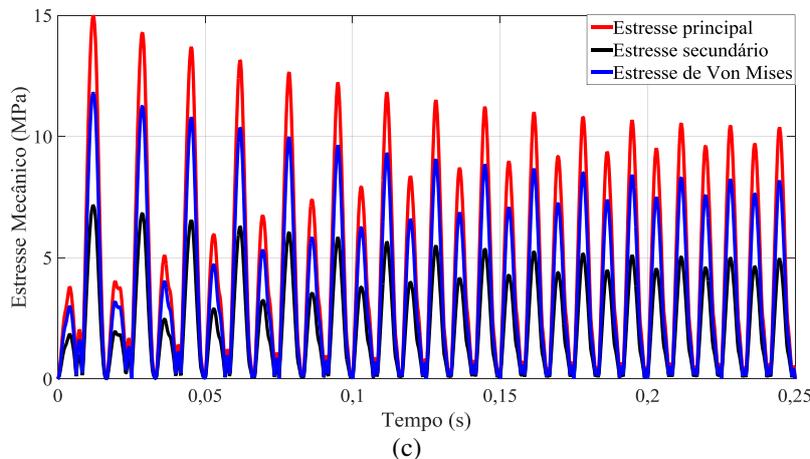
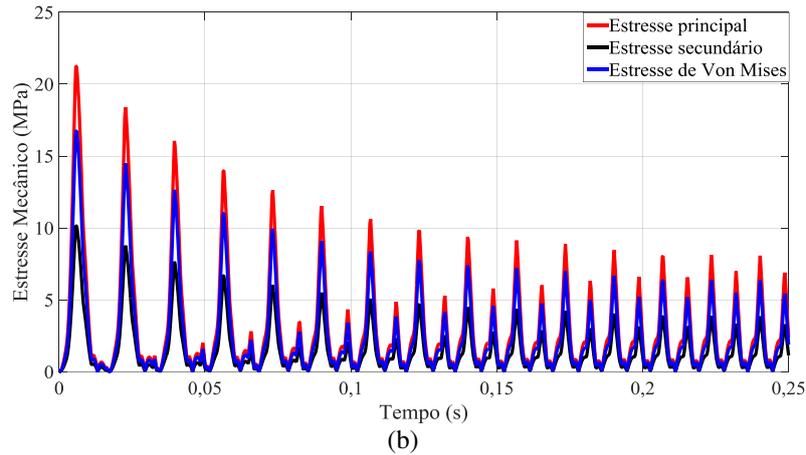




Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 22- Estresses principais e de Von Mises para os enrolamentos externos das fase A, B e C, respectivamente, do transformador T180.





Fonte: Elaborada pelo autor.

Na Figura 21 é possível observar que os estresses principais, em vermelho, são menores que 70 MPa, limite de escoamento do cobre, em todas as fases. Quando se compara os estresses, por fase, constata-se que a fase A apresenta maiores níveis de estresses, cerca de 69 MPa. Sendo assim, o critério de máxima tensão mecânica não indicaria deformado plasticamente, ou seja, uma falha mecânica em nenhum dos enrolamento internos. Nas figuras também pode-se observar que o estresse secundário, em preto, também é inferior ao limite de escoamento, não indicando falha mecânica.

O critério de Von Mises é representado em azul na Figura 21. Ele combina os estresses principal e secundário e produz uma amplitude máxima nas fases A, B e C de 57 Mpa, 46 MPa e 32 Mpa, respectivamente, que são menores que o limite de escoamento do cobre. Logo, este critério indica que não ocorreria falha nos enrolamentos internos do transformador T180.

Apesar de ambos os critérios não indicarem a ocorrência de falhas mecânicas, pode-se observar que, considerando o critério da máxima tensão, o transformador está muito próximo do limite de falha mecânica. Se considerado que o envelhecimento dos

transformadores reduzem suas características de suportabilidade, o transformador T180 tem um alta probabilidade de falhar mecanicamente.

Para o enrolamentos externos, os estresses principais são representados em vermelho na Figura 22 e produz uma amplitude máxima de 35 MPa, 21 MPa e 15 Mpa, respectivamente nas fase A, B e C. O critério de máxima tensão mecânica indica que os enrolamentos não teriam uma falha mecânica, pois os estresses principais são menores que o limite de escoamento do cobre. Já o estresse secundário, em preto, é inferior ao limite de escoamento e também não indica falha mecânica.

O critério de Von Mises, é representado em azul na Figura 14, combina os estresses principal e secundário e produz uma amplitude máxima de 30 MPa, 17 MPa e 12 MPa, respectivamente nas fase A, B e C, que são menores que o limite de escoamento do cobre. Logo, este critério indica que não ocorreria falha nos enrolamentos externos.

A bibliografia da Engenharia Mecânica considera o critério da máxima tensão mais conservador que o critério de Von Mises, pois esse considera apenas o maior estresse ocorrente no transformador para análise da proximidade de falha mecânica. Por outro lado o critério de Von Mises pode ser considerado mais adequado, em razão de utilizar mais parâmetros para a tomada de decisão em relação à falha mecânica, tornando-o mais exato.

6 CONCLUSÕES

Os transformadores são os equipamentos mais caros e estratégicos dentro dos sistemas de transmissão e distribuição. Por esta razão, estudos com foco em tornar este equipamento mais seguro e confiável são de extrema importância para o sistema elétrico.

Com o intuito de analisar a proximidade de falha dos enrolamentos de transformadores, comparações dos dois critérios de falha mecânica foram realizadas nos transformadores T75 e T180.

Das comparações, constatou-se que o critério da máxima tensão é mais conservador que o critério de Von Mises. Por outro lado, o critério de Von Mises é mais adequado, em razão de utilizar mais parâmetros para a tomada de decisão em relação à falha mecânica, tornando-o mais exato.

Com a análise dos resultados, pôde-se concluir que:

- A partir da comparação entre a formulação analítica e a modelagem baseada no método dos elementos finitos, constatou-se que é o método mais adequado para determinação das forças eletromagnéticas.
- A representação gráfica, em 3D, dos enrolamentos do transformador é necessária para determinação correta dos esforços eletromecânicos, uma vez que a geometria influencia diretamente na determinação dos esforços.

Pelo exposto, a simulação computacional se mostrou como uma ferramenta viável para estimativas dos esforços eletromecânicos ocorrentes nos enrolamentos dos transformadores. As simulações permitiram, também, a visualização das deformações e localização dos pontos de esforços eletromecânicos mais intensos.

A partir dos resultados apresentados para os transformadores estudados, conclui-se que as comparações realizadas e verificações obtidas nesta dissertação podem ser generalizadas para outros transformadores. Possibilitando, assim, uma análise mais adequada sobre os esforços eletromecânicos ocorrentes nos transformadores de potência.

A partir da apresentação das conclusões, vale salientar que elas ainda carecem de validações, que só poderão ser realizadas com a aquisição de um transformador de potência instrumentado, o qual possibilitaria a medição real dos esforços eletromecânicos

ocorrentes nos enrolamentos do transformador. A validação dos resultados obtidos configura-se como a principal atividade, dentre as atividades futuras, desta linha de pesquisa. Para isso, o transformador já foi adquirido, por meio do P&D intitulado “Supervisão em Tempo Real da Temperatura e das Deformações Mecânicas nos Enrolamentos de Transformadores”. Contudo, devido à complexidade do projeto, a entrega do transformador sofreu uma série de atrasos, e atualmente a previsão de entrega é julho de 2016.

Sabendo destas informações, podem ser destacadas algumas perspectivas de trabalhos futuros, os quais estão apresentados na subseção abaixo.

6.1 TRABALHOS FUTUROS

- Validação dos resultados obtidos por meio de simulações computacionais dos esforços eletromecânicos ocorrentes nos enrolamentos dos transformadores, por meio da comparação dos resultados de ensaios experimentais;
- Verificação da influência dos materiais isolantes, papel e espaçadores, sobre os esforços eletromecânicos ocorrentes nos enrolamentos dos transformadores;
- Verificação dos efeitos dos esforços eletromecânicos sobre a degradação dos materiais isolantes existentes nos enrolamentos dos transformadores;
- Comparação de análises térmicas e mecânicas de transformadores, via simulações computacionais, para dimensionamento dos enrolamentos dos transformadores.

PUBLICAÇÕES

ANDRADE, F., COSTA, E., FERREIRA, T., ARAÚJO, J., ARRUDA, R., XAVIER, C. Forças Eletromagnéticas nos Enrolamentos de um Transformador: Modelagem Analítica versus Método dos Elementos Finitos. CBQEE, 2015.

ANDRADE, F., COSTA, E., ARAÚJO, J., BARROS, R., FERREIRA, T., AGRA, J., XAVIER, C. Evaluation Of Mechanical Criteria Applied To The Transformers Windings. EMD, 2015

ANDRADE, F., COSTA, E., ARAÚJO, J., FERREIRA, T. Uso De Software Baseado No Método Dos Elementos Finitos Na Formação De Novos Engenheiros Eletricistas. Cobenge, 2015.

ARAÚJO, J., ANDRADE, F., FERREIRA, T., ARRUDA, R., COSTA, E., SILVEIRA, V., CRISOSTOMO, B., XAVIER, C. Using Of Von Mises Criterion To Determine Failure Proximity And Dynamic Deformation Analysis On Transformers' Windings. ISH, 2015.

ARAÚJO, J., ANDRADE, F., FERREIRA, T., ARRUDA, R., COSTA, E., LIMA, B., XAVIER, C. Metodologia Para Verificação De Proximidade De Falha Em Transformadores Utilizando O Critério De Von Mises. SNPTEE, 2015.

REFERÊNCIAS

ABB BRASIL, P. P. D. High Voltage Power Transformers - Short-Circuit - Stress, Strength, Design, Testing, Advanced Technologies and Recommendations, 17 Abril 2015. Disponível em: <[http://www04.abb.com/global/seitp/seitp202.nsf/0/ef4ad0c3a8059a0ac1257d0a00682777/\\$file/3.+Jose+Carlos+Mendes.pdf](http://www04.abb.com/global/seitp/seitp202.nsf/0/ef4ad0c3a8059a0ac1257d0a00682777/$file/3.+Jose+Carlos+Mendes.pdf)>.

AHN, H.; OH, Y.; KIM, J. K.; SONG, J.; HAHN, S. Experimental Verification and Finite Element Analysis of Short-Circuit Electromagnetic Force for Dry-Type Transformer. IEEE Transactions on Magnetics, v. 48, n. 2, p. 819-822, February 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Transformadores de Potência - Método de Ensaio. [S.l.]. 1993.

AYERS, R. E. E. A. Dynamic Measurements During Short Circuit Testing of Transformers. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, p. v. 94, 1975.

AYERS, R. E.; USRY, G. O. Dynamic Measurements During Short Circuit Testing of Transformers Part I: Instrumentation and Testing. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, p. v. PAS-93, 1974.

AZEVEDO, A. C. Estresse Eletromecânicos em Transformadores Causados por Curto Circuitos "Passantes" e Corrente de Energização. Tese de Doutorado. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia. 2007.

BAKSHI, A. An Investigation of Winding Curvature Effect on the Mechanical Strength of Transformer Windings. IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, v. 30, n. 4, August 2015.

BAKSHI, A.; KULKARNI, S. V. Analysis of Buckling Strength of Inner Windings in Transformers Under Radial Short-Circuit Forces. IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, v. 26, n. 1, February 2015.

BARTLEY, W. H. Analysis of Transformers failures. 36 Annual Conference of IMIA - The International Association of Engineering Insurers, September 2003. p. 1-12.

BRANCO, C. A. G. M. Mecânica dos Materiais. Porto Alegre: Fundação Calousie Gulbenkian, 1985.

CALLISTER, W. D. Materials Science and Engineering an Introduction. 8th. ed. [S.l.]: John Wiley & Sons, Inc, 2009.

CIGRE, G. D. T. 1. 0. Enquête International sur les Défaillances en Service des Transformateurs de Grande Puissance. ELECTRA, No. 88. [S.l.]: [s.n.]. 1983.

CIGRE, W. G. 1. 1. The Short Circuit Performance of Power Transformers. Brochure 209. [S.l.]: Cigre. 2002.

DANESHMAND, S. V.; HEYDARI, H. Multiphysics Approach in HTS Transformers With Different Winding Schemes. IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY, v. 24, n. 2, p. 103-110, April 2014.

EBRAHIMI, B. M. et al. Analytical estimation of short circuit axial and radial forces on power transformers windings. IET Generation, Transmission & Distribution, v. 8, n. 2, p. 250-260, February 2014.

FAIZ, J.; EBRAHIMI, B. M.; ABU-ELHAIJA, W. Computation of Static and Dynamic Axial and Radial Forces on Power Transformers due to Inrush and Short Circuit. Applied Electrical Engineering and Computing Technologies - AEECT. Jordan: IEEE Conference. 2011. p. 1-8.

FERREIRA, T. V. Estudo do Trilhamento de Núcleo em Isoladores Poliméricos. Campina Grande. 2007.

FRANZEN, A.; KARLSSON, S. Failure Modes And Effects Analysis of Transformers. Roal Institute of Technology KTH, School of Electrical Enginnering, Stockholm, 2007.

FRONTIN, S. O. Equipamentos de Alta Tensão - Prospecção e Hierarquização de Inovações Tecnológicas. Brasília: Agência Nacional de Energia Elétrica - Aneel, 2013.

GEISSLER, D.; LEIBFRIED, T. Mechanical breakdown of aged insulating paper around continuously transposed conductors for power transformers under the influence of short-circuit forces - Analysis by numerical simulations. Electrical Insulation Conference, Sattle, Washington, June 2015.

GIBBS, J. B. Transformer: Principles and Practice. 2 Ed. [S.l.]: McGraw-Hill, 1950.

GUIMARÃES, R. Suportabilidade Mecânica e Vida Útil de Transformadores Submetidos a Correntes de Energização e Curto Circuito. Uberlândia. 2013.

IEC. Power Transformers - Part 5: Ability to withstand short circuit. [S.l.]. 2000.

IEEE STD 551. Recommended Practice for Calcularion AC Short Circuit Currents in Insustrial and Commercial Power Systems. [S.l.]. 2006.

LI, H.; LI, Y.; SUN, X.; LI, D.; JING, Y. Analysis of Three-Phase Power Transformer Windings Forces Caused by Magnetic Inrush and Short-Circuit Currents. Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices, 2009. [S.l.]: ASEMD 2009. 2009. p. p. 233-236.

MEDINA, P. M. C. Falhas em Transformadores de Potência: Uma Contribuição para Análise, Definições, Causas e Soluções. Dissertação de Mestrado. Itajubá: Universidade Federal de Itajubá. 2003. p. 148.

MISES, R. V. *Mechanik der festen Körper in plastisch-deformablen Zustand*. Mathematisch-Physikalische Klasse, p. 582-592, 1913.

NAJDENKOSKI, K.; MANOV, D. Electromagnetic Calculation on Power Transformer Windings under Short Circuit. *COMPEL - The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering*, p. vol. 17, No. 3, p. 374-377, 1998.

REIS, A. K. C. *Compensação de Potência Reativa através do Controle da Saturação de Reatores*. Dissertação de Mestrado. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia. 1997.

ROSENTINO, A. J. P. J. *Estimativa dos Esforços Eletromecânicos em Transformadores Submetido a um Curto Circuito Trifásico*. Dissertação de Mestrado. Uberlândia: FEELT-UFU. 2010. p. 200.

SADIKU, M. N. O. *Elementos de Eletromagnetismo*. [S.l.]: Bookman, 2004.

SALON, S.; LAMATTINA, B.; SIVASUBRAMANIAM, K. Comparison of Assumptions in Computation of Short Circuit Forces in Transformers. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2000.

SARAIVA, E. *Um Estudo das Alterações dos Parâmetros de Transformadores Oriundas de Deformações nos enrolamentos: Uma Contribuição para o Diagnóstico de Vida Útil*. Tese de Doutorado. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia. 2011. p. 220.

SHINGLEY, J. E.; MISCHKE, C. R.; BUDYNAS, R. G. *Projeto de Engenharia Mecânica*. 7. ed. Porto Alegre: Bookman, 2005.

STRAC, L.; KELEMEN, F.; ZARKO, D. Analysis of Short-Circuit Forces at the Top of the Low Voltage U-type and I-type Winding in a Power Transformer. *Power Electronics and Motion Control Conference*. [S.l.]: EPE-PEMC 2008. 2008. p. 855-858.

WANG, H.; BUTHER, K. Finite Element Analysis of Internal Winding Faults in Distribution Transformers. *IEEE Transactions on Power Delivery*, V. 16, N. 3, p. 422-429, 2001.

WANG, M.; VANDERMMAR, A.; SRIVASTAVA, K. D. Review of Condition Assessment of Power Transformers in Service. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 2002.

WATERS, M. *The Short Circuit Strength of Power Transformers*. London: MacDonald & Co., 1966.

XAVIER, C. S. S. *Análise de Desempenho Térmico de Transformadores de Potência como Ciclo Diário de Sobrecarga Planejada*. Campina Grande: Universidade Federal de Campina Grande, Dissertação de Mestrado, 2015.

YUM-QIU; JING-QIU; ZI-HONG, X. Numerical Calculation of Short Circuit Electromagnetic Forces on the Transformers Winding. *IEEE Transaction on Magnetics*, p. V. 26, N. 2, p. 1039-1041, 1990.

ZHANG, H.; YANG, B.; XU, W.; WANG, S.; WANG, G.; HUANGFU, Y.; ZHANG, J.
Dynamic Deformation Analysis of Power Transformer Windings in Short-Circuit Fault
by FEM. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 24, no. 3, 2014. 1-4.

ANEXO 1

Figura 23- Detalhamento das dimensões do, em milímetro, do Transformador monofásico 75 MVA.

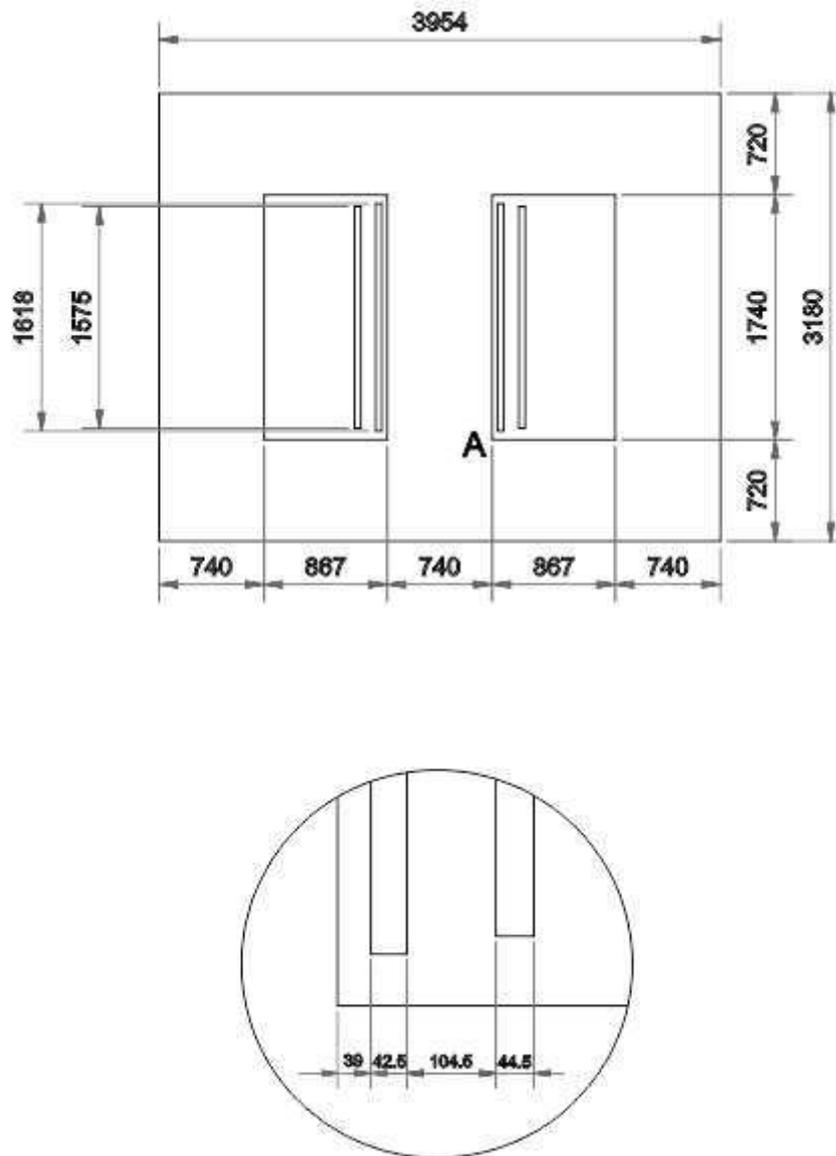


Figura 24- Detalhamento das dimensões do, em milímetro, do Transformador trifásico de 180 MVA.

