



Universidade Federal  
de Campina Grande

**Centro de Engenharia Elétrica e Informática**

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

JALBERTH FERNANDES DE ARAUJO

NOVA METODOLOGIA BASEADA NOS CRITÉRIOS DE VON  
MISES E DE FADIGA PARA AVALIAÇÃO DOS ESFORÇOS  
ELETROMECAÑICOS CAUSADOS PELA CIRCULAÇÃO DE  
CORRENTES DE CURTO CIRCUITO NOS ENROLAMENTOS DE  
TRANSFORMADORES

Campina Grande, Paraíba.  
Abril de 2016

NOVA METODOLOGIA BASEADA NOS CRITÉRIOS DE VON MISES E DE FADIGA PARA  
AVALIAÇÃO DOS ESFORÇOS ELETROMECÂNICOS CAUSADOS PELA CIRCULAÇÃO DE  
CORRENTES DE CURTO CIRCUITO NOS ENROLAMENTOS DE TRANSFORMADORES

Tese apresentada à Coordenadoria do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande, em cumprimento às exigências do Programa de Doutorado em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.

Jalberth Fernandes de Araujo  
Orientando

Edson Guedes da Costa, D. Sc.  
Orientador

Tarso Vilela Ferreira, D. Sc.  
Orientador

Campina Grande, Paraíba.  
Abril de 2016

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

- A663n      Araújo, Jalberth Fernandes de.  
Nova metodologia baseada nos critérios de Von Mises e da fadiga para avaliação dos esforços eletromecânicos causados pela circulação de correntes de curto circuito nos enrolamentos de transformadores / Jalberth Fernandes de Araújo. – Campina Grande, 2016.  
121 f. : il. color.
- Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Engenharia Elétrica e Informática, 2016.  
"Orientação: Prof. D. Sc. Edson Guedes da Costa, Prof. D. Sc. Tarso Vilela Ferreira".  
Referências.
1. Transformador.    2. Enrolamentos.    3. Curto Circuito.  
4. Falha Mecânica.    5. Von Mises.    I. Costa, Edson Guedes da.  
II. Ferreira, Tarso Vilela.    III. Título.
- CDU 621.314.224(043)

**"NOVA METODOLOGIA BASEADA NOS CRITÉRIOS DE VON MISES E DE FADIGA  
PARA AVALIAÇÃO DOS ESFORÇOS ELETROMECAÑICOS CAUSADOS PELA  
CIRCULAÇÃO DE CORRENTES DE CURTO CIRCUITO NOS ENROLAMENTOS DE  
TRANSFORMADORES"**

**JALBERTH FERNANDES DE ARAÚJO**

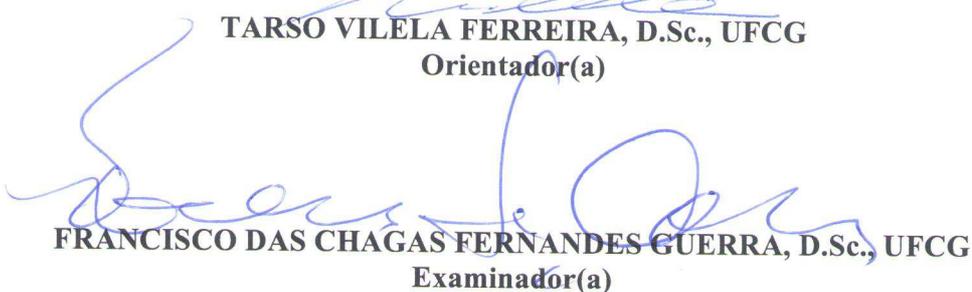
**TESE APROVADA EM 18/04/2016**



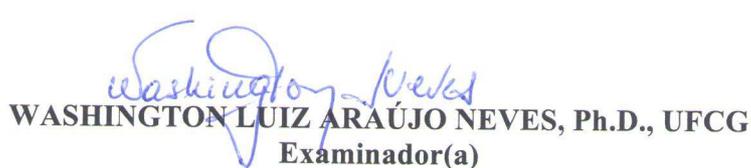
**EDSON GUEDES DA COSTA, D.Sc., UFCG**  
**Orientador(a)**



**TARSO VILELA FERREIRA, D.Sc., UFCG**  
**Orientador(a)**

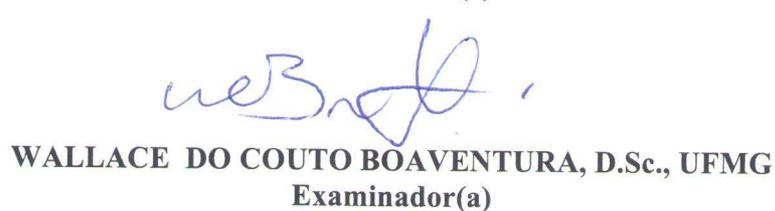


**FRANCISCO DAS CHAGAS FERNANDES GUERRA, D.Sc., UFCG**  
**Examinador(a)**



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

**JOSÉ PISSOLATO FILHO, Dr., UNICAMP**  
**Examinador(a)**



**WALLACE DO COUTO BOAVENTURA, D.Sc., UFMG**  
**Examinador(a)**

**CAMPINA GRANDE - PB**

*Dedico este trabalho a minha esposa,  
Mônica, que é o amor que existe em mim.*

# AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar a Deus, pela minha existência, por ter me dado serenidade e coragem para lidar com os desafios.

Aos meus pais, por se fazerem presentes em todos os momentos da minha trajetória, e que mesmo com todas as dificuldades, me incentivaram na dedicação aos estudos, abrindo mão de seus projetos em favor dos meus.

À minha amada esposa, Mônica, por acreditar que eu seria capaz, apoiando-me nas minhas dificuldades, bem como torcendo e vibrando com cada obstáculo superado.

Tenho uma felicidade imensa de agradecer aos meus orientadores, Professor Edson Guedes da Costa e Professor Tarso Vilela Ferreira, por acreditarem nesta pesquisa e no meu potencial.

Agradeço a todos os professores do curso de graduação e pós-graduação em Engenharia Elétrica que forneceram os conhecimentos para minha formação como engenheiro e pesquisador.

Agradeço aos meus amigos e colegas de trabalho Filipe Lucena e Rafael Barros por terem me ajudado na elaboração das simulações computacionais, bem como no desenvolvimento dos estudos necessários à realização deste trabalho.

Agradeço ao colega Luís Pereira por sanar dúvidas a respeito do *software* COMSOL Multiphysics®.

Agradeço ao colega Renan Arruda por desenvolver, no AutoCAD®, as representações gráficas em 3D dos transformadores empregados neste trabalho.

Agradeço a todo o pessoal do Laboratório de Alta Tensão pelo auxílio durante as pesquisas que participei.

À Companhia Hidroelétrica do São Francisco (CHESF) que, por meio do projeto de P&D intitulado “Supervisão em Tempo Real da Temperatura e das Deformações Mecânicas nos Enrolamentos de Transformadores”, contribuiu de forma significativa para o desenvolvimento deste trabalho.

À Professora Elise Saraiva, por sanar dúvidas a respeito das forças eletromagnéticas ocorrentes nos enrolamentos de transformadores.

Ao CNPq pela bolsa de doutorado.

Aos Professores Raphael Henrique, João Batista, Marco Antônio e Jonatas Júnior por sanarem dúvidas sobre os conceitos de Engenharia Mecânica empregados neste trabalho.

Aos colegas Vitor Silveira e Bruna Lima por auxiliarem em diversos estágios da pesquisa.

Aos meus queridos amigos que fazem parte da minha vida, me apoiando no desenvolvimento deste sonho, em especial: Filipe Lucena, Rafael Barros, Ronimack Trajano, André Germano, Camila Guedes, Marconni Freitas, Paulo Pucu, Éwerton Veríssimo e Adriano Costa.

Por fim, agradeço aos meus alunos que tanto me ensinam dia a dia.

*“Nas grandes batalhas da vida, o primeiro passo para a vitória é o desejo de vencer.”*

Mahatma Gandhi

## RESUMO

Neste trabalho é apresentada uma nova metodologia para avaliar os esforços eletromecânicos causados pela circulação de correntes de curto circuito nos enrolamentos de transformadores. A metodologia é baseada no uso de simulações computacionais, do método dos elementos finitos e em dois critérios de falha mecânica: o critério de Von Mises e o critério de Fadiga. A partir dos resultados obtidos, verificou-se a possibilidade de ocorrência de falhas mecânicas nos enrolamentos, por fadiga, para valores de estresses mecânicos abaixo dos valores de estresses críticos dos enrolamentos. Adicionalmente, observou-se que as falhas por fadiga dependem da amplitude e do tempo de duração dos estresses mecânicos, além do número de vezes que os estresses ocorrem nos enrolamentos. Ademais, foi possível correlacionar o número de curtos circuitos suportáveis pelos enrolamentos, a intensidade da corrente de curto circuito e a redução percentual de vida útil dos enrolamentos. O uso da metodologia proposta possibilitou, também, a avaliação da proximidade da falha plástica nos enrolamentos por meio da utilização do critério de Von Mises. Com isso, pode-se destacar que a utilização da nova metodologia, apresentada nesta pesquisa, permite contribuir com o aprimoramento dos estudos relacionados às metodologias de avaliação dos esforços eletromecânicos ocorrentes nos enrolamentos de transformadores. Além disso, a metodologia pode ser empregada durante a fase de projeto do equipamento, com o intuito de aumentar a margem de segurança contra falhas mecânicas e, conseqüentemente, o seu tempo de vida útil.

Palavras-chave: Transformador, enrolamentos, curto circuito, falha mecânica, Von Mises, fadiga.

## ABSTRACT

In this work is presented a new methodology to evaluate the electromechanical efforts caused by short circuit currents on the transformers windings. The methodology is based on the use of computer simulations, the finite element method and two mechanical failure criteria: Von Mises criterion and Fatigue criterion. From the results, it was verified that the possibility of mechanical failures by fatigue, in the windings, to mechanical stresses values below the critical stress values of the windings. Additionally, it was observed that the failures by fatigue depend on the amplitude of mechanical stress and residence time, and the number of times that such stresses are applied on the windings. The use of the proposed methodology also allowed the evaluation of the failure proximity in the windings. Moreover, it was possible to correlate the withstand short circuit number, the short circuit current intensity and the windings percentage reduction of life. The use of the methodology also allows evaluating the plastic failure proximity by the use of Von Mises criterion. Thus, it is emphasized that the use of the methodology proposed in this work allows contribute to the improvement in studies related to methodologies to assess the electromechanical efforts occurring in the transformers windings. Furthermore, the methodology can be used during the stage of equipment design, with order to increase the safety margin against mechanical failures and, thus, their useful life span

Key-words: Transformer, windings, short circuit, mechanical failure, Von Mises, fatigue.

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

FE	Forças Eletromagnéticas
EM	Estresses Mecânicos
MEF	Método dos Elementos Finitos
1D	Uma dimensão
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
$\alpha$	Ângulo da fase da tensão no instante em que ocorre o curto circuito
$\varphi$	Defasagem entre tensão e corrente
$\omega$	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
$Fi$	Fator de assimetria
$r, \phi$ 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
$\mu_0$	Permeabilidade magnética
$N$	Número de espiras do enrolamento
$I$	Corrente elétrica
$H_e$	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
$d\mathcal{V}$	Elemento de volume diferencial
$J$	Densidade de corrente elétrica
$D_m$	Diâmetro médio do enrolamento
$F_0$	Valor de pico da força eletromagnética
$\sigma$	Estresse mecânico
$A_F$	Área em que a força está sendo aplicada
$E_0$	Módulo de elasticidade
$\varepsilon$	Deformação
$\Delta\varepsilon$	Deformação residual
$\sigma_y$	Limite de escoamento
$T$	Vetor de estresse mecânico
$N$	Vetor unitário normal
$\beta_1, \beta_2$ e $\beta_3$	Invariantes dos estresses mecânicos
$\sigma_1, \sigma_2$ e $\sigma_3$	Estresses principais
$\delta$	Símbolo de Kronecker
$\sigma_{VM}$	Estresse de Von Mises
$\sigma_{crit}$	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
$\sigma_{f0}$	Limite de fadiga da curva S-N básica
$k_s$	Coeficiente de acabamento superficial
$k_t$	Coeficiente de tamanho
$k_f$	Coeficiente de fiabilidade
$k_T$	Coeficiente de temperatura
$\eta$	Coeficiente de segurança
$\sigma_{fad}$	Limite de fadiga admissível
$n_{ck}$	Número de ciclos do estresse $\sigma_k$
$N_{ck}$	Número de ciclos para ocorrência da falha mecânica no estresse $\sigma_k$
$D$	Dano acumulado
$R\%$	Redução percentual da curva S-N admissível de fadiga
$n_{fad}$	Número de ciclos correspondente ao limite de fadiga admissível
$\nabla$	Operador nabra
T1	Transformador de 75 MVA
T2	Transformador de 100 MVA
EI	Enrolamento interno
EE	Enrolamento externo
$a$ e $b$	Limitantes inferior e superior do intervalo que contém o valor do estresse crítico do enrolamento

# SUMÁRIO

1	Introdução .....	14
1.1	Motivação .....	17
1.2	Contribuições do trabalho .....	19
1.3	Objetivos .....	20
1.4	Organização do texto .....	20
2	Fundamentação Teórica .....	22
2.1	Falhas em Transformadores .....	22
2.2	Metodologias para Avaliação de Falhas Mecânicas nos Enrolamentos de Transformadores... 25	
2.2.1	Medição de Capacitância do Enrolamento .....	26
2.2.2	Medição da Corrente de Excitação .....	26
2.2.3	Medição da Impedância de Curto Circuito .....	27
2.2.4	Análise por Resposta em Frequência .....	27
2.2.5	Análise Vibracional .....	28
2.3	Corrente de curto circuito .....	29
2.4	Densidade de fluxo magnético de dispersão .....	32
2.5	Forças Eletromagnéticas .....	34
2.6	Estresses Mecânicos .....	39
2.6.1	Conceitos Básicos que Regem a Física Mecânica .....	40
2.6.2	Estresses Principais .....	42
2.6.3	Critério de Von Mises .....	44
2.6.4	Critério de Fadiga .....	48
2.7	Método dos elementos finitos .....	54
2.7.1	Discretização .....	55
2.7.2	Equacionamento dos Elementos .....	56
2.7.3	Junção dos Elementos .....	56
2.7.4	Solução do sistema .....	56
2.7.5	Visualização .....	57
3	Revisão Bibliográfica .....	59
4	Metodologia .....	70
4.1	Construção das Representações Gráficas dos Transformadores .....	71
4.2	Inserção das Representações Gráficas dos Transformadores em um <i>Software</i> baseado no Método dos Elementos Finitos .....	72
4.3	Geração da Malha da Representação Gráfica do Transformador .....	73
4.4	Realização das Simulações Computacionais .....	74
4.5	Determinação dos Estresses Críticos dos Enrolamentos do Transformador .....	75
4.6	Construção das Curvas Representativas da Proximidade de Falha Plástica dos Enrolamentos 76	
4.7	Determinação das Curvas S-N Admissíveis de Fadiga .....	77
4.8	Emprego do Critério de Fadiga .....	78
5	Resultados .....	81
5.1	Respostas da Representação Gráfica do Transformador à União das Físicas Eletromagnética e Mecânica .....	81

5.1.1	Respostas da Simulação do Transformador de 75 MVA .....	82
5.1.2	Respostas da Simulação do Transformador de 100 MVA .....	84
5.2	Avaliação dos Critérios de Falha Mecânica para o Transformador de 75 MVA.....	87
5.2.1	Avaliação da Proximidade de Falha Plástica dos enrolamentos .....	87
5.2.2	Avaliação do nível de danos causados por fadiga .....	94
5.3	Avaliação dos Critérios de Falha Mecânica para o Transformador de 100 MVA.....	101
5.3.1	Avaliação da proximidade de falha Plástica dos enrolamentos.....	101
5.3.2	Avaliação do nível de danos causados por fadiga .....	107
5.4	Etapas de aplicação da nova metodologia .....	111
5.5	Aplicabilidade da metodologia empregada .....	113
6	Conclusões .....	114
6.1	Trabalhos Futuros.....	115
7	Publicações .....	116
	Referências .....	117

# 1 INTRODUÇÃO

Transformadores de potência são equipamentos essenciais aos sistemas elétricos. A sua função fundamental é transferir energia elétrica de um circuito de entrada para um circuito de saída, elevando ou diminuindo os valores de tensão e corrente, mantendo a frequência invariável. Dentre outras funções dos transformadores, destacam-se: reduzir as perdas durante a transmissão de energia elétrica e propiciar a utilização de energia elétrica de forma adequada pelos consumidores.

O princípio de funcionamento dos transformadores se baseia na indução eletromagnética decorrente do acoplamento entre duas ou mais bobinas por meio do núcleo, o qual é constituído de material ferromagnético. Para que o transformador desempenhe suas funções de forma adequada, falhas devem ser evitadas, uma vez que causam prejuízos financeiros elevados, devido ao alto valor comercial do equipamento, além da possível perda temporária da capacidade de transmissão da energia elétrica.

A indisponibilidade de linhas transmissão, provocada pelas possíveis falhas em transformadores, reflete diretamente no atendimento às cargas do setor produtivo nacional. Ela também reflete no faturamento das empresas concessionárias de energia elétrica, influenciando o desempenho econômico do país como um todo. Por isso, os fabricantes de transformadores vêm aprimorando cada vez mais as técnicas de fabricação, com objetivo de aumentar o tempo de vida útil do equipamento.

As falhas que podem ocorrer em transformadores de potência podem ser, principalmente, de origem térmica, dielétrica, química e mecânica. Segundo pesquisas feitas pelo Cigré (1983) e por Souza (2008), cerca de 1% das falhas são de origem química, 9% são de origem térmica, 31% são de origem dielétrica, 53% são de origem mecânica e 6% são falhas referentes a outras origens. Portanto, mais de 80% das falhas que ocorrem em transformadores são de origem mecânica ou dielétrica.

As falhas de origem mecânica estão relacionadas, principalmente, a vibrações e deformações nos enrolamentos durante a circulação de elevadas correntes transitórias, como as correntes de curto circuito e de energização.

As falhas de origem dielétrica também podem ter origem nas falhas mecânicas, uma vez que as falhas de origem mecânica podem conduzir à perda da suportabilidade dielétrica dos materiais isolantes presentes no transformador (FRANZEN e KARLSSON, 2007).

Na Figura 1 está apresentada uma fotografia, ilustrativa, com os efeitos que a circulação de elevadas correntes transitórias pode causar nos enrolamentos de um transformador.

Figura 1 - Fotografia com os efeitos causados aos enrolamentos de um transformador devido à circulação de elevadas correntes transitórias.



Fonte: Bartley (2003).

Os efeitos apresentados na Figura 1 são decorrentes dos esforços eletromecânicos causados pela circulação de elevadas correntes transitórias nos enrolamentos do transformador. Para mitigar os efeitos, as vibrações e deformações nos enrolamentos do equipamento podem ser monitoradas por meio da medição das forças eletromagnéticas (FE) e dos estresses mecânicos (EM). A medição das forças eletromagnéticas e dos estresses mecânicos pode ser realizada mediante a utilização de sensores, os quais devem ser colocados em pontos estratégicos dos enrolamentos do transformador. Desta forma, evita-se que o funcionamento do equipamento seja comprometido e os sensores sejam danificados durante a medição.

Por outro lado, existem algumas dificuldades que faz a medição das forças eletromagnéticas e dos estresses mecânicos não ser uma atividade trivial, por exemplo:

- Retirar o equipamento de operação para que os sensores sejam colocados em pontos estratégicos dos enrolamentos, os quais estão protegidos pelos materiais isolantes;
- Encontrar fabricantes que forneçam acesso a sua tecnologia e permitam a inserção dos sensores durante o processo de fabricação do equipamento;
- Encontrar fabricantes que estejam dispostos a ajustar o projeto do transformador à introdução dos sensores nos enrolamentos, visto que os

sensores representam, também, a inserção de custos adicionais significativos ao projeto do transformador.

Com as dificuldades existentes, para realização da medição das forças eletromagnéticas e dos estresses mecânicos, soluções analíticas, modelos e simulações computacionais podem ser utilizadas como técnicas alternativas para avaliar e prever os efeitos dos esforços eletromecânicos, os quais são causados pela circulação das elevadas correntes transitórias nos enrolamentos de transformadores (YANG, 2013).

Atualmente, existem diversas metodologias, já consolidadas, que são utilizadas para avaliar os efeitos dos esforços eletromecânicos, tais como: medição da corrente de excitação, medição da capacitância, determinação da impedância de curto circuito e análise da resposta em frequência. Elas podem ser empregadas em conjunto com novas metodologias, baseadas no uso de critérios de falha mecânica adequados e simulações computacionais.

Com relação ao uso de critérios de falha mecânica, dois podem ser destacados: o critério de Von Mises, que é um dos critérios mais utilizados para avaliação da proximidade de falha plástica em materiais dúcteis; e o critério de Fadiga, que é referente à ocorrência de falhas, por ruptura do material, para valores de estresses mecânicos que estão abaixo dos valores de estresses mecânicos suportáveis pelo material (BRANCO, 1985). Já a utilização de simulações computacionais está relacionada aos avanços da capacidade de processamento dos computadores e com o desenvolvimento de plataformas computacionais, baseadas no uso do Método dos Elementos Finitos (MEF), para a realização de simulações de fenômenos físicos. Assim, o uso dessas ferramentas para transformadores permite, atualmente:

- Representar graficamente o transformador em 3D;
- Simular, em conjunto, os fenômenos físicos de origem eletromagnética e mecânica, de modo a determinar as forças eletromagnéticas e os estresses mecânicos ocorrentes nos enrolamentos do transformador;
- Evitar a retirada do transformador, durante sua operação, para introdução de sensores;
- Reduzir custos da realização de ensaios de tipo;
- Auxiliar uma tomada de decisão, para fins de manutenção, de acordo os valores das forças eletromagnéticas e dos estresses mecânicos para os quais o equipamento está submetido.

Desta forma, as novas metodologias podem ser propostas com o intuito de complementar as metodologias já existentes e, também, serem utilizadas durante a fase de projeto dos transformadores. Com o conhecimento dos efeitos dos esforços eletromecânicos nos enrolamentos de transformadores e a aplicação de ações corretivas, preventivas ou preditivas, pode-se aumentar seu tempo de vida útil e minimizar o número de ocorrências de falhas mecânicas que podem acontecer no equipamento.

Pelo exposto, esta pesquisa foi concebida com o objetivo de analisar a aplicação de uma nova metodologia para avaliar os efeitos dos esforços eletromecânicos nos enrolamentos de transformadores, tomando como base a utilização de simulações computacionais, baseadas no MEF, e no uso dos dois critérios de falha mecânica supracitados, o critério de Von Mises e o critério de fadiga.

## 1.1 MOTIVAÇÃO

Em operação, os transformadores estão sujeitos à ocorrência de elevadas correntes transitórias. Conforme já mencionado, quando as elevadas correntes transitórias circulam pelos enrolamentos, ocorre o surgimento de esforços eletromecânicos que podem ocasionar falhas de origem mecânica.

A minimização do número de falhas de origem mecânica, em transformadores de potência, deve ser uma preocupação dos projetistas e fabricantes do equipamento, bem como dos profissionais de manutenção e operação das empresas de energia elétrica. Todavia, na Lei 8666/93, que institui normas para licitações e contratos da administração pública, é destacado que o menor preço do equipamento é um fator determinante na sua compra ou venda. A diminuição do preço de um transformador pode ser ocasionado pela redução dos custos envolvidos para sua fabricação e, conseqüentemente, da qualidade ou da quantidade dos materiais empregados. Isto resulta no aumento da probabilidade da ocorrência de falhas mecânicas.

Para reduzir a probabilidade da ocorrência das falhas mecânicas, e por ser um equipamento de custo bastante elevado, o projeto dos transformadores de potência deve ser realizado prevendo as condições mecânicas (esforços eletromecânicos) mais críticas a que o equipamento pode ficar submetido.

Segundo os livros de Waters (1966) e Bertagnolli (2007), as condições mecânicas mais críticas decorrem da circulação de correntes de curto circuito pelos enrolamentos.

Estas correntes, conforme estudo feito por Bechara (2010), são as que causam mais falhas de origem mecânica nos enrolamentos dos transformadores. Sabendo disto, o projeto de um transformador deve contemplar a capacidade de suportar um determinado número de curtos circuitos durante o seu tempo de vida útil. Porém, mesmo assim, falhas mecânicas ainda poderão ocorrer e a capacidade de o transformador suportar novos esforços eletromecânicos é, então, reduzida.

Com o intuito de analisar a probabilidade de falhas mecânicas, diversas metodologias são utilizadas. No uso das metodologias, é destacado na literatura que os enrolamentos falharão apenas quando o valor do estresse mecânico for superior ao valor do estresse crítico dos enrolamentos. Entretanto, dependendo da intensidade e do tempo de duração do estresse mecânico nos enrolamentos, a falha também poderá ocorrer para valores de estresses mecânicos abaixo do valor do estresse crítico dos enrolamentos. Diante disto, os valores de estresses mecânicos que estão abaixo dos valores dos estresses críticos dos enrolamentos devem ser considerados na avaliação das falhas que podem acontecer nos enrolamentos de transformadores.

Fazendo as considerações mencionadas, novas metodologias devem ser propostas com o intuito de complementar as já existentes, podendo ser empregadas durante a fase de projeto do transformador ou ao longo de sua vida útil.

Uma metodologia apropriada deve, então, ser baseada no uso de critérios de falha mecânica, os quais permitam avaliar a proximidade de falha dos enrolamentos de transformadores. Com este objetivo, dois critérios de falha mecânica podem ser aplicados: o critério de Von Mises e o critério de Fadiga. Conforme já mencionado, o critério de Von Mises é um dos critérios, de falha mecânica, mais empregados para determinação da proximidade de falha de materiais dúcteis, podendo ser utilizado para verificar a proximidade de falha plástica dos enrolamentos. Já o critério de Fadiga permite a análise de falha, por ruptura dos enrolamentos, para valores de estresses mecânicos abaixo do valor do estresse crítico.

Diante das considerações técnicas apresentadas, a motivação desta pesquisa está em verificar, estudar, analisar e constatar, via simulações computacionais, que:

- Segundo o critério de Fadiga, a falha dos enrolamentos pode ocorrer para valores de estresses mecânicos que estão abaixo do valor do estresse crítico dos enrolamentos;

- Os critérios de falha mecânica podem ser utilizados para avaliar os efeitos dos esforços eletromecânicos nos enrolamentos dos transformadores;
- Os critérios de falha mecânica podem ser utilizados para determinar a proximidade de falha plástica dos enrolamentos por meio da comparação entre os valores do estresse mecânico, ocorrente nos enrolamentos, e do estresse crítico dos enrolamentos;
- Os critérios de falha mecânica podem ser utilizados para correlacionar o número de curtos circuitos suportáveis pelos enrolamentos, com os valores dos fatores de assimetria das correntes de curto circuito e com a redução percentual do tempo de vida útil dos enrolamentos;
- A utilização de critérios de falha mecânica, durante a execução do projeto de transformadores de potência, permite minimizar a ocorrência de falhas de origem mecânica mediante o aumento da margem de segurança do equipamento.

## 1.2 CONTRIBUIÇÕES DO TRABALHO

A partir das informações apresentadas na subseção anterior, pode destacar que as principais contribuições desta pesquisa são:

- Propor uma nova metodologia capaz de verificar a ocorrência de falhas mecânicas nos enrolamentos de transformadores para valores de estresses mecânicos abaixo do valor do estresse crítico dos enrolamentos;
- Apresentar uma nova metodologia, baseada no uso dos critérios de Von Mises e de Fadiga, para avaliar os efeitos progressivos dos esforços eletromecânicos nos enrolamentos de transformadores;
- Apresentar uma nova metodologia capaz de correlacionar o número de curtos circuitos suportáveis pelos enrolamentos, os valores dos fatores de assimetria das correntes de curtos circuitos e a redução percentual do tempo de vida útil dos enrolamentos;

- Apresentar uma nova metodologia que pode ser aplicada durante a fase de projeto dos transformadores de potência, a fim de aumentar sua margem de segurança contra a ocorrência de falhas de origem mecânica.

### 1.3 OBJETIVOS

O objetivo geral desta tese é analisar a aplicação de uma nova metodologia, para avaliação dos efeitos dos esforços eletromecânicos causados pela circulação de correntes de curto circuito nos enrolamentos de transformadores, tomando-se como base a utilização de critérios de falha mecânica.

Além disso, esta tese possui os seguintes objetivos específicos:

- Verificar que a falha dos enrolamentos pode ocorrer para valores de estresses mecânicos inferiores aos valores dos estresses críticos dos enrolamentos;
- Avaliar os estresses mecânicos para diferentes condições de curto circuito;
- Utilizar os critérios de Von Mises e de Fadiga para determinar a proximidade de falha de um enrolamento, quando submetido a curtos circuitos com diferentes fatores de assimetria;
- Apresentar uma nova metodologia que seja capaz de correlacionar o número de curtos circuitos suportáveis pelos enrolamentos com os valores dos fatores de assimetria e com a redução percentual do tempo de vida útil dos enrolamentos.

### 1.4 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

Este trabalho está organizado em sete capítulos, descritos a seguir.

No Capítulo 2 será realizado o embasamento teórico a respeito de falhas em transformadores, metodologias para avaliação dos esforços eletromecânicos em transformadores, corrente de curto circuito, densidade de fluxo magnético de dispersão, forças eletromagnéticas, estresses mecânicos e método dos elementos finitos.

No Capítulo 3 a revisão bibliográfica será apresentada, discutindo a respeito de pesquisas que tratam da utilização da modelagem analítica, e computacional, para a determinação das forças eletromagnéticas e dos estresses mecânicos nos enrolamentos de transformadores. Além disso, serão apresentadas pesquisas que tratam da utilização de critérios de falha mecânica para avaliar os efeitos das forças eletromagnéticas e dos estresses mecânicos, quando da ocorrência de circulação de correntes de curto circuito e de energização nos enrolamentos.

No Capítulo 4 será apresentada a metodologia empregada para avaliação dos efeitos dos esforços eletromecânicos nos enrolamentos de transformadores, tomando como base a utilização de critérios de falha mecânica.

Nos Capítulos 5 serão apresentados os resultados obtidos nesta pesquisa.

No Capítulo 6 serão apresentadas as conclusões e as sugestões de trabalhos futuros, com o intuito de continuar a linha de pesquisa apresentada neste trabalho.

No Capítulo 7 serão apresentados os artigos que foram publicados, aceitos para publicação e submetidos.

Por fim, serão apresentadas as referências.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo estão apresentados os conceitos necessários para entendimento da nova metodologia e da análise dos resultados. Assim, os tipos de falhas em transformadores, as metodologias para avaliação de falhas nos enrolamentos de transformadores, os conceitos sobre corrente de curto circuito, densidade de fluxo magnético de dispersão, forças eletromagnéticas, estresses mecânicos, critérios de falha mecânica e método dos elementos finitos são descritos nas seções a seguir.

### 2.1 FALHAS EM TRANSFORMADORES

Devido a sua importância para os sistemas elétricos de potência, os transformadores são equipamentos que devem ser cuidadosamente protegidos contra os fenômenos causadores de falhas. A ocorrência de falhas pode demandar altos custos financeiros, tanto às concessionárias de energia elétrica, quanto aos consumidores, devido ao alto valor comercial do transformador e também à perda temporária da capacidade de transmissão de energia elétrica.

Fenômenos como descargas atmosféricas, curtos circuitos, energizações, vandalismo, travamentos de dispositivos mecânicos, danos causados por animais, deficiência do sistema de vedação, descargas parciais e sobrecargas ocasionam o surgimento de falhas de origem térmica, química, dielétrica e mecânica. A origem das falhas nos componentes dos transformadores, segundo Franzen e outros (2007), manifesta-se, principalmente, nas buchas, nos enrolamentos, no tanque, no comutador sob carga, no núcleo, no óleo e na isolação. A caracterização das falhas nos componentes de transformadores está indicada a seguir (FRANZEN *et al.*, 2007; BECHARA, 2010):

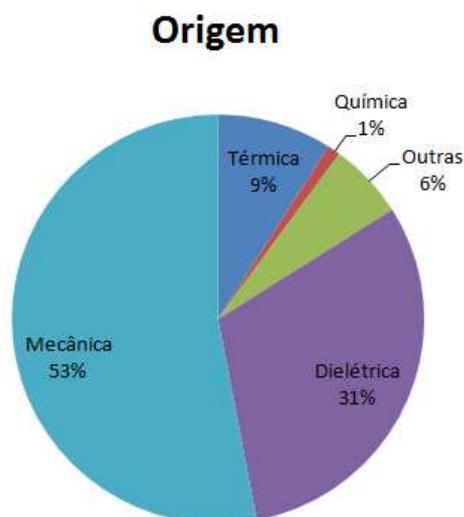
- As falhas no núcleo são caracterizadas pela redução no rendimento do transformador, podendo ser causada por falhas de origem mecânica ou por não conformidade durante o processo de fabricação;
- O tanque é um componente que está sujeito à radiação solar, vibrações, umidade elevada, vazamentos de óleo e corrosão. Além disso, a geração

de arcos elétricos dentro do transformador pode causar um aumento da pressão interna e, conseqüentemente, a ruptura do tanque;

- A celulose faz da parte isolamento. A análise do grau de polimerização é utilizada como base para averiguar a qualidade da celulose. Um baixo grau de polimerização indica que a celulose possui baixa resistência mecânica e não pode ser capaz de suportar solicitações eletromecânicas. Além disso, a degradação da celulose é irreversível e sua substituição é tecnicamente inviável. Adicionalmente, o envelhecimento da celulose é acelerado com a presença de água e ocorrências de curtos circuitos;
- O óleo também faz parte da isolamento. A qualidade do óleo influi na capacidade de isolamento e refrigeração do transformador. Em transformadores com circulação forçada, existe o risco de uma falha na bomba, o que levaria a não circulação de óleo e, conseqüentemente, o aumento das temperaturas no transformador;
- O principal modo de falha das buchas é a ocorrência de curtos circuitos, os quais podem ser causados devido a defeitos no material da bucha. Além disso, as falhas nas buchas podem ocorrer devido a vandalismo e a defeitos no processo de fabricação;
- As falhas em comutadores sob carga decorrem de problemas de natureza mecânica, desgaste de contatos, procedimentos de manutenção inadequados e deterioração do óleo isolante da chave comutadora;
- As falhas nos enrolamentos podem ser de origem mecânica, ocasionadas por vibrações e deformações nos enrolamentos devido, principalmente, aos esforços eletromecânicos produzidos pela circulação de correntes de curto circuito.

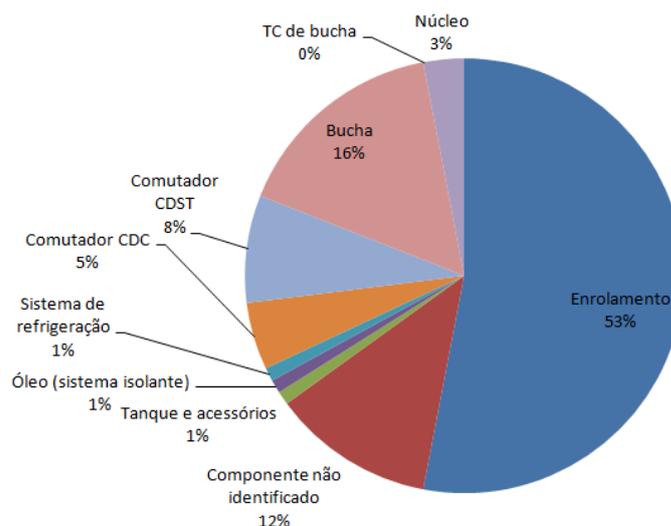
Nas Figuras 2 e 3 são apresentados os percentuais das falhas que podem ocorrer em transformadores de potência. Os percentuais foram obtidos a partir de estudos feitos pelo Cigré (1983) e por Souza (2008), nos quais são destacadas as percentagens tanto com relação à origem quanto com relação ao componente que pode vir a falhar. Ao observar as figuras, verifica-se que mais de 80% das falhas que podem acontecer são de origem dielétrica e mecânica.

Figura 2 - Percentagem de falhas em transformadores conforme pesquisa feita pelo Cigré (1983).



Fonte: Adaptado de Cigré (1983).

Figura 3 - Percentagem de falhas em transformadores conforme pesquisa feita por Souza (2008).



Fonte: Adaptado de Souza (2008).

As falhas de origem dielétrica estão relacionadas à degradação do sistema isolante, e podem ser causadas por:

- Reações químicas aceleradas provocadas por trocas de calor;
- Redução da suportabilidade dielétrica causadas por sobretensões;
- Contaminação;
- Umidade;
- Vibrações;
- Esforços eletromecânicos causados pela circulação de correntes de curto circuito nos enrolamentos.

Ao verificar as causas das falhas de origem dielétrica, pode-se dizer que algumas delas se iniciam devido às falhas de origem mecânica. De fato, a circulação de correntes de curto circuito ocasiona vibrações e deformações que podem provocar a diminuição ou aumento no diâmetro dos enrolamentos, causando:

- Dificuldade de circulação de óleo;
- Aquecimento localizado na isolação;
- Aceleração do envelhecimento do papel isolante;
- Redução da capacidade de isolação;
- Alongamento do isolante que reveste os condutores dos enrolamentos;
- Diminuição das distâncias de isolação entre o enrolamento interno e núcleo;
- Diminuição das distâncias de isolação do enrolamento externo ao tanque ou a outro enrolamento do transformador;
- Afrouxamento das amarrações dos enrolamentos;
- Diminuição da suportabilidade mecânica dos enrolamentos.

Todos os problemas citados, dificultam o funcionamento correto do transformador. Para reduzir a ocorrência de falhas mecânicas e fazer com que o transformador funcione de forma adequada, metodologias que servem para avaliar e mitigar os efeitos dos esforços eletromecânicos podem ser utilizadas. As metodologias estão apresentadas a seguir.

## 2.2 METODOLOGIAS PARA AVALIAÇÃO DE FALHAS

### MECÂNICAS NOS ENROLAMENTOS DE TRANSFORMADORES

Como muitas das falhas em transformadores são de origem mecânica, ocorrentes majoritariamente nos enrolamentos, algumas metodologias vêm sendo utilizadas para avaliar a condição dos enrolamentos quando submetidos a esforços eletromecânicos. Estas metodologias podem fornecer um indicativo de deformação nos enrolamentos, e podem ser aplicadas tanto durante a etapa de projeto do transformador, quanto durante sua operação. As metodologias estão apresentadas nas subseções a seguir.

### 2.2.1 MEDIÇÃO DE CAPACITÂNCIA DO ENROLAMENTO

Os transformadores contêm um complexo sistema de isolamento, em que o enrolamento externo deve estar isolado tanto do tanque, quanto do enrolamento interno, assim como o enrolamento interno deve estar isolado do núcleo. Todos os espaços de isolamentos criam capacitâncias próprias ao transformador e devem ser verificadas regularmente, ou seja, medindo-se as capacitâncias existentes entre: o enrolamento externo e interno; enrolamento externo e tanque e enrolamento interno e núcleo.

A ocorrência de descargas atmosféricas, surtos de manobra e faltas no sistema elétrico podem causar alterações nos valores medidos das capacitâncias. Tais alterações podem ser indicativas de deformações nos enrolamentos, problemas estruturais e alterações nas propriedades dielétricas dos materiais isolantes (PAULINO, 2006).

As variações dos valores das capacitâncias do enrolamento dependem do tipo de fenômeno que pode causar alterações nos valores das capacitâncias. Além disso, a interpretação dos valores medidos pode ser dificultada caso os valores de referência não estejam disponíveis.

A medição de capacitância do enrolamento é efetiva, particularmente, em casos que é possível separar as medições por fase. No entanto, para que a metodologia seja empregada, deve-se retirar o transformador de operação para evitar que as capacitâncias existentes no sistema elétrico influenciem na medição. Adicionalmente, comparações das capacitâncias entre o primário e secundário, de cada fase, auxiliam na possibilidade de encontrar alguma anormalidade (CIGRÉ, 2002; SARAIVA, 2011).

### 2.2.2 MEDIÇÃO DA CORRENTE DE EXCITAÇÃO

A metodologia de medição da corrente de excitação tem a vantagem de utilizar equipamentos relativamente simples para a medição, tais como: fonte de tensão e medidores de tensão, potência e corrente.

Para medir a corrente de excitação, o ensaio de circuito aberto no transformador deve ser realizado, em que é aplicada a tensão nominal senoidal no enrolamento de baixa tensão, enquanto o enrolamento de alta tensão fica em aberto (NBR 5380, 1993).

Embora as medições de corrente de excitação sejam tipicamente a forma mais fácil de detectar espiras curto circuitadas, que pode ocorrer devido ao movimento do enrolamento, a medição de corrente de excitação é de sensibilidade limitada para outros

tipos de falhas como deformações nos enrolamentos e ocorrência de vibrações (CIGRÉ, 2002). Além disso, as correntes de excitação não sofrem alterações devido às deformações nos enrolamentos (SARAIVA, 2011).

### 2.2.3 MEDIÇÃO DA IMPEDÂNCIA DE CURTO CIRCUITO

Quando um sistema de potência sofre uma condição de curto circuito, a corrente gerada no evento é normalmente elevada e flui através dos enrolamentos dos transformadores gerando esforços eletromecânicos com valores elevados. Estes esforços podem ocasionar o surgimento de deformações nos enrolamentos, as quais afetam a trajetória do fluxo de dispersão que, por sua vez, resulta na mudança do valor da impedância de curto circuito medida (BOLDUC *et al.*, 2000).

A medição da impedância de curto circuito é uma das técnicas mais aceitas para detectar movimento dos enrolamentos (CIGRÉ, 2002, NBR 5380, 1993). Ela deve ser realizada com correntes suficientemente altas, de modo que a impedância de magnetização possa ser desprezada. Além disso, deve-se assegurar que os cabos utilizados sejam de baixa impedância.

A principal dificuldade em fazer uso da metodologia de medição da impedância de curto circuito deve-se à variação natural do parâmetro medido. Para que sejam obtidas interpretações confiáveis, valores de referência da impedância são necessários.

Com a medição das impedâncias de curto circuito, pode-se obter informações sobre deslocamentos dos enrolamentos, alterações das distâncias entre os enrolamentos e entre os enrolamentos e o núcleo ferromagnético.

As metodologias de medição da corrente de excitação ou da capacitância do enrolamento não são substituídas pela metodologia de medição da impedância de curto circuito. Pelo contrário, elas são complementadas e, sendo empregadas em conjunto, podem fornecer informações mais precisas sobre diagnóstico dos enrolamentos.

### 2.2.4 ANÁLISE POR RESPOSTA EM FREQUÊNCIA

O principal interesse das medições de resposta em frequência é detectar deformações nos enrolamentos e no núcleo, resultantes dos esforços eletromecânicos a que o transformador pode ser submetido. Os esforços são ocasionados por falhas no sistema em que o equipamento está conectado, falhas no comutador sob carga, falhas de

transporte, descargas atmosféricas, defeitos dentro do transformador, ocorrências de curtos circuitos e vibrações (KRAETGE, 2009).

Outra aplicação da metodologia de análise, por resposta em frequência, é a verificação da integridade mecânica de um transformador depois de seu transporte. Se o transporte for inadequado, ou fora dos padrões, pode ocorrer movimento do enrolamento e do núcleo.

Para empregar a metodologia de análise por resposta em frequência, é necessário determinar a resposta em frequência das impedâncias existentes no transformador (entre enrolamentos, enrolamento e núcleo, enrolamentos e tanque). A resposta em frequência é utilizada para detectar falhas por meio de um comparativo entre as respostas em frequência da grandeza física antes e depois do equipamento entrar em operação. Além disso, podem ser determinadas funções de transferência que representem o comportamento do transformador, nas quais podem ser detectadas variações dos parâmetros quando da ocorrência de uma falha. Adicionalmente, a detecção de falhas também é feita por meio da localização de pontos de ressonância no gráfico da resposta em frequência (ABU-SIADA; ISLAM, 2007).

A vantagem da metodologia de análise por resposta em frequência é não ser uma técnica invasiva ao equipamento. Entretanto, deve-se ter a referência para possibilitar a avaliação dos efeitos dos esforços eletromecânicos. Complementarmente, a técnica não pode ser utilizada durante a fase de projeto do transformador, uma vez que é empregada com o equipamento já montado.

#### 2.2.5 ANÁLISE VIBRACIONAL

A análise vibracional é baseada na medição das vibrações que se propagam através do óleo até atingir o tanque do transformador. A medição é realizada mediante o uso de sensores de vibração, como por exemplo: acelerômetros, extensômetros e sensores de fibra óptica (SHENGCHANG *et al.*, 2000).

Para se utilizar a metodologia da análise vibracional é necessário realizar medições das vibrações no tanque do transformador. As assinaturas da grandeza vibracional, antes e depois do transformador entrar em operação, são comparadas com o intuito de avaliar a ocorrência de falhas nos enrolamentos e no núcleo.

Por ser uma metodologia relativamente nova, avaliações da técnica ainda estão sendo realizadas, de modo a tentar verificar os pontos ótimos de medição no tanque e as

componentes harmônicas do sinal de vibração que mais se correlacionam com a variação de outras grandezas, como tensão, corrente e temperatura. Por isso, é uma metodologia que ainda está em fase de testes e aprimoramentos, e novas pesquisas devem ser realizadas com o intuito de consolidar sua utilização como técnica de avaliação de falhas em transformadores (YUYING *et al.*, 2011).

A vantagem da medição de sinais vibracionais é que sua realização não requer a retirada do transformador de operação. A desvantagem é a necessidade de se instalar vários sensores nas paredes do tanque para que as assinaturas vibracionais sejam analisadas, de modo que comparações entre elas possam ser utilizadas para a detecção de falhas.

Apesar da existência de diversas metodologias para a avaliação de falhas nos enrolamentos de transformadores, novas metodologias devem ser propostas, uma vez que ainda não existe uma metodologia confiável ou consolidada. As metodologias devem ser baseadas nos fenômenos que conduzem às falhas. Um dos fenômenos que mais ocasionam falhas mecânicas nos enrolamentos de transformadores, conforme já mencionado, é a circulação de correntes de curto circuito. Por isso, seus efeitos nos enrolamentos devem ser avaliados.

Para avaliar os efeitos ocasionados pela circulação de correntes de curto circuito nos enrolamentos, é necessário saber uma fundamentação teórica a respeito da corrente de curto circuito. A fundamentação está apresentada na seção a seguir.

## 2.3 CORRENTE DE CURTO CIRCUITO

A capacidade de um transformador resistir aos curtos circuitos é considerada essencial para garantir a segurança do equipamento e a confiabilidade dos sistemas elétricos. Os transformadores devem ser projetados e construídos para suportar os níveis de correntes de curtos circuitos a que possam ser submetidos durante o tempo de vida útil para o qual foram projetados (FOLDI *et al.*, 2000).

Adicionalmente, em dados estatísticos é mostrado que a maioria dos curtos circuitos nos sistemas elétricos ocorre entre fase e terra. Além dos curtos circuitos entre fase e terra, existem também, em termos da frequência de ocorrência, os curtos circuitos bifásicos e bifásico à terra e, por último, os curtos circuitos trifásicos (BOLLEN, 2000).

Apesar de ocorrerem com menor frequência, as faltas trifásicas são as que ocasionam os maiores esforços eletromecânicos nos enrolamentos em transformadores. Por esse motivo, é prática comum projetar transformadores para resistir a faltas trifásicas em seus terminais (WATERS, 1966, BERTAGNOLLI, 2007).

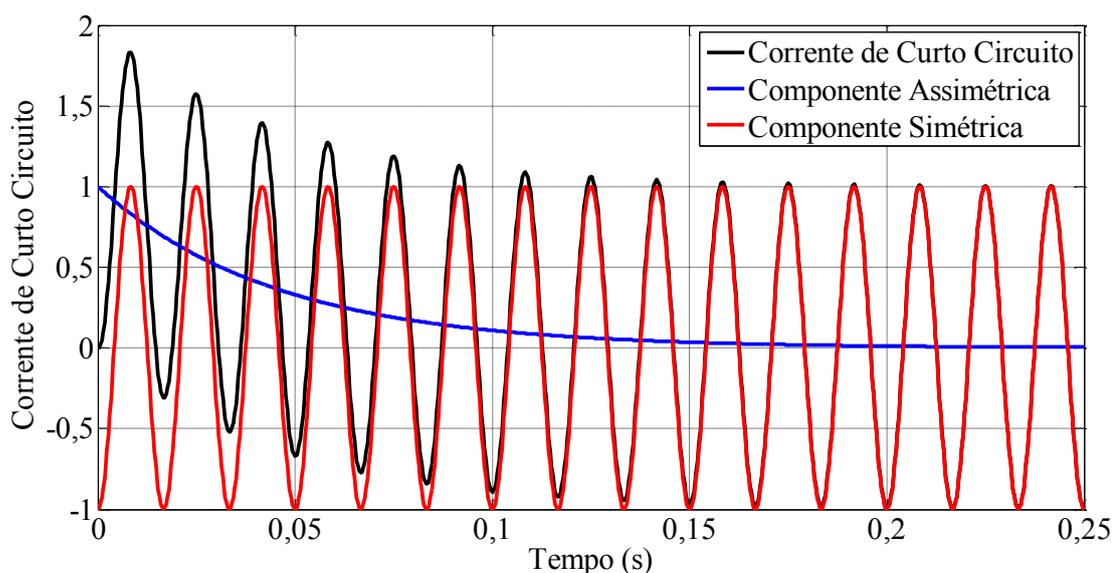
Para projetar os transformadores de modo a resistir às correntes de curto circuito, é necessário ter conhecimento de como realizar o cálculo das correntes de curto circuito. Para determinar a corrente de curto circuito (IEEE STD., 2006; IEC STD., 2000; NBR 5380, 1993), como função do tempo, pode-se utilizar a Expressão (1).

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

em que  $I_{cc}(t)$  representa a corrente de curto circuito no tempo,  $t$ ;  $V_{RMS}$  é o valor eficaz da tensão;  $S$  é a potência aparente do transformador;  $R$  e  $L$  são a resistência e indutância do circuito da entrada da instalação até o ponto onde ocorreu o curto circuito;  $\alpha$  é o ângulo da fase da tensão no instante em que ocorre o curto circuito;  $\varphi$  é a defasagem entre tensão e corrente;  $Z\%$  é a impedância percentual do transformador e  $\omega$  é a frequência angular.

A forma de onda típica de uma corrente de curto circuito está apresentada na Figura 4.

Figura 4 - Forma de onda típica da corrente de curto circuito.



Fonte: Autor

Ao observar a Figura 4 e a Expressão (1), verifica-se que a corrente de curto circuito (curva em preto) possui duas componentes, uma é chamada de simétrica (curva em vermelho) e outra é chamada de assimétrica (curva em azul). A componente simétrica está relacionada aos valores da corrente em regime permanente, e a componente assimétrica está relacionada aos valores da corrente em regime transitório.

O valor de pico da componente simétrica pode ser calculado por meio do uso da Expressão (2).

$$I_{sim} = \frac{\sqrt{2} \cdot S}{V_{RMS} \cdot Z\%}, \quad (2)$$

em que  $I_{sim}$  representa o valor de pico da componente simétrica da corrente de curto circuito.

Com o valor de pico da componente simétrica, o valor de pico da corrente de curto circuito, considerando a componente assimétrica, pode ser determinado por meio da Expressão (3).

$$I_{asim} = fi \cdot I_{sim}, \quad (3)$$

em que  $I_{asim}$  é o valor de pico da corrente de curto circuito considerando a componente assimétrica e  $fi$  é chamado de fator de assimetria.

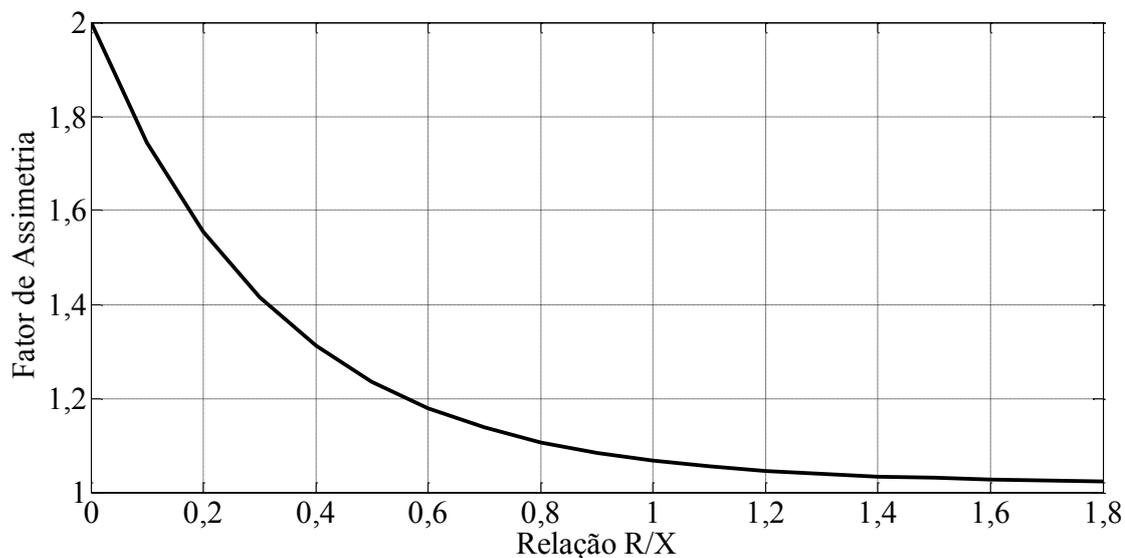
O fator de assimetria, conforme apresentado na Expressão (3), é utilizado para calcular o valor de pico da corrente de curto circuito considerando a componente assimétrica. Sabendo disso, pode-se dizer que ele está relacionado ao termo de decaimento exponencial apresentado na Expressão (1). De acordo com IEEE Std. (2006) e Rosentino (2010), o fator de assimetria pode ser determinado utilizando-se a expressão empírica apresentada em (4).

$$fi = 1,02 + 0,98 \cdot e^{-3,03 \frac{R}{X}}, \quad (4)$$

em que  $X$  é a reatância correspondente à indutância  $L$ .

A Expressão (4) pode ser representada, graficamente, conforme apresentado na Figura 5. Nela, o fator de assimetria é uma função da relação  $\frac{R}{X}$ .

Figura 5-Fator de assimetria em função da relação  $\frac{R}{X}$ .



Fonte: Adaptado de IEEE Std. (2006) e Rosentino (2010).

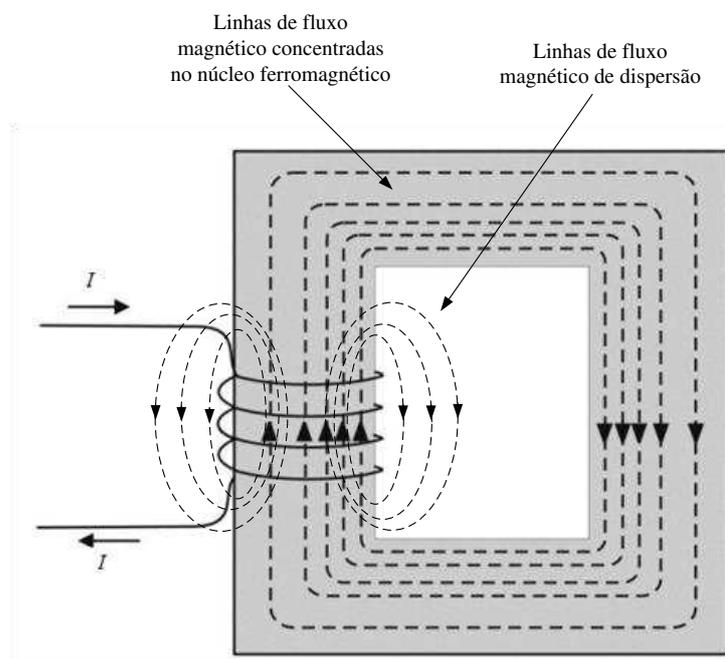
Apesar de a Expressão (4) ser empírica, o valor do fator de assimetria varia em um intervalo que vai de 1,0 até 2,0. Sabendo disto, a corrente de curto circuito, então, pode atingir até o dobro do valor da componente simétrica.

Com as informações apresentadas sobre as correntes de curto circuito e sabendo que a lei de Ampère relaciona a densidade de fluxo magnético com a corrente elétrica, pode-se dizer que, a circulação de correntes de curto circuito nos enrolamentos de transformadores gera a densidade de fluxo magnético de dispersão nos enrolamentos. As informações a respeito desta grandeza estão apresentadas na seção a seguir.

## 2.4 DENSIDADE DE FLUXO MAGNÉTICO DE DISPERSÃO

Por possuir um valor de permeabilidade magnética elevado, o núcleo ferromagnético concentra a maioria das linhas de fluxo magnético no seu interior. As linhas que não ficam concentradas no núcleo ferromagnético são as linhas de fluxo magnético de dispersão. Esta característica pode ser visualizada na Figura 6, na qual podem ser observadas as linhas de fluxo magnético que são geradas pela circulação de uma corrente elétrica,  $I$ , pelo enrolamento.

Figura 6 – Distribuição das linhas de fluxo magnético geradas pela circulação de corrente elétrica pelo enrolamento.



Fonte: Adaptado de Neves (2015).

Ao observar a Figura 6, verifica-se que as linhas de fluxo magnético de dispersão formam um campo vetorial, para o qual é dado o nome de densidade de fluxo magnético de dispersão.

A divergência do rotacional de um campo vetorial é sempre nula. Os campos vetoriais de divergência nula, como a densidade de fluxo magnético de dispersão, podem ser escritos como o rotacional de um vetor potencial, que, no caso, é o vetor potencial magnético (HAYT JR.; BUCK, 2011; SHADIKU, 2003). Na Expressão (5) é explicitado matematicamente a definição.

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \Rightarrow \vec{B} = \nabla \times \vec{A}, \quad (5)$$

em que  $B$  é a densidade de fluxo magnético de dispersão,  $A$  é o potencial magnético e  $\nabla$  é o operador nabla.

A densidade de fluxo magnético de dispersão possui duas componentes, a componente na direção axial e a componente na direção radial. Estas componentes podem ser determinadas, respectivamente, por meio das Expressões (6) e (7):

$$B_r = -\frac{\partial A_\phi}{\partial z}; \quad (6)$$

$$B_z = \frac{1}{r} \frac{\partial r A_\phi}{\partial r}, \quad (7)$$

em que  $r$ ,  $\phi$  e  $z$  são representativos das direções dos vetores unitários em coordenadas cilíndricas; e  $B_r$  e  $B_z$  são as componentes radial e axial da densidade de fluxo magnético de dispersão, respectivamente.

Além disso, o cálculo de  $B_z$  pode ser determinado, também, utilizando a Expressão (8).

$$B_z = \frac{\mu_0 \cdot N \cdot I}{H_e}, \quad (8)$$

em que  $\mu_0$  é a permeabilidade magnética do vácuo;  $N$  é o número de espiras do enrolamento;  $I$  é a corrente e  $H_e$  é a altura do enrolamento (HAYT JR.; BUCK, 2011; SHADIKU, 2003).

Desta forma, o cálculo da densidade de fluxo magnético de dispersão é dependente das características construtivas dos enrolamentos. Na próxima seção, está apresentado que a densidade de fluxo magnético de dispersão gera as forças eletromagnéticas nos enrolamentos de transformadores e que estas forças são dependentes das características construtivas dos enrolamentos.

## 2.5 FORÇAS ELETROMAGNÉTICAS

As forças eletromagnéticas nos enrolamentos de um transformador são causadas pela circulação de corrente elétrica e pela densidade de fluxo magnético de dispersão. Elas podem ser determinadas por meio das forças de Lorentz (HAYT JR. *et al.*, 2011; SHADIKU, 2003), as quais podem ser calculadas por meio da Expressão (9).

$$d\vec{F} = I \cdot d\vec{l} \times \vec{B}, \quad (9)$$

em que  $F$  representa a força eletromagnética e  $l$  é o comprimento considerado.

Adicionalmente, as forças eletromagnéticas podem ser expressas em termos de duas componentes, uma na direção radial e outra na direção axial. As componentes podem ser observadas na Expressão (10).

$$\vec{F} = \int_{\nu} J_{\phi} \hat{\phi} \times (B_r \hat{r} + B_z \hat{z}) d\nu = F_r \hat{r} + F_z \hat{z}, \quad (10)$$

em que  $F_r$  e  $F_z$  são as componentes nas direções radial e axial das forças eletromagnéticas, respectivamente;  $J$  é a densidade de corrente e  $d\nu$  representa o elemento diferencial de volume (HAYT JR. e BUCK, 2011). Com isso, as forças eletromagnéticas, nas direções radial e axial, podem ser determinadas conforme apresentado nas Expressões (11) e (12):

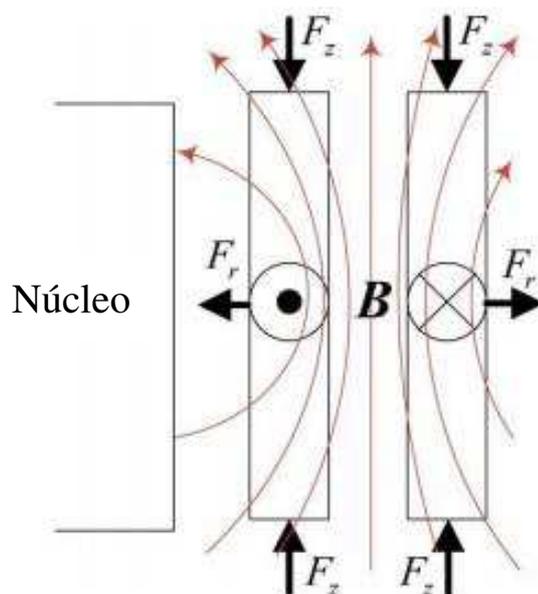
$$\vec{F}_r = \vec{J}_{\phi} \times \vec{B}_z; \quad (11)$$

$$\vec{F}_z = \vec{J}_{\phi} \times \vec{B}_r. \quad (12)$$

Ao se observar as Expressões (11) e (12), verifica-se que as forças eletromagnéticas na direção radial são geradas devido à densidade de fluxo magnético de dispersão na direção axial. Já as forças eletromagnéticas na direção axial são oriundas da densidade de fluxo magnético de dispersão na direção radial.

Um esboço do comportamento das componentes das forças eletromagnéticas nos enrolamentos de um transformador está apresentado na Figura 7.

Figura 7 - Comportamento das forças eletromagnéticas nos enrolamentos de um transformador.

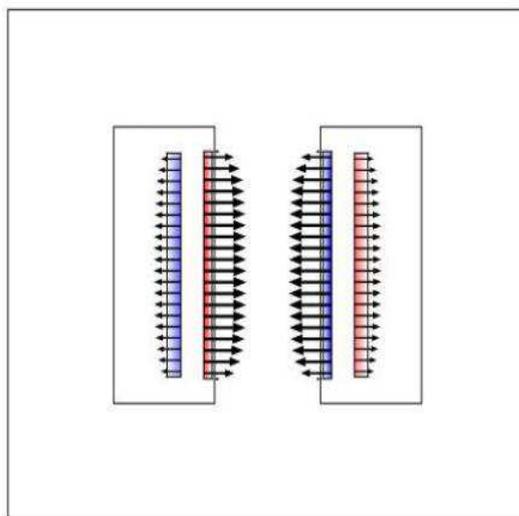


Fonte: Adaptado de Zhang e outros(2014).

Na Figura 7, verifica-se que as forças eletromagnéticas na direção radial são compressivas no enrolamento interno e trativas no enrolamento externo. Além disso, as forças na direção axial são compressivas em ambos os enrolamentos.

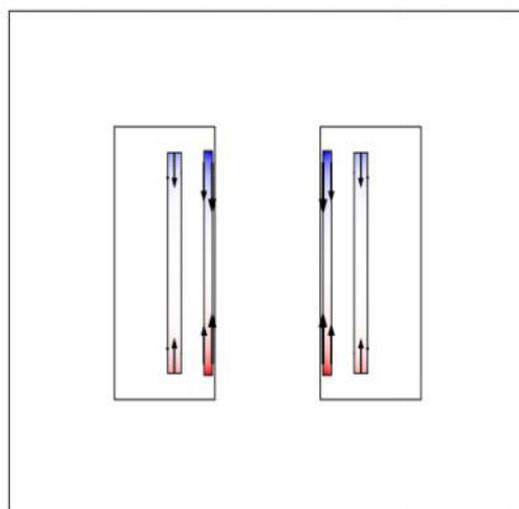
O comportamento das componentes das forças também pode ser observado por meio das Figuras 8 e 9. Nelas, constata-se que as forças eletromagnéticas distribuem-se ao longo dos enrolamentos, formando um campo vetorial.

Figura 8 - Distribuição radial das forças eletromagnéticas nos enrolamentos de um transformador.



Fonte: Autor.

Figura 9- Distribuição axial das forças eletromagnéticas nos enrolamentos de um transformador.



Fonte: Autor.

Ao se observar o campo vetorial formado pelas forças, pode-se verificar que as forças eletromagnéticas na direção radial são maiores no centro dos enrolamentos e

menores em suas extremidades, enquanto que as forças eletromagnéticas na direção axial são maiores nas extremidades dos enrolamentos e menores em seus centros.

Adicionalmente, foi mencionado, na seção anterior, que as forças eletromagnéticas são dependentes das características construtivas dos enrolamentos. De fato, Frontin (2013) descreve que as Expressões (11) e (12) podem ser reescritas conforme as Expressões (13) e (14).

$$F_r = \frac{\mu_0 \cdot (NI)^2 \cdot \pi \cdot D_m}{2 \cdot H_e}; \quad (13)$$

$$F_z = 2 \cdot \pi \cdot \frac{D_m}{2} \cdot \frac{(NI)}{H_e} \cdot \int_{z_0}^z B_r(z) \cdot dz, \quad (14)$$

nas quais  $D_m$  representa o diâmetro médio do enrolamento.

De acordo com as Expressões (13) e (14), pode-se destacar que as forças eletromagnéticas são proporcionais ao valor da corrente ao quadrado. Sabendo disto, pode-se dizer que a expressão analítica que representa o comportamento das forças eletromagnéticas, com relação ao tempo, (BERTAGNOLLI, 2007; MUKUND, 2002) pode ser explicitada pela Expressão (15).

$$F(t) = c \cdot I_{cc}^2(t), \quad (15)$$

na qual  $c$  é uma constante de proporcionalidade e  $I_{cc}(t)$  é a corrente de curto circuito, no tempo, apresentada na Expressão (1).

Ao substituir a Expressão (1) na Expressão (15), verifica-se que as forças eletromagnéticas dependem dos valores  $\alpha$  e  $\varphi$ . Segundo Bertagnolli (2007), os valores de  $\alpha$  e  $\varphi$  que fornecem a pior condição de curto circuito são  $\alpha = 0$  e  $\varphi = \frac{\pi}{2}$ . Com esta consideração, a Expressão (15) pode ser reescrita conforme a Expressão (16).

$$F(t) = c \cdot I_{sim}^2 \cdot \left[ \text{sen}\left(\frac{\pi}{2} + \omega \cdot t\right) - e^{-\frac{R}{L}t} \right]^2. \quad (16)$$

Ao expandir o produto notável na Expressão (16), obtém-se a Expressão (17).

$$F(t) = c \cdot I_{sim}^2 \cdot \left[ \frac{1}{2} + e^{-\frac{2R}{L}t} - 2 \cdot e^{-\frac{R}{L}t} \cdot \cos(\omega \cdot t) + \frac{1}{2} \cdot \cos(2 \cdot \omega \cdot t) \right]. \quad (17)$$

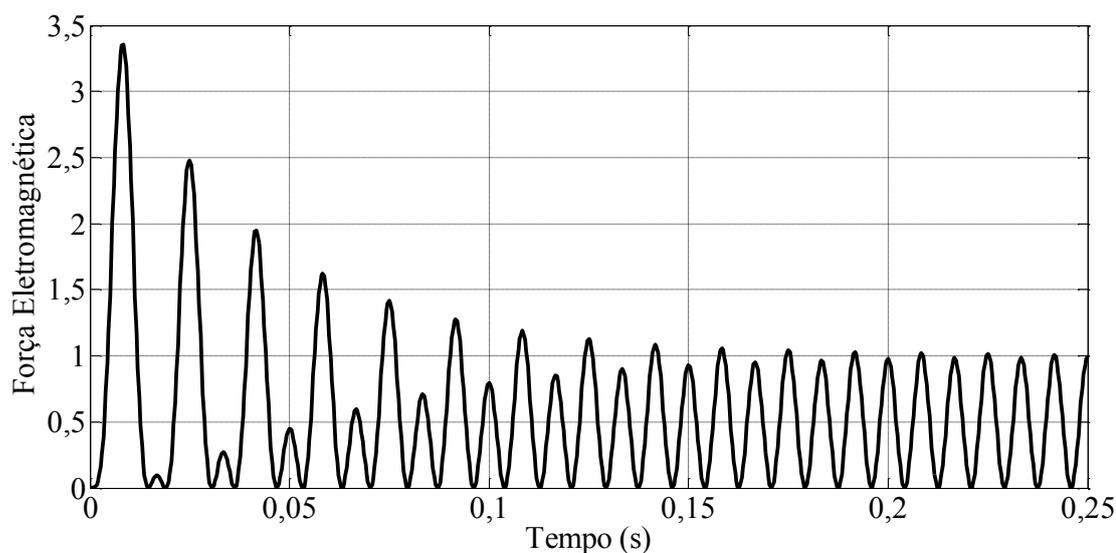
A Expressão (17) pode ser reescrita conforme a Expressão (18).

$$F(t) = F_0 \cdot \left[ \frac{1}{2} + e^{-\frac{2R}{L}t} - 2 \cdot e^{-\frac{R}{L}t} \cdot \cos(\omega \cdot t) + \frac{1}{2} \cdot \cos(2 \cdot \omega \cdot t) \right], \quad (18)$$

em que  $F_0 = c \cdot I_{sim}^2$  é o valor de pico da força eletromagnética.

Ao construir o gráfico da força eletromagnética, como função do tempo, verifica-se que a forma de onda da força é do tipo pulsante, conforme apresentado na Figura 10.

Figura 10 - Forma de onda, normalizada, típica das forças eletromagnéticas nos enrolamentos de um transformador devido à ocorrência de um curto circuito.



Fonte: Autor.

Medições das forças eletromagnéticas, no tempo, são resultados escassos na literatura. Entretanto, no livro de Bertagnolli (2007) é apresentada uma medição das forças eletromagnéticas nos enrolamentos de um transformador. Os resultados da medição estão apresentados na Figura 11, na qual, de fato, pode ser observado que a forma de onda das forças eletromagnéticas é do tipo pulsante.

Figura 11 – Força eletromagnética medida nas extremidades do enrolamento de um transformador.



Fonte: Adaptado de Bertagnolli (2007).

Com a caracterização das forças eletromagnéticas, pode-se entender, mais detalhadamente, a origem dos efeitos dos esforços eletromecânicos nos enrolamentos de transformadores. Entretanto, o entendimento das forças faz parte do estudo eletromagnético dos efeitos ocasionados pela circulação de correntes de curto circuito. Para se entender o estudo mecânico, é necessário ter conhecimento a respeito dos estresses mecânicos nos enrolamentos de transformadores, os quais são originados pelas forças eletromagnéticas. O conhecimento do comportamento dos estresses mecânicos é de fundamental importância para minimizar a ocorrência de falhas mecânicas em transformadores. A fundamentação teórica a respeito dos estresses mecânicos está apresentada na seção a seguir.

## 2.6 ESTRESSES MECÂNICOS

As falhas mecânicas, em transformadores, são caracterizadas por vibrações ou deformações nos enrolamentos oriundas da circulação das elevadas correntes transitórias. As vibrações e deformações são causadas pelos estresses mecânicos que são gerados pelas forças eletromagnéticas. De acordo com os valores dos estresses mecânicos, pode existir a possibilidade de falha dos enrolamentos. Portanto, torna-se necessário a sua investigação por meio do uso de critérios de falha mecânica.

Para se entender a aplicabilidade dos critérios de falha mecânica, é necessário conhecer os conceitos básicos que regem a física mecânica. Esses conceitos estão apresentados nas seções a seguir.

### 2.6.1 CONCEITOS BÁSICOS QUE REGEM A FÍSICA MECÂNICA

Os conceitos básicos, que regem a física mecânica, permitem o entendimento das influências dos estresses mecânicos. As influências estão relacionadas às deformações que podem ocorrer no material.

O estudo dos efeitos dos estresses mecânicos nos materiais é essencial para a aplicabilidade do material. Desta maneira, o conhecimento das propriedades mecânicas dos materiais é de fundamental importância para a realização do projeto de um equipamento, de forma a minimizar as falhas que possam acontecer.

A ocorrência de falhas mecânicas é iniciada de acordo com a distribuição de forças a que o material está submetido. Pode-se verificar que o estresse mecânico é ocasionado por uma força atuando em uma determinada área, assim como é apresentado na Expressão (19).

$$\sigma = \frac{F}{A_F}, \quad (19)$$

na qual  $A_F$  é a área em que a força está sendo aplicada.

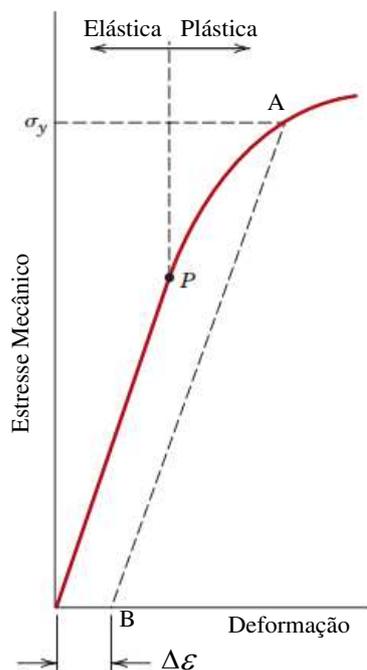
Quando um material é submetido a um estresse mecânico, podem ocorrer deformações reversíveis ou irreversíveis na estrutura do material. Os estresses mecânicos e as deformações do tipo reversíveis podem ser relacionados segundo a Lei de Hooke (CALLISTER JR., 2007), a qual está apresentada na Expressão (20).

$$\sigma = E_0 \cdot \varepsilon, \quad (20)$$

em que  $E_0$  representa o módulo de elasticidade do material e  $\varepsilon$  é a deformação.

Com os valores dos estresses mecânicos e das deformações, pode-se caracterizar um material por meio da construção do gráfico que relaciona os estresses mecânicos com as deformações. Este gráfico é conhecido como curva estresse mecânico *versus* deformação. Na Figura 12 está apresentada uma ilustração da curva do estresse mecânico com relação à deformação.

Figura 12. Ilustração da curva do estresse mecânico com relação à deformação.



Fonte: Adaptado de Callister Jr (2007).

Na curva apresentada na Figura 12 podem ser visualizadas duas regiões bem definidas, a região que está à esquerda do ponto  $P$  e a que está à direita do ponto  $P$ . Na região localizada à esquerda do ponto  $P$ , a deformação é reversível, sendo chamada de região elástica. Nela, o material retorna ao seu formato original após a retirada do estresse mecânico, caracterizando a Lei de Hooke. Na região localizada a direita do ponto  $P$ , os estresses mecânicos aplicados podem provocar o escoamento macromolecular do material. Assim, quando o estresse mecânico é retirado, o material retorna à condição de estresse mecânico nulo, só que no ponto B, permanecendo com uma condição de deformação residual,  $\Delta \epsilon$ , ou seja, o material perde a capacidade de retornar ao seu comportamento original. Neste caso, diz-se que o material apresenta um comportamento plástico.

Além disso, o estresse mecânico no ponto  $P$  representa o valor do limite de escoamento do material. Entretanto, em muitos materiais é difícil localizar o ponto  $P$  na curva estresse mecânico *versus* deformação. Desta forma, os valores que são fornecidos para o limite de escoamento são os localizados no ponto A,  $\sigma_y$ , que é o limite de escoamento para a deformação  $\Delta \epsilon$ . O valor de  $\Delta \epsilon$ , normalmente empregado para o cobre, que é o material empregado nos enrolamentos de transformadores, é 0,1% (CIGRÉ,

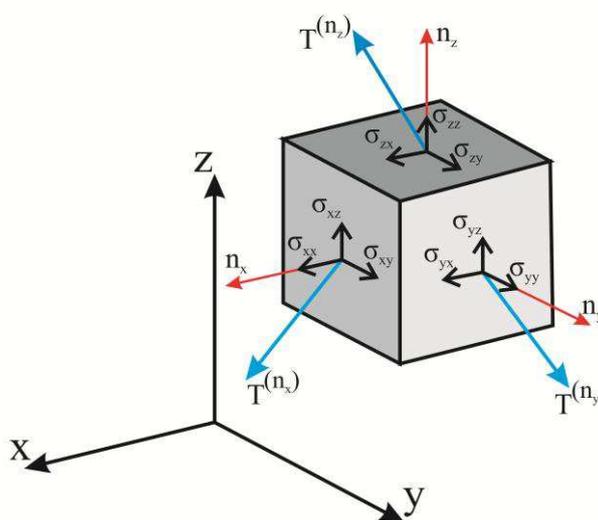
2002). Complementarmente, o valor de  $\sigma_y$  é usado para determinar o valor estresse crítico dos enrolamentos.

Para se determinar o valor dos estresses críticos dos enrolamentos, é necessário que se tenha conhecimento a respeito dos estresses principais ocorrentes no material. As informações a respeito dos estresses principais estão apresentadas na seção a seguir.

### 2.6.2 ESTRESSES PRINCIPAIS

A ocorrência dos estresses mecânicos em um corpo pode ser caracterizada conforme é apresentado na Figura 13.

Figura 13 – Caracterização da ocorrência de estresses mecânicos em um corpo.



Fonte: Adaptado de Branco (1985) e Shigley e outros (2006).

Ao observar a Figura 13, verifica-se que os estresses mecânicos ocorrem em diferentes direções no corpo, formando um tensor de estresses mecânicos. O tensor pode ser representado segundo a Expressão (21).

$$\begin{bmatrix} T^{(n_x)} \\ T^{(n_y)} \\ T^{(n_z)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \end{bmatrix}, \quad (21)$$

em que  $T$  é o vetor de estresses mecânicos oriundo do tensor de estresses mecânicos,  $\sigma_{ij}$ , multiplicado pelo vetor unitário,  $n$ , que é normal aos planos perpendiculares às direções de ocorrência dos estresses mecânicos, que são  $x$ ,  $y$  e  $z$ ; e  $i$  e  $j$  são índices referentes às direções  $x$ ,  $y$  e  $z$ .

Conforme apresentado na Expressão (21), pode-se reescrever o vetor de estresses mecânicos segundo mostrado na Expressão (22).

$$T^{(n)} = \sigma_{ij} \cdot n_i. \quad (22)$$

Adicionalmente, a Expressão (22) pode ser reescrita conforme é apresentado na Expressão (23).

$$\sigma_{ij} \cdot n_i - T^{(n)} = 0. \quad (23)$$

Considerando que  $T^{(n)} = \lambda \cdot \delta_{ij} \cdot n_i$ , em que  $\lambda$  é um fator multiplicativo, pode-se reescrever a Expressão (23) conforme apresentado na Expressão (24).

$$(\sigma_{ij} - \lambda \cdot \delta_{ij}) \cdot n_i = 0, \quad (24)$$

em que  $\delta$  é chamado de símbolo de Kronecker, o qual é apresentado na Expressão (25).

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{se } i = j \\ 0, & \text{se } i \neq j \end{cases}. \quad (25)$$

A Expressão (24) é representativa de um sistema homogêneo que pode ser solucionado por meio da obtenção de uma solução não trivial. Para achar a solução não trivial, o determinante da matriz formada por  $(\sigma_{ij} - \lambda \cdot \delta_{ij})$  deve ser igual a zero, como expressado em (26).

$$\begin{vmatrix} \sigma_{xx} - \lambda & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} - \lambda & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} - \lambda \end{vmatrix} = 0. \quad (26)$$

Ao fazer com que o determinante da matriz  $(\sigma_{ij} - \lambda \cdot \delta_{ij})$  seja zero, conforme apresentado na Expressão (26), pode-se obter a equação característica dada pela Expressão (27), a qual é denominada de equação cúbica de estresses principais.

$$\lambda^3 - \beta_1 \cdot \lambda^2 + \beta_2 \cdot \lambda - \beta_3 = 0, \quad (27)$$

em que  $\beta_1, \beta_2$  e  $\beta_3$  são os invariantes dos estresses mecânicos e são dados pelas Expressões (28), (29) e (30).

$$\beta_1 = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z; \quad (28)$$

$$\beta_2 = \sigma_x \cdot \sigma_y + \sigma_z \sigma_x + \sigma_y \sigma_z - \sigma_{xy}^2 - \sigma_{xz}^2 - \sigma_{yz}^2; \quad (29)$$

$$\beta_3 = \sigma_x \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z + 2 \cdot \sigma_{xy} \cdot \sigma_{xz} \cdot \sigma_{yz} - \sigma_z \cdot \sigma_{xy}^2 - \sigma_y \cdot \sigma_{xz}^2 - \sigma_x \cdot \sigma_{yz}^2, \quad (30)$$

Os invariantes dos estresses mecânicos são os coeficientes da equação cúbica de estresses principais. Eles são assim chamados devido a seus valores não serem dependentes do sistema de coordenadas empregado.

As raízes da equação cúbica de estresses principais são os estresses principais, que são designados por  $\lambda_1 = \sigma_1$ ,  $\lambda_2 = \sigma_2$  e  $\lambda_3 = \sigma_3$ . Para determinar as raízes da Expressão (27), métodos numéricos, para determinação de raízes reais de funções não lineares, podem ser utilizados, como, por exemplo, o método de Newton-Raphson (RUGGIERO, 2012; BARROSO, 1987).

A partir da determinação dos estresses principais é possível empregar os critérios de falha mecânica para avaliar os efeitos dos estresses mecânicos e, assim, realizar a avaliação da proximidade de falha de um determinado corpo. Um dos critérios mais empregados para avaliar proximidade de falha plástica em materiais dúcteis é o critério de Von Mises, cuja caracterização está apresentada a seguir.

### 2.6.3 CRITÉRIO DE VON MISES

Em Engenharia Mecânica, existem alguns critérios de falha mecânica que são utilizados para verificar a proximidade de falha plástica do material. Esta proximidade é a iminência de ocorrer a falha plástica quando da ocorrência de um determinado estresse mecânico. Dentre os critérios que são utilizados, dois podem ser destacados: o critério do máximo estresse mecânico e o critério de Von Mises.

O critério do máximo estresse mecânico considera que a falha plástica irá acontecer quando o estresse principal,  $\sigma_1$ , for superior ao estresse crítico do material, o

qual é o estresse mecânico que, se ultrapassado, provoca deformação plástica no material. O critério do máximo estresse mecânico pode ser representado pela Expressão (31).

$$\sigma_1 \geq \sigma_{crit} , \quad (31)$$

em que  $\sigma_{crit}$  é o estresse crítico do material.

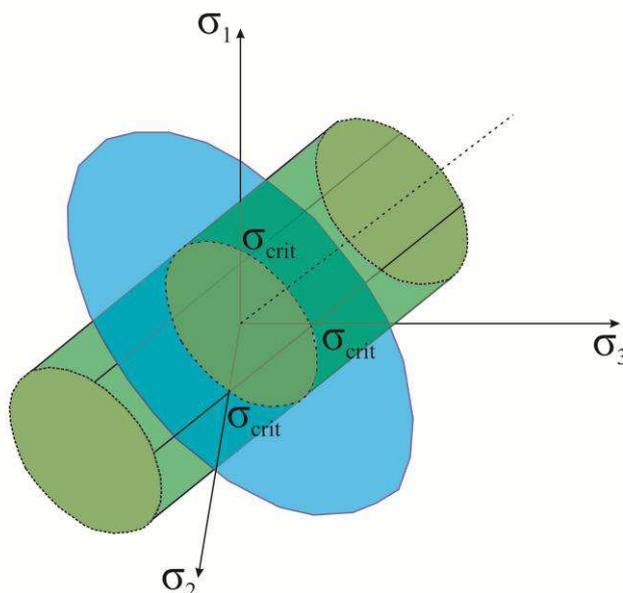
No critério de Von Mises, é considerado que a falha plástica ocorrerá se o estresse mecânico ocorrente, que é o estresse de Von Mises, for superior ao estresse crítico que o material suporta. A expressão matemática que representa o critério de Von Mises está apresentada em (32).

$$\sigma_{VM} = \left[ \frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2} \right]^{\frac{1}{2}} \geq \sigma_{crit} , \quad (32)$$

em que  $\sigma_{VM}$  é o estresse de Von Mises e  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  e  $\sigma_3$  são os estresses principais definidos na seção anterior.

A Expressão (32) resulta no cilindro elíptico apresentado na Figura 14. O interior do cilindro representa a região em que não ocorre falha plástica no material.

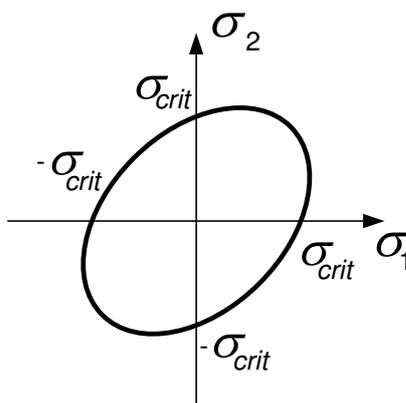
Figura 14 – Cilindro elíptico que representa a região em que não ocorre falha plástica no material.



Fonte: Adaptado de Branco (1985) e Shigley e outros (2006).

Ao realizar um corte, no cilindro elíptico, usando o plano  $\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 = 0$ , tal como apresentado na Figura 14, e considerando  $\sigma_3 = 0$ , pode-se obter como resultado a elipse apresentada na Figura 15.

Figura 15 - Elipse que representa a região de segurança para o critério de Von Mises.



Fonte: Adaptado de Branco (1985) e Shigley e outros (2006).

Na Figura 15 está apresentada a elipse no plano  $\sigma_1 - \sigma_2$ , cujo interior também representa a região em que, para um determinado estresse de Von Mises, não ocorrerá falha plástica no material. A elipse pode ser representada pela Expressão (33).

$$\sigma_{VM} = \left( \sigma_1^2 - \sigma_1 \cdot \sigma_2 + \sigma_2^2 \right)^{1/2} \geq \sigma_{crit}. \quad (33)$$

Na literatura a respeito de transformadores, verifica-se que o critério do máximo estresse mecânico é o critério que vem sendo utilizado para analisar a proximidade de plástica dos enrolamentos de transformadores. Entretanto, segundo os livros de Branco (1985) e Shigley e outros (2006), o critério do máximo estresse mecânico é mais adequado para ser empregado em materiais com características frágeis, que não é o caso do cobre, que é o material dos enrolamentos do transformador. Além disso, esse critério considera apenas um único estresse principal para analisar a proximidade de falha no material, e sabe-se, conforme apresentado nas seções anteriores, que os estresses mecânicos ocorrem simultaneamente em diferentes direções.

Nos livros de Branco (1985) e de Shigley e outros (2006) é destacado que o critério de Von Mises é um dos critérios mais utilizados para determinar proximidade de falha plástica em materiais dúcteis, como é o caso do cobre dos enrolamentos. Além disso, nos livros é enfatizado que o critério é o mais completo, devido à consideração de que os

estresses ocorrem de forma combinada em diferentes direções. De fato, para determinar o estresse de Von Mises, são utilizados, simultaneamente, os três estresses principais ocorrentes.

De acordo com as informações apresentadas, pode-se dizer que o critério de Von Mises é um critério adequado para ser empregado na determinação da proximidade de falha plástica, nos enrolamentos de transformadores. A proximidade, conforme já mencionado, é avaliada analisando o estresse de Von Mises ocorrente no enrolamento, e verificando se tal estresse se aproxima, ou não, do estresse crítico de suportabilidade do enrolamento. Para realizar a avaliação da proximidade de falha dos enrolamentos, deve-se, portanto, determinar o estresse crítico dos enrolamentos.

Segundo Vecchio e outros (2010) e Thompson e outros (1979), o estresse crítico dos enrolamentos é dependente dos parâmetros da curva estresse mecânico *versus* deformação do cobre. Além disso, os autores destacam que o estresse crítico dos enrolamentos também é dependente das características construtivas dos enrolamentos, podendo ser determinado por meio do uso da Expressão (34).

$$\sigma_{crit}^{m+1} + \frac{\sigma_0^m}{\gamma} \cdot \sigma_{crit} - \frac{\sigma_0^m}{4 \cdot \gamma} \cdot E_0 \cdot \left( \frac{h}{R_m} \right)^2 = 0, \quad (34)$$

na qual  $m = 11,6$ ,  $k = \frac{3}{7}$  e  $\gamma = 5,4$  são parâmetros da curva estresse mecânico *versus* deformação do cobre;  $E_0 = 110$  GPa é o módulo de elasticidade do cobre;  $h$  é a espessura radial do enrolamento,  $R_m$  é o raio médio do enrolamento e  $\sigma_0$  é um estresse mecânico que pode ser calculado por meio da Expressão (35).

$$\sigma_0 = \left( \frac{k}{E_0 \cdot \varepsilon_y} \right)^{\frac{1}{m}} \cdot \sigma_y^{\left( \frac{1+m}{m} \right)}, \quad (35)$$

em que  $\varepsilon_y = 0,1\%$  e  $\sigma_y = 70$  MPa.

Ao observar a Expressão (34), pode-se verificar que ela está na forma  $f(\sigma_{crit}) = 0$ , em que  $f$  é uma função. No livro de Vecchio e outros (2010), os autores propõem que, para determinar os estresses críticos dos enrolamentos, pode-se utilizar um método numérico para determinação de raízes reais de funções não lineares. O método numérico sugerido é o método de Newton-Raphson (RUGGIERO, 2012).

De acordo com as informações apresentadas nesta seção, pode-se dizer que o critério de Von Mises pode ser empregado para determinar a proximidade de falha dos enrolamentos de transformadores. Adicionalmente, também pode ser destacado que, segundo os livros de Shigley (2006) e Branco (1985), o critério de Von Mises também pode ser empregado durante a fase de projeto de equipamentos, com o intuito de aumentar a margem de segurança contra falhas mecânicas e, conseqüentemente, aumentar o tempo de vida útil do equipamento.

Além de poder ser empregado durante a fase de projeto de equipamentos, o critério de Von Mises pode ser utilizado como dado de entrada para aplicação do critério de fadiga. De fato, os enrolamentos dos transformadores estão submetidos, durante sua vida útil, a estresses mecânicos dinâmicos, o que caracteriza a utilização do critério de fadiga.

Para se entender como aplicar o critério de fadiga, a fundamentação teórica a respeito do critério está apresentada na seção a seguir.

#### 2.6.4 CRITÉRIO DE FADIGA

A fadiga é um fenômeno em que ocorre a degradação progressiva do material, quando o material é submetido a estresses mecânicos com características dinâmicas (BRANCO, 1985).

A falha do material por fadiga é caracterizada pela ruptura do material quando da ocorrência de valores de estresses mecânicos inferiores aos seus limites de suportabilidade mecânica. A falha ocorre, normalmente, após um longo período de aplicação do estresse dinâmico (SHIGLEY *et al.*, 2006).

O método utilizado para analisar falhas mecânicas por meio do critério de fadiga é baseado nas curvas S-N, ou diagramas de Whöler (BRANCO, 1985; SHIGLEY *et al.*, 2006), que são curvas que relacionam o número de ciclos do estresse mecânico, até a falha por fadiga, com a amplitude do estresse mecânico. As curvas S-N possuem um formato típico de uma exponencial decrescente, podendo ser representadas por meio da Expressão (36).

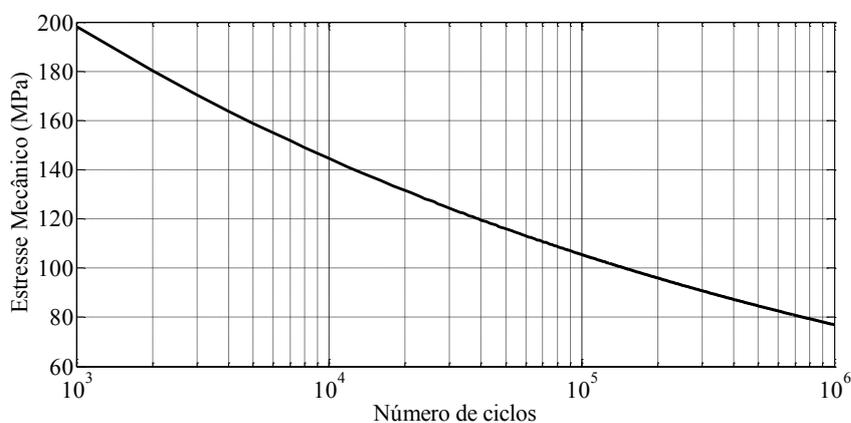
$$\sigma = a_f \cdot n_c^{b_f}, \quad (36)$$

em que  $n_c$  é o número de ciclos;  $a_f$  e  $b_f$  são os parâmetros da curva S-N.

O critério de fadiga é caracterizado pela comparação de curvas S-N de fadiga para o componente novo e em uso. A área abaixo da curva S-N de fadiga de um componente novo é maior do que a área da curva S-N de fadiga de um componente em uso, de forma que, à medida que o tempo de vida útil do componente diminui, a área abaixo de sua curva S-N de fadiga também diminui.

Em transformadores, um dos componentes que pode ser considerado para estudos de fadiga é o enrolamento. Quando novo, o enrolamento possui uma curva de fadiga denominada de curva S-N básica de fadiga (BRANCO, 1985), a qual, para o cobre, pode ser visualizada na Figura 16.

Figura 16 - Curva S-N básica de fadiga para o cobre.



Fonte: Adaptado de Branco (1985).

Na Figura 16 é representada a curva S-N básica de fadiga que compreende o número de ciclos numa faixa que varia de  $10^3$  a  $10^6$  ciclos. A curva S-N nessa faixa de valores de número de ciclos é chamada de zona de fadiga de alto ciclo, em que o número de ciclos de projeto é superior a  $10^3$  ciclos e os estresses mecânicos ocorrem na região elástica do material.

Segundo os livros de Branco (1985) e Shigley e outros (2006), a curva S-N de fadiga passa por dois pontos básicos, o primeiro corresponde ao estresse mecânico que é referente a 90% do limite de resistência do material, o qual ocorre em  $10^3$  ciclos; e o segundo é o estresse mecânico que ocorre em  $10^6$  ciclos, que é chamado de limite de fadiga. Com esses dois pontos, pode-se estimar a curva S-N básica de fadiga para qualquer material e realizar estudos de redução de vida útil do componente (GUIMARÃES, 2013).

Com isso, para equipamentos que são projetados para tempo de vida útil superior a  $10^3$  ciclos e os estresses mecânicos ocorrentes são considerados elásticos, como, por

exemplo, os transformadores, a zona de fadiga de alto ciclo é a que deve ser utilizada nos estudos de fadiga.

As curvas S-N de fadiga podem ser modificadas de modo a buscar aumentar a margem de segurança contra falhas mecânicas e, conseqüentemente, o tempo de vida útil do equipamento. O aumento do tempo de vida útil é alcançado reduzindo o valor do limite de fadiga.

O limite de fadiga pode ser reduzido (BRANCO, 1985; SHIGLEY *et al.*, 2006; GUIMARÃES, 2013) de acordo com as características do material (composição), fabricação (método, tratamento térmico), ambiente (corrosão, temperatura) e projeto (tamanho, forma). O limite de fadiga reduzido recebe o nome de limite de fadiga admissível e pode ser calculado por meio da Expressão (37).

$$\sigma_{fad} = (k_s \cdot k_t \cdot k_f \cdot k_T) \times \frac{1}{\eta} \cdot \sigma_{f0}, \quad (37)$$

em que  $\sigma_{fad}$  é o limite de fadiga admissível;  $k_s$ ,  $k_t$ ,  $k_f$  e  $k_T$  são os fatores de redução do limite de fadiga,  $\sigma_{f0}$  é o limite de fadiga da curva S-N básica e  $\eta$  é o coeficiente de segurança.

Adicionalmente, a curva S-N com o limite de fadiga reduzido é chamada de curva S-N admissível de fadiga e todos os fatores que modificam o valor do limite de fadiga podem ser chamados de fatores modificadores do limite de fadiga.

Os valores dos fatores modificadores do limite de fadiga variam na faixa de valores apresentada na Tabela 1.

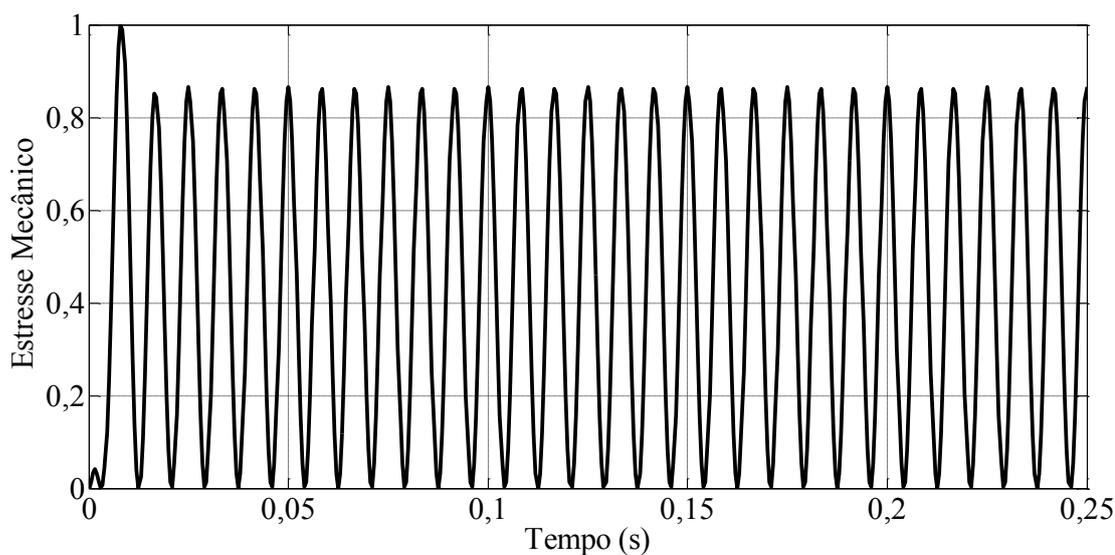
Tabela 1 - Significado e faixa de valores dos fatores modificadores do limite de fadiga.

Fator modificador	Significado	Variação
$k_s$	Coefficiente de acabamento superficial	1 (para metais não ferrosos)
$k_t$	Coefficiente de tamanho	0,75 – 1
$k_f$	Coefficiente de fiabilidade	0,62 – 1
$k_T$	Coefficiente de temperatura	1 (temperaturas inferiores a 70°)
$\eta$	Coefficiente de segurança	$\frac{4}{3}$ - 3

Fonte: Branco(1985) e Shigley e outros (2006).

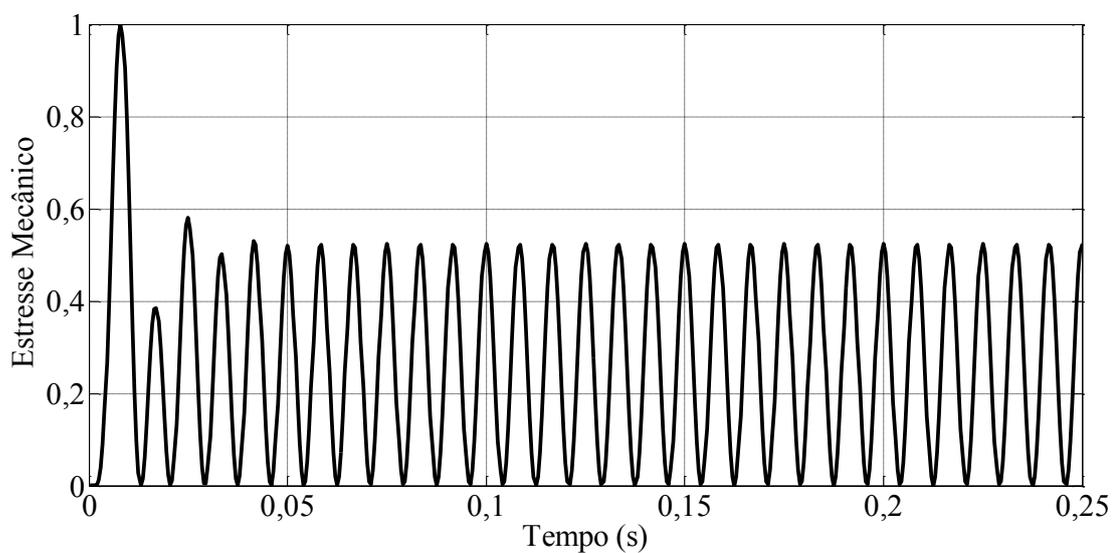
Além das curvas S-N de fadiga, os fenômenos associados ao critério de fadiga também estão correlacionados com a forma de onda do estresse mecânico. Em transformadores, alguns dos tipos de forma de onda dos estresses mecânicos que podem ser verificados nos enrolamentos estão apresentados nas Figuras 17, 18 e 19.

Figura 17 -Forma de onda, normalizada, de um estresse mecânico devido a um curto circuito com fator de assimetria 1,1.



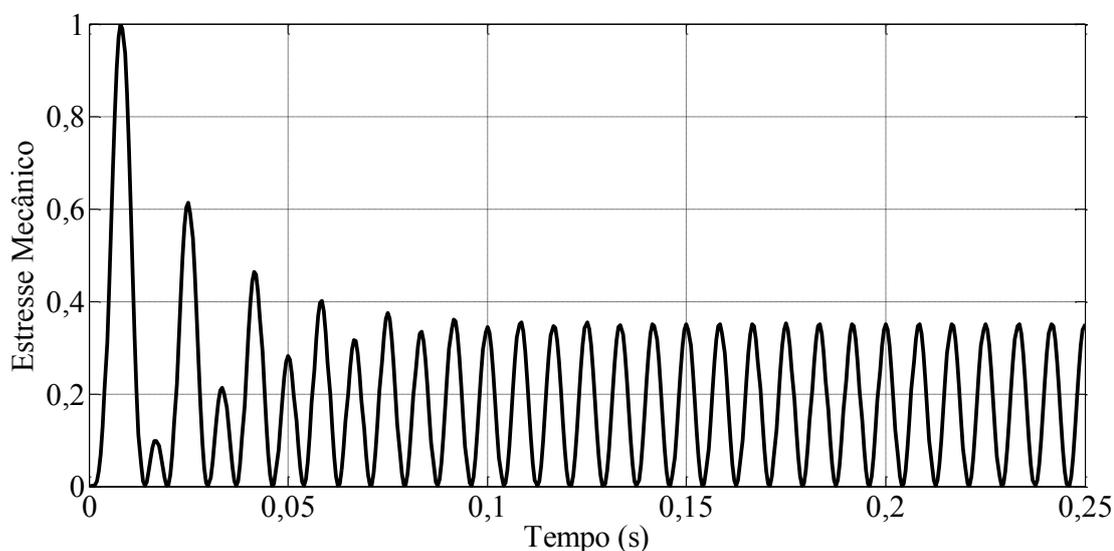
Fonte: Autor.

Figura 18 -Forma de onda, normalizada, de um estresse mecânico devido a um curto circuito com fator de assimetria 1,4.



Fonte: Autor.

Figura 19 -Forma de onda, normalizada, de um estresse mecânico devido a um curto circuito com fator de assimetria 1,7.



Fonte: Autor.

As formas de onda apresentadas nas Figuras 17, 18 e 19 são produzidas devido à circulação de correntes de curto circuito nos enrolamentos dos transformadores. Ao observar as figuras, pode-se dizer o aumento do fator de assimetria faz com que o número de ciclos do regime transitório aumente e o número de ciclos do regime permanente diminua. Além disso, as propriedades que são utilizadas para o uso do critério de fadiga são:

- Forma de onda dos estresses mecânicos, que no caso das Figuras 17, 18 e 19 são do tipo pulsante;
- Tempo de duração da amplitude do estresse mecânico;
- Amplitude do estresse mecânico.

Ademais, quando um curto circuito acontece, é gerado um estresse mecânico nos enrolamentos do transformador que faz com que a área abaixo da curva S-N admissível de fadiga reduza. A área abaixo da curva S-N será novamente reduzida quando um novo curto circuito ocorrer. Com isso, o dano causado pela ocorrência de curtos circuitos é cumulativo nos enrolamentos, uma vez que a área abaixo da curva S-N de fadiga reduz, cumulativamente, para cada curto circuito que incide sobre os enrolamentos do transformador.

Nos livros de Branco (1985) e de Shigley e outros (2006) é apresentado que o dano cumulativo ocorrente nas curvas S-N de fadiga pode ser quantificado. Nos livros é descrito que para quantificar o dano cumulativo, pode-se utilizar o critério desenvolvido por Palmgren-Miner, também conhecido como regra de Miner, o qual está apresentado na Expressão (38).

$$\sum \frac{n_{ck}}{N_{ck}} = D, \quad (38)$$

na qual  $n_{ck}$  é o número de ciclos do estresse  $\sigma_k$ ;  $N_{ck}$  é o número de ciclos para ocorrência da falha mecânica no estresse  $\sigma_k$ ;  $D$  é o dano acumulado, em que, quando  $D = 1$ , acontece a falha no componente.

O cálculo do dano cumulativo, segundo a regra de Miner, evidencia que um conjunto de estresses mecânicos ocorrentes em um componente contribui para redução da área abaixo da curva S-N de fadiga e, conseqüentemente, para redução da vida útil do componente. Tal conjunto é caracterizado por possuir amplitudes de estresse mecânico,  $\sigma_k$ , que duram  $n_{ck}$  ciclos.

A redução percentual da curva S-N admissível de fadiga, para um dado dano, pode ser determinada por meio da expressão (39) (BRANCO, 1985; SHIGLEY *et al.*, 2006; GUIMARÃES, 2013).

$$R\% = \left( 1 - \frac{n_{fr}}{n_{fad}} \right) \cdot 100, \quad (39)$$

em que  $R\%$  é a redução percentual da curva S-N admissível de fadiga;  $n_{fr}$  é número de ciclos correspondente ao limite de fadiga reduzido e  $n_{fad}$  é o número de ciclos correspondente ao limite de fadiga admissível.

Pelo exposto, a avaliação dos efeitos dos esforços eletromecânicos ocasionados pela circulação de correntes de curto circuito nos enrolamentos pode ser realizada por meio da utilização de critérios de falha mecânica. Essa avaliação, aliada ao uso de simulações computacionais, permite que uma previsão de comportamento do equipamento possa ser realizada durante a fase de projeto, com o intuito de aumentar a margem de segurança contra falhas mecânicas e o tempo de vida útil do transformador.

Atualmente, com o aumento da capacidade de processamento das máquinas computacionais, as simulações computacionais, baseadas em métodos numéricos, tem se tornado uma alternativa economicamente viável para estudos do comportamento de equipamentos quando submetidos a diversas condições de funcionamento.

As simulações computacionais podem ser utilizadas para prever o comportamento dos enrolamentos de transformadores, quando da circulação de correntes de curto circuito, além de auxiliar a tomadas de decisão durante o projeto do equipamento. Um dos métodos mais utilizados em simulações computacionais para solução de problemas envolvendo equações diferenciais é o MEF.

## 2.7 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Diversos problemas em engenharia podem ser descritos em termos de equações diferenciais parciais, como a Equação de Poisson, Equação de Laplace, Equação de Helmholtz, Navier-Stokes, etc. Todavia, com exceção de alguns casos particulares, não é possível obter uma solução analítica exata para as equações diferenciais parciais (PEREIRA, 2005).

Quando as complexidades das expressões analíticas tornam as soluções analíticas impraticáveis, recorre-se aos métodos não analíticos, os quais são: métodos gráficos, métodos experimentais e métodos numéricos. Particularmente, os métodos numéricos têm sido cada vez mais utilizados com o aumento da capacidade de processamento das máquinas computacionais e o desenvolvimento de *softwares* dedicados.

Embora os métodos numéricos forneçam soluções aproximadas, as soluções numéricas podem ser aplicadas complementando as soluções do tipo analíticas (HAYT JR., 2011).

O Método dos Elementos Finitos (MEF) é um dos métodos numéricos mais empregados para solucionar problemas em engenharia, podendo ser utilizado nos componentes que possuem geometrias nos domínios 1D, 2D e 3D (SHADIKU, 2003; HAYT JR., 2011).

Devido às características de flexibilidade e estabilidade numérica do MEF, o método pode ser implementado na forma de um sistema computacional de forma consistente e sistemática, o que explica a sua grande popularidade nos dias atuais. Além de permitir a análise de problemas práticos, o MEF diminui os custos de projeto, pois

permite a realização de uma simulação computacional de vários fenômenos físicos e seus efeitos, antes da construção de um protótipo do equipamento. As principais áreas de aplicação do MEF são: projeto e análise de estruturas, análise de escoamento de fluidos, distribuição de temperaturas e eletromagnetismo (PEREIRA, 2004).

Segundo o livro de Shadiku (2003), a análise de problemas por meio do MEF envolve basicamente quatro passos. Adicionalmente, de acordo com Ferreira (2007), o uso prático do MEF impõe a adição de um quinto passo, o qual será descrito a seguir juntamente com os demais.

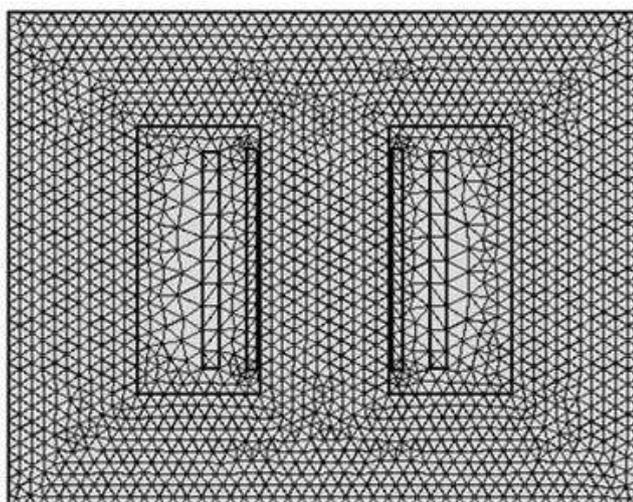
### 2.7.1 DISCRETIZAÇÃO

A discretização de um problema consiste na representação abstrata da região, equipamento ou corpo que se deseja analisar, e na subdivisão dessa representação em um número finito de elementos. A geometria dos elementos tem a forma, em geral, de polígonos simples, como triângulos, quadriláteros, pentágonos, etc., e são pertencentes ao que se chama de malha.

O problema de um corpo completo, “o todo” na linguagem do MEF, passa a ser tratado como a solução de vários problemas menores e correlacionados entre si. Os pontos comuns entre os elementos são os nós, onde os resultados das análises devem ser computados.

Na Figura 20 é ilustrada a discretização de uma representação gráfica de um transformador no domínio 2D.

Figura 20 -Ilustração da discretização de uma representação gráfica de um transformador no domínio 2D.



Fonte: Autor

### 2.7.2 EQUACIONAMENTO DOS ELEMENTOS

Neste passo, um modelo equacional é definido, com o intuito de reger fisicamente os elementos. A escolha do modelo equacional varia amplamente de acordo com o problema físico analisado. São exemplos: a Lei de Hooke, Lei de Fourier, Equação de Poisson, dentre outras equações que regem fenômenos físicos.

Em seguida, são montadas as matrizes de coeficientes para cada um dos elementos. A partir das matrizes, originam-se equações matriciais baseadas no modelo físico adotado. Cada elemento possui uma matriz de elementos e uma equação matricial, relacionando-o com a grandeza física sob a óptica da qual está sendo analisado. A equação matricial descreve, portanto, as possíveis variações de grandezas dos nós pertencentes a um dado elemento. Essas possíveis variações são os graus de liberdade de cada nó.

### 2.7.3 JUNÇÃO DOS ELEMENTOS

Todas as matrizes de coeficientes são utilizadas para a montagem da matriz de coeficientes global. A matriz global define o acoplamento entre quaisquer dois nós da malha, e tem por características ser simétrica e esparsa. Assim, a equação matricial resultante da combinação das equações matriciais dos elementos representa um sistema de equações. O sistema de equações terá tantas equações quantos forem os graus de liberdade presentes nos nós do sistema analisado. Todavia, o sistema de equações supracitado ainda não é solucionável, pois tem mais incógnitas do que equações.

Para diminuir o número de incógnitas, aplicam-se as condições de contorno. Alguns dos nós têm grandezas físicas conhecidas e constantes, e os valores numéricos correspondentes a essas grandezas devem ser alocados na matriz de coeficientes global.

### 2.7.4 SOLUÇÃO DO SISTEMA

O sistema de equações representado na equação matricial global é então solucionado por meio de métodos tradicionais, diretos ou indiretos. A solução do sistema fornecerá os valores numéricos correspondentes a cada grau de liberdade de cada nó do sistema.

Muitos problemas de eletromagnetismo e mecânica apresentam nós com um só grau de liberdade. Este grau de liberdade pode representar, por exemplo, o potencial

magnético. A partir do potencial magnético, e utilizando-se o modelo equacional adotado, podem-se determinar outras grandezas físicas. Com base na geometria e na malha do MEF, monta-se um sistema de equações, cuja solução permite determinar as grandezas de interesse do fenômeno estudado.

No caso particular deste estudo, para os fenômenos eletromagnéticos e mecânicos, a solução é encontrada por meio dos vetores potencial magnético e estresse mecânico em cada nó da malha, a partir dos quais é possível determinar os fluxos magnéticos, as forças eletromagnéticas e os estresses mecânicos no interior dos elementos finitos.

### 2.7.5 VISUALIZAÇÃO

Os ambientes computacionais de simulação baseados no MEF devem dispor de ferramentas visuais e numéricas de representação, permitindo identificar todas as implicações da análise. Estas implicações apontam as regiões críticas onde podem existir fragilidades mecânicas, concentrações de campo e outros aspectos importantes à avaliação do caso analisado.

Apesar de apresentar soluções aproximadas, o MEF pode ser melhorado com o refinamento da malha. Existe um nível ótimo de refinamento que proporciona uma solução mais próxima da realizada 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 dos elementos não traz uma melhora na precisão.

Existem diversos *softwares* que são baseados no MEF, e o COMSOL Multiphysics® é um deles. O COMSOL Multiphysics® é um ambiente computacional construído com a meta de modelar, projetar e analisar problemas que podem ser solucionados por meio de equações diferenciais parciais.

A vantagem associada ao uso do COMSOL Multiphysics® reside em poder construir, ou importar, o modelo do objeto a ser analisado. O seu uso permite atribuir grandezas e constantes físicas sem a necessidade da construção das equações do MEF ou escrever rotinas de solução. Além disso, o COMSOL Multiphysics® faz uso de algoritmos que permitem a definição adequada da malha, e dispõe de vários métodos numéricos para resolver o sistema de equações, trabalhando, também, associado ao MATLAB®. Com isso, o uso de um ambiente computacional, como o COMSOL Multiphysics®, permite algumas vantagens, já destacadas nos capítulos anteriores, tais como:

- Representar graficamente o transformador em 3D;
- Simular, em conjunto, os fenômenos físicos de origem eletromagnética e mecânica, de modo a determinar as forças eletromagnéticas e os estresses mecânicos ocorrentes nos enrolamentos do transformador;
- Evitar a retirada do transformador, durante sua operação, para introdução de sensores;
- Reduzir custos da realização de ensaios de tipo;
- Auxiliar uma tomada de decisão, para fins de manutenção, de acordo os valores das forças eletromagnéticas e os estresses mecânicos para os quais o equipamento está submetido.

Adicionalmente, o COMSOL Multiphysics® contém um completo conjunto de ferramentas para resolver problemas tanto no domínio 1D, 2D quanto 3D e, como qualquer outro programa que utiliza o MEF, é baseado nos seguintes módulos:

- Pré-processamento: modelagem, definição das propriedades físicas e geração das malhas;
- Processamento: resolução de problemas;
- Pós-processamento: apresentação dos resultados.

Assim, o uso de um *software* pode agilizar a análise de problemas científicos e de engenharia sem, contudo, exigir profundo conhecimento matemático, físico e de materiais acerca do problema. Entretanto, o entendimento do fenômeno físico, o conhecimento das características físicas dos materiais envolvidos, bem como a compreensão do algoritmo utilizado no MEF, são recomendados. Caso contrário, o risco de resultados equivocados serem assumidos como verdadeiros torna-se grande.

Com a apresentação das informações a respeito das falhas em transformadores, corrente de curto circuito, metodologias para avaliação de falhas nos enrolamentos, densidade de fluxo magnético de dispersão, forças eletromagnéticas, estresses mecânicos, critérios de falha mecânica 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 serão comentados os principais estudos realizados referentes à avaliação dos efeitos dos esforços eletromecânicos nos enrolamentos de transformadores.

Diante da importância do tema, estudos das forças eletromagnéticas e dos estresses mecânicos, assim como seus efeitos nos enrolamentos de transformadores, têm sido abordados em diversos artigos.

Billig (1946) estudou os efeitos dos estresses mecânicos nos enrolamentos de transformadores. Em seu trabalho o autor destaca a importância de se conhecer os fenômenos físicos causados pela circulação de correntes de curto circuito nos enrolamentos de transformadores, uma vez que as correntes podem provocar esforços eletromecânicos que reduzem a vida útil do equipamento, e até mesmo sua destruição. Além disso, os efeitos dos esforços eletromecânicos nos enrolamentos dos transformadores são discutidos, enfatizando que as forças eletromagnéticas axiais tendem a comprimir os enrolamentos, enquanto que as forças eletromagnéticas radiais são compressivas no enrolamento interno e trativas no enrolamento externo. Adicionalmente, e considerando que os esforços eletromecânicos a que o transformador está submetido podem causar danos cumulativos aos enrolamentos, impactando diretamente na diminuição de sua vida útil. O autor enfatizou que os cálculos dos esforços eletromecânicos a que os transformadores podem ficar submetidos durante sua vida útil devem ser considerados durante a fase de projeto.

No livro de Waters (1966) são apresentadas expressões para cálculo dos esforços eletromecânicos decorrentes de elevadas correntes em transformadores. Para o cálculo dos esforços eletromecânicos são considerados os diversos arranjos de tapes, além dos esforços adicionais causados devido à introdução de derivações e assimetrias nos enrolamentos. O autor forneceu a modelagem analítica para a determinação das forças eletromagnéticas nos enrolamentos de transformadores considerando o primeiro pico da componente assimétrica da corrente de curto circuito, além de destacar que o tempo de permanência das correntes de curto circuito não é um fator agravante na determinação dos efeitos das forças eletromagnéticas e dos estresses mecânicos.

Nos trabalhos de Ayers e Usry (1974) e de Ayers e outros (1975) foram desenvolvidos métodos de instrumentação e procedimentos para testes em transformadores para obtenção das forças eletromagnéticas axiais nos enrolamentos de

um transformador. O transformador foi construído para estudo do comportamento dinâmico dos esforços eletromecânicos. Nos trabalhos é destacado que células de carga baseadas em aços de liga de níquel foram desenvolvidas para medição dos esforços eletromecânicos. Além disso, um programa computacional, baseado na determinação da densidade de fluxo magnético de dispersão na direção radial, foi desenvolvido para permitir a comparação entre os resultados computacionais e os medidos. A principal contribuição do trabalho é apresentar a instrumentação que foi utilizada para medição dos esforços eletromecânicos. Entretanto, a aplicação da metodologia não é trivial em transformadores em operação, uma vez que a metodologia foi desenvolvida para ser implementada durante a fase de projeto do equipamento.

Em Patel (1980) é apresentado que a instabilidade axial dos enrolamentos pode ser ocasionada pela circulação de correntes de curtos circuitos nos enrolamentos de transformadores. No trabalho é apresentada a formulação analítica necessária para determinação dos estresses críticos dos enrolamentos, assim como sua frequência de ressonância. O autor destaca que o conhecimento das características geométricas dos enrolamentos do transformador é de fundamental importância para determinação dos valores do estresse crítico e da frequência de ressonância dos enrolamentos. Além disso, em Patel (1980) está descrito que o projeto dos enrolamentos deve ser baseado no valor do estresse crítico dos enrolamentos e que a frequência de ressonância dos enrolamentos é muito mais elevada comparada a frequência de operação do transformador, enfatizando que a probabilidade de falha devido à ressonância dos enrolamentos é mínima.

Yun-Qiu e outros (1990) determinaram as forças eletromagnéticas nos enrolamentos de um transformador usando cálculo numérico. Para tanto, foram obtidas as expressões das forças eletromagnéticas baseando-se nas expressões de cálculo da corrente de curto circuito. Além disso, os autores destacaram que as forças eletromagnéticas ocorrentes devido à circulação de correntes de curto circuito possuem três componentes, a componente contínua, a componente na frequência fundamental e a componente de segunda harmônica. Os valores das forças eletromagnéticas, via formulação analítica, foram comparados com os obtidos por meio da utilização do MEF. Os autores verificaram que os valores das forças eletromagnéticas, obtidos por meio da modelagem analítica, são próximos dos valores das forças eletromagnéticas referentes à formulação numérica. Entretanto, é destacado que é preferível utilizar o MEF para determinação das forças eletromagnéticas na direção axial, uma vez que o cálculo

analítico da densidade de fluxo de dispersão na direção radial, que é a grandeza que origina as forças eletromagnéticas na direção axial, não é trivial.

Arturi (1995) realizou simulações computacionais, baseadas no MEF, utilizando o *software* Maxwell 3D, para determinar as forças eletromagnéticas na direção axial nos enrolamentos de um transformador. No trabalho, o transformador empregado possui enrolamentos concêntricos e na simulação foi considerada apenas uma fase do transformador trifásico. A simplificação permitiu um maior refinamento da malha para análise das forças eletromagnéticas nos enrolamentos. O autor alegou que o refinamento considerando as três fases era impraticável devido à limitação de memória computacional. Nos resultados foi verificado que as forças eletromagnéticas na direção radial são maiores no centro dos enrolamentos e as forças eletromagnéticas na direção axial são maiores nas extremidades dos enrolamentos.

Najdenkoski e Manov (1998) utilizaram o MEF para determinar as forças eletromagnéticas atuantes em um transformador para a condição de curto circuito trifásico. No trabalho foi considerado o primeiro pico da corrente de curto circuito. Os autores verificaram que as forças radiais no enrolamento interno são compressivas e no enrolamento externo são trativas, enquanto que as forças axiais são compressivas. Adicionalmente, foi destacado que o desalinhamento dos enrolamentos influencia nos valores das forças eletromagnéticas. Apesar de o trabalho ter seu mérito, os autores apresentaram resultados já consolidados na literatura.

Em Salon e outros (2000) foi avaliada a influência do desalinhamento dos enrolamentos e uso de tapes nos valores das forças eletromagnéticas nos enrolamentos de um transformador de distribuição. Os autores verificaram que o desalinhamento dos enrolamentos e uso de tapes pode aumentar significativamente os valores das forças eletromagnéticas nos enrolamentos. Além disso, Salon e outros (2000) realizaram simulações computacionais em 2D e 3D, constatando que os valores das forças eletromagnéticas em 2D são próximos dos valores das forças eletromagnéticas em 3D, para as regiões do transformador que podem ser representadas graficamente em 2D. As regiões em 2D correspondem a um corte transversal da representação gráfica do transformador em 3D. Os autores destacaram que a representação gráfica em 3D é de fundamental importância para avaliar as forças eletromagnéticas nos enrolamentos nas regiões fora da janela do transformador, o que não é possível com a representação gráfica em 2D.

No trabalho de Steurer e Fröhlich (2002) avaliaram as forças eletromagnéticas geradas por correntes de curto circuito e corrente de *inrush* nos enrolamentos de um transformador. Os autores destacam que apesar de as correntes de energização serem menores que as correntes de curto circuito, as forças eletromagnéticas geradas pelas correntes de energização podem possuir a mesma ordem de grandeza que as forças eletromagnéticas geradas pelas correntes de curto circuito. Com isso, Steurer e Fröhlich (2002) ressaltaram que, embora os picos da corrente de energização sejam cerca de 70% dos picos das correntes de curto circuito, as forças eletromagnéticas geradas podem provocar danos semelhantes, visto que o tempo de duração das correntes de energização é maior que a duração das correntes de curto circuito.

No livro de Kulkarni e Khaparde (2004) é apresentado que para modelar a corrente de *inrush*, devem ser utilizados *softwares* computacionais para simulação de transitórios eletromagnéticos. Os *softwares* são baseados em modelos de circuito elétrico equivalente de transformadores. No entanto, os autores destacam que a determinação da corrente de *inrush* não é uma atividade trivial, ressaltando que, em geral, o conhecimento do valor máximo (primeiro pico) da corrente de *inrush* é suficiente para realizar estudos a respeito da corrente de energização.

Além disso, os autores descreveram um procedimento analítico que permite a estimação do valor de pico da corrente de *inrush*. No procedimento, é considerado que o transformador está conectado a um barramento infinito e que a energização ocorre pelo enrolamento de alta tensão. No livro, é destacado, ainda, que o pior instante para energização do transformador ocorre quando a onda de tensão está passando pelo zero.

No trabalho de Strac e outros (2008) foi apresentada a representação gráfica de um transformador em 2D e 3D para a determinação das forças eletromagnéticas. A representação gráfica em 3D foi realizada com os enrolamentos nas formas cilíndrica e helicoidal. Como resultados, os autores mostraram que as forças eletromagnéticas determinadas na representação gráfica em 2D são bastante próximas da representação gráfica em 3D, tal como apresentado no trabalho de Salon e outros (2008). Além disso, eles destacaram vantagens das representações gráficas em 2D e 3D, como: o cálculo das forças eletromagnéticas pela representação gráfica em 2D é mais rápido e demanda menos esforços computacional. A representação gráfica em 3D é vantajosa no sentido de permitir desenvolver uma representação gráfica com um grau maior de detalhamento, ou seja, que se aproxime mais das características reais do equipamento. Adicionalmente, os autores verificaram que os resultados das forças eletromagnéticas, considerando os

enrolamentos na forma cilíndrica e helicoidal, foram próximos. Eles destacaram que, na falta de uma máquina com uma capacidade de processamento elevada, a modelagem cilíndrica pode ser empregada no lugar da helicoidal.

Feyzi e Sabahi (2008) utilizaram o MEF para calcular as forças eletromagnéticas oriundas de curtos circuitos para condições de deslocamento entre os enrolamentos e comutadores de carga. Os autores verificaram que o desbalanceamento entre os enrolamentos pode causar esforços axiais destrutivos nos enrolamentos. Para a determinação das forças eletromagnéticas foi utilizado o *software* VECTORFIELD<sup>®</sup>. Os autores ainda destacaram que é de fundamental importância a determinação das forças eletromagnéticas durante a fase de projeto de transformadores, para que sejam minimizadas a ocorrência de falhas mecânicas nos enrolamentos. Além disso, eles informaram que durante a fase de projeto do equipamento o uso de simulações computacionais é preferível para a determinação das forças eletromagnéticas, pois permite realizar os cálculos sob condições não ideais de modelagem do equipamento. Por outro lado, para se realizar a modelagem analítica do equipamento, a condição do diâmetro dos enrolamentos ser muito menor do que a altura dos enrolamentos, permite a simplificação da solução.

No trabalho de Azevedo (2007) foi realizado um estudo das forças eletromagnéticas nos enrolamentos de transformadores resultantes da circulação de correntes de curto circuito e de energização. A autora empregou uma modelagem computacional no domínio do tempo baseada em forças magnetomotrizes e relutâncias magnéticas. O modelo empregado permitiu simulações de fenômenos de regime transitório e permanente, além de possibilitar o acesso a grandezas elétricas, magnéticas e mecânicas. A metodologia utilizada no trabalho foi aplicada a dois modelos de transformadores operando em condições nominais e de curto circuito. Adicionalmente, Azevedo (2007) informa que devido à dificuldade de se encontrar publicações que contivessem valores de referência para validar sua metodologia, seus resultados foram comparados aos correspondentes obtidos de um tradicional e bem aceito pacote computacional do MEF, o *software* FEMM. Os resultados oriundos das simulações foram avaliados em termos do grau de impacto que é provocado nas grandezas utilizadas para determinar os esforços eletromecânicos aplicado aos enrolamentos do transformador.

A partir dos esforços eletromecânicos, a autora apresentou uma proposta de metodologia que estabelecesse a correlação entre os fenômenos estudados e o impacto sobre a vida útil de transformadores. A metodologia apresentada está baseada no

comparativo direto dos esforços eletromecânicos nos enrolamentos, devido à circulação das correntes transitórias, com os estresses mecânicos admissíveis, em que, caso os estresses mecânicos nos enrolamentos fossem maiores que os estresses admissíveis, a unidade deveria passar pelo processo de manutenção, caso os valores fossem inferiores, o equipamento continuaria em operação. Também, a partir dos resultados apresentados pela autora, foi constatado que a condição de curto circuito ocasiona esforços eletromecânicos nos enrolamentos superiores comparados aos gerados pelas correntes de energização, considerando esta menos prejudicial aos enrolamentos do transformador. Finalmente, Azevedo (2007), em sua metodologia, não considera que falhas mecânicas podem ocorrer para valores de estresses mecânicos abaixo dos valores dos estresses admissíveis.

No trabalho de dissertação de Rosentino (2010) é apresentado que muitas das falhas que ocorrem em transformadores são devido à redução da suportabilidade da isolamento dos seus enrolamentos. A redução pode ser causada por fenômenos eletroquímicos do líquido de resfriamento (óleo), pelas vibrações e deformações produzidas pelas forças eletromagnéticas durante a operação normal e em condições de curto circuito.

Além disso, o autor informa que o transformador é projetado para suportar um determinado número de curtos circuitos, e que os danos causados pelos curtos circuitos são cumulativos no transformador. Rosentino (2010) afirma que existe uma carência de metodologias e ferramentas consistentes para se avaliar os efeitos dos esforços eletromecânicos nos enrolamentos de transformadores devido à circulação de correntes de curto circuito. No trabalho ainda são apresentadas as características dos esforços eletromecânicos causados pela forças eletromagnéticas nos enrolamentos de transformadores, além de uma metodologia analítica para estimar as forças eletromagnéticas e os estresses mecânicos nos enrolamentos de um transformador, submetido a condições de curto circuito. Os valores das forças eletromagnéticas obtidos foram confrontados com resultados obtidos por meio de simulações computacionais no domínio do tempo, empregando o programa FEMM. O autor aplica a mesma metodologia utilizada por Azevedo (2007) para verificar a proximidade de falha dos enrolamentos.

A tese de Saraiva (2011) teve como objetivo estudar as alterações que poderiam ocorrer nos parâmetros dos transformadores quando algum tipo de deformação incidisse nos enrolamentos. Para a verificação dos efeitos, a autora optou por analisar possíveis variações em parâmetros elétricos, magnéticos e mecânicos, as quais poderiam indicar

um decaimento na vida útil do equipamento. Para realização de seus estudos, Saraiva empregou o *software* FLUX 3D, baseado no MEF. Deformações foram aplicadas nos enrolamentos e análises foram realizadas para a verificação dos parâmetros. A autora verificou que a inserção de deformações nos enrolamentos provoca o aumento das forças eletromagnéticas e também alterações nos parâmetros dos transformadores.

No trabalho de Neves e outros (2011) foi realizada uma comparação dos esforços eletromecânicos, nos enrolamentos de transformadores, causados pela circulação de correntes de *inrush* e de curto circuito. Os autores destacaram que, apesar de a condição de energização ser realizada durante a operação normal do transformador, ela pode produzir elevadas correntes e, assim, reduzir a vida útil do equipamento. Por meio dos resultados obtidos, foi verificado que, para o mesmo valor de pico da corrente, as forças eletromagnéticas na direção axial, causadas pela condição de *inrush*, são maiores comparadas às geradas pela condição de curto circuito. Além disso, os autores ressaltaram a importância de se estudar os esforços eletromecânicos ocasionados pelas correntes de *inrush* nos enrolamentos de transformadores, uma vez que seu tempo de duração nos enrolamentos é consideravelmente maior comparado aos das correntes de curto circuito. Para desenvolver o trabalho, Neves e outros (2011) utilizaram o Flux 3D e um transformador de 15 kVA.

Em Beniwal e outros (2010) foi apresentado um estudo a respeito da estimativa de vida útil de transformadores de distribuição considerando fadiga nos enrolamentos. Inicialmente, os autores informaram que as falhas mecânicas em transformadores ocorrem devido à circulação de correntes transitórias pelos enrolamentos, assim como defeitos durante o processo de fabricação do transformador. Além disso, os autores realçaram que aproximadamente 90% das falhas mecânicas que acontecem em componentes mecânicos são ocasionadas por fadiga. Enfatizando também, que falhas por fadiga afetam a geometria do material, suas propriedades e faixa de estresses admissíveis. Além disso, os autores destacaram que falhas por fadiga não tem sido reportadas na literatura. No trabalho, a influência dos estresses cíclicos nos enrolamentos de um transformador de distribuição considerando o critério de fadiga aplicado para o alumínio e o cobre foi avaliada. Foi examinado que o cobre suporta a fadiga por mais tempo do que o alumínio. Os autores ainda destacam que falhas por fadiga podem ocorrer durante a operação normal do transformador. Finalmente, no trabalho é dito que as curvas S-N de fadiga devem ser empregadas durante a fase de projeto do transformador, com o intuito

de aumentar o tempo de vida útil do equipamento e também reduzir o número de ocorrências de falhas mecânicas nos transformadores.

Hyun-Mo e outros (2012) realizaram simulações computacionais em 3D para a determinação das forças eletromagnéticas e dos estresses mecânicos nos enrolamentos de um transformador. Os resultados oriundos da física eletromagnética, que são as forças eletromagnéticas, serviram de dados de entrada para a física mecânica. O estresse de Von Mises, as deformações e os deslocamentos nos enrolamentos, quando da ocorrência de um curto circuito, foram os resultados oriundos da física mecânica. Os resultados foram comparados com o limite de escoamento dos materiais empregados no transformador. Os autores ainda destacaram que o MEF pode ser utilizado para auxiliar no projeto do transformador, com o intuito de evitar que falhas mecânicas ocorram no equipamento.

Zhang e outros (2014) verificaram o comportamento dinâmico dos estresses mecânicos e dos deslocamentos no enrolamento interno de um transformador. O comportamento dinâmico dos estresses mecânicos e dos deslocamentos foram apresentados em termos das curvas dos estresses mecânicos e dos deslocamentos como função do tempo, mas nenhuma análise das curvas foi realizada. Além disso, simulações computacionais em 3D foram realizadas, apresentando às respostas do enrolamento interno às forças eletromagnéticas. Essas respostas foram apresentadas em termos do estresse de Von Mises e deslocamentos. Os autores destacaram que o trabalho foi desenvolvido com o intuito de os resultados serem úteis para o projeto do transformador e diagnóstico de faltas.

Hyun-Mo e outros (2012) apresentaram um trabalho em que as forças eletromagnéticas radiais e axiais são determinadas por meio do MEF, mediante uma simulação em 3D. As distribuições volumétricas das forças radiais e axiais são apresentadas e destaques são feitos para resultados que já são consolidados, como forças eletromagnéticas na direção radial são compressivas no enrolamento interno e trativas no enrolamento externo, enquanto que as forças eletromagnéticas na direção axial são compressivas nos enrolamentos.

Em Guimarães (2013) é proposta uma metodologia analítica para estimar os limites de suportabilidade mecânica dos enrolamentos de transformadores, assim como determinar curvas que permitam analisar a redução de vida útil do equipamento, quando os enrolamentos são submetidos à circulação de correntes de curto circuito e de energização. A metodologia é baseada na utilização do critério de fadiga, em que são determinadas curvas S-N para os enrolamentos. O autor salienta que, para efeito didático

a fim de entendimento de sua metodologia, foi utilizado um curto circuito com 120 ciclos de duração, referente a 40 eventos de curto circuito, e um estresse mecânico de 54 MPa. Apesar de o trabalho de Guimarães (2013) abordar o uso do critério de fadiga para avaliação dos esforços eletromecânicos nos enrolamentos de transformadores, o efeito da componente transitória da corrente de curto circuito no cálculo da redução percentual de vida do enrolamento não foi considerado.

Em Barros (2015) foi realizada a determinação dos esforços eletromecânicos causados por correntes de *inrush* nos enrolamentos de transformadores de potência. No trabalho, as forças eletromagnéticas foram determinadas por meio de expressões analíticas e simulações computacionais. No caso particular estudado pelo autor, ele destaca que, apesar de a corrente de *inrush* possuir amplitude oito vezes menor que a de curto circuito, a corrente de *inrush* causa esforços eletromecânicos de mesma ordem de grandeza nos enrolamentos do transformador. Além disso, Barros (2015) ainda destaca que, como as correntes de energização possuem tempo de duração maior e são mais frequentes durante a vida útil dos transformadores, é possível que tais correntes possam ocasionar, nos enrolamentos do equipamento, falha por fadiga mais rapidamente que as correntes de curto circuito. Diante disto, o autor recomenda que as correntes de energização sejam apreciadas durante a etapa de projeto de transformadores de potência.

No trabalho de Bakshi (2015), é apresentado 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 (2015) 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.

Andrade (2016) realizou simulações computacionais nos enrolamentos de transformadores com o intuito de comparar dois critérios de falha mecânica, o critério do máximo estresse mecânico e o critério de Von Mises. No trabalho é mencionado que o critério do máximo estresse mecânico é o mais empregado em transformadores, sendo que o autor discute que esse critério não é adequado para ser aplicado em materiais

dúcteis, como o cobre. Então, o autor propõe utilizar o critério de Von Mises como técnica alternativa, uma vez que é um dos critérios mais utilizados para avaliação da proximidade de falhas em materiais dúcteis.

A partir da revisão bibliográfica apresentada, constatou-se que os fenômenos eletromagnéticos e mecânicos ocorrentes em transformadores estão sendo estudados em diversas pesquisas. Além disso, os trabalhos apresentados se destacam pela determinação das forças eletromagnéticas e dos estresses mecânicos por meio de métodos analíticos e computacionais. Os métodos computacionais são embasados em diferentes *softwares* baseados no MEF. Adicionalmente, a tendência na utilização de métodos computacionais deu-se pela utilização de representações gráficas em 3D. Por outro lado, verificou-se que na literatura existem poucos trabalhos que correlacionam a determinação do comportamento eletromecânico dos enrolamentos do transformador com a sua vida útil.

A fim de sintetizar as contribuições dos trabalhos supracitados, a seguir é apresentada uma tabela com as principais referências e contribuições abordadas nesta revisão bibliográfica. Adicionalmente, na Tabelas 2 também é destacada a contribuição desta pesquisa.

Tabela 2 - Resumo das principais referências e contribuições dos pesquisadores citados na revisão bibliográfica.

Pesquisadores	Contribuições				
	EE	2D	3D	CF	VU
<b>Billig (1946)</b>	X				
<b>Waters (1966)</b>	X				
<b>Ayers e outros (1974) e (1975)</b>	X				
<b>Patel (1980)</b>	X				
<b>Yun-Qiu e outros (1990)</b>	X	X			
<b>Arturi (1995)</b>			X		
<b>Najdenkoski e Manov (1998)</b>	X	X			
<b>Salon e outros (2000)</b>		X	X		
<b>Azevedo (2007)</b>	X	X		X	
<b>Strac e outros (2008)</b>		X	X		
<b>Feyzi e Sabahi (2008)</b>	X	X			
<b>Rosentino (2010)</b>	X	X		X	

1. Destacaram a modelagem analítica dos esforços eletromecânicos (EE).
2. Destacaram as representações gráficas, no domínio 2D, dos esforços eletromecânicos (2D).
3. Destacaram as representações gráficas, no domínio 3D, dos esforços eletromecânicos (3D).
4. Destacaram a utilização de critérios de falha mecânica nos enrolamentos de transformadores (CF).
5. Destacaram a utilização de métodos para determinação do tempo de vida útil do equipamento (VU).

Tabela 2 - Resumo das principais referências e contribuições dos pesquisadores citados na revisão bibliográfica.

Pesquisadores	Contribuições				
	EE	2D	3D	CF	VU
<b>Beniwal e outros (2010)</b>	X				X
<b>Saraiva (2011)</b>	X		X	X	
<b>Hyun-Mo e outros (2012)</b>			X	X	
<b>Yang e outros (2013)</b>		X			
<b>Guimarães (2013)</b>	X		X		X
<b>Zhang e outros (2014)</b>			X	X	
<b>Bakshi (2015)</b>	X			X	
<b>Andrade (2016)</b>	X	X	X	X	
<b>Este trabalho</b>	X	X	X	X	X

1. Destacaram a modelagem analítica dos esforços eletromecânicos (EE).
2. Destacaram as representações gráficas, no domínio 2D, dos esforços eletromecânicos (2D).
3. Destacaram as representações gráficas, no domínio 3D, dos esforços eletromecânicos (3D).
4. Destacaram a utilização de critérios de falha mecânica nos enrolamentos de transformadores (CF).
5. Destacaram a utilização de métodos para determinação do tempo de vida útil do equipamento (VU).

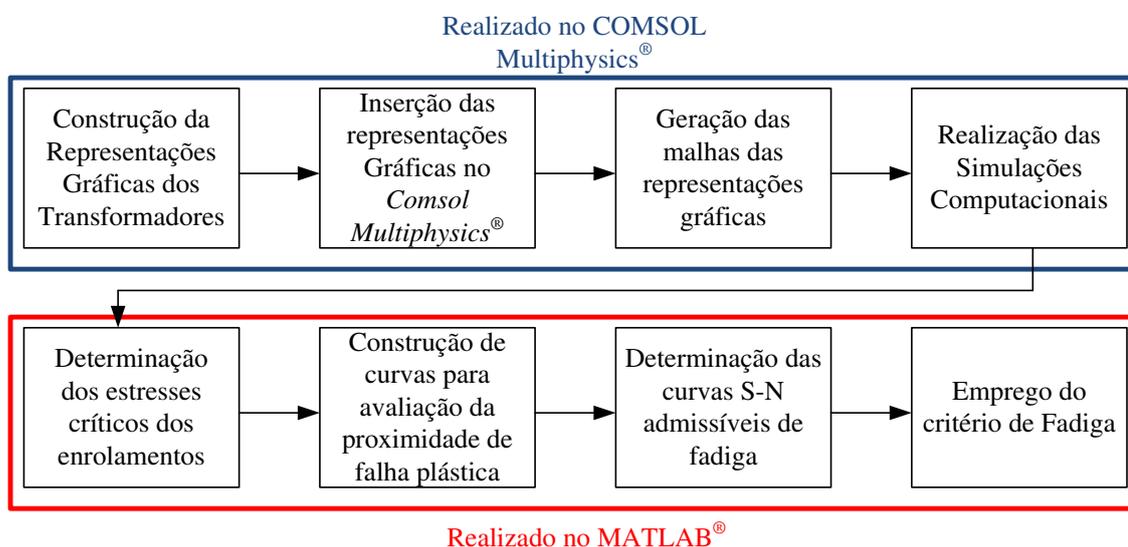
Fonte: Autor.

## 4 METODOLOGIA

Neste capítulo, são apresentados os procedimentos utilizados em uma nova metodologia capaz de avaliar os esforços eletromecânicos nos enrolamentos de transformadores. A metodologia está baseada na utilização de simulações computacionais e no uso de critérios de falha mecânica. Os procedimentos são: construção das representações gráficas dos transformadores, inserção das representações gráficas dos transformadores em um *software* baseado no MEF, geração das malhas das representações gráficas dos transformadores, realização das simulações computacionais, determinação dos estresses críticos dos enrolamentos, construção das curvas representativas da proximidade de falha plástica dos enrolamentos, determinação das curvas S-N admissíveis de fadiga dos enrolamentos e emprego do critério de fadiga.

Com a apresentação dos procedimentos que devem ser utilizados para emprego da nova metodologia, foi construído o diagrama de blocos apresentado na Figura 21, o qual serve para indicar a ordem de usabilidade dos procedimentos supracitados.

Figura 21 - Diagrama de blocos representativo da metodologia proposta.



Fonte: Autor.

Adicionalmente, para que os procedimentos indicados sejam empregados, é necessário utilizar modelos de transformadores. As características construtivas dos modelos de transformadores utilizados estão apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 - Características construtivas dos modelos de transformadores empregados.

<b>Transformadores</b>		T1	T2
<b>Potência (MVA)</b>		75	100
<b>Número de fases</b>		1	3
<b>Impedância percentual (%)</b>		23,5	9,32
<b>Número de espiras</b>	Enrolamento interno	115	454
	Enrolamento externo	667	756
<b>Relação de transformação (kV/kV)</b>		22/127	138/230
<b>Altura dos enrolamentos (mm)</b>	Enrolamento interno	1521	1518
	Enrolamento externo	1496,2	1475
<b>Diâmetro médio (mm)</b>	Enrolamento interno	994	903
	Enrolamento externo	1557	1201
<b>Área da seção transversal do fio de cobre (mm<sup>2</sup>)</b>	Enrolamento interno	583	394
	Enrolamento externo	229	188
<b>Espessura radial (mm)</b>	Enrolamento interno	70	85
	Enrolamento externo	113	89
<b>Largura do núcleo (mm)</b>		4320	3954
<b>Altura do núcleo (mm)</b>		3418	3180
<b>Largura da janela (mm)</b>		840	867
<b>Altura da janela (mm)</b>		1850	1740

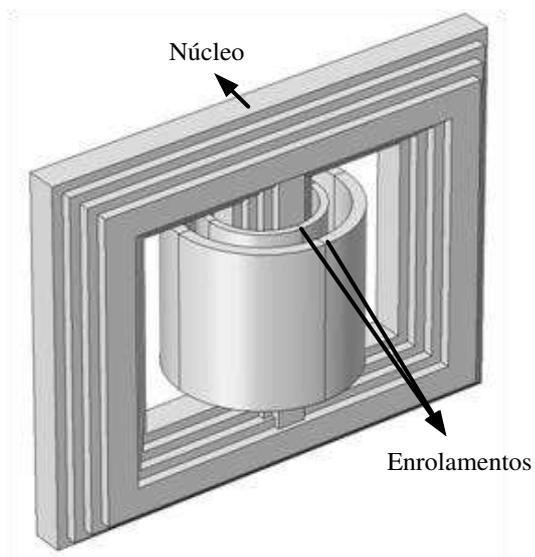
Fonte: Adaptado de Zhang e outros (2014) e Azevedo (2007).

A seguir, será apresentada a descrição de como foram utilizados cada um dos procedimentos, tendo como objetivo explicar como a nova metodologia foi desenvolvida.

#### 4.1 CONSTRUÇÃO DAS REPRESENTAÇÕES GRÁFICAS DOS TRANSFORMADORES

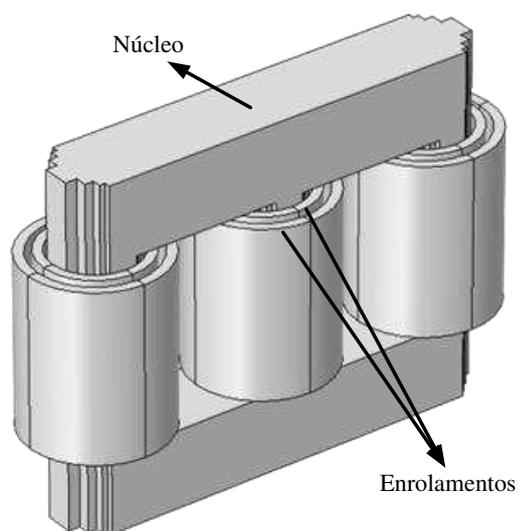
Para construir as representações gráficas, em 3D, dos transformadores de 75 MVA e de 100 MVA, é necessário utilizar as características construtivas apresentadas na Tabela 3, e um *software* baseado em *Computer Aided Design* (CAD). O *software* CAD que deve ser empregado é o Autocad<sup>®</sup>. As representações gráficas dos transformadores, apresentando o núcleo e os enrolamentos, estão apresentadas nas Figuras 22 e 23.

Figura 22 -Representação gráfica em 3D do transformador de 75 MVA.



Fonte: Autor.

Figura 23 - Representação gráfica em 3D do transformador de 100 MVA.



Fonte: Autor.

## 4.2 INSERÇÃO DAS REPRESENTAÇÕES GRÁFICAS DOS TRANSFORMADORES EM UM *SOFTWARE* BASEADO NO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

As representações gráficas dos transformadores devem ser inseridas no COMSOL Multiphysics<sup>®</sup>, o qual permite a importação das representações diretamente do ambiente

CAD. As representações gráficas são os dados de entrada para a realização das simulações computacionais.

### 4.3 GERAÇÃO DA MALHA DA REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DO TRANSFORMADOR

Com o objetivo de realizar as simulações computacionais, é necessário gerar as malhas das representações gráficas dos transformadores. Para gerar as malhas, as representações gráficas devem ser discretizadas.

A fim de discretizar as malhas das representações gráficas, é necessário utilizar o COMSOL Multiphysics®, que disponibiliza oito pré-configurações de malha para realizar a discretização. As oito pré-configurações variam de uma extremamente grossa para uma extremamente fina. A escolha da pré-configuração depende do grau de refinamento desejado pelo usuário, tanto em termos de desempenho computacional quanto em termos de precisão de resultados. As representações gráficas dos transformadores, com as malhas geradas, estão apresentadas nas Figuras 24 e 25.

Figura 24. Malha da representação gráfica do transformador de 75 MVA.

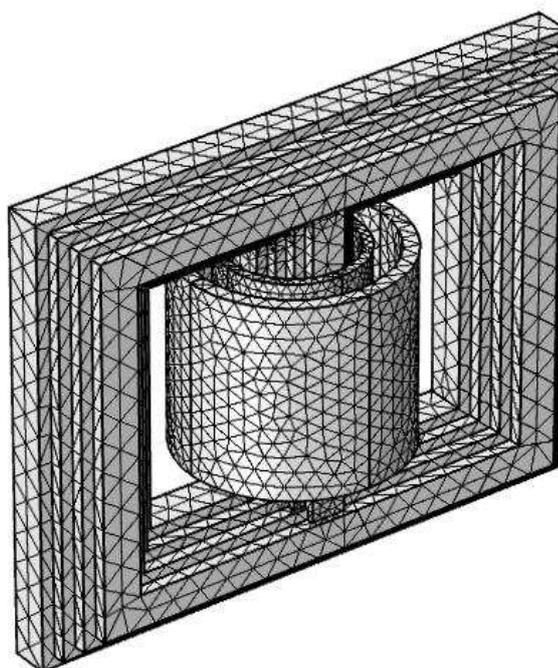
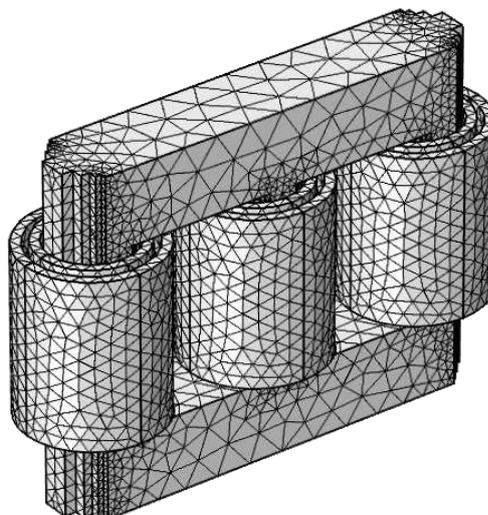


Figura 25. Malha da representação gráfica do transformador de 100 MVA.



Fonte: Autor.

#### 4.4 REALIZAÇÃO DAS SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS

Para a realização das simulações computacionais no COMSOL Multiphysics<sup>®</sup>, as características dos fenômenos físicos devem ser conhecidas. Nesta pesquisa, em que o objeto de estudo é o enrolamento do transformador, é necessário utilizar duas físicas: eletromagnética e mecânica. Nelas, os fundamentos apresentados nas seções 2.3 a 2.7 são empregados.

Em particular, neste trabalho, a física eletromagnética recebe como dados de entrada as expressões das correntes de curto circuito, no tempo, que circulam nos enrolamentos. Além disso, valores estacionários de correntes de curto circuito também podem ser inseridos como dados de entrada na física eletromagnética. A física eletromagnética fornece como resultado as forças eletromagnéticas, as quais são utilizadas como dados de entrada na física mecânica.

Na física mecânica, o COMSOL Multiphysics<sup>®</sup>, como padrão, habilita a análise dos estresses de Von Mises. Isto permite a determinação das curvas dos estresses mecânicos nos enrolamentos, os quais devem estar fixos em suas extremidades.

Portanto, para se obter as forças eletromagnéticas e os estresses de Von Mises nos enrolamentos dos transformadores, é necessário simular a circulação de correntes de curto circuito nos terminais dos enrolamentos.

## 4.5 DETERMINAÇÃO DOS ESTRESSES CRÍTICOS DOS ENROLAMENTOS DO TRANSFORMADOR

Com o intuito de construir curvas para avaliação da proximidade de falha plástica dos enrolamentos, é necessário determinar os estresses críticos dos enrolamentos dos transformadores.

Para determinar os estresses críticos, torna-se necessário aplicar, conforme sugerido por Vecchio e outros (2010), o método de Newton-Raphson na Expressão (34). A expressão para estimação do estresse crítico, pelo método de Newton-Raphson, está apresentada na Expressão (40).

$$\sigma_{crit} = \sigma_{crit} - \frac{f(\sigma_{crit})}{f'(\sigma_{crit})}, \quad (40)$$

na qual  $f(\sigma_{crit})$  é dada pela Expressão (41) e  $f'(\sigma_{crit})$ , que é a derivada primeira de  $f(\sigma_{crit})$ , está representada na Expressão (42).

$$f(\sigma_{crit}) = \sigma_{crit}^{m+1} + \frac{\sigma_0^m}{\gamma} \cdot \sigma_{crit} - \frac{\sigma_0^m}{\gamma} \cdot E_0 \cdot \left(\frac{h}{R}\right)^2, \quad (41)$$

$$f'(\sigma_{crit}) = (m+1) \cdot \sigma_{crit}^m + \frac{\sigma_0^m}{\gamma}. \quad (42)$$

Para se utilizar as Expressões (40), (41) e (42) e determinar o valor estresse crítico, deve ser desenvolvida uma rotina para a qual o ambiente MATLAB<sup>®</sup> pode ser utilizado. A rotina deve ser capaz de determinar um intervalo,  $[a, b]$ , que contenha o  $\sigma_{crit}$  procurado. Para que o intervalo possua o  $\sigma_{crit}$  procurado e o método de Newton Raphson convirja, as restrições contidas nas Expressões (43), (44) e (45) devem ser obedecidas.

$$f(a) \cdot f(b) < 0, \quad (43)$$

$$f'(a) \cdot f'(b) > 0, \quad (44)$$

$$f''(a) \cdot f''(b) > 0, \quad (45)$$

em que  $f''$  é a derivada segunda da função  $f(\sigma_{crit})$ , sendo definida pela Expressão (46).

$$f''(\sigma_{crit}) = m \cdot (m+1) \cdot \sigma_{crit}^{m-1}. \quad (46)$$

Assim, com o emprego do método de Newton-Raphson, pode-se determinar o estresse crítico dos enrolamentos dos transformadores e construir as curvas de proximidade falha dos enrolamentos.

#### 4.6 CONSTRUÇÃO DAS CURVAS REPRESENTATIVAS DA PROXIMIDADE DE FALHA PLÁSTICA DOS ENROLAMENTOS

As curvas representativas da proximidade de falha plástica nos enrolamentos são apresentadas, graficamente, em termos dos valores dos estresses críticos dos enrolamentos e dos valores máximos dos estresses de Von Mises, com relação aos fatores de assimetria.

Para determinar os valores máximos dos estresses de Von Mises nos enrolamentos, é necessário simular, no ambiente COMSOL Multiphysics®, curtos circuitos com diferentes fatores assimetria. Os valores dos fatores de assimetria devem ser variados numa faixa de 1,0 até 2,8. Esta faixa deve ser escolhida apenas para realizar uma análise de sensibilidade do fator, pois se sabe que os valores do fator de assimetria variam de 1,0 até 2,0.

Conforme já mencionado, para se obter as forças eletromagnéticas e os estresses de Von Mises nos enrolamentos dos transformadores, é necessário simular a circulação de correntes de curto circuito nos terminais dos enrolamentos. Como cada curto circuito possui um fator de assimetria associado, para cada fator de assimetria há um estresse de Von Mises correspondente.

Sabendo disto, para construir as curvas de proximidade de falha plástica dos enrolamentos, é necessário importar os valores dos estresses de Von Mises do COMSOL Multiphysics® para o ambiente MATLAB®. No ambiente MATLAB®, é necessário desenvolver uma rotina capaz de plotar, no mesmo gráfico, os estresses críticos dos

enrolamentos e os valores máximos dos estresses de Von Mises com relação aos fatores de assimetria.

Com os estresses de Von Mises e com os valores dos estresses críticos dos enrolamentos, é possível construir e avaliar as curvas de proximidade de falha plástica dos enrolamentos.

Para avaliar a proximidade de falha plástica dos enrolamentos, é necessário aplicar o critério de Von Mises para cada estresse de Von Mises correspondente a um determinado fator de assimetria. Para aplicar o critério, é necessário comparar o estresse de Von Mises ocorrente, com o estresse crítico do enrolamento.

Por meio da avaliação da proximidade de falha plástica, também é possível determinar o fator de assimetria crítico dos enrolamentos. Para determinar este fator, é necessário determinar o ponto de interseção entre as curvas dos valores dos estresses críticos e dos valores máximos dos estresses de Von Mises com relação aos fatores de assimetria. O ponto de interseção é representativo do primeiro valor do fator de assimetria que faz com que o critério de Von Mises seja obedecido. O fator de assimetria crítico é o fator correspondente ao ponto de interseção entre as curvas.

## 4.7 DETERMINAÇÃO DAS CURVAS S-N ADMISSÍVEIS DE FADIGA

Com o objetivo de empregar o critério de fadiga, é necessário realizar a determinação das curvas S-N admissíveis de fadiga para os enrolamentos do transformador. Conforme explicado na seção 2.6.4, para determinar as curvas, é necessário utilizar a curva S-N básica de fadiga para o cobre, apresentada na Figura 16, juntamente com a Expressão (37) e os fatores modificadores do limite de fadiga.

Sabendo disto, a curva S-N básica para o cobre passa por dois pontos, os quais são:  $(10^3; 0,9 \cdot \sigma_r)$  e  $(10^6, \sigma_{f0})$ . Nestes pontos,  $\sigma_r$  é o limite de resistência do cobre e  $\sigma_{f0}$  é o valor do limite de fadiga da curva S-N básica de fadiga para o cobre.

Com os dois pontos supracitados, podem ser calculados os parâmetros da curva S-N básica de fadiga para o cobre e, assim, determinar a exponencial decrescente apresentada na Expressão (36). As expressões matemáticas para determinação dos

parâmetros  $a_f$  e  $b_f$ , apresentados na Expressão (36), estão apresentadas nas Expressões (47) e (48).

$$b_f = \frac{\log_{10}(\sigma_{f0}) - \log_{10}(0,9 \cdot \sigma_r)}{\log_{10}(10^6) - \log_{10}(10^3)}, \quad (47)$$

$$a_f = 10^{\left[\log_{10}(\sigma_{f0}) - b_f \cdot \log_{10}(10^6)\right]}. \quad (48)$$

Com a expressão para a curva S-N básica de fadiga para o cobre, pode-se também determinar uma expressão para a curva S-N admissível para o enrolamento, bastando apenas empregar a Expressão (37) para calcular o limite de fadiga admissível.

Assim, para calcular o limite de fadiga admissível, é necessário utilizar a Expressão (37). Ao empregar esta expressão, obtém-se o valor do limite de fadiga admissível, e com ele, podem ser calculados os valores dos parâmetros da curva S-N admissível de fadiga para os enrolamentos. Os parâmetros podem ser calculados por meio das Expressões (49) e (50).

$$b_f = \frac{\log_{10}(\sigma_{fad}) - \log_{10}(0,9 \cdot \sigma_r)}{\log_{10}(10^6) - \log_{10}(10^3)}, \quad (49)$$

$$a_f = 10^{\left[\log_{10}(\sigma_{fad}) - b_f \cdot \log_{10}(10^6)\right]}. \quad (50)$$

Com os parâmetros da curva S-N admissível de fadiga para os enrolamentos, a curva pode ser determinada, e o critério de fadiga pode ser empregado.

Adicionalmente, vale salientar que para realizar os procedimentos supracitados na determinação das curvas S-N admissíveis, é necessário desenvolver uma rotina no ambiente MATLAB®.

## 4.8 EMPREGO DO CRITÉRIO DE FADIGA

Para empregar o critério de fadiga, devem ser utilizadas as curvas S-N admissíveis de fadiga para os enrolamentos e os estresses de Von Mises, no tempo, para cada fator de assimetria que faz os estresses de Von Mises serem inferiores aos estresses críticos dos enrolamentos. Além disso, devem ser utilizadas também, conforme descrito na subseção

2.6.4, a regra de Miner e a expressão (39), que possibilita o cálculo da redução percentual de tempo de vida útil.

O emprego do critério de fadiga está correlacionado à determinação do dano cumulativo produzido por um determinado estresse mecânico ocorrente nos enrolamentos. Além disso, o emprego do critério de fadiga pode resultar na determinação do número de curtos circuitos suportáveis pelos enrolamentos, assim como na verificação da influência do tempo de duração, do curto circuito simulado, sobre o número de curtos circuitos suportáveis. Adicionalmente, o critério pode ser utilizado também para a construção de gráficos de superfícies que relacionem o número de curtos circuitos suportáveis, os fatores de assimetria e as reduções percentuais de tempo de vida útil.

Sabendo disso, para determinar o dano cumulativo, é necessário fixar uma percentagem de redução de tempo de vida útil. Além disso, é necessário também simular o estresse de Von Mises, no tempo, produzido por um curto circuito com um determinado fator de assimetria. O estresse de Von Mises é simulado até que a redução percentual da curva S-N admissível de fadiga do enrolamento atinja o valor percentual de redução de tempo de vida útil fixado. Ao mesmo tempo, com o intuito de quantificar o número de curtos circuitos suportáveis pelos enrolamentos de um transformador, é necessário realizar uma contagem do número de vezes que o estresse de Von Mises é simulado para atingir a percentagem de redução de vida útil fixada.

A fim de verificar se o tempo de duração do curto circuito simulado influencia na estimação do número de curtos circuitos suportáveis, é necessário simular, nos terminais dos enrolamentos do transformador, curtos circuitos com diferentes tempos de duração. Os tempos de duração que devem ser escolhidos são de 0,25 s, 0,05 s e 3 s. Estes tempos de duração estão indicados, como tempos de duração padrão de correntes de curto circuito, nas referências NBR 5380 (1993), IEC 60076 (2000) e Siemens (1988). O tempo de 0,25 s e de 3 s são definidos na NBR 5380 (1993), e na IEC 60076 (2000), para fins de ensaio de curto circuito em transformadores. O tempo de 0,05 s é definido pela SIEMENS (1988), como o tempo máximo de atuação de um disjuntor para interromper um curto circuito.

Com o objetivo de analisar a sensibilidade da estimação do número de curtos circuitos suportáveis às variações dos fatores de assimetria e do tempo de duração do curto circuito, é necessário construir gráficos de superfícies que correlacionem: o número de curtos circuitos suportáveis, a redução percentual tempo de vida útil e os fatores de

assimetria. As superfícies devem ser construídas para os tempos de duração de curto circuito supracitados.

Com a apresentação dos procedimentos indicados para desenvolvimento da nova metodologia para avaliação dos esforços eletromecânicos nos enrolamentos de transformadores, podem ser obtidos resultados que servem para analisar tecnicamente a metodologia proposta. Desta maneira, as análises e discussões dos resultados obtidos, por meio da aplicação dos procedimentos supracitados, estão apresentados no capítulo a seguir.

## 5 RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentadas as análises dos resultados obtidos utilizando-se a metodologia descrita no capítulo anterior. A apresentação dos resultados está dividida em cinco seções. A primeira tratará das respostas das representações gráficas dos transformadores de 75 MVA e de 100 MVA às forças eletromagnéticas e aos estresses mecânicos; a segunda e a terceira correspondem à avaliação dos resultados com respeito à proximidade de falha plástica e uso do critério de fadiga nos enrolamentos dos transformadores; na quarta seção serão apresentadas as etapas para aplicação da nova metodologia e, finalmente, na quinta seção, serão listadas as potenciais aplicabilidades da nova metodologia.

### 5.1 RESPOSTAS DA REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DO TRANSFORMADOR À UNIÃO DAS FÍSICAS ELETROMAGNÉTICA E MECÂNICA

Nesta seção são apresentadas as respostas das representações gráficas dos transformadores à aplicação conjunta das físicas eletromagnética e mecânica. A aplicação foi realizada no COMSOL Multiphysics® com o intuito de ilustrar os efeitos das forças eletromagnéticas e dos estresses mecânicos nos enrolamentos dos transformadores.

Para obter os resultados, foram utilizadas as representações gráficas dos transformadores e os valores de pico das correntes de curto circuito para um determinado fator de assimetria. As representações gráficas e os valores de pico das correntes de curto circuito serviram como dados de entrada para a física eletromagnética.

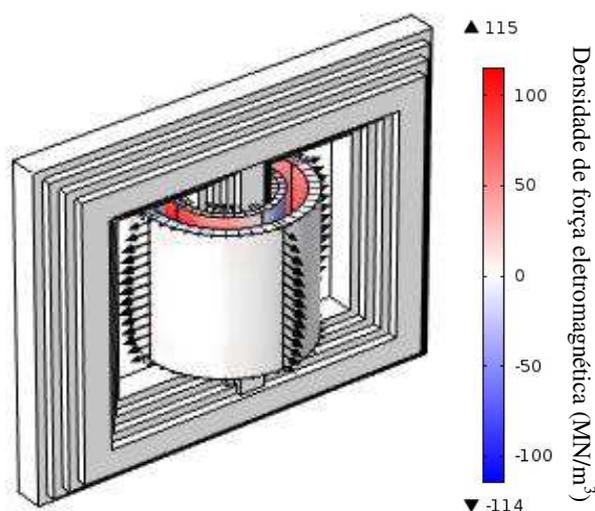
Com os dados de entrada da física eletromagnética, as densidades volumétricas de força eletromagnética nas direções radial e axial foram obtidas. As densidades volumétricas de força eletromagnética foram utilizadas como dados de entrada para a física mecânica. Esta possui, como dados de saída, os estresses de Von Mises provocados pelo valor de pico da corrente de curto circuito simulada nos terminais dos enrolamentos do transformador.

Sabendo disto, as respostas das representações gráficas dos transformadores estão apresentadas nas subseções a seguir.

### 5.1.1 RESPOSTAS DA SIMULAÇÃO DO TRANSFORMADOR DE 75 MVA

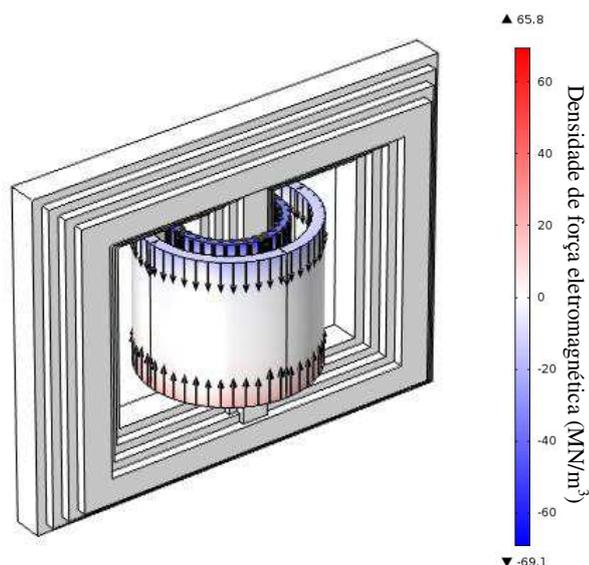
As densidades volumétricas de força eletromagnética nas direções radial e axial, para o transformador de 75 MVA, empregando o valor de pico de um curto circuito com fator de assimetria de 1,6 (32,8 kA no enrolamento interno e 5,7 kA no enrolamento externo), estão apresentadas nas Figuras 26 e 27.

Figura 26 - Densidade volumétrica de força eletromagnética na direção radial empregando o valor de pico de um curto circuito com fator de assimetria de 1,6.



Fonte: Autor.

Figura 27 - Densidade volumétrica de força eletromagnética na direção axial empregando o valor de pico de um curto circuito com fator de assimetria de 1,6.



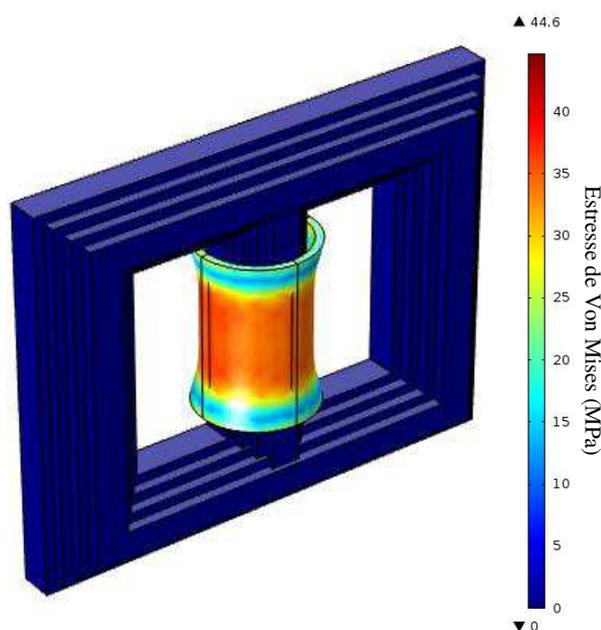
Fonte: Autor.

Ao analisar as Figuras 26 e 27, constatou-se que as forças eletromagnéticas na direção radial são compressivas no enrolamento interno e trativas no externo. Além disso,

verificou-se também que as forças eletromagnéticas na direção axial são compressivas nos dois enrolamentos.

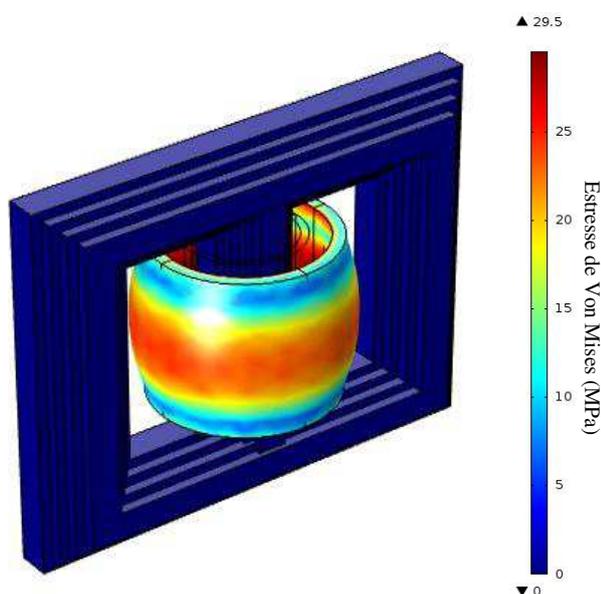
As respostas dos enrolamentos às forças eletromagnéticas de tração e compressão estão apresentadas nas Figuras 28 e 29. Nelas estão evidenciados os efeitos dos estresses de Von Mises nos enrolamentos do transformador, os quais tendem a comprimir o enrolamento interno e tracionar o enrolamento externo.

Figura 28–Estresse de Von Mises no enrolamento interno causado pelas forças eletromagnéticas trativas e compressivas.



Fonte: Autor.

Figura 29 -Estresse de Von Mises no enrolamento externo causado pelas forças eletromagnéticas trativas e compressivas.



Fonte: Autor.

Com a apresentação dos resultados mostrados nas Figuras 26 a 29, pode-se constatar que a simulação computacional permite observar as consequências dos fenômenos eletromagnéticos e mecânicos ocorrentes nos enrolamentos do transformador. Esta é uma vantagem que pode ser utilizada com o intuito de antever o comportamento do equipamento à circulação de correntes de curto circuito. Adicionalmente, devido às altas resistências mecânicas à deformação e por questões de visualização dos fenômenos, as Figuras 28 e 29 estão com um fator multiplicativo de 700 vezes.

Complementarmente, também foram realizadas simulações para verificar as respostas do transformador de 100 MVA às forças eletromagnéticas e aos estresses mecânicos. Os resultados estão apresentados na subseção a seguir.

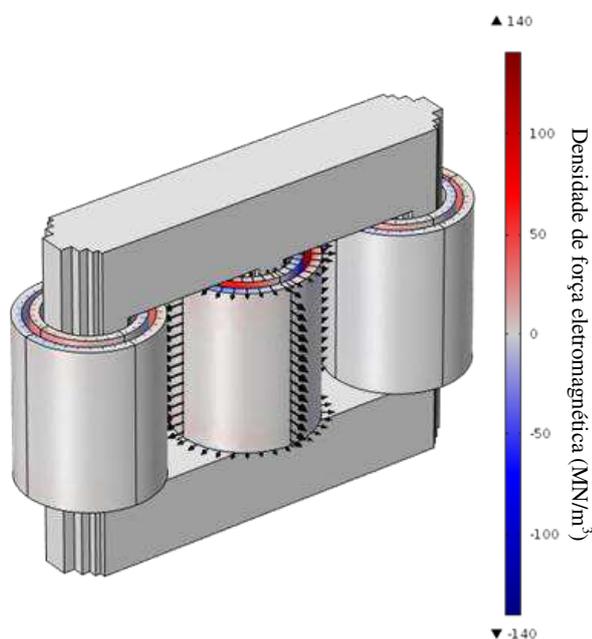
#### 5.1.2 RESPOSTAS DA SIMULAÇÃO DO TRANSFORMADOR DE 100 MVA

Segundo Waters (1966) e Bertagnolli (2007), os curtos circuitos trifásicos são os que causam os maiores danos aos transformadores e, por isso, devem ser os considerados durante a fase de projeto do equipamento. Sabendo disto, e como o transformador de 100 MVA é trifásico, foi simulado um curto circuito trifásico neste transformador.

As densidades volumétricas de força eletromagnética nas direções radial e axial, para o transformador de 100 MVA estão apresentadas nas Figuras 30 e 31. Os resultados foram obtidos empregando o valor de pico de um curto circuito trifásico com fator de assimetria de 1,6 (10,2 kA no enrolamento interno e 6,1 kA no enrolamento externo).

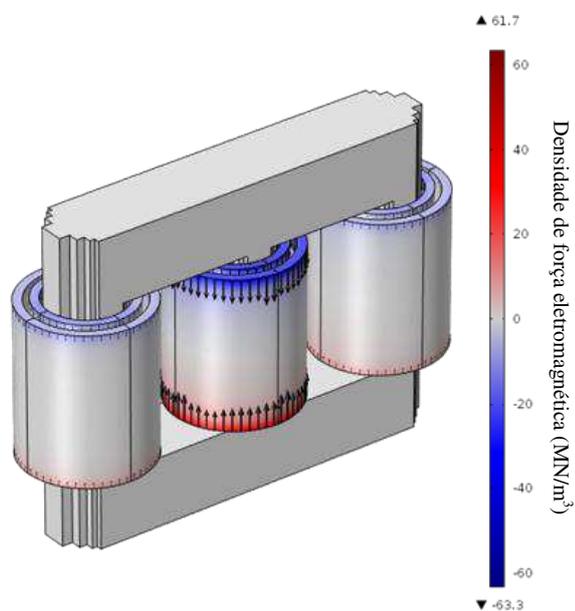
Conforme pode ser observado nas Figuras 30 e 31, as forças são maiores na fase central. Isso aconteceu porque na simulação foi considerado o instante de tempo em que ocorreu o máximo valor da corrente de curto circuito na fase central. Adicionalmente, as mesmas constatações apresentadas para o transformador de 75 MVA são verificadas, ou seja, as forças radiais são compressivas no enrolamento interno e trativas no enrolamento externo, enquanto que as forças axiais são compressivas em ambos os enrolamentos.

Figura 30 - Densidade volumétrica de força eletromagnética na direção radial empregando o valor de pico de um curto circuito com fator de assimetria de 1,6.



Fonte: Autor.

Figura 31 – Densidade volumétrica de força eletromagnética na direção axial empregando o valor de pico de um curto circuito com fator de assimetria de 1,6.

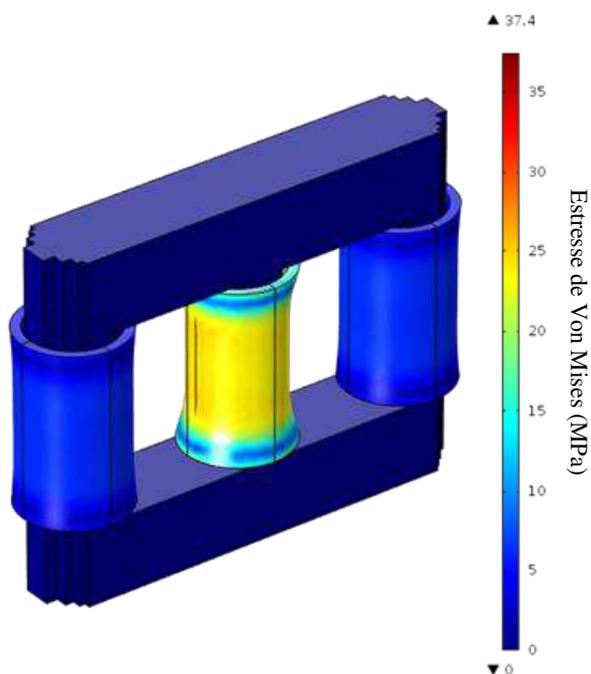


Fonte: Autor.

Sabendo que as forças eletromagnéticas produzem os estresses mecânicos nos enrolamentos, nas Figuras 32 e 33 são apresentados os estresses de Von Mises ocasionados pelas forças eletromagnéticas nos enrolamentos. Nas Figuras também pode

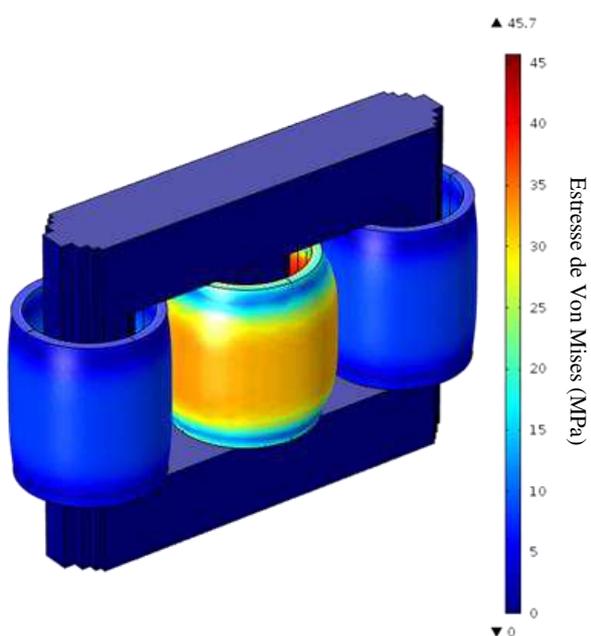
ser observado que os estresses tendem a comprimir o enrolamento interno e tracionar o enrolamento externo.

Figura 32 -Estresse de Von Mises no enrolamento interno causado pelas forças eletromagnéticas trativas e compressivas.



Fonte: Autor.

Figura 33 -Estresse de Von Mises no enrolamento externo causado pelas forças eletromagnéticas trativas e compressivas.



Fonte: Autor.

Observando-se os resultados apresentados nas Figuras 32 e 33, pode-se, então, constatar os mesmos comportamentos mostrados para o transformador de 75 MVA. Adicionalmente, assim como para o transformador de 75 MVA, devido às altas resistências mecânicas à deformação e por questões de visualização dos fenômenos, as Figuras 32 e 33 estão, também, com um fator multiplicativo de 700 vezes.

A partir dos resultados apresentados nesta seção, verificou-se que os princípios físicos dos fenômenos eletromagnéticos e mecânicos, ocorrentes nos enrolamentos dos dois transformadores simulados, foram os mesmos. De fato, nos enrolamentos dos dois transformadores, as forças radiais são compressivas no enrolamento interno e trativas no enrolamento externo, enquanto que as forças axiais são compressivas em ambos os enrolamentos. A ação das forças nos enrolamentos faz com que os estresses mecânicos tendam a comprimir o enrolamento interno e tracionar o enrolamento externo.

Após verificar as respostas da representação gráfica dos transformadores de 75 MVA e de 100 MVA aos esforços eletromecânicos, foram realizadas as avaliações dos critérios de falha mecânica nos enrolamentos dos transformadores empregados. As avaliações foram feitas tomando como base o emprego dos critérios de Von Mises e de fadiga.

## 5.2 AVALIAÇÃO DOS CRITÉRIOS DE FALHA MECÂNICA PARA O TRANSFORMADOR DE 75 MVA

Para o transformador de 75 MVA, que está caracterizado na Tabela 3, curtos circuitos monofásicos foram simulados. Além disso, as avaliações e análises foram feitas para os dois critérios de falha mecânica, uma referente aos resultados correspondentes à proximidade de falha plástica dos enrolamentos, empregando o critério de Von Mises, e outra relativa à utilização do critério de fadiga.

### 5.2.1 AVALIAÇÃO DA PROXIMIDADE DE FALHA PLÁSTICA DOS ENROLAMENTOS

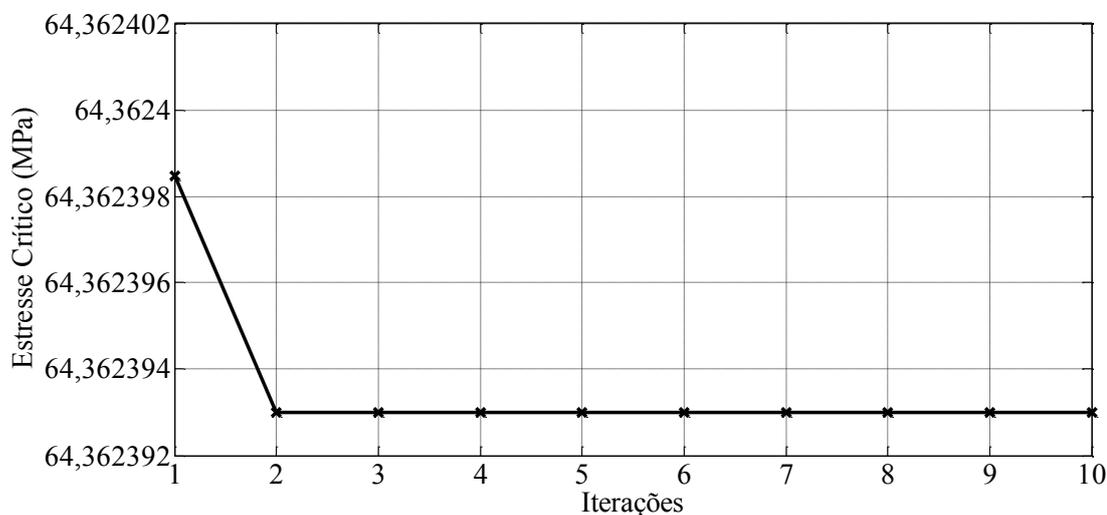
Os resultados da avaliação da proximidade de falha plástica dos enrolamentos foram obtidos usando a metodologia apresentada na seção 4.6. Na seção foi apresentado que, para avaliar a proximidade de falha plástica dos enrolamentos, devem ser

comparados os valores dos estresses críticos dos enrolamentos com os valores máximos dos estresses de Von Mises. Para fazer a comparação, devem ser colocados, em um mesmo gráfico, os estresses críticos dos enrolamentos e os valores máximos dos estresses de Von Mises com relação aos fatores de assimetria. Sabendo disso, para construir os gráficos dos estresses de Von Mises com relação aos fatores de assimetria, foram simulados curtos circuitos com diferentes fatores de assimetria, que foram variados de 1,0 até 2,8. Para cada curto circuito simulado, havia um estresse de Von Mises correspondente. Os estresses foram correlacionados com o seu respectivo fator de assimetria gerador. Com os valores dos estresses de Von Mises e dos fatores de assimetria, pôde-se construir o gráfico que relaciona os valores máximos dos estresses de Von Mises com os fatores de assimetria.

Para avaliar a proximidade de falha plástica dos enrolamentos, foram determinados os estresses críticos dos enrolamentos. Os estresses críticos podem ser determinados por meio da Expressão (41), na qual o estresse crítico é a raiz da função  $f(\sigma_{crit})$ . O método de Newton-Raphson foi sugerido para determinação do estresse crítico. Sabendo disto, foram utilizados os intervalos  $[64,3; 64,4]$  MPa e  $[64,7; 64,8]$  MPa para determinar os estresses críticos dos enrolamentos interno e externo, respectivamente. Adicionalmente, a média dos intervalos foi considerada como estimativa inicial para uso do método de Newton-Raphson.

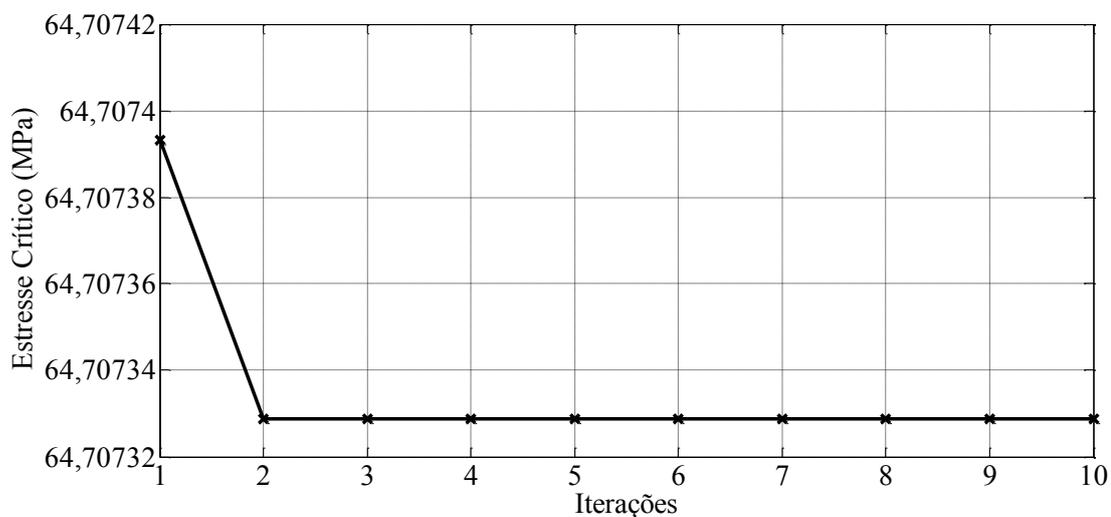
Nas Figuras 34 e 35 estão apresentados os gráficos de convergência dos estresses críticos dos enrolamentos após o uso do método de Newton-Raphson.

Figura 34. Gráfico de convergência do estresse crítico para o enrolamento interno.



Fonte: Autor.

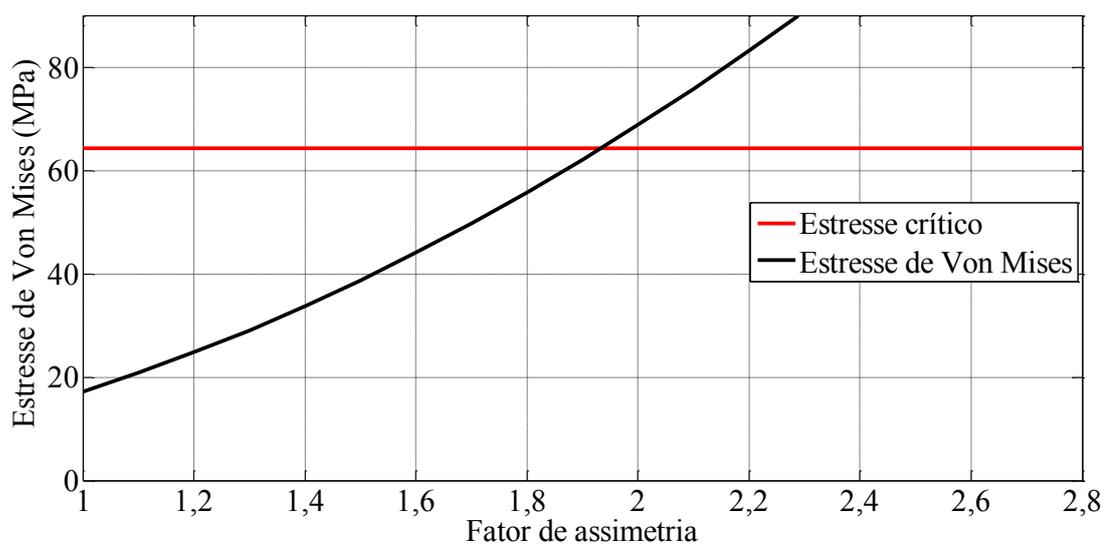
Figura 35. Gráfico de convergência do estresse crítico para o enrolamento externo.



Fonte: Autor.

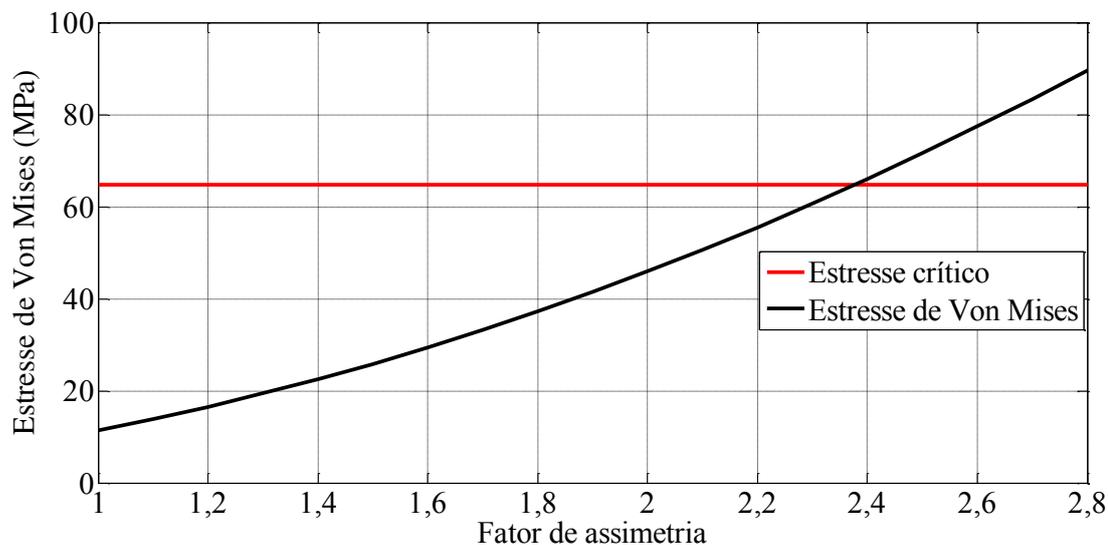
Com os valores dos estresses críticos, o critério de Von Mises foi aplicado e a avaliação da proximidade de falha plástica dos enrolamentos pôde ser realizada. Os resultados obtidos para a avaliação da proximidade de falha plástica dos dois enrolamentos estão apresentados nas Figuras 36 e 37.

Figura 36–Estresse crítico e valores máximos dos estresses de Von Mises no enrolamento interno com relação aos fatores de assimetria.



Fonte: Autor.

Figura 37 -Estresse crítico e valores máximos dos estresses de Von Mises no enrolamento externo com relação aos fatores de assimetria.



Fonte: Autor.

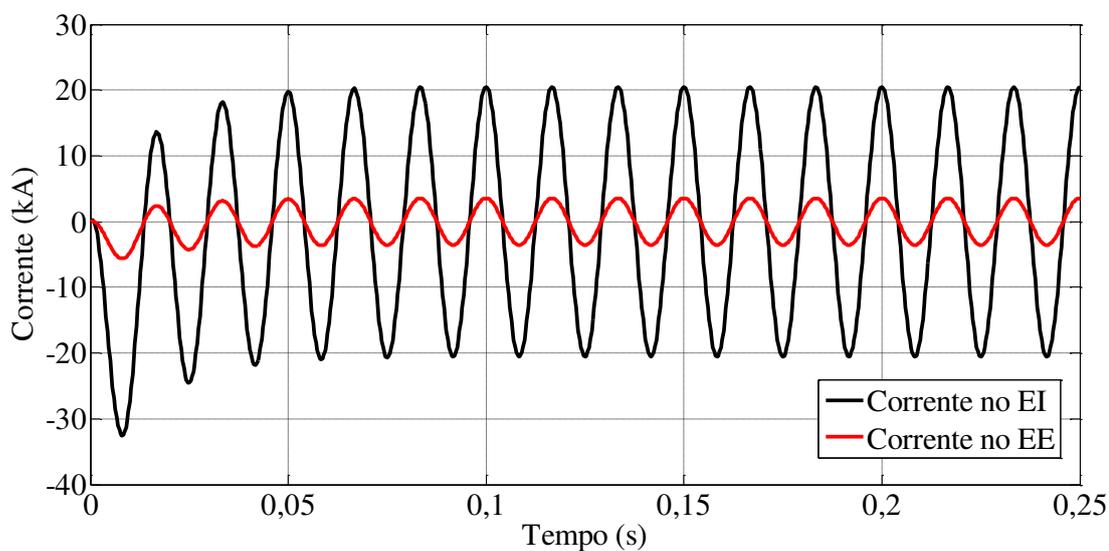
Nas Figuras 36 e 37, é possível observar os pontos de interseção entre curvas vermelhas e pretas. Nestes pontos podem ser localizados os fatores de assimetria críticos, os quais, aplicando o critério de Von Mises, fazem os enrolamentos falharem plasticamente. Nas figuras, os valores dos fatores de assimetria críticos são 1,94 (40 kA) para o enrolamento interno e 2,38 (8,5 kA) para o enrolamento externo.

Além disso, verificou-se que, para o mesmo fator de assimetria, não necessariamente ocorrerá falha plástica em ambos os enrolamentos. De fato, como as características construtivas dos enrolamentos são diferentes, os estresses de Von Mises ocorrentes nos enrolamentos também são diferentes.

Além da avaliação da proximidade de falha plástica dos enrolamentos, também podem ser realizadas análises de falhas por fadiga. As falhas por fadiga são caracterizadas pela ocorrência de estresses de Von Mises, dinâmicos e pulsantes, inferiores aos valores dos estresses críticos dos enrolamentos. Sabendo disto, as análises de falhas por fadiga devem ser realizadas por meio da utilização do critério de fadiga.

Antes de empregar o critério de fadiga, para verificar que os estresses mecânicos nos enrolamentos são pulsantes, simulou-se nos terminais do transformador, o curto circuito representado na Figura 38. Este curto circuito possui um fator de assimetria de 1,6, o qual, pelos resultados apresentados nas Figuras 36 e 37, não faz com que o valor do estresse mecânico seja superior ao valor do estresse crítico dos enrolamentos.

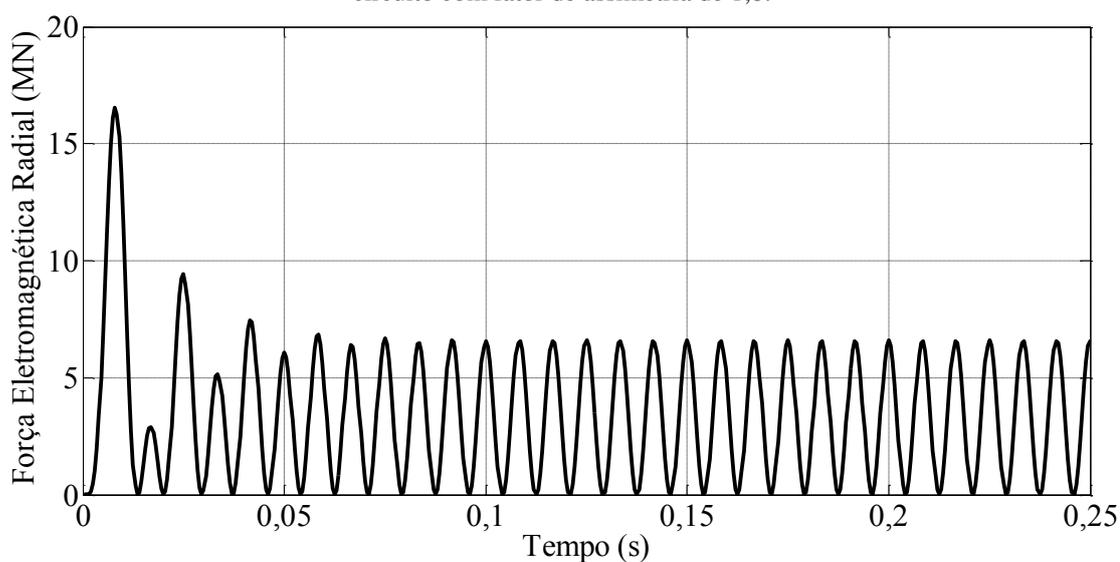
Figura 38 - Corrente de curto circuito nos enrolamentos com fator de assimetria de 1,6.



Fonte: Autor.

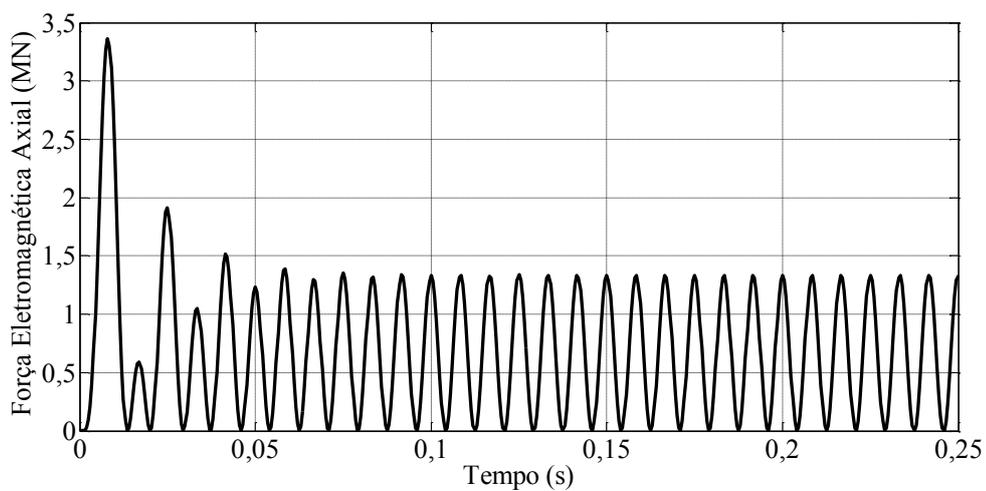
As correntes de curto circuito representadas na Figura 38 estão de acordo com a NBR 5380 (1993), em que a corrente de curto circuito deve ter uma duração de 0,25 s para fins de ensaio. Com as correntes circulando nos enrolamentos, o comportamento dinâmico das forças eletromagnéticas nas direções radial e axial pôde ser observado, o que está ilustrado nas Figuras 39 a 42.

Figura 39 - Força eletromagnética na direção radial no enrolamento interno para a corrente de curto circuito com fator de assimetria de 1,6.



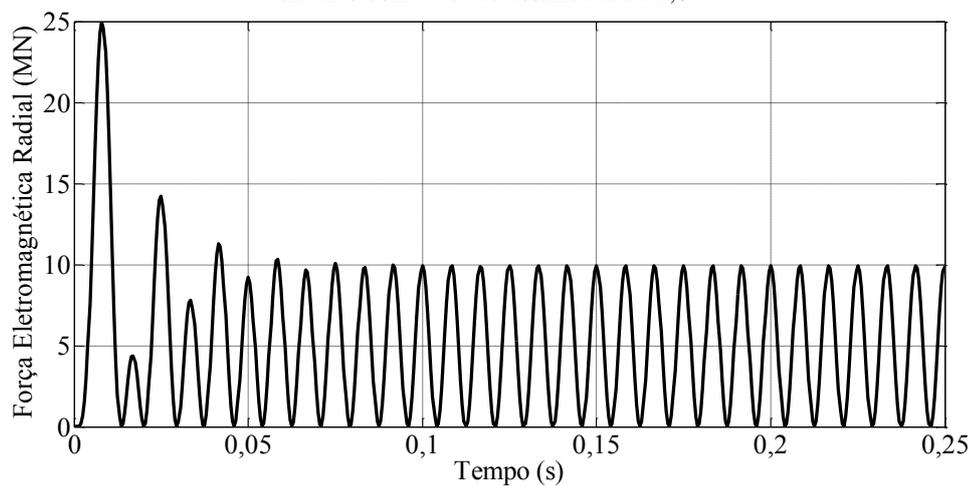
Fonte: Autor.

Figura 40 - Força eletromagnética na direção axial enrolamento interno para a corrente de curto circuito com fator de assimetria de 1,6.



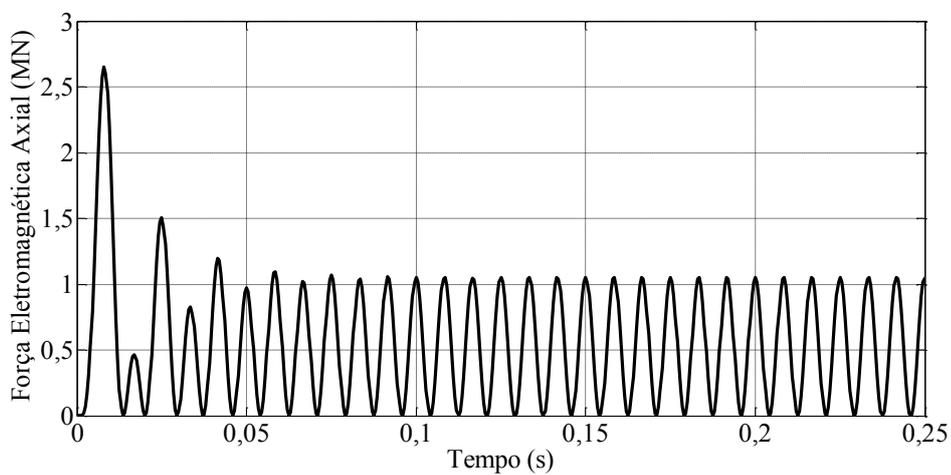
Fonte: Autor.

Figura 41 - Força eletromagnética na direção radial no enrolamento externo para a corrente de curto circuito com fator de assimetria de 1,6.



Fonte: Autor.

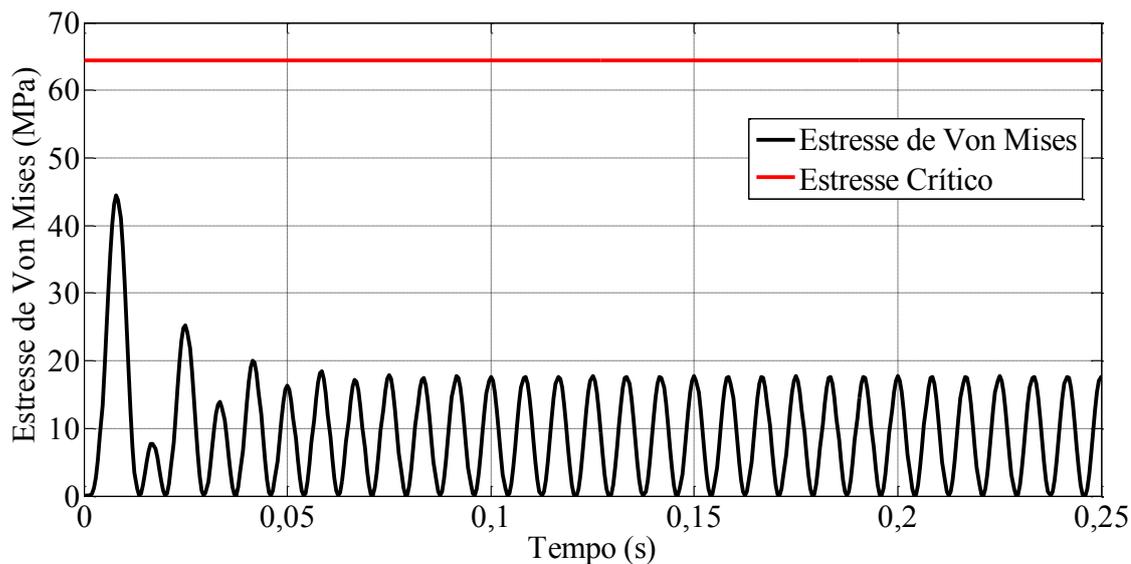
Figura 42 - Força eletromagnética na direção axial no enrolamento externo para a corrente de curto circuito com fator de assimetria de 1,6.



Fonte: Autor.

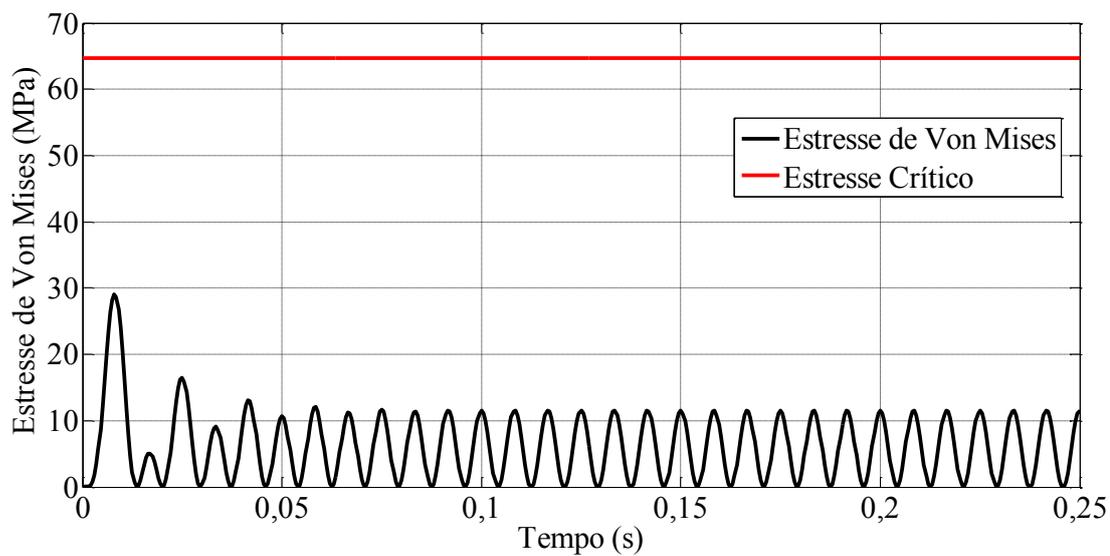
Nas Figuras 39 a 42 são apresentadas as forças eletromagnéticas nos enrolamentos ocasionadas pela circulação das correntes de curto circuito mostradas na Figura 38. Estas forças eletromagnéticas produzem os estresses mecânicos apresentados nas Figuras 43 e 44.

Figura 43 - Estresse de Von Mises no enrolamento interno para a corrente de curto circuito com fator de assimetria de 1,6.



Fonte: Autor.

Figura 44 - Estresse de Von Mises no enrolamento externo para a corrente de curto circuito com fator de assimetria de 1,6.



Fonte: Autor.

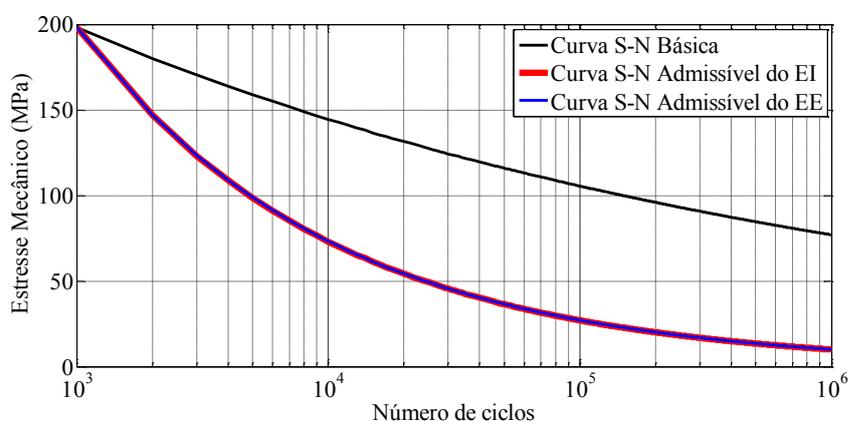
Nas Figuras 43 e 44 observa-se que o estresse mecânico ocasionado pelo curto circuito, apresentado na Figura 38, não causa falha plástica aos enrolamentos, uma vez que os valores dos estresses de Von Mises estão abaixo do valor dos estresses críticos dos enrolamentos. Entretanto, segundo o critério de fadiga, o comportamento dinâmico desses estresses mecânicos pode causar falha por fadiga.

Desta forma, os resultados apresentados nas Figuras 43 e 44 serviram para ilustrar que o critério de fadiga pode ser utilizado e que, conseqüentemente, o nível de danos nos enrolamentos causados por um curto circuito pode ser avaliado. Esta avaliação está apresentada na seção a seguir.

### 5.2.2 AVALIAÇÃO DO NÍVEL DE DANOS CAUSADOS POR FADIGA

Para se avaliar o nível de danos causado por um curto circuito, é necessário, inicialmente, determinar a curva S-N admissível de fadiga dos enrolamentos. Para tanto, foram utilizados os fatores modificadores do limite de fadiga apresentados na Tabela 1, cujos valores considerados foram:  $k_s = 1$ ,  $k_t = 0,75$ ,  $k_f = 0,62$ ,  $k_T = 1$  e  $\eta = 3$ . É importante destacar que foram utilizados os valores que ocasionam uma maior redução do limite de fadiga, o que garantiria maior segurança para os enrolamentos do transformador. Com isso, as curvas S-N admissíveis de fadiga para os dois enrolamentos foram determinadas e elas estão apresentadas na Figura 45, na qual o enrolamento interno é designado por EI e o enrolamento externo por EE.

Figura 45 - Curva S-N básica e admissível para os enrolamentos do transformador de 75 MVA.



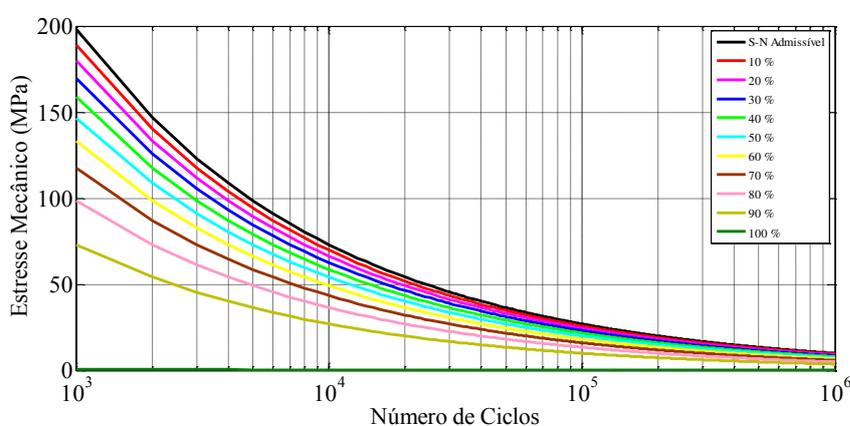
Fonte: Autor.

Ao observar a Figura 45, verifica-se que, após a aplicação dos fatores modificadores do limite de fadiga, ocorreu uma redução significativa no valor do limite

de fadiga (estresse mecânico correspondente a  $10^6$  ciclos), o que, como já foi dito, aumenta a margem de segurança dos enrolamentos.

Quando curtos circuitos ocorrem, a curva S-N admissível de fadiga é reduzida cumulativamente, o que ocasiona a redução da vida útil dos enrolamentos dos transformadores. Para ilustrar a redução da curva S-N admissível de fadiga, o estresse mecânico apresentado na Figura 44 foi simulado diversas vezes nos terminais do enrolamento interno, e o resultado está apresentado na Figura 46.

Figura 46 - Redução cumulativa da curva S-N admissível de fadiga do enrolamento interno quando da aplicação repetitiva de um curto circuito.



Fonte: Autor.

Ao observar a Figura 46, verifica-se que a aplicação repetitiva de um determinado curto circuito, que não ocasiona falha plástica nos enrolamentos, pode ocasionar, por fadiga, deterioração total do transformador. A deterioração é caracterizada pela redução cumulativa da curva S-N admissível de fadiga (curva preta), em que, quando o número de aplicações do curto circuito cresce indefinidamente, a redução percentual da curva tende a 100% (curva verde escuro) e, conseqüentemente, a área abaixo da curva S-N admissível de fadiga tende a zero.

Para melhor entender a ilustração apresentada na Figura 12, pode ser considerada a seguinte análise: na curva S-N admissível de fadiga (curva preta), se um curto circuito, que provoca um estresse mecânico de 200 MPa, permanecer por mais de  $1 \times 10^3$  ciclos, o enrolamento falhará por fadiga. Por outro lado, se o número de ciclos do curto circuito com as mesmas características for maior que  $10 \times 10^3$ , o estresse mecânico necessário para causar falha por fadiga reduz para 70 MPa.

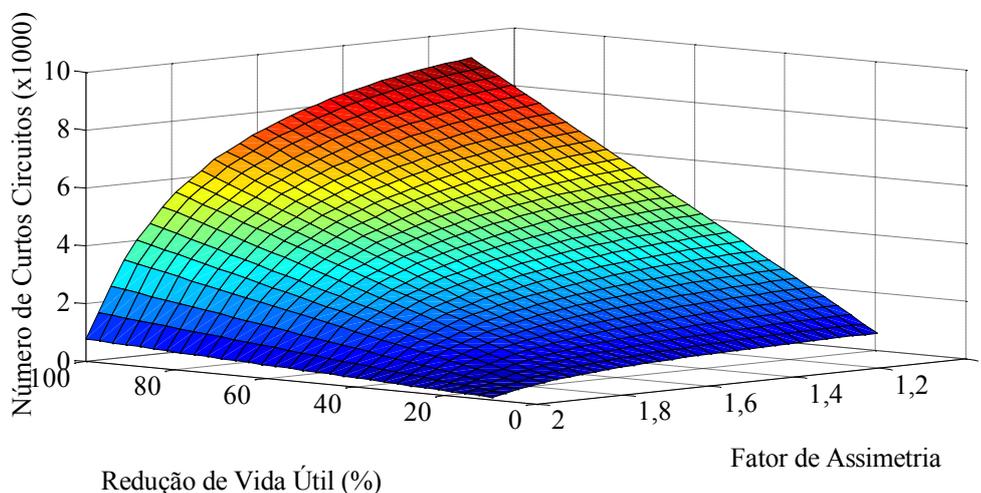
Assumindo que o enrolamento sofreu uma redução percentual de vida útil de 50% (curva azul turquesa) devido aos danos cumulativos provocados pela ocorrência de curtos circuitos, se o mesmo estresse mecânico de 70 MPa permanecer, agora, por mais de

$5 \times 10^3$  ciclos, o enrolamento falhará por fadiga. Ao supor que os danos cumulativos provocados pela ocorrência de curtos circuitos foram suficientes para reduzir a vida útil do enrolamento em 90% (curva ouro), o mesmo estresse mecânico de 70 MPa provoca, agora, falha por fadiga para um número de ciclos superior a  $1 \times 10^3$  ciclos.

Portanto, pode-se dizer que, para um valor fixo de estresse mecânico, o crescimento da redução percentual de vida útil causa a diminuição do número de ciclos suportáveis à fadiga. Ademais, para o mesmo valor de número de ciclos, o crescimento da redução percentual de vida útil ocasiona o decréscimo do estresse mecânico necessário para ocorrência da falha por fadiga. Assim, até o momento foi apresentada a correlação entre os estresses mecânicos e o número de ciclos suportáveis até a ocorrência da fadiga.

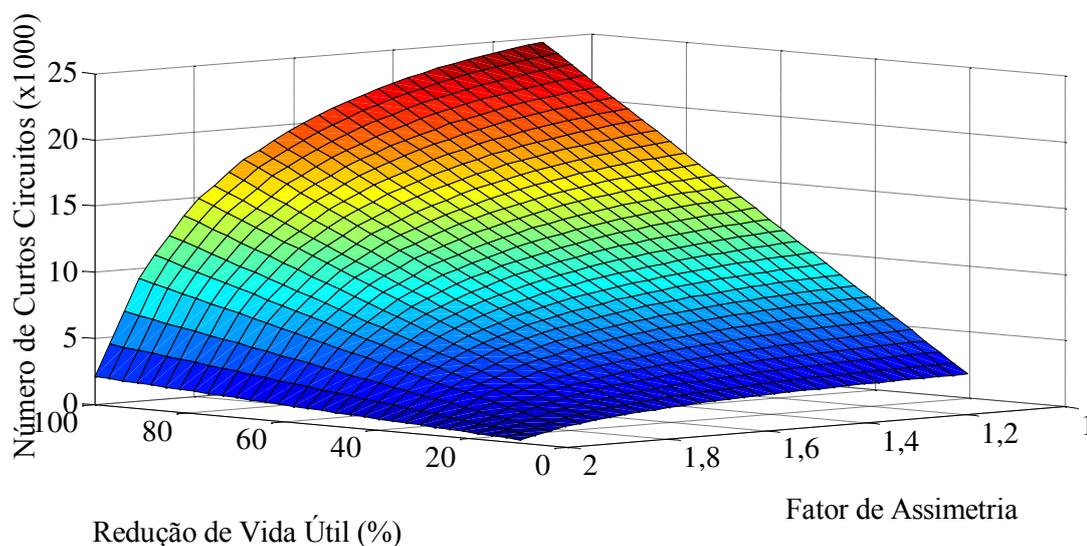
A partir das informações apresentadas, foi ilustrada a correlação entre os estresses mecânicos e o número de ciclos suportáveis até a falha por fadiga. Entretanto, o número de curtos circuitos que ocasiona uma determinada redução percentual de tempo de vida útil não foi apresentado. Sabendo disto, para a redução de um determinado percentual de tempo de vida útil, um certo número de curtos circuitos deve ser simulado nos terminais dos enrolamentos. Com isso, ao empregar a regra de Miner e a Expressão (38), o número de curtos circuitos suportáveis, para uma determinada redução percentual da curva S-N admissível de fadiga, foi estimado como função da redução percentual de tempo de vida útil e também do fator de assimetria do curto circuito. Os resultados foram obtidos para os dois enrolamentos por meio da simulação de curtos circuitos, inicialmente, com tempo de duração de 0,25 s. Os resultados obtidos estão apresentados nas Figuras 47 e 48.

Figura 47 -Superfície que relaciona o número de curtos circuitos, redução de vida útil e fatores de assimetria de curtos circuitos com tempo de duração de 0,25 s para o enrolamento interno.



Fonte: Autor.

Figura 48 - Superfície que relaciona o número de curtos circuitos, redução de vida útil e fatores de assimetria de curtos circuitos com tempo de duração de 0,25 s para o enrolamento externo.



Fonte: Autor.

Ao se observar as Figuras 47 e 48, verifica-se que as superfícies obtidas para os enrolamentos possuem o mesmo comportamento. O comportamento diz respeito às características a seguir:

- À medida que o valor do fator de assimetria aumenta, menor é o número de curtos circuitos suportáveis para uma determinada redução percentual de vida útil;
- Quanto mais curtos circuitos são aplicados, mais a vida útil dos enrolamentos é reduzida, que é um resultado esperado.

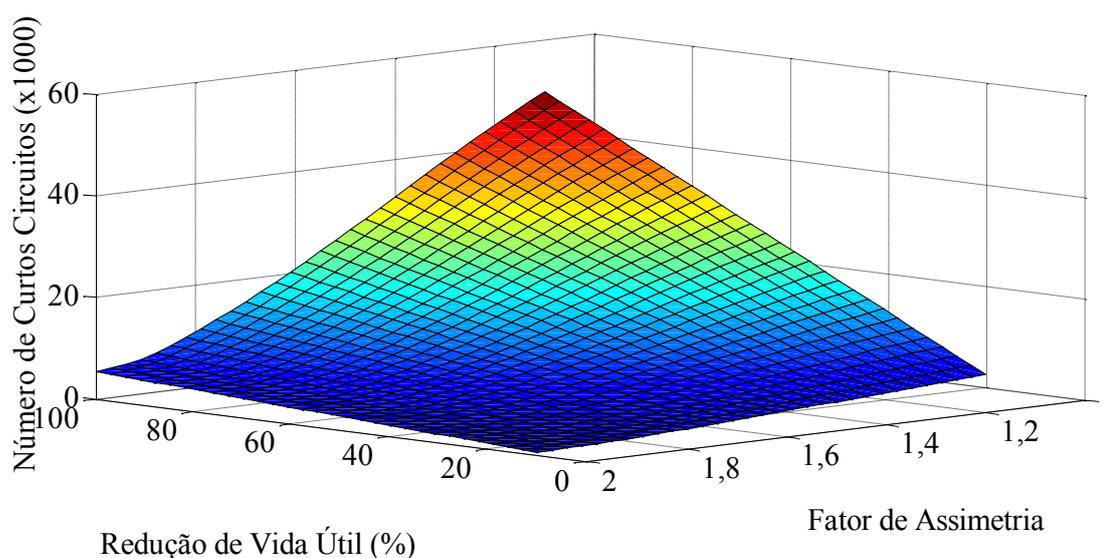
Nas figuras, constatou-se que as superfícies sobem devido à necessidade de um maior número de curtos circuitos para reduzir um maior percentual de tempo de vida útil do enrolamento. Por outro lado, as superfícies decrescem porque o aumento do fator de assimetria ocasiona o aumento do valor do estresse mecânico nos enrolamentos, e com isso, são necessários menos curtos circuitos para reduzir um determinado percentual de vida útil do enrolamento.

Destaca-se, ainda, que para o mesmo fator de assimetria e redução percentual de vida útil, o número de curtos circuitos suportáveis é menor no enrolamento interno comparado ao enrolamento externo. Isto ocorre devido aos estresses mecânicos serem maiores no enrolamento interno comparados aos do enrolamento externo, tal como pode ser observado nas Figuras 36 e 37.

Além disso, observando a Figura 36, pode-se dizer que, segundo o critério de Von Mises, o enrolamento falha plasticamente quando a superfície atinge o valor do fator de assimetria crítico (1,94). Entretanto, ainda é necessário um determinado número de curtos circuitos para fazer com que o enrolamento falhe por fadiga. Isto pode ser constatado sabendo que a falha plástica ocasiona a deformação plástica no material e a falha por fadiga ocasiona a ruptura do material, ou seja, quando o fator de assimetria de 1,94 é alcançado, a falha plástica é alcançada, mas a ruptura, por fadiga, ainda não.

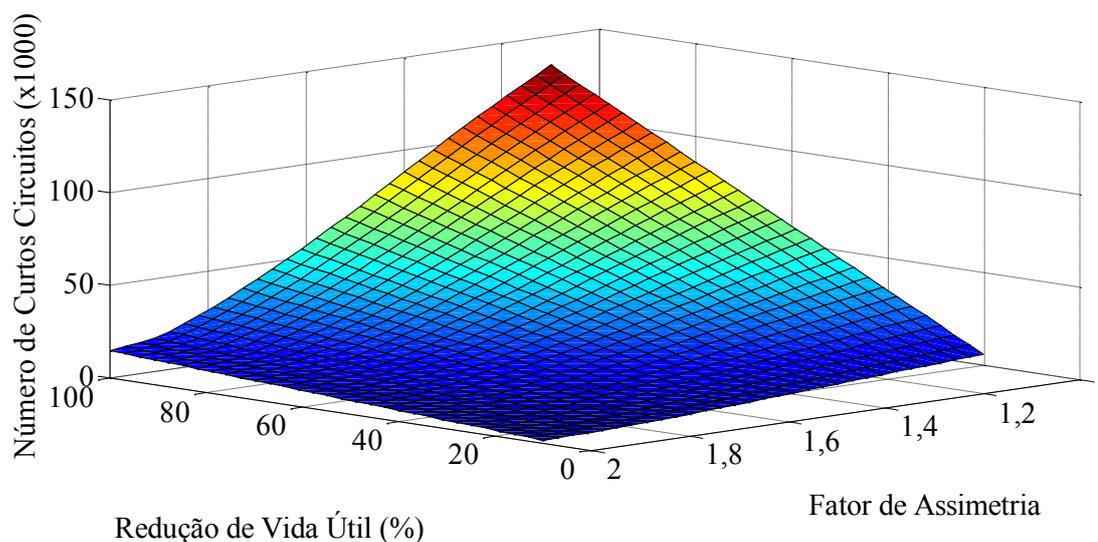
Adicionalmente, agora analisando segundo o critério de fadiga, tem-se que o número de ciclos e a amplitude dos estresses mecânicos influenciam no número de curtos circuitos, os quais devem ser simulados para a redução de um determinado percentual da curva S-N admissível de fadiga para os enrolamentos. Com isso, os curtos circuitos considerados, até então, foram de 0,25 s, o qual está de acordo com a NBR 5380 (1993). Entretanto, o tempo máximo de interrupção de um curto circuito para um disjuntor no sistema é de 0,05 s (SIEMENS, 1988). Desta forma, os curtos circuitos com tempo de duração de 0,05 s influenciam no limite de número de curtos circuitos que devem ser simulados para reduzir um determinado percentual de vida útil dos enrolamentos, uma vez que o tempo de duração do curto circuito foi alterado. Os resultados para os curtos circuitos com tempo de duração de 0,05 s estão apresentados nas Figuras 49 e 50.

Figura 49 - Superfície que relaciona o número de curtos circuitos, redução de vida útil e fatores de assimetria de curtos circuitos com tempo de permanência de 0,05 s para o enrolamento interno.



Fonte: Autor.

Figura 50 - Superfície que relaciona o número de curtos circuitos, redução de vida útil e fatores de assimetria de curtos circuitos com tempo de permanência de 0,05 s para o enrolamento externo.



Fonte: Autor.

Ao se observar as Figuras 49 e 50 verifica-se que, para curtos circuitos com tempo de duração de 0,05 s, o número de curtos circuitos suportáveis aumenta. Este comportamento deve-se às seguintes razões:

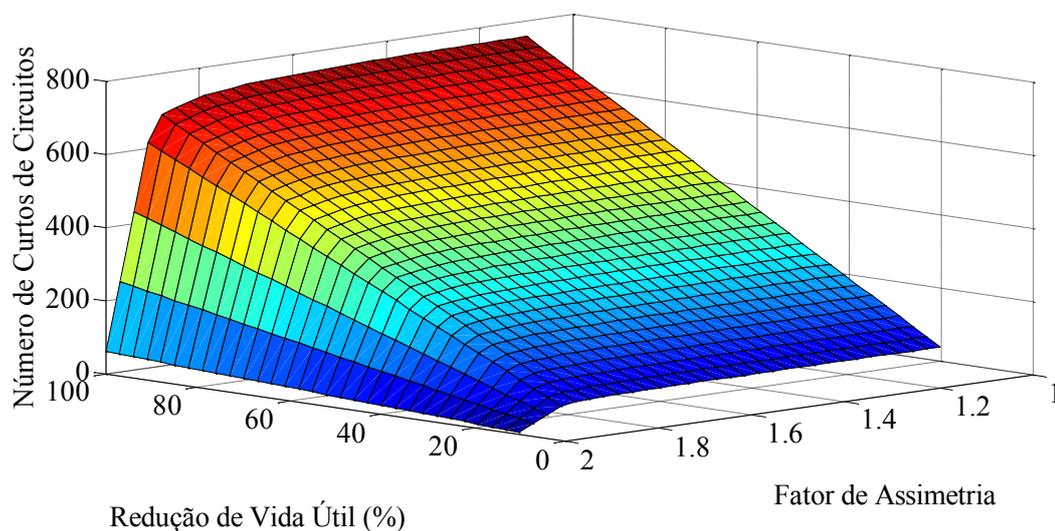
- Quanto maior o tempo de duração do curto circuito, maior é o dano cumulativo ocasionado aos enrolamentos;
- O aumento do tempo de duração do curto circuito ocasiona uma redução do número de curtos circuitos necessários para redução de um determinado percentual de vida útil e vice-versa.

Adicionalmente, verificou-se que o comportamento das superfícies, apresentadas nas Figuras 49 e 50, é similar ao apresentado nas Figuras 47 e 48. As diferenças no formato das superfícies são ocasionadas devido ao tempo de duração do curto circuito ser diferente. Como o regime transitório é predominante nos curtos circuitos de tempo de duração de 0,05 s, e em regime transitório, os valores de estresses mecânicos variam de forma mais intensa, evidencia-se que a redução do número de curtos circuitos é mais acentuada nos curtos circuitos com tempo de duração de 0,05 s comparado aos de tempo de duração de 0,25 s, conforme apresentado nas Figuras 49 e 50.

Com o intuito de confirmar a influência dos tempos de duração dos curtos circuitos, também foram simulados curtos circuitos com tempos de duração de 3 s. Este tempo de duração caracteriza-se como o pior caso encontrado na literatura, e assim como

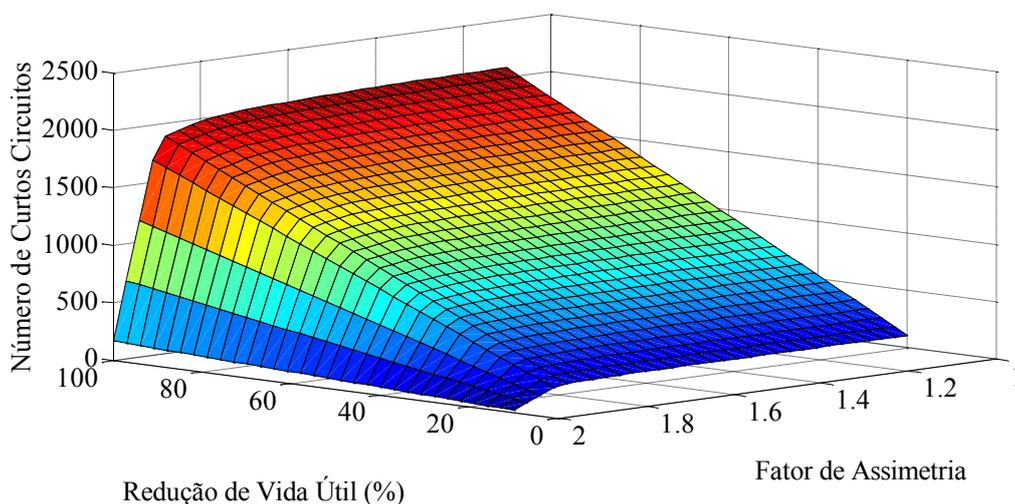
o tempo de 0,25 s, ele é empregado para fins de ensaio. As superfícies para os curtos circuitos com tempos de duração de 3 s estão apresentadas nas Figuras 51 e 52.

Figura 51. Superfície que relaciona o número de curtos circuitos, redução de vida útil e fatores de assimetria de curtos circuitos com tempo de permanência de 3 s para o enrolamento interno.



Fonte: Autor.

Figura 52. Superfície que relaciona o número de curtos circuitos, redução de vida útil e fatores de assimetria de curtos circuitos com tempo de permanência de 3 s para o enrolamento externo.



Fonte: Autor.

Ao observar as Figuras 51 e 52, confirmou-se a influência dos tempos de duração dos curtos circuitos no número de curtos circuitos suportáveis pelos enrolamentos. Pelos resultados, verificou-se uma redução significativa do número de curtos circuitos suportáveis com o aumento do tempo de duração do curto circuito. Além disso, pode ser observado que a superfície decresce acentuadamente quando o valor do fator de

assimetria ultrapassa o do fator de assimetria crítico. Isto acontece porque, para os valores de fator de assimetria superiores ao fator de assimetria crítico, os valores de estresse mecânicos são significativamente elevados. Além disso, o tempo de duração dos estresses tende a se aproximar de 3 s, o que ocasiona uma redução ainda mais acentuada no valor do número de curtos circuitos suportáveis.

Por meio dos resultados apresentados, verificou-se que a amplitude e o tempo de duração dos estresses mecânicos são fatores que influenciam significativamente no número de curtos circuitos suportáveis pelos enrolamentos. Para avaliar se as verificações feitas para o transformador de 75 MVA poderiam ser realizadas em um outro transformador, a nova metodologia foi aplicada em um transformador de 100 MVA. Os resultados neste transformador estão apresentados na seção a seguir.

### 5.3 AVALIAÇÃO DOS CRITÉRIOS DE FALHA MECÂNICA PARA O TRANSFORMADOR DE 100 MVA

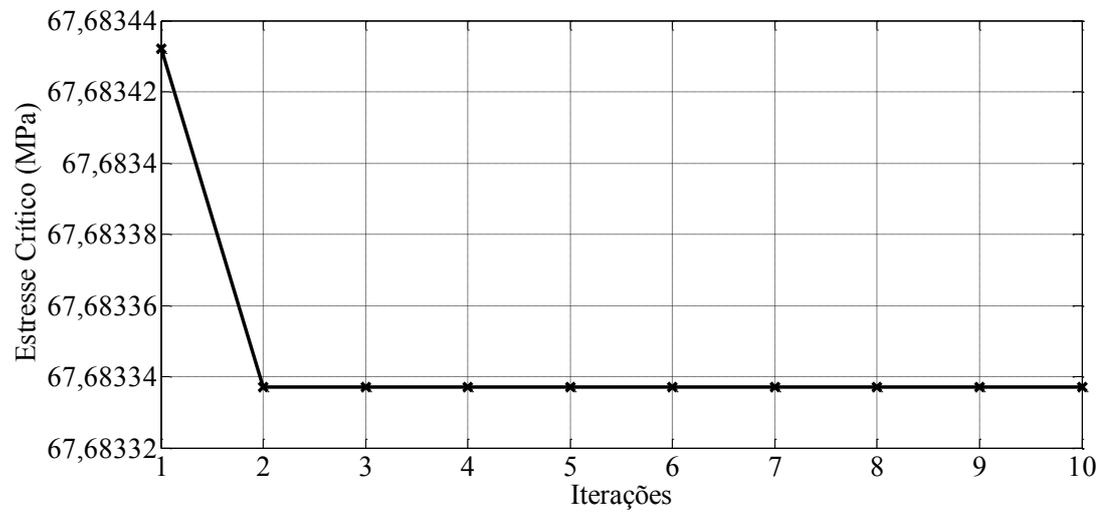
Para o transformador de 100 MVA, que está caracterizado na Tabela 3, curtos circuitos trifásicos foram simulados. Os resultados correspondentes à proximidade de falha plástica dos enrolamentos e à utilização do critério de fadiga estão apresentados nas duas subseções a seguir.

#### 5.3.1 AVALIAÇÃO DA PROXIMIDADE DE FALHA PLÁSTICA DOS ENROLAMENTOS

A avaliação da proximidade de falha plástica dos enrolamentos do transformador de 100 MVA foi realizada a partir da determinação dos estresses críticos dos enrolamentos. Os estresses críticos foram determinados por meio do uso do método de Newton-Raphson na Expressão (41). Sabendo disto, os intervalos utilizados foram  $[67,6; 67,7]$  MPa e  $[64,9; 65,0]$  MPa para a determinação dos estresses críticos dos enrolamentos interno e externo, respectivamente. A média dos intervalos foi considerada como estimativa inicial para aplicação do método de Newton-Raphson.

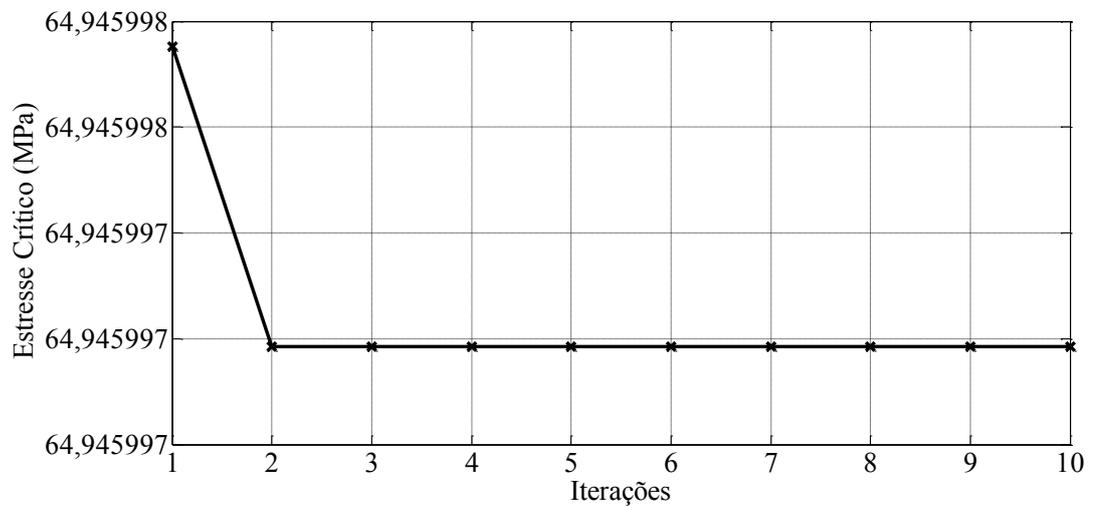
Nas Figuras 53 e 54 estão apresentados os gráficos de convergência dos estresses críticos dos enrolamentos após o uso do método de Newton-Raphson.

Figura 53–Gráfico de convergência do estresse crítico para o enrolamento interno.



Fonte: Autor.

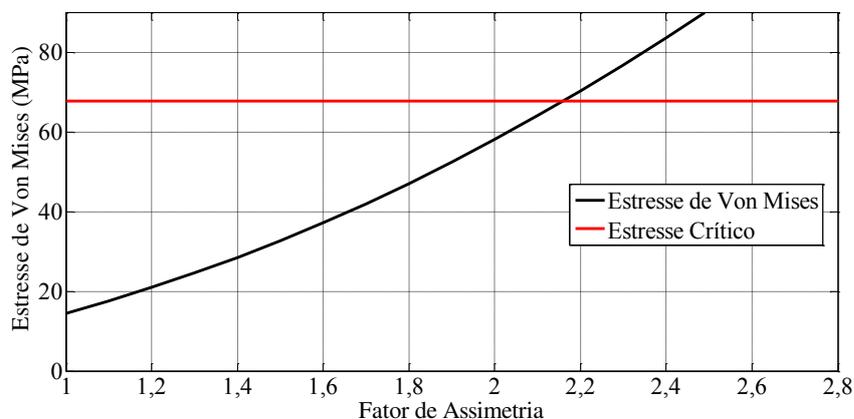
Figura 54 - Gráfico de convergência do estresse crítico para o enrolamento externo.



Fonte: Autor.

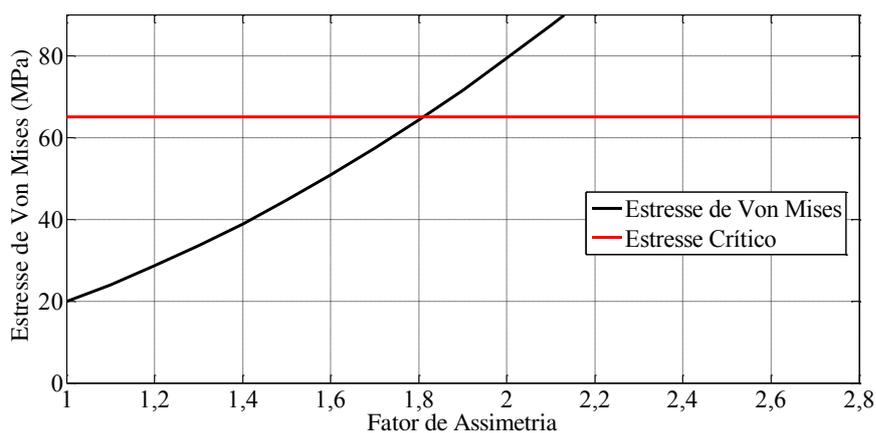
Com os valores dos estresses críticos, foram colocados, em um mesmo gráfico, os estresses críticos dos enrolamentos e os valores máximos dos estresses de Von Mises com relação aos fatores de assimetria. Os resultados obtidos estão apresentados nas Figuras 55 e 56.

Figura 55 –Estresse crítico e valores máximos dos estresses de Von Mises no enrolamento interno com relação aos fatores de assimetria.



Fonte: Autor.

Figura 56 –Estresse crítico e valores máximos dos estresses de Von Mises no enrolamento interno com relação aos fatores de assimetria.



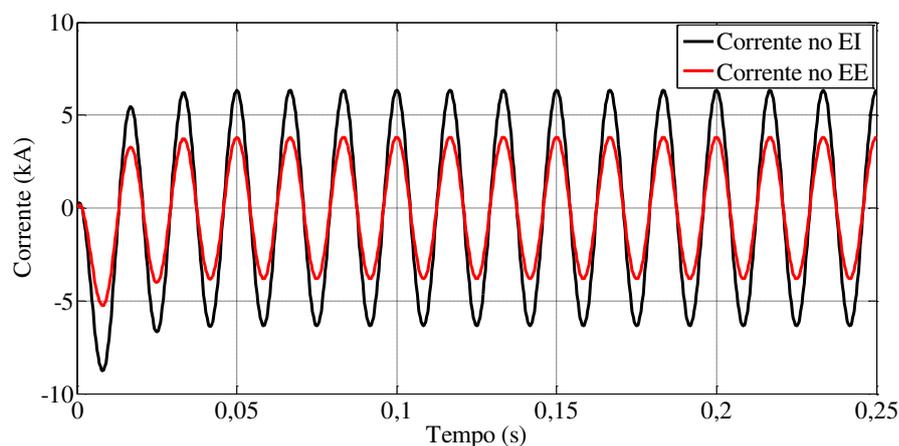
Fonte: Autor.

Ao se observar as Figuras 55 e 56, constatou-se que ocorre o mesmo comportamento indicado nas Figuras 36 e 37, correspondentes ao transformador de 75 MVA. Entretanto, como são transformadores diferentes, os fatores de assimetria que causam estresses de Von Mises superiores aos estresses críticos dos enrolamentos também são diferentes.

Após a aplicação do critério de Von Mises, foram encontrados os fatores de assimetria críticos. Os fatores encontrados foram 1,8 (6,8 kA) para o enrolamento externo, e 2,18 (13,8 kA) para o enrolamento interno. As correntes entre parênteses são alcançadas multiplicando o valor da componente simétrica da corrente de curto circuito (3,8 kA para o enrolamento externo e 6,3 kA para o enrolamento interno) pelos fatores de assimetria com valores de 1,8 e 2,18.

Conforme também realizado para o transformador de 75 MVA, um curto circuito com fator de assimetria que causa estresses mecânicos na zona elástica foi simulado nos terminais dos enrolamentos. O fator de assimetria escolhido foi 1,4 e as correntes de curto circuito simuladas estão apresentadas na Figura 57.

Figura 57 - Corrente de curto circuito nos enrolamentos com fator de assimetria de 1,4.

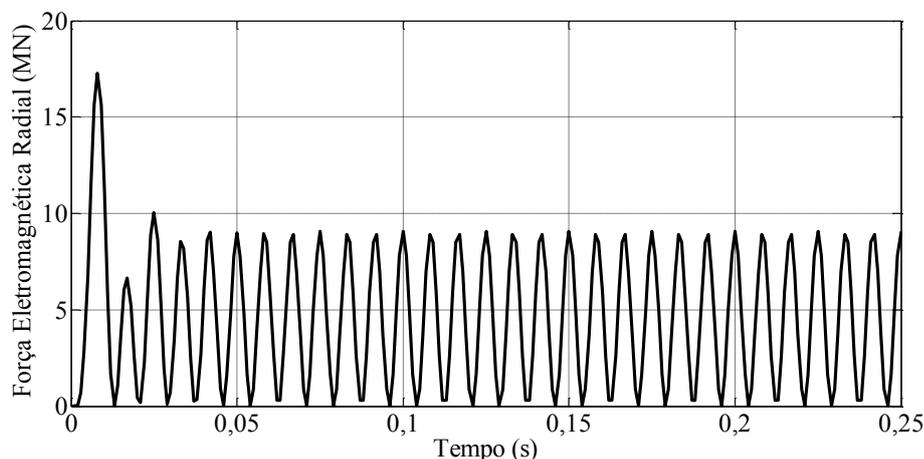


Fonte: Autor.

Na literatura é apresentado que a análise dos resultados com relação aos esforços eletromecânicos nos enrolamentos de transformadores trifásicos é feita no instante em que a corrente é máxima na fase central, ou seja, na fase B (AZEVEDO, 2007; ROSENTINO, 2010). Por isto, na Figura 57 são apresentadas apenas as correntes de curto circuito na fase central. Sabendo disto, as análises dos resultados obtidos para o transformador de 100 MVA foram realizadas tomando como referência a fase B.

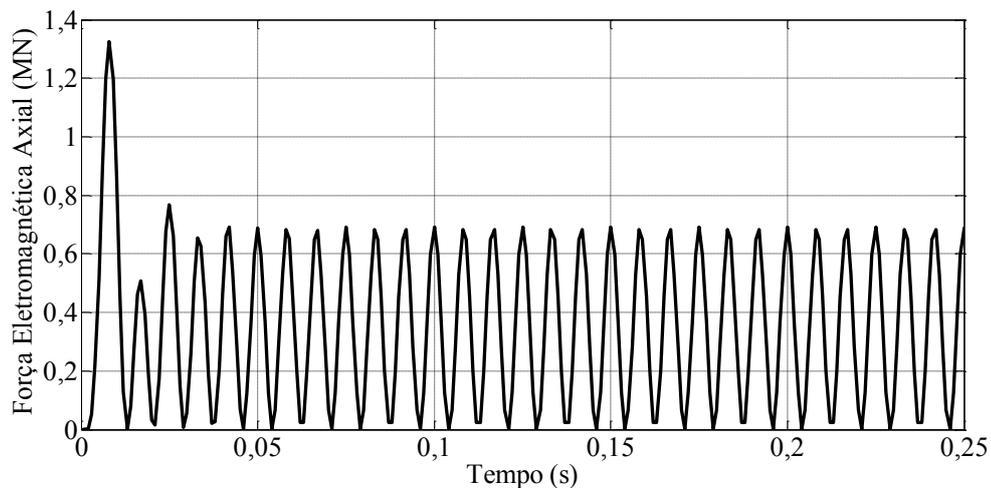
Com as correntes de curto circuito circulantes pelos enrolamentos, foram determinadas as forças eletromagnéticas. As forças geradas pelas correntes de curto circuito apresentadas na Figura 57 estão mostradas nas Figuras 58 a 61.

Figura 58 - Força eletromagnética na direção radial no enrolamento interno.



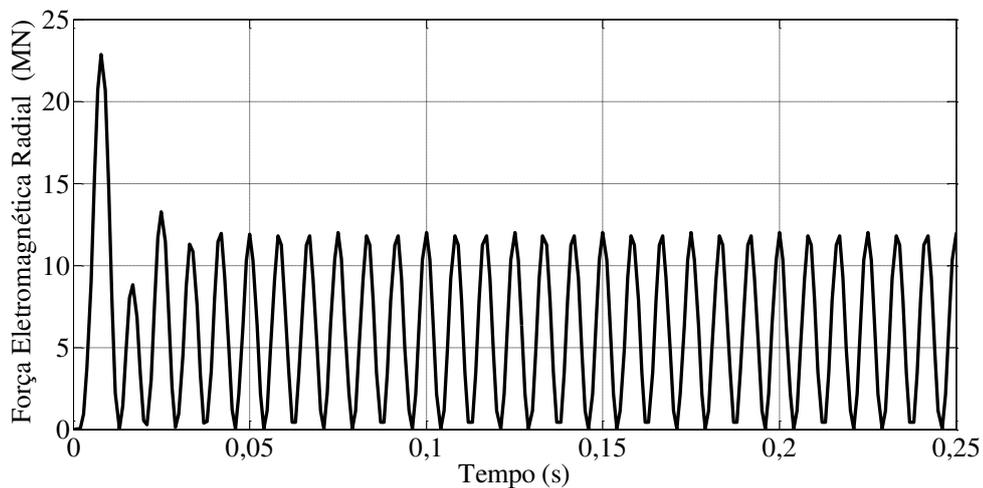
Fonte: Autor.

Figura 59 - Força eletromagnética na direção axial no enrolamento interno.



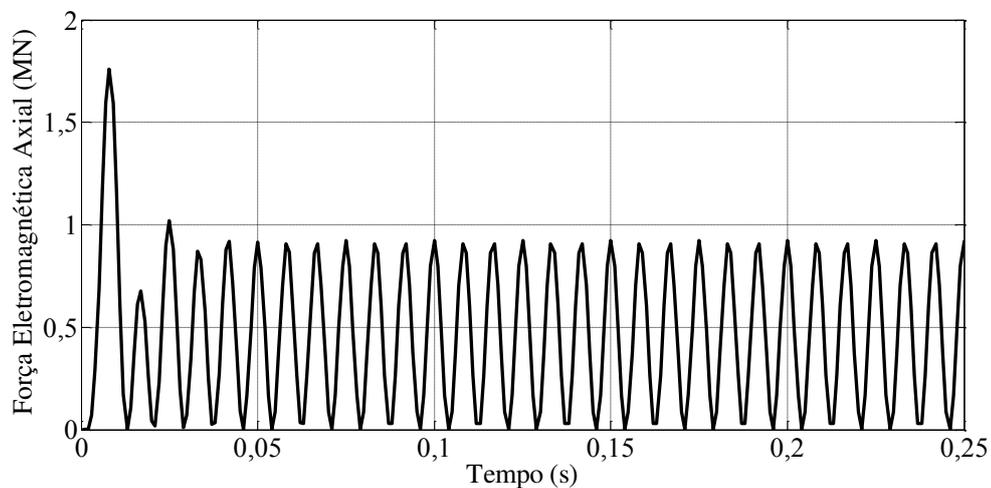
Fonte: Autor.

Figura 60 - Força eletromagnética na direção radial no enrolamento externo.



Fonte: Autor.

Figura 61 - Força eletromagnética na direção axial no enrolamento externo.



Fonte: Autor.

As forças eletromagnéticas apresentadas nas Figuras 58 a 61 geram estresses mecânicos nos enrolamentos que não provocam falha plástica. Isto pode ser observado nas Figuras 62 e 63.

Figura 62 - Estresse de Von Mises no enrolamento interno para uma corrente de curto circuito com fator de assimetria de 1,4.

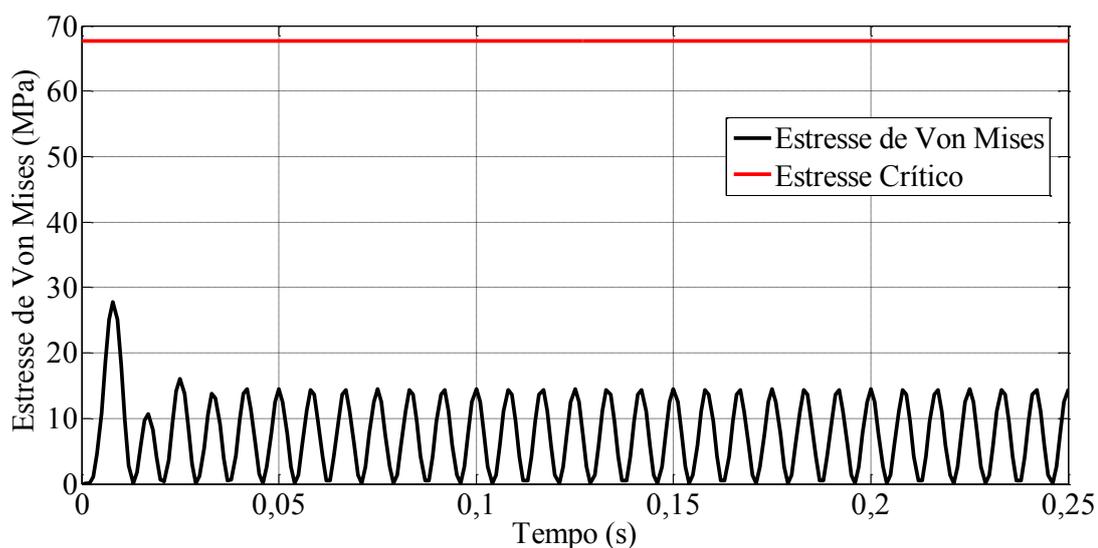
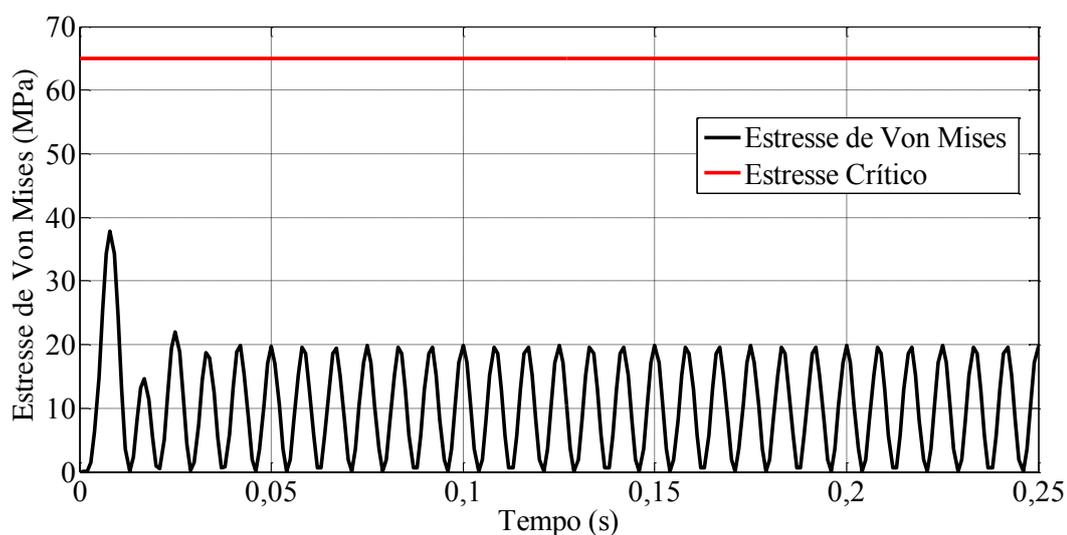


Figura 63 - Estresse de Von Mises no enrolamento externo para uma corrente de curto circuito com fator de assimetria de 1,4.



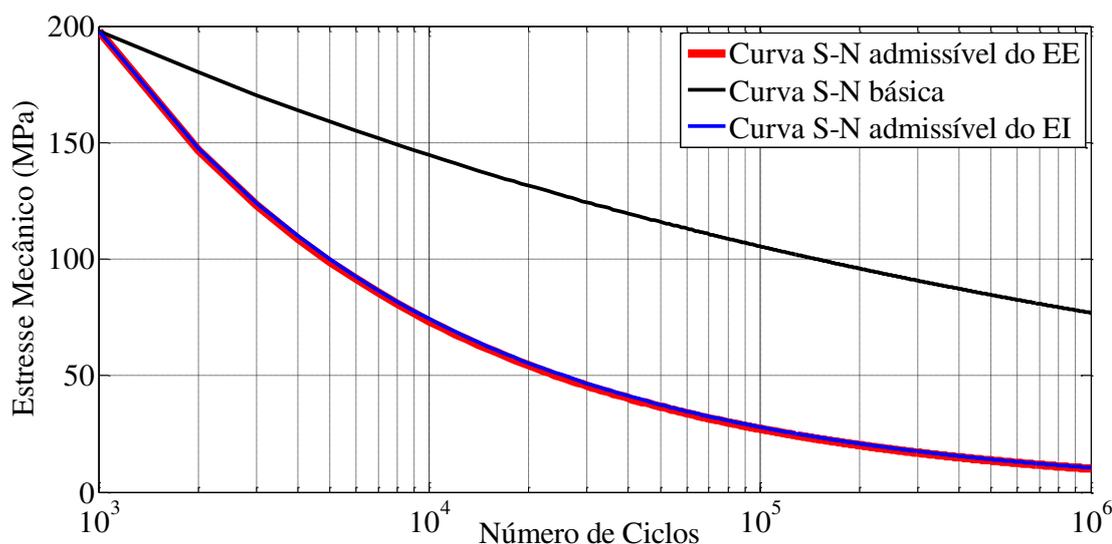
A partir dos resultados apresentados, constata-se que a metodologia para avaliação da proximidade de falha plástica, empregada para o transformador de 75 MVA, pode ser utilizada para o transformador de 100 MVA. Adicionalmente, o critério de fadiga pode

ser empregado para os estresses de Von Mises que não ocasionam falha plástica nos enrolamentos. Sabendo disto, a seguir é apresentada a utilização do critério de fadiga para o transformador de 100 MVA.

### 5.3.2 AVALIAÇÃO DO NÍVEL DE DANOS CAUSADOS POR FADIGA

As curvas S-N admissíveis de fadiga para os enrolamentos do transformador de 100 MVA foram determinadas. Os mesmos fatores modificadores empregados para o transformador de 75 MVA foram utilizados para o transformador de 100 MVA. As curvas estão apresentadas na Figura 64.

Figura 64 - Curva S-N básica e admissível para os enrolamentos de T2.

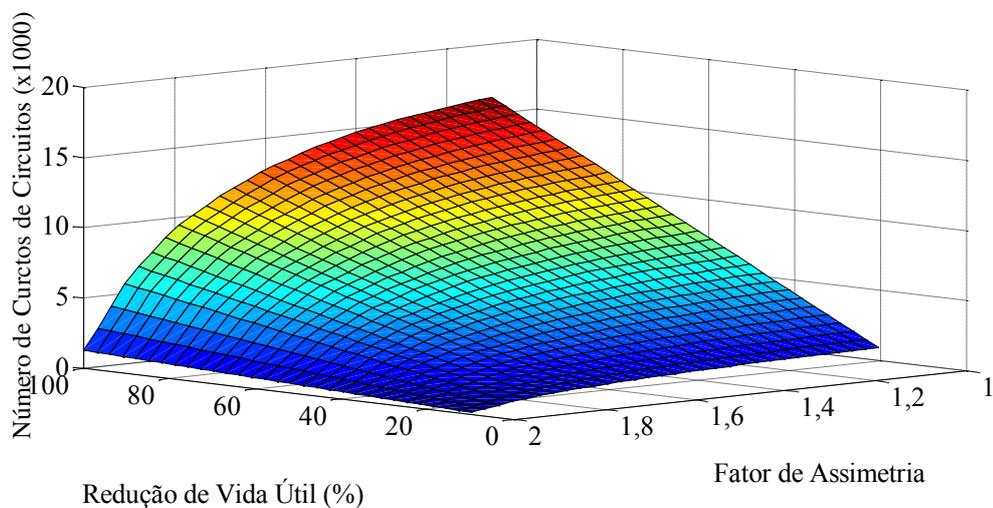


Fonte: Autor.

A partir das curvas S-N admissíveis de fadiga dos enrolamentos, podem ser determinadas as superfícies que correlacionam o número de curtos circuitos suportáveis, os fatores de assimetria e a redução percentual de tempo de vida útil dos enrolamentos. As superfícies também foram determinadas para curtos circuitos com tempos de duração de 0,25 s, 0,05 s e 3 s.

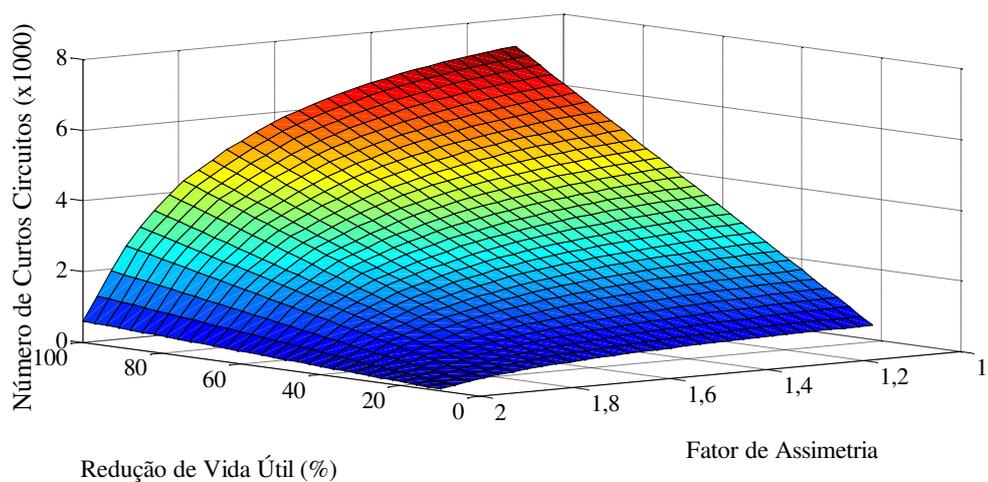
Os resultados obtidos com a aplicação de curtos circuitos com tempos de duração de 0,25 s estão apresentados nas Figuras 65 e 66.

Figura 65 - Superfície que relaciona o número de curtos circuitos, redução de vida útil e fatores de assimetria de curtos circuitos com tempo de permanência de 0,25 s para o enrolamento interno.



Fonte: Autor.

Figura 66 - Superfície que relaciona o número de curtos circuitos, redução de vida útil e fatores de assimetria de curtos circuitos com tempo de permanência de 0,25 s para o enrolamento externo.



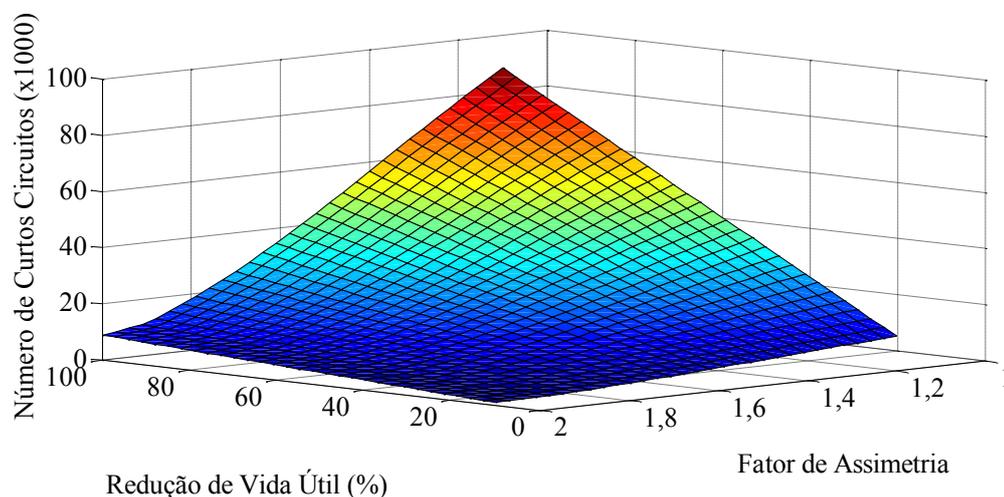
Fonte: Autor.

Ao observar as Figuras 65 e 66, verificam-se os mesmos comportamentos apresentados para o transformador de 75 MVA, em que:

- O aumento do fator de assimetria provoca redução do número de curtos circuitos suportáveis;
- O aumento da redução percentual de tempo de vida útil provoca aumento no número de curtos circuitos.

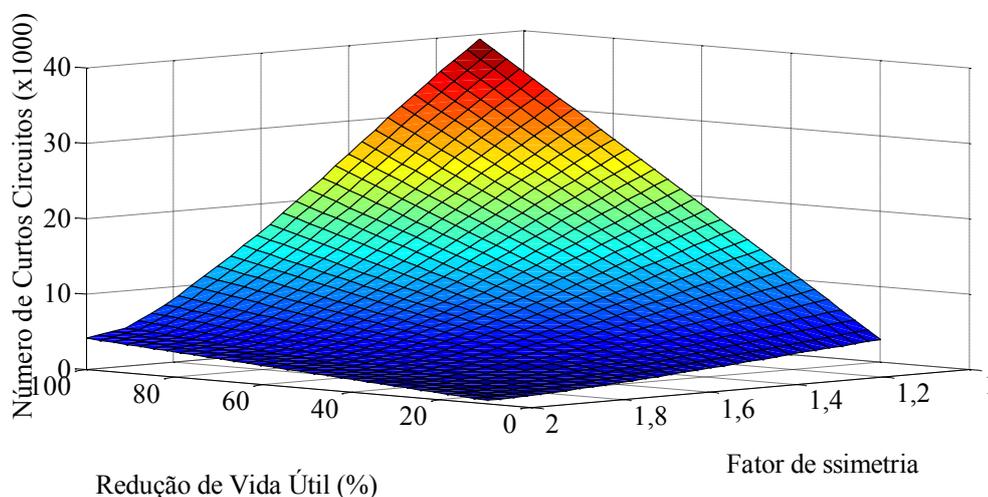
Adicionalmente, os resultados para os curtos circuitos com tempo de duração de 0,05 s estão apresentados nas Figuras 67 e 68.

Figura 67 - Superfície que relaciona o número de curtos circuitos, redução de vida útil e fatores de assimetria de curtos circuitos com tempo de permanência de 0,05 s para o enrolamento interno.



Fonte: Autor.

Figura 68 - Superfície que relaciona o número de curtos circuitos, redução de vida útil e fatores de assimetria de curtos circuitos com tempo de permanência de 0,05 s para o enrolamento externo.



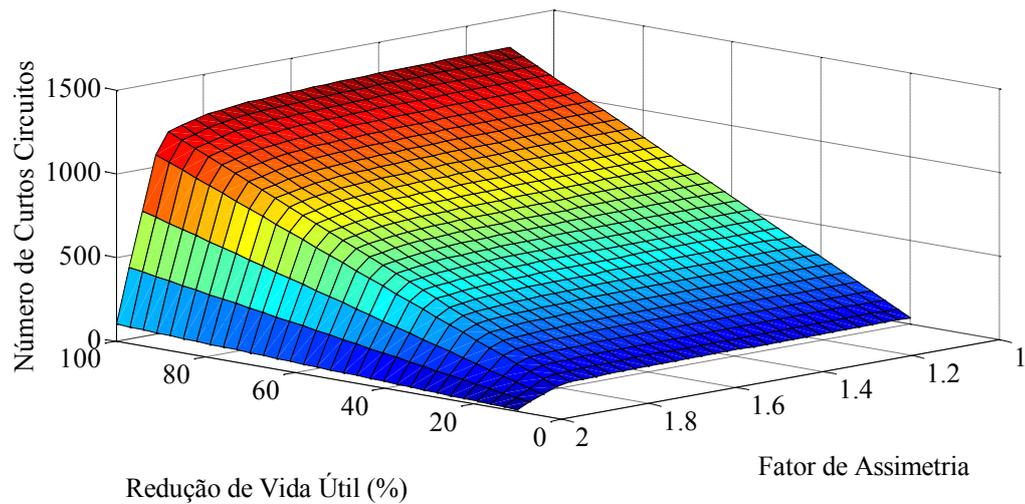
Fonte: Autor.

Pelos resultados apresentados, a diminuição do tempo de duração dos curtos circuitos aumenta o número de curtos circuitos que devem ser simulados para ocasionar determinada redução percentual do tempo de vida útil. Este é um dos resultados que também foram verificados para o transformador de 75 MVA.

Além disso, verifica-se, novamente, que o decréscimo das superfícies com tempos de duração de 0,05 s são mais acentuados comparados àqueles com tempos de duração de 0,25 s.

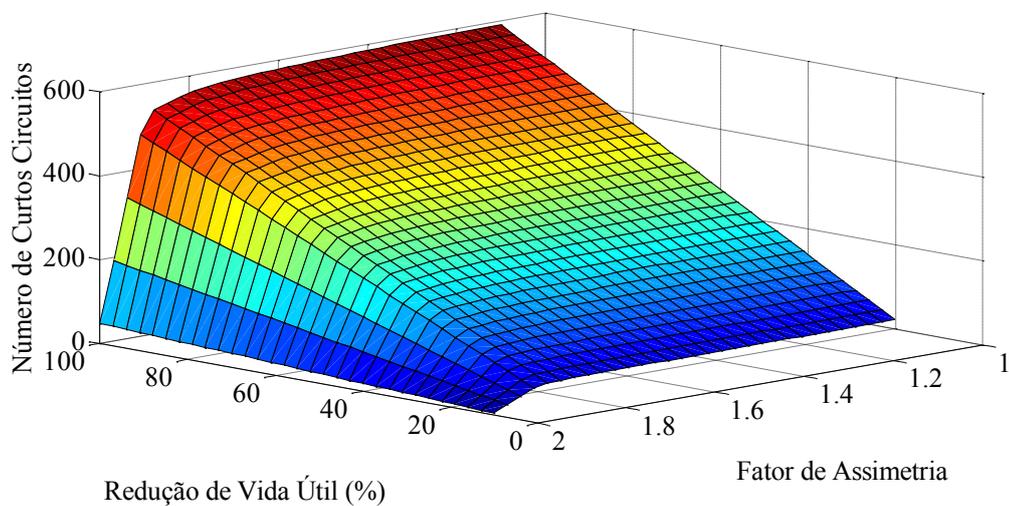
Também foram simulados curtos circuitos com tempo de duração de 3 s, para confirmar a influência dos tempos de duração dos curtos circuitos no número de curtos circuitos suportáveis pelos enrolamentos. Os resultados estão apresentados nas Figuras 69 e 70.

Figura 69. Superfície que relaciona o número de curtos circuitos, redução de vida útil e fatores de assimetria de curtos circuitos com tempo de permanência de 3 s para o enrolamento interno.



Fonte: Autor.

Figura 70. Superfície que relaciona o número de curtos circuitos, redução de vida útil e fatores de assimetria de curtos circuitos com tempo de permanência de 3 s para o enrolamento externo.



Fonte: Autor.

Ao observar as Figuras 69 e 70, verifica-se que o tempo de duração do curto circuito, é um fator significativo no número de curtos circuitos suportáveis pelos enrolamentos. De fato, com curtos circuitos com tempo de duração de 3 s, também ocorreu uma redução considerável no número de curtos circuitos suportáveis pelos enrolamentos do transformador de 100 MVA.

A partir dos resultados apresentados, constatou-se que os comportamentos evidenciados no transformador de 75 MVA também ocorrem no transformador de 100 MVA. Isto indica que a nova metodologia apresentada pode ser empregada para transformadores de potência com diferentes valores de potência nominal. Também, aplicação da nova metodologia para transformadores diferentes, modifica, apenas, os resultados obtidos, mas os procedimentos para emprego da metodologia não são modificados.

Como a nova metodologia pode ser aplicada para transformadores de potência com diferentes potências nominais, na seção a seguir, serão apresentadas as etapas que devem ser seguidas para aplicação da nova metodologia.

#### 5.4 ETAPAS DE APLICAÇÃO DA NOVA METODOLOGIA

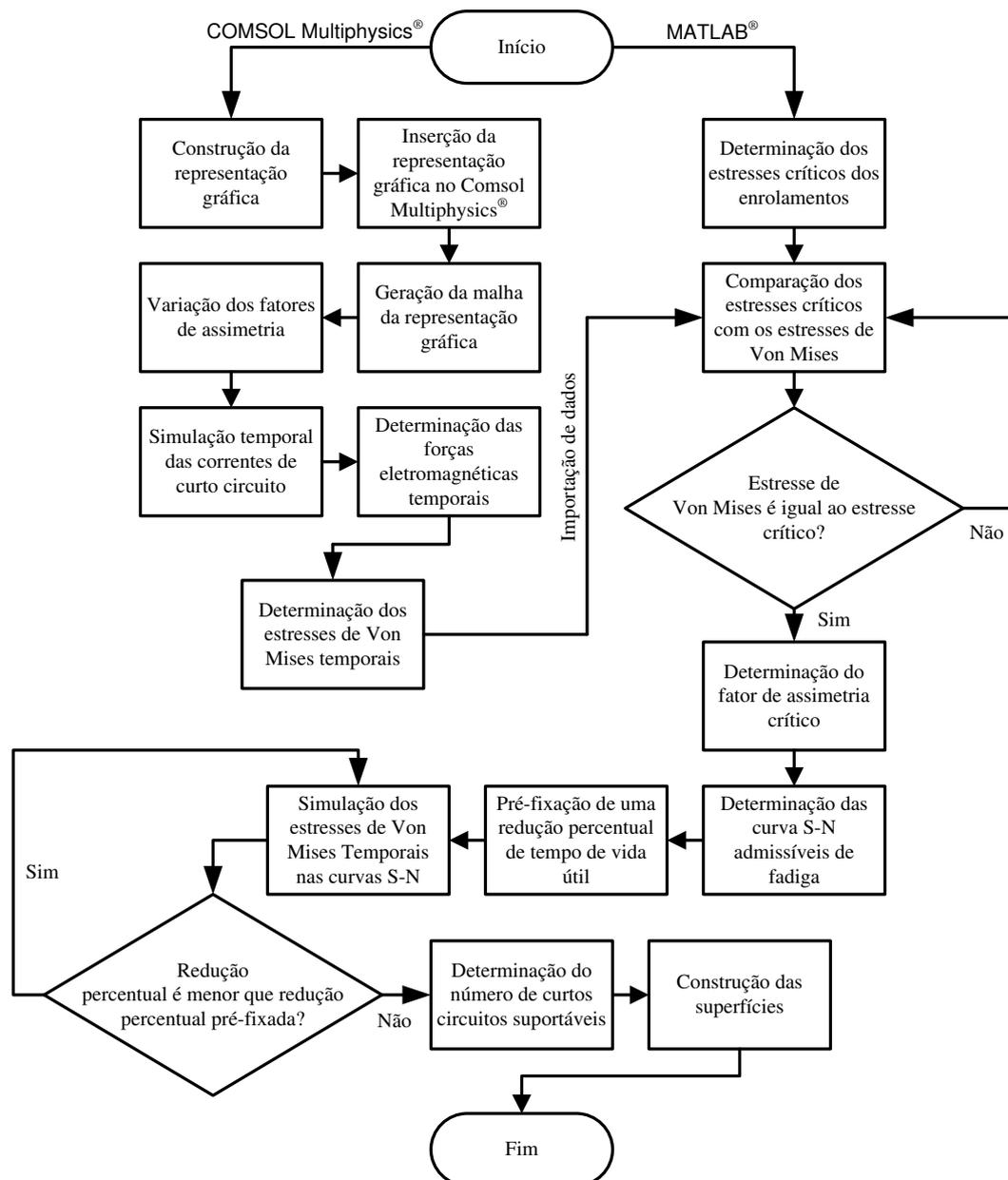
Resumidamente, as etapas para a aplicação da nova metodologia devem ser as seguintes:

1. Construir a representação gráfica do transformador de potência a ser estudado;
2. Inserir a representação gráfica do transformador de potência no ambiente COMSOL Multiphysics®;
3. Gerar a malha da representação gráfica;
4. Simular a circulação de correntes de curtos circuitos pelos enrolamentos para diferentes fatores de assimetria;
5. Determinar as forças eletromagnéticas e os estresses mecânicos nos enrolamentos do transformador;
6. Determinar os estresses críticos dos enrolamentos;
7. Avaliar a proximidade de falha plástica dos enrolamentos por meio do critério de Von Mises;
8. Determinar as curvas S-N admissíveis de fadiga dos enrolamentos;

9. Construir, a partir das curvas S-N admissíveis de fadiga, as superfícies que correlacionam: o número de curtos circuitos suportáveis pelos enrolamentos, os fatores de assimetria e a redução percentual de tempo de vida útil dos enrolamentos.

De maneira alternativa, as etapas também estão apresentadas no diagrama de blocos apresentado na Figura 71.

Figura 71 – Diagrama de blocos representativo das etapas para aplicação da nova metodologia.



Fonte: Autor.

Com a apresentação dos resultados e das etapas que devem ser seguidas para aplicação da nova metodologia, podem ser verificadas algumas potenciais aplicações da nova metodologia proposta. As potenciais aplicações estão listadas na seção a seguir.

## 5.5 APLICABILIDADE DA METODOLOGIA EMPREGADA

A utilização da nova metodologia, apresentada neste trabalho, resulta nas potenciais aplicações listadas abaixo:

- Estimção do número de curtos circuitos suportáveis pelos enrolamentos para reduzir a vida útil do enrolamento do transformador em um determinado percentual;
- Determinação do melhor momento para reparo ou substituição do transformador, de acordo com os estresses mecânicos a que os enrolamentos estão submetidos;
- Verificação da proximidade de falha dos enrolamentos;
- Utilização dos critérios de Von Mises e de fadiga durante a fase de projeto do transformador, com o intuito de aumentar a margem de segurança contra a ocorrência de falhas mecânicas.

## 6 CONCLUSÕES

Nesta pesquisa foi apresentada a análise da aplicação de uma nova metodologia com o intuito de avaliar os esforços eletromecânicos, causados pela circulação de correntes de curto circuito, nos enrolamentos de transformadores. A metodologia é fundamentada no uso de simulações computacionais, baseadas no Método dos Elementos Finitos, e que tem como objetivo ser utilizada durante a fase de projeto do equipamento para aumentar a margem de segurança contra falhas de origem mecânica nos enrolamentos.

Com isso, algumas conclusões puderam ser obtidas com o desenvolvimento desta pesquisa, as quais estão relacionadas à aplicabilidade da metodologia apresentada. Desta forma, com os resultados obtidos, é possível concluir que a utilização da metodologia utilizada permite:

- Avaliar a proximidade de falha dos enrolamentos de acordo com a intensidade e duração dos estresses mecânicos a que os enrolamentos estão submetidos;
- Constatar que a falha nos enrolamentos pode ocorrer para valores de estresses mecânicos que estão abaixo dos valores dos estresses críticos dos enrolamentos, e não apenas para valores de estresses mecânicos que ultrapassem os valores dos estresses críticos dos enrolamentos;
- Verificar que a falha plástica e falha por fadiga não ocorrem simultaneamente nos enrolamentos;
- Ser empregada durante a fase de projeto do transformador para aumentar sua margem de segurança contra possíveis falhas mecânicas;
- Estimar o número de curtos circuitos suportáveis pelos enrolamentos do transformador;
- Verificar numericamente e em diversas situações que, quanto maior o fator de assimetria da corrente de curto circuito, menor é o número de curtos circuitos que devem ser simulados para reduzir a vida útil do enrolamento em um determinado percentual;

- Verificar que o aumento do tempo de duração do curto circuito ocasiona uma diminuição no número de curtos circuitos suportáveis para reduzir um determinado percentual de vida útil do enrolamento;
- Contribuir para o aprimoramento dos estudos relacionados às metodologias de avaliação dos efeitos dos esforços eletromecânicos nos enrolamentos de transformadores;
- Auxiliar na tomada de decisão, para fins de manutenção, de acordo com os estresses mecânicos a que os enrolamentos estão submetidos.

Com a apresentação das conclusões obtidas por meio desta tese, podem ser destacadas algumas perspectivas de trabalhos futuros. As perspectivas estão apresentadas na subseção a seguir.

## 6.1 TRABALHOS FUTUROS

Algumas linhas de investigação que podem ser seguidas a partir dos estudos apresentados neste trabalho, bem como as questões não aprofundadas nele, estão listadas abaixo:

- Empregar a metodologia apresentada considerando a circulação de correntes de energização;
- Empregar a metodologia apresentada em transformadores de mesma potência nominal, mas que são fabricados por diferentes fabricantes;
- Comparar os danos cumulativos ocasionados pela circulação de correntes de curto circuito e correntes de energização nos enrolamentos de transformadores;
- Realizar medições de estresses mecânicos nos enrolamentos e comparar com os obtidos via simulação computacional;
- Modelar matematicamente as superfícies que correlacionam o número de curtos circuitos suportáveis, fatores de assimetria e redução percentual de tempo de vida útil dos enrolamentos.

## 7 PUBLICAÇÕES

Até o presente momento e durante o desenvolvimento da pesquisa, alguns artigos foram publicados, submetidos e aceitos para publicação. Os artigos estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Artigos publicados, submetidos e aceitos para publicação.

Artigos	Autores	Título	Congresso ou Revista	Ano
Publicados	ANDRADE, F. L. M. COSTA, E. G. <b>ARAUJO, J. F.</b> ARRUDA, R. D. P. FEREIRA, T. V. XAVIER, C. S.	Forças Eletromagnéticas nos Enrolamentos de um Transformador: Modelagem Analítica versus Método dos Elementos Finitos	CBQEE	2015
	ANDRADE, F. L. M. FEREIRA, T. V. ARRUDA, R. D. P. COSTA, E. G. SILVEIRA, V. CRISOSTOMO, B. XAVIER, C. S.	Using of Von Mises Criterion to Determine Failure proximity and Dynamic Deformation Analysis on Transformers' Windings <b>(ISH 2015 Student Award)</b>	ISH	2015
	ANDRADE, F. L. M. FEREIRA, T. V. ARRUDA, R. D. P. COSTA, E. G. CRISOSTOMO, B. XAVIER, C. S.	Metodologia para Verificação de Proximidade de Falha em Transformadores Utilizando o Critério de Von Mises	SNPTEE	2015
	ANDRADE, F. L. M. COSTA, E. G. <b>ARAUJO, J. F.</b> BARROS, R. M. R. FEREIRA, T. V. AGRA, J. B. XAVIER, C. S.	Evaluation of mechanical criteria applied to the transformers windings	EMD	2015
	FLORENTINO, M. T. FEREIRA, T. V. COSTA, E. G. LUCIANO, B. A. LIRA, G. R. S. BARROS, R. M. R.	Mathematical Modeling of Transformers Based on the Frequency Response of Magnetizing Parameters	Revista Ciência & Engenharia	2016
Submetidos para revista	<b>ARAUJO, J. F.</b> COSTA, E. G. ANDRADE, F. L. M. GERMANO, A. D. FEREIRA, T. V.	A New Methodology to Evaluate the Electromechanical Efforts on Transformer Windings using the Von Mises and Fatigue Criteria	IEEE Transactions on Power Delivery	2015

Fonte: Autor.

## REFERÊNCIAS

ABU-SIADA, A.; ISLAM, S. **High frequency transformer computer modeling**. IEEE Power Engineering Conference. [S.l.]: [s.n.]. 2007.

ANDRADE, F. L. M. **Avaliação de critérios de falha mecânica aplicados aos enrolamentos de transformadores**. Universidade Federal de Campina Grande (Dissertação de Mestrado). Campina Grande. 2015.

ARTURI, C. M. 3D FE Analysis of the Axial Forces on the Step Up Transformer Windings with Helicoidal LV. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 31, p. 2032-2035, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Transformador de Potência - Método de Ensaio**. NBR 5380. [S.l.]. 1993.

AYERS, R. E., USRY, G.O.; PATEL, M.R.; STEEL, R.B. Dynamic measurements during short-circuit testing of transformers part II: Test results and analysis. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, 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**, v. PAS-93, 1974.

AZEVEDO, A. C. **Estresse Eletromecânico em Transformadores causado por Curtos Circuitos "Passantes" e Correntes de Energização**. Universidade Federal de Uberlândia (Tese de Doutorado). Uberlândia. 2007.

BAKSHI, A. An investigation of Winding Curvature Effect on the Mechanical Strength of Transformer Windings. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 30, 2015.

BARROS, R. M. R. **Determinação dos Esforços Eletromecânicos em Transformadores de Potência Causados por Correntes de Inrush Utilizando Simulações Multifísicas**. Universidade Federal de Campina Grande (Trabalho de Conclusão de Curso). Campina Grande. 2015.

BARROSO, L.; BARROSO, M. M. A.; CAMPOS-FILHO, F. F. **Calculo numérico com aplicações**. 2ª. ed. São Paulo: Harbra, 1987.

BARTLEY, P. E. **Analysis of Transformer Failures**. International Association of Engineering Insurers. Stockholm: [s.n.]. 2003.

BASTOS, J.; SADOWSKI, N. **Electromagnetic by Modeling by Finite Element Methods**. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 2003.

BECHARA, R. **Análise de Falhas de Transformadores de Potência**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (Dissertação de Mestrado). São Paulo. 2010.

BENIWAL, N. S.; DWIVEDI, D. K.; GUPTA, H. O. Life estimation of distribution transformers considering axial fatigue in loose winding conductors. **Elsevier Journal of Engineering Failure Analysis**, v. 18, 2010.

BERTAGNOLLI, G. **Short Circuit Duty of Power Transformer**. Zurich, Switzerland: ABB Ltd.: [s.n.], 2007.

BILLIG, E. Mechanical stresses in transformer windings. **Journal of the Institution of Electrical Engineers - Part II: Power Engineering**, v. 93, 1946.

BOLDUC, L., PICHER, P.; PARÉ, G.; DEMERS, R.; BÉLANG, J. **Detection of transformer winding displacements by the frequency response of stray losses (FRSL)**. Cigré Session - 12/33-02. [S.l.]. 2000.

BOLLEN, M. **Understanding Power Quality Problems: Voltage Sags and Interruptions**. 1<sup>a</sup>. ed. New York: IEEE Press, 2000.

BRANCO, C. A. G. M. **Mecânica dos Materiais**. [S.l.]: Fundação Calouste Gulbenkian, 1985.

CALLISTER JR., W. D. **Materials Science and Engineering – An Introduction**. [S.l.]: John Wiley & Sons, Inc., 2007.

CIGRÉ, WORKING GROUP 12.19. **The Short Circuit Performance of Power Transformers**. Brochure 209. [S.l.]. 2002.

CIGRÉ, GROUP DU TRAVAIL 12.05. Enquête Internationale sur les Défaillances en Service des Transformateurs de Grande Puissance. **ELECTRA**, 1983. ISSN 88.

FERREIRA, T. **Estudo do Trilhamento de Núcleo em Isoladores Poliméricos**. Universidade Federal de Campina Grande (Dissertação de Mestrado). [S.l.]. 2007.

FEYZI, M. R.; SABAHI, M. **Finite element analyses of short circuit forces in power transformers with asymmetric conditions**. IEEE International Symposium on Industrial Electronics. [S.l.]: [s.n.]. 2008.

FOLDI, J.; BERUBE, D.; RIFFON, P.; BERTAGNOLLI, G.; MAGGI, R. **Recent Achievements in Performing Short Circuit Withstand Tests on Large Power Transformers in Canada**. Cigre Session 12-201. [S.l.]. 2000.

FRANZEN, A.; KARLSSON, S. **Failure Modes and Effects Analysis of Transformers**. Royal Institute of Technology - School of Electrical Engineering. Stockholm. 2007.

FRONTIN, S. O. **Equipamentos de Alta Tensão - Prospecção e Hierarquização de Inovações Tecnológicas**. 1ª. ed. Brasília: Teixeira, 2013.

GUIMARÃES, R. **Suportabilidade Mecânica e Vida Útil de Transformadores Submetidos a Correntes de Energização e de Curto Circuito**. Universidade Federal de Uberlândia (Tese de Doutorado). Uberlândia. 2013.

HAYT JR., W. H.; BUCK, J. A. **Engineering Electromagnetics**. 8ª. ed. [S.l.]: The McGraw-Hill Companies, 2011.

HYUN-MO, A., OH, Y. H.; KIM, J. K.; SONG, J. S.; HAHN, S. C. Experimental Verification and Finite Element Analysis of Short-Circuit Electromagnetic Force for Dry-Type Transformer. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 48, 2012.

HYUN-MO, A., LEE, B. J.; KIM, C. J.; SHIN, H. K.; HAHN, S. C. **Finite element modeling of power transformer for short-circuit electromagnetic force analysis**. International Conference on Electrical Machines and Systems. [S.l.]: [s.n.]. 2012.

IEC. **Common specifications for high-voltage switchgear and controlgear standards**. IEC International Standard 60694. [S.l.]. 2002.

IEC. **Power Transformers-Part 5: Ability to withstand short circuit**. IEC International Standard 60076-5. [S.l.]. 2000.

IEEE STD 551. **Recommended Practice for Calculating AC Short-Circuit Currents in Industrial and Commercial Power Systems**. The Violet Book. [S.l.]. 2006.

KULKARNI, S. V.; KHAPARDE, S. A. **Transformer Engineering: Design and Practice**. New York: Marcel Dekker, 2004.

KRAETGE, A., KRUGER, M.; VELÁSQUEZ, J.; VILJOEN, H.; DIERKS, A. **Aspects of the practical application of sweep frequency response analysis on power transformers**. Cigré Southern Africa Regional Conference. [S.l.]: [s.n.]. 2009.

MUKUND, R. P. Instability of the continuously transposed cable under axial short-circuit forces in transformers. **IEEE Transaction on Power Delivery**, v. 17, p. 149-154, 2002.

NAJDENKOSKI, K.; MANOV, D. Electromagnetic forces calculation on power transformer windings under short circuit. **The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering**, v. 17, 1998.

NEVES, E. G. D. C. **Eurico Guimarães de Castro Neves**. Disponível em: <[http://minerva.ufpel.edu.br/~egcneves/disciplinas/mte/caderno\\_mte/circ\\_magn.pdf](http://minerva.ufpel.edu.br/~egcneves/disciplinas/mte/caderno_mte/circ_magn.pdf)>. Acesso em: Maio 2015.

Neves, W.; Fernandes, D.; Baltar, F. J. A.; Rosentino, A. J. P.; Saraiva, E.; Delaiba, A. C.; Guimarães, R.; Lynce, M.; Oliveira, J.C. A comparative investigation of

electromechanical stresses on transformers caused by inrush and short-circuit currents. **International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation**, p. 1 - 6, 2011.

PATEL, M. R. Dynamic stability of helical and barrel coils in transformers against axial short - circuit forces. **IEEE Proceedings C Generation, Transmission and Distribution**, v. 127, 1980.

PAULINO, M. **Medidas de Resposta em frequencia, Capacitância e Fator de Potência com Variação de Frequência para Diagnóstico de Transformadores**. Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos. Campina Grande : [s.n.]. 2006.

PENA, M. C. M. **Falhas em Transformadores de Potência: uma Contribuição para análise, definições, causas e soluções**. Universidade Federal de Itajubá (Dissertação de Mestrado). [S.l.]. 2003.

PEREIRA, L. A. Método dos Elementos Finitos 2D Aplicado ao Eletromagnetismo, 2004. Disponível em: <[http://diana.ee.pucrs.br/~lpereira/fem2000/FEM2D\\_Eletromagnetismo.pdf](http://diana.ee.pucrs.br/~lpereira/fem2000/FEM2D_Eletromagnetismo.pdf)>. Acesso em: maio 2015.

PEREIRA, O. J. B. A. Introdução ao Método dos Elementos Finitos na Análise de Problemas Planos de Elasticidade, 2005. Disponível em: <<http://www.civil.ist.utl.pt/ae2/IMEFAPPE.pdf>>. Acesso em: Maio 2015.

ROSENTINO JR., A. **Estimativa dos esforços eletromecânicos em transformadores submetidos a um curto circuito trifásico**. Universidade Federal de Uberlândia (Dissertação de Mestrado).. Uberlândia. 2010.

RUGGIERO, M.; LOPES, V. **Cálculo Numérico: aspectos teóricos e computacionais**. São Paulo: Makron, 2012.

SALON, S.; LAMATTINA, B.; SIVASUBRAMANIAM, K. Comparison of assumptions in computation of short circuit forces in transformers. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 36, 2000.

SARAIVA, E. **Um Estudo das alterações dos parâmetros de transformadores oriundas de deformações nos enrolamentos: uma contribuição para o diagnóstico de vida útil**. Universidade Federal de Uberlândia (Tese de Doutorado). Uberlândia. 2011.

SHADIKU, M. N. O. **Elementos de Eletromagnetismo**. 3<sup>a</sup>. ed. [S.l.]: Bookman, 2003.

SHENGCHANG, J.; PING, S.; YANMING, L.; DAKE, X.; JUNLING, C.. The vibration measuring system for monitoring core and winding condition of power transformer. **International Symposium on Proceedings of Electrical Insulating Materials**, 2001.

SHIGLEY, J.; MISCHE, C.; BUDYNAS, R. **Mechanical Engineering**. London: Macdonald & Co., 2006.

SIEMENS. Material Elétrico Industrial. **Disjuntores de Média Tensão** , 1988.

SOUZA, D. C. P. **Falhas e defeitos ocorridos em transformadores de potência do sistema elétrico da Celg, nos últimos 28 anos: um estudo de caso**. Universidade Federal de Goiás (Dissertação de Mestrado). Goiânia. 2008.

STEURER M.; FRÖHLICH, K. The Impact of Inrush Currents on the Mechanical Stress of High Voltage Power Transformer Coils. **IEEE Power Engineering Review**, v. 21, 2001.

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.]: [s.n.]. 2008.

THOMPSON, H. A.; TILLERY F.; ROSENBERG, D. U. V. The dynamic response of low voltage, high current, disk type transformer windings to through fault loads. **IEEE Transactions on Power Apparatus Systems**, v. PAS-98, 1979.

VECCHIO, R.,POULIN, B.; FEHALI, P.; SHAH, D.; AHUJA, R. **Transformer Design Principles with Application to Core-Form Power Transformers**. [S.l.]: CRC Press Taylor & Francis Group, 2010.

WANG, M.; VANDERMAAR, A. J.; SRIVASTAVA, K. D. Review of condition assessment of power transformers in service. **IEEE Electrical Insulation Magazine**, v. 18, 2002.

WATERS, M. **The short circuit strength of power transformers**. London: Macdonald and Co., 1966.

YANG, B.,WANG, S. H.; HUANGFU, Y. P.; WANG, G. L. **Dynamic deformation analysis of power transformer windings by considering the effect of elasticity characteristics of kraft paper**. IEEE International Conference on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices. [S.l.]: [s.n.]. 2013.

YUN-QIU, T.; JING-QIU; ZI-HONG, X. Numerical calculation of short circuit electromagnetic forces on the transformer winding. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 26, 1990.

YUYING, S.,HONG, G.; YU, Z.; ZHIJIAN, JIN; ZHUSHI, R.. The study on measuring point selection of transformer vibration monitoring. **IEEE International Conference on Electronic Measurement & Instruments**, v. 4, 2011.

ZHANG, H.,YANG, B.; XU, W.; WANG, S.; WANG, G.; HUANDFU, Y.; ZHANG, J. Dynamic Deformation Analysis of Power Transformer Windings in Short-Circuit Fault by FEM. **IEEE Transactions on Applied Superconductivity**, v. 24, 2014.