



Universidade Federal
de Campina Grande

Centro de Engenharia Elétrica e Informática

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Mestrado Profissional em Sistemas de Energia Elétrica

EDUARDO JORGE CALHEIROS JUNIOR

ESTIMAÇÃO COMPUTACIONAL DOS ESFORÇOS ELETROME CÂNICOS
EM TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA NO SISTEMA CHESF

Campina Grande, Paraíba
Junho de 2014

EDUARDO JORGE CALHEIROS JUNIOR

ESTIMAÇÃO COMPUTACIONAL DOS ESFORÇOS ELETROME CÂNICOS
EM TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA NO SISTEMA CHESF

*Dissertação de Mestrado apresentada à Coordenação
de do Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande,
em cumprimento às exigências para obtenção do Grau
de Mestre em Sistemas de Energia Elétrica.*

Área de Concentração: Processamento da Energia.

Orientadores:

Professor Tarso Vilela Ferreira, D. Sc.
Professor Edson Guedes da Costa, D. Sc.

Campina Grande, Paraíba
Junho de 2014

Em memória da minha avó materna (1924-2014).

RESUMO

As análises de adequabilidade de equipamentos são indispensáveis para permitir que as empresas do setor elétrico conheçam as condições em que os mesmos operam, garantindo assim o desempenho dos ativos da empresa e sua disponibilidade no Sistema Interligado Nacional. Dentre os equipamentos analisados, destacam-se os transformadores de potência pelo seu alto custo e a sua importância para o sistema elétrico. Grande parte das falhas em transformadores de potência é de origem dielétrica, relacionadas com a danificação da isolação dos condutores devido às deformações mecânicas ocasionadas pelas altas correntes de curto-circuito passantes nos enrolamentos, reduzindo a vida útil do equipamento. A partir destas considerações, propôs-se avaliar os esforços eletromecânicos internos a alguns transformadores de potência presentes no sistema CHESF, por intermédio de simulações computacionais, quando da ocorrência de curto-circuito trifásico. A metodologia para as simulações consistiu em selecionar os transformadores a serem analisados e coletar as informações técnicas necessárias fornecidas pelos fabricantes. Posteriormente foram determinadas as condições sistêmicas às quais os transformadores estariam submetidos e obtidos os níveis de curto-circuito resultantes, para então efetuar as simulações propriamente ditas. Os resultados das simulações computacionais mostraram os esforços eletromecânicos estimados em quatro transformadores de potência em operação no sistema elétrico da CHESF, resultantes do efeito dinâmico da corrente de curto-circuito trifásico que percorrem os enrolamentos do transformador, considerando diferentes configurações sistêmicas. As conclusões das análises dos resultados indicaram possíveis casos de superações de limites admissíveis e revelou a importância dos aspectos construtivos dos transformadores na sua capacidade de suportar os esforços mecânicos causados por curtos-circuitos.

Palavras-Chave: Adequabilidade, Corrente de Curto-Circuito, Enrolamentos, Esforços Eletromecânicos, Simulações, Transformadores.

ABSTRACT

Analysis of suitability of equipment are indispensable for the electric sector companies meet the conditions in which they operate, thus ensuring the performance of the company's assets and its availability in the National Interconnected System (Sistema Interligado Nacional). The power transformers are included among the analyzed equipment due to its high cost and importance for the electrical system. Most faults in power transformers is of dielectric origin, related to insulation damage due to mechanical deformations, caused by the high short-circuit currents in the windings, reducing the life of the equipment. Then, it was proposed to evaluate the internal electromechanical efforts to some power transformers present in the CHESF system, through computer simulations, in the event of a three-phase short circuit. The methodology for the simulations consisted to select the transformers to parse and collect the necessary technical information provided by the manufacturers. Later, certain systemic conditions in which the transformers would be subjected were defined, it was obtained the resulting short circuit levels and then was performed the simulations themselves. The results of the computer simulations showed the electromechanical efforts estimated at four power transformers in operation in the CHESF electrical system, resulting from the dynamic effect of three-phase short-circuit current that run through the windings of the transformer, considering different systemic configurations. The conclusions of the analysis results indicated possible cases of overruns of permissible limits and reveal the importance of the transformers constructive aspects in their ability to withstand the mechanical stress caused by short circuits.

Keywords: Electromechanical Efforts, Short-Circuit Current, Simulations, Suitability, Transformers, Windings.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Estrutura interna de um transformador de grande porte danificada por uma falta.	15
Figura 2 - Quantitativo de equipamentos com os limites nominais ultrapassados.	19
Figura 3 – Forma de onda típica de corrente de curto-circuito.	20
Figura 4 – Curva da força associada à corrente de curto-circuito assimétrica.	21
Figura 5 – Direção das forças eletromecânicas nos enrolamentos do transformador.	23
Figura 6 – Sentido das forças radiais nos enrolamentos.	25
Figura 7 – Forças radiais agindo em enrolamentos concêntricos.	26
Figura 8 – Os enrolamentos e os espaçadores radiais e axiais.	28
Figura 9 – Deformação forçada no enrolamento (forced buckling).	29
Figura 10 – Enrolamento danificado por deformação forçada (forced buckling).	29
Figura 11 – Deformação livre no enrolamento (free buckling).	30
Figura 12 – Saliências causadas por compressões radiais - free buckling.	30
Figura 13 – Representação de uma deformação causada pelas forças axiais.	31
Figura 14 – Curvas de compressão axial em enrolamentos concêntricos.	32
Figura 15 - Espaçadores radiais em um trecho do enrolamento.	34
Figura 16 – Curvatura dos condutores entre os espaçadores radiais (efeito bending).	34
Figura 17 – Efeito bending em um transformador real.	35
Figura 18 – Condutores inclinados devido a forças axiais (efeito <i>tilting</i>).	36
Figura 19 – Efeito <i>tilting</i> em um transformador real.	36
Figura 20 – Diagrama unifilar simplificado de uma subestação com três transformadores.	43
Figura 21 – Níveis da corrente de curto-circuito (A) em uma subestação com três transformadores.	46
Figura 22 – Níveis da corrente de curto-circuito (A) na mesma subestação em contingência.	46
Figura 23 – Mapa eletrogeográfico e as subestações em destaque.	47
Figura 24 – Estrutura da metodologia para as simulações.	50
Figura 25 – Corrente de curto-circuito assimétrica.	52
Figura 26 – Força radial total.	53
Figura 27 - Estresses radiais de compressão e tração.	53
Figura 28 - Força radial total na subestação João Câmara II.	54
Figura 29 – Força axial compressiva.	55
Figura 30 - Estresses axiais.	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Registro de ocorrências em transformadores da CHESF.....	14
Tabela 2 - Valores típicos do fator de assimetria.	21
Tabela 3 – Transformadores da CHESF selecionados para as simulações.	44
Tabela 4 – Resultados mais significativos e respectivas subestações de ocorrência.	57

LISTA DE SÍMBOLOS

1. I_{assim} → Corrente de curto-circuito assimétrica [A];
2. I_{sim} → Corrente de curto-circuito assimétrica [A];
3. X/R → Relação entre a reatância e a resistência do sistema elétrico;
4. K → Fator de assimetria;
5. f → Densidade volumétrica de força eletromagnética [N/m^3];
6. J → Densidade superficial de corrente elétrica [A/m^2];
7. B → Densidade de fluxo magnético de dispersão [T].
8. F_{rad} → Força radial total [N];
9. D_m → Diâmetro médio do enrolamento [m];
10. h → Altura do enrolamento [m];
11. n → Quantidade de espiras do enrolamento;
12. F_{radmed} → Força Radial Média [N];
13. $F_{raddist}$ → Força radial distribuída [N/m];
14. σ_{radmed} → Estresse radial médio [N/m^2];
15. A → Seção transversal do condutor [m^2],
16. σ_{crit-} → estresse radial crítico para enrolamentos sem espaçadores axiais [N/m^2];
17. E → módulo de elasticidade do material [N/m^2];
18. e → Espessura radial do condutor [m];
19. σ_{crit+} → estresse radial crítico para enrolamentos com espaçadores axiais [N/m^2];
20. $E(\delta)$ → Módulo de elasticidade incremental no valor crítico [N/m^2];
21. x → Constante do fabricante para espessura equivalente do condutor;
22. $E_{spaxial}$ → Quantidade de espaçadores axiais;
23. F_{ax} → Força axial compressiva total [N];
24. S → Potência aparente [MVA];

25. Z_{pu} → Impedância por unidade;
26. f → frequência industrial da rede [Hz];
27. F_{axext} → Força axial total na extremidade do enrolamento [N];
28. q → Ampère-espira no final do enrolamento;
29. w → Dimensão axial do condutor, considerando sua isolação e a isolação entre espiras [m];
30. d → Largura equivalente do ducto [m];
31. d_0 → Largura entre os enrolamentos [m];
32. d_i → Largura do enrolamento interno [m];
33. d_e → Largura do enrolamento externo [m];
34. $\sigma_{axbending}$ → Estresse axial *bending* [N/m^2];
35. F_{axdist} → Força axial distribuída ao longo da espira [N/m];
36. L → Distância entre os espaçadores radiais [m];
37. b → Dimensão axial do condutor [m];
38. F_{axcrit} → Força axial crítica para o efeito *tilting* [N];
39. k → Quantidade de condutores em cada disco do enrolamento;
40. σ_{axcrit} → Estresse axial crítico para o efeito *tilting* [N/m^2].

Sumário

1	Introdução.....	12
1.1	Motivação	13
1.2	Objetivos.....	16
1.2.1	Objetivos Secundários	16
1.3	Contribuições da Dissertação.....	17
2	Embasamento Teórico.....	18
2.1	Fundamentação Teórica.....	18
2.1.1	As Análises de Adequabilidade de Equipamentos Quanto à Corrente de Curto-Circuito	18
2.1.2	Os Efeitos Dinâmicos da Corrente de Curto-Circuito	20
2.1.3	Os Esforços Eletromecânicos em Transformadores Submetidos a Curtos-Circuitos	22
2.2	Embasamento Técnico	37
3	Metodologia.....	42
3.1	Definição dos Transformadores	43
3.2	Definição das Configurações do Sistema Elétrico	44
3.3	Simulações Computacionais	48
4	Análise dos Resultados.....	51
4.1	Esforços Eletromecânicos Radiais	51
4.2	Esforços Eletromecânicos Axiais.....	55
5	Conclusões.....	58
	Referências	62

1 INTRODUÇÃO

Os transformadores de potência podem ser considerados os principais equipamentos que fazem parte do Sistema Elétrico de Potência (SEP). Devido ao seu custo elevado e sua importância no sistema elétrico, requerem atenção especial pelo corpo técnico da empresa responsável pelo equipamento, sendo necessárias ações como manutenções preventivas ou corretivas para garantir o pleno funcionamento do mesmo. Outra forma importante de ação preventiva visando garantir a integridade destes equipamentos é a análise de adequabilidade com o objetivo de evitar a violação dos seus limites nominais. Esses estudos são solicitados em casos de expansão do SEP, intervenções em equipamentos com desligamento, estudos pré-operacionais, ocorrências, entre outros.

Os enrolamentos pertencem à parte ativa dos transformadores de potência e ficam submetidos a efeitos térmicos e dinâmicos devido à passagem da corrente de curto-circuito, fenômenos caracterizados por altas correntes transitórias. Os efeitos dinâmicos resultantes de curtos-circuitos causam esforços eletromecânicos que podem danificar o material isolante dos condutores dos enrolamentos. No atual cenário, os defeitos originados por esses esforços nos enrolamentos de um transformador de potência são um fenômeno pouco explorado nas empresas de transmissão de energia elétrica.

Diante deste cenário, foi firmado entre a Companhia Hidro Elétrica do São Francisco (CHESF) e a Universidade Federal de Uberlândia (UFU) o projeto de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) “Estresse Eletromecânico em Transformadores Causado pelas Altas Correntes de Energização (*Inrush*) e de Curtos-circuitos Passantes”, referido de forma contraída como *Estresse-Din*. Seu objetivo foi desenvolver uma metodologia que possibilitasse avaliar os esforços mecânicos em um transformador de potência devido à passagem de correntes de curto-circuito e energização. O produto final do projeto foi a ferramenta computacional *Estresse-Din-Trafo*, capaz de calcular essas grandezas e indicar a adequabilidade dos enrolamentos a esses esforços.

Com relação à estrutura desta dissertação, ainda no Capítulo 1 são apresentadas as motivações que levaram à escolha do tema estudado, logo em seguida são apresentados os objetivos alcançados, para então finalizar com as contribuições resultantes de todo trabalho desenvolvido. No Capítulo 2 da dissertação é apresentado o embasamento teórico, dividido na seguinte sequência: inicia-se com a fundamentação teórica, na qual se faz uma descrição resumida dos critérios adotados na CHESF para as análises de adequabilidade de equipamentos em suportar a corrente de curto-circuito, e posteriormente apresentam-se de forma sucinta os conceitos acerca da corrente de curto-circuito assimétrica e seus efeitos dinâmicos nos enrolamentos de um transformador. Na sequência, é abordada a relação entre as forças eletromagnéticas que atuam nos enrolamentos do transformador e os esforços eletromecânicos vinculados. Logo após, são mostrados os principais tipos de defeitos nos enrolamentos decorrentes das forças radiais e axiais e as equações utilizadas para calcular essas forças e os respectivos estresses eletromecânicos. Esta seção é acompanhada pelo embasamento técnico no qual constam as principais referências a presente dissertação, destacando-se conteúdos que compunham os relatórios do projeto de P&D. No Capítulo 3 é apresentada a metodologia desenvolvida para as simulações computacionais, mostrando todo o processo sequencialmente, desde a definição dos transformadores que serão analisados até as simulações propriamente ditas. No Capítulo 4 são apresentadas as análises dos resultados das simulações, destacando os resultados mais significativos encontrados para os esforços eletromecânicos. E, finalmente, na etapa seguinte, são apresentadas as conclusões e as sugestões de trabalhos futuros.

1.1 MOTIVAÇÃO

O transformador de potência é um tipo de equipamento que fica submetido às mais diversas solicitações no SEP, como curtos-circuitos, energizações, sobrecargas, entre outros. Como exemplo das consequências destas solicitações, é apresentado na Tabela 1 um registro de ocorrências no ano de 2013 e início de 2014 em transformadores de potência em operação no sistema elétrico da CHESF.

No caso de curtos-circuitos, os danos podem ser catastróficos e irreversíveis e, inclusive, expor vidas humanas a acidentes. Na Figura 1 pode ser observada a foto da

estrutura interna de um transformador severamente danificada pela ocorrência de uma falta, provavelmente causada por um curto-circuito.

Tabela 1 – Registro de ocorrências em transformadores da CHESF.
Modificado de (CHESF, 2014).

<i>Regional</i>	<i>Local</i>	<i>Data/Hora do Desligamento</i>	<i>Descrição da Causa</i>
Oeste	Teresina II	11/1/2013 23:41	Surtos ou Transitório
Centro	Cícero Dantas	20/1/2013 18:10	Explosão
Centro	Cícero Dantas	20/1/2013 18:10	Explosão
Sudoeste	Usina Sobradinho	29/1/2013 11:15	Surtos ou Transitório
Oeste	Teresina	9/2/2013 18:01	Explosão
Norte	Banabuiu	15/2/2013 03:33	Curto-Circuito
Leste	Recife II	30/3/2013 05:40	Defeito
Leste	Bongi	7/4/2013 10:08	Explosão
Sul	Olindina	14/7/2013 13:01	Explosão
Leste	Suape III	24/7/2013 06:46	Defeito
Leste	Recife II	25/7/2013 11:44	Explosão
Norte	Fortaleza II	3/8/2013 05:40	Defeito
Sul	Matatu	13/9/2013 13:19	Falha
Leste	Mirueira	6/10/2013 09:32	Defeito
Centro	Zebu II	7/10/2013 20:50	Sobreaquecimento
Sudoeste	Bom Jesus da Lapa	26/12/2013 18:41	Isolação - Falha/Defeito
Oeste	Teresina	13/1/2014 15:26	Queima

Os transformadores de potência são projetados para suportarem as solicitações mecânicas causadas pela passagem da corrente de curto-circuito nos enrolamentos, previamente estimadas durante sua fase de projeto, sem a contribuição do SEP. Entretanto, são escassos estudos que indiquem os efeitos desses fenômenos na integridade física dos enrolamentos do transformador durante sua vida útil operacional e sob a influência do acoplamento a um sistema elétrico complexo.

Mesmo considerando os dispositivos de proteção e a frequência da ocorrência de faltas em uma subestação, as correntes transitórias de um curto-circuito em um

transformador de potência podem atingir valores significativos e causar deformações mecânicas nos enrolamentos. As falhas devido ao fenômeno de curto-circuito estão associadas principalmente com as falhas de origem dielétrica, já que os esforços eletromecânicos podem reduzir a suportabilidade da isolação do condutor (ROSENTINO, 2010).



Figura 1 – Estrutura interna de um transformador de grande porte danificada por uma falta. (Rosentino, 2010).

Os estudos atualmente realizados para os transformadores de potência no processo de análises de adequabilidade dos equipamentos de propriedade da CHESF se restringem a avaliar a suportabilidade térmica dos enrolamentos quanto à passagem da corrente de curto-circuito simétrica. Isto exposto, o desenvolvimento de uma metodologia capaz de avaliar os esforços mecânicos nos enrolamentos de transformadores de potência, resultantes dos efeitos dinâmicos da passagem da corrente de curto-circuito assimétrica, mostrou relevância em contribuir nas análises de adequabilidade dos transformadores em operação no sistema da CHESF.

Durante o período de execução do projeto de P&D, as pesquisas focaram apenas transformadores com potências nominais menores das que operam os transformadores da CHESF, e desconsiderando a influência do SEP. Para fins de aplicação prática da metodologia desenvolvida no projeto aos transformadores de potência de propriedade da Empresa, houve a motivação de se realizar simulações computacionais considerando transformadores com potências acima de 100 MVA, em operação no sistema elétrico e considerando diversas situações de topologia de rede usualmente adotadas. Com isso,

independente dos resultados obtidos, as simulações serviram para mostrar a possibilidade de se aplicar a metodologia no âmbito empresarial, que de outra forma poderia ficar restrito a finalidades didáticas e acadêmicas. Além disso, foi fundamental para incrementar o número de resultados provenientes de casos práticos desenvolvidos no projeto de P&D *Estresse-Din*.

Nesse sentido, também contribuiu para a motivação desta dissertação a existência do *software Estresse-Din-Trafo*, produto final do projeto de P&D *Estresse-Din*, capaz de realizar as simulações supracitadas, e a possibilidade de se internalizar tal *software* à rotina de procedimentos de análises de equipamentos da CHESF. Assim, buscou-se realizar as simulações para calcular os esforços eletromecânicos em vários modelos de transformadores da CHESF, sob a influência do SEP, construindo-se uma base de dados de resultados passível de análise.

Em alguns casos, durante o processo de coleta das informações necessárias que compõem os dados de entrada do referido programa, ocorreram dificuldades em se obter esses parâmetros do fabricante. Contudo, uma vez obtidas, as informações coletadas poderão formar um banco de dados valioso para futuras utilizações dentro da Empresa.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo principal desta dissertação foi analisar os resultados obtidos pelo cálculo dos esforços eletromecânicos decorrentes da passagem da corrente de curto-circuito assimétrica nos enrolamentos de transformadores de potência da CHESF, considerando a contribuição do sistema elétrico interligado. A ferramenta computacional *Estresse-Din-Trafo*, desenvolvida no projeto de P&D *Estresse-Din*, foi a utilizada para realizar os cálculos necessários, por meio de simulações.

1.2.1 OBJETIVOS SECUNDÁRIOS

Esta dissertação também teve o intuito de avaliar o funcionamento prático do *software Estresse-Din-Trafo*, destacando as vantagens e dificuldades encontradas na aquisição dos dados de entrada, no processo de simulação e nas análises dos resultados.

Nos casos em que fossem encontradas dificuldades, sugerir-se-iam melhoramentos para dirimi-las, facilitando a utilização da ferramenta pelo usuário. Ao final de todo esse processo, ter-se-ia uma avaliação geral da metodologia proposta no projeto de P&D, como também uma complementação ao mesmo.

Outro objetivo secundário da dissertação como um todo foi agregar à CHESF conhecimento sobre o assunto nas áreas técnicas afins, enriquecendo com material científico inédito o banco de conhecimento da Empresa.

1.3 CONTRIBUIÇÕES DA DISSERTAÇÃO

A principal contribuição desta dissertação foi fornecer uma metodologia, baseada na ferramenta *Estresse-Din-Trafo*, para avaliar os efeitos dinâmicos da corrente de curto-circuito nos transformadores de potência trifásicos em operação no sistema elétrico da CHESF, ou seja, uma ferramenta capaz de calcular os esforços eletromecânicos nos enrolamentos e indicar a sua adequabilidade a esses fenômenos, análises de aspecto ainda pouco abordado dentro da Empresa. Somado a isso, deve-se considerar que os resultados das simulações contribuíram no incremento da quantidade de resultados obtidos nos casos práticos da metodologia desenvolvida no projeto de P&D *Estresse-Din*.

Outra contribuição foi o levantamento de dados e parâmetros profundamente detalhados acerca de transformadores instalados na CHESF. Na aquisição de transformadores novos pela Empresa, muitos fabricantes não fornecem todos os parâmetros necessários para o cálculo dos esforços eletromecânicos nos enrolamentos. Como consequência, poderá contribuir sinalizando para que a CHESF perceba a necessidade de exigir dos fabricantes que forneçam todas as informações disponíveis do transformador, inclusive aquelas tidas como confidenciais, e apresentá-las de forma clara e de fácil entendimento.

Além do que foi exposto, esta dissertação irá contribuir com literatura de conteúdo científico a um tema de caráter estratégico para as empresas de transmissão de energia elétrica, como também para as instituições acadêmicas, constituindo incentivo a futuras pesquisas.

2 EMBASAMENTO TEÓRICO

Este capítulo está dividido em duas seções: na primeira apresenta-se a fundamentação teórica na qual se encontram os principais conceitos referentes ao assunto tratado; na segunda seção trata-se do embasamento técnico que mostra as principais referências bibliográficas que sustentam esta dissertação, destacando os relatórios originados durante a execução do projeto de P&D.

2.1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

As seções a seguir apresentam o processo das análises de adequabilidade de equipamentos realizadas na CHESF, bem como os efeitos dinâmicos da corrente de curto-circuito e os esforços eletromecânicos nos enrolamentos dos transformadores resultantes desses efeitos.

2.1.1 AS ANÁLISES DE ADEQUABILIDADE DE EQUIPAMENTOS QUANTO À CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO

Conforme está fundamentado em (CHESF, 2014), a ampliação do sistema elétrico mediante a incorporação de novos empreendimentos, tais como a instalação de novas linhas de transmissão e transformadores, provocam o crescimento dos níveis de curto-circuito que poderão exceder os limites nominais dos equipamentos em operação nas subestações, ameaçando a integridade não só dos equipamentos, mas pondo em risco inclusive vidas humanas que eventualmente estejam nas proximidades. As análises dos efeitos da corrente de curto-circuito sobre os equipamentos das subestações de propriedade da CHESF são necessárias e fundamentais para a Empresa, que é remunerada pela disponibilidade de seus ativos. Esses estudos são solicitados em casos como expansão do sistema elétrico, intervenções em equipamentos com desligamento, estudos pré-operacionais, ocorrências, entre outros.

É indispensável para a Empresa fazer o acompanhamento das condições em que seus equipamentos estão operando no sistema elétrico e identificar aqueles que se

encontram com seus limites admissíveis em suportar a passagem da corrente de curto-circuito ultrapassados. Para então recomendar medidas operacionais mitigadoras ou ainda indicar os equipamentos para substituição, com a finalidade de manter a disponibilidade, o desempenho e a operação de suas instalações de acordo com os padrões estabelecidos.

As análises de adequabilidade de equipamentos quanto à corrente de curto-circuito são realizadas mediante o emprego de simulações utilizando *software* específico, que permite modelagem fiel do sistema elétrico, permitindo a solução direta de curtos-circuitos em sistemas elétricos de grande porte (CEPEL, 2006). As simulações têm o objetivo de identificar a ultrapassagem dos limites nominais em disjuntores, chaves seccionadoras, transformadores de corrente, bobinas de bloqueio, transformadores de potência e reatores de aterramento, com classes de tensão compreendidas entre 13,8 a 500 kV. Na Figura 2 são apresentados os quantitativos de equipamentos nos quais foram constatadas a ultrapassagem de seus limites nominais em suportar a corrente de curto-circuito, referente ao último ciclo de estudos, que abrangeu um horizonte até dezembro de 2016.

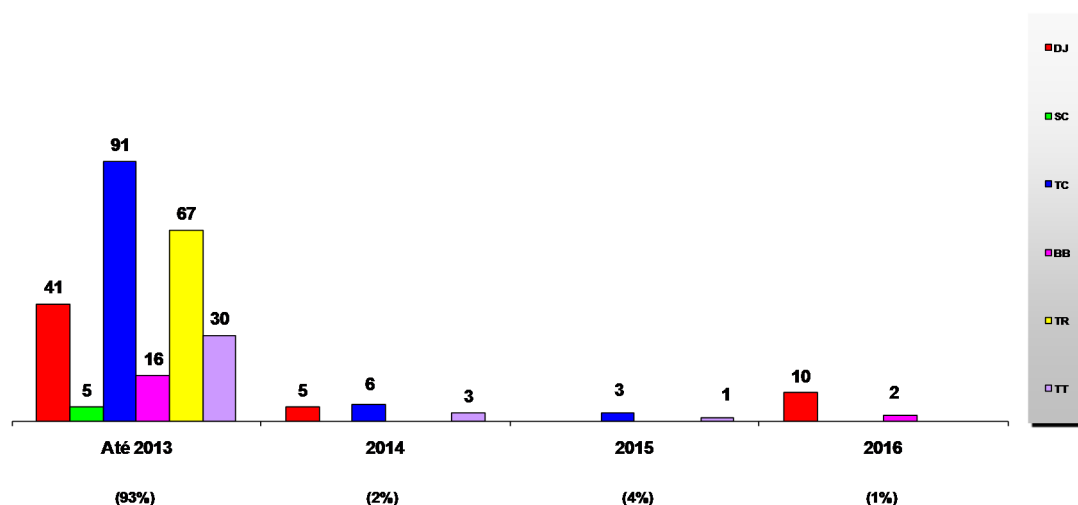


Figura 2 - Quantitativo de equipamentos com os limites nominais ultrapassados. Disjuntores (DJ); Chave seccionadora (SC); Transformador de corrente (TC); Bobina de bloqueio (BB); Transformador de potência (TR); Reator de aterramento (TT) (CHESF, 2014).

Os estudos de adequabilidade seguem critérios estabelecidos, e têm como referências normativos técnicos, publicações científicas, documentos internos, entre outros.

As atuais análises de adequabilidade dos transformadores de potência devido à passagem da corrente de curto-circuito têm como finalidade verificar sua capacidade

quanto ao efeito térmico, ou seja, o valor eficaz da corrente de curto-circuito simétrica não deve ultrapassar 25 vezes a corrente nominal do enrolamento, na refrigeração natural, com duração máxima de 2 segundos, conforme referências (CHESF, 2014; ABNT, 2007).

O impacto que os efeitos térmicos e mecânicos podem causar em unidades transformadoras em função de suas potências nominais é uma questão para a qual ainda não existe um consenso absoluto. Entretanto, os efeitos mecânicos (estresse) tendem a ser predominantes em transformadores de potência, devido às elevadas correntes de curto-circuito envolvidas (CHESF/UFU, 2009b). Contudo, esses efeitos ainda não são considerados nas análises de adequabilidade dos transformadores de potência.

2.1.2 OS EFEITOS DINÂMICOS DA CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO

Os efeitos das correntes de curto-circuito são geralmente divididos em térmicos e dinâmicos. Os efeitos térmicos são decorrentes da componente simétrica senoidal da corrente.

As correntes assimétricas de curto-circuito são compostas de uma corrente alternada simétrica e de uma componente contínua (KINDERMANN, 1997), tal como está exemplificado na Figura 3.

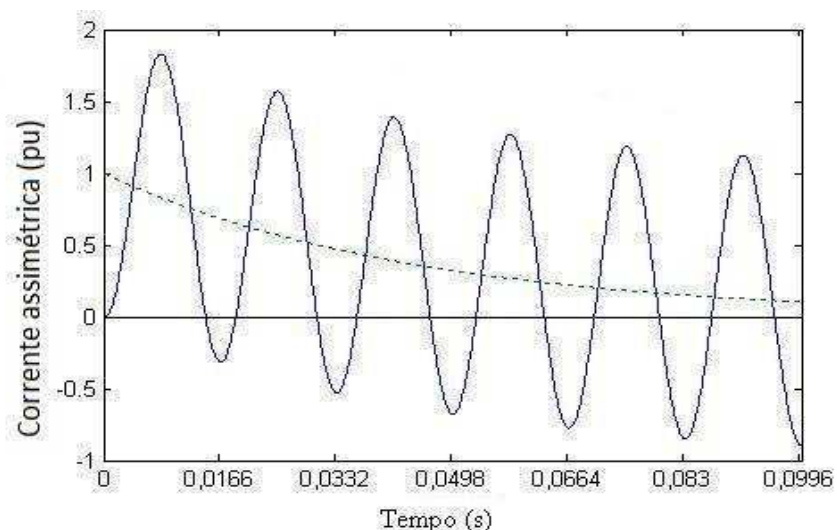


Figura 3 – Forma de onda típica de corrente de curto-circuito.
Modificado de (Rosentino, 2010).

Os efeitos dinâmicos provocados por um curto-circuito ocorrem principalmente no instante de maior amplitude da corrente assimétrica. Está ilustrada na Figura 4 a

variação da força associada com a curva de corrente do exemplo representado na Figura 3.

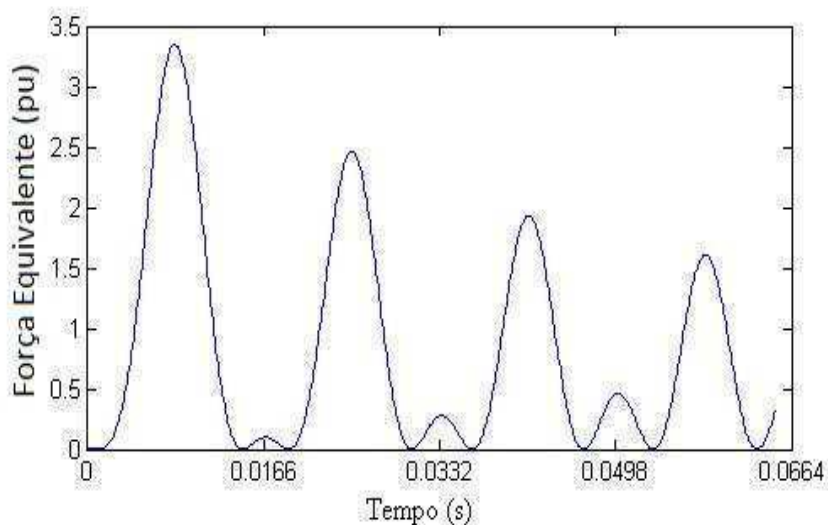


Figura 4 – Curva da força associada à corrente de curto-circuito assimétrica. Modificado de (Rosentino, 2010).

A amplitude da primeira crista (valor de pico) da componente assimétrica da corrente de curto-circuito é calculada pela expressão:

$$I_{assim} = I_{sim} \cdot K \cdot \sqrt{2}, \quad (1)$$

em que I_{assim} é o valor da corrente assimétrica de curto-circuito [A]; I_{sim} é o valor da corrente simétrica de curto-circuito [A] e a constante K é o fator de assimetria. A constante K é função da relação X/R do sistema. Geralmente, se utilizam os máximos valores de fator de assimetria para ensaios de transformadores de potência. Para fins práticos, a Tabela 2 é utilizada para especificar o valor para o fator de assimetria como função da relação X/R (ABNT, 2007).

Tabela 2 - Valores típicos do fator de assimetria. (ABNT, 2007).

X/R	1	1,5	2	3	4	5	6	8	10	≥ 14
K	1,07	1,16	1,25	1,38	1,48	1,55	1,61	1,68	1,74	1,8
$K\sqrt{2}$	1,51	1,64	1,76	1,95	2,09	2,19	2,27	2,38	2,46	2,55

Para um fator de assimetria máximo (1,8), as forças correspondentes ao valor da primeira crista da corrente de curto-circuito assimétrica são aproximadamente três vezes

maiores ($1,8^2 = 3,24$) do que para uma corrente completamente simétrica (WATERS, 1966). Uma vez que as forças produzidas são proporcionais ao quadrado da corrente.

Pela própria natureza física dos tipos de curtos-circuitos, o trifásico é mais raro. Em contrapartida, é o curto-circuito monofásico à terra o mais corriqueiro (KINDERMANN, 1997). Contudo, os curtos-circuitos trifásicos são os responsáveis pelos maiores esforços mecânicos que ocorrem nos enrolamentos dos transformadores. Por esse motivo, é prática usual projetar transformadores para suportar a esse tipo de curto-circuito em seus terminais (WATERS, 1966).

2.1.3 OS ESFORÇOS ELETROMECAÑICOS EM TRANSFORMADORES SUBMETIDOS A CURTOS-CIRCUITOS

Conforme a teoria eletrodinâmica, as forças eletromagnéticas em um enrolamento de um transformador devido à presença de corrente elétrica são caracterizadas pela seguinte produto vetorial:

$$\mathbf{f} = \mathbf{J} \times \mathbf{B}, \quad (2)$$

em que \mathbf{f} é a densidade de força num dado volume do enrolamento [N/m^3]; \mathbf{J} a densidade superficial de corrente no enrolamento [A/m^2] e \mathbf{B} a densidade de fluxo magnético de dispersão [T]. Esta equação define as forças eletromagnéticas como a interação entre as componentes das densidades de fluxo de dispersão e a corrente que circula nos enrolamentos.

Está ilustrada na Figura 5 a distribuição do fluxo magnético de dispersão nos enrolamentos devido à presença da corrente elétrica e as forças resultantes. O fluxo magnético é praticamente paralelo ao longo da altura dos enrolamentos (axial) e inclina-se nas extremidades superior e inferior dos enrolamentos, procurando o caminho de retorno. Isso provoca a decomposição do campo de dispersão em uma componente axial e outra radial nas extremidades do enrolamento. A interação do fluxo magnético de dispersão com a corrente elétrica origina as forças radiais e axiais que atuam nos enrolamentos do transformador.

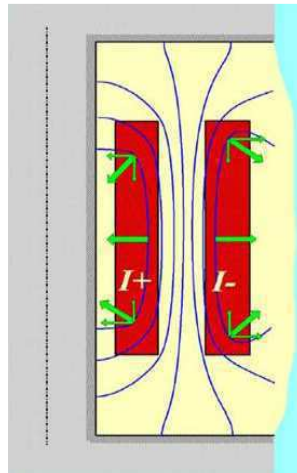


Figura 5 – Direção das forças eletromecânicas nos enrolamentos do transformador. (Rosentino, 2010).

Em condições normais de operação, os esforços eletromecânicos são perfeitamente suportáveis pelas estruturas dos enrolamentos do transformador, uma vez que os fluxos de dispersão são relativamente pequenos. Por outro lado, a ação de correntes elevadas decorrentes de curtos-circuitos pode aumentar consideravelmente os valores dos fluxos de dispersão, que por sua vez podem originar esforços capazes de causar o deslocamento e/ou a deformação dos enrolamentos, danificando total ou parcialmente o transformador.

O tipo de construção dos transformadores de potência considerados nas análises é o de enrolamentos concêntricos de núcleo envolvido, um tipo de construção que se realiza dispondo-se sobre cada coluna os dois enrolamentos de alta e baixa tensão, concêntricos, separados entre si por meio de material isolante (MARTIGNONI, 1969).

Os enrolamentos dos transformadores de potência são dimensionados para terem resistência mecânica suficiente para suportar os esforços eletromecânicos produzidos por um determinado valor de corrente de curto-circuito, estimado durante sua fase de projeto. Apesar disso, durante a vida útil do transformador em operação no sistema devem ser considerados vários fatores relativos a curtos-circuitos que venha a danificar o equipamento.

Dois fatores a serem considerados são a frequência de ocorrências de faltas e o tempo de duração dos defeitos. Quanto ao primeiro ponto, uma maior frequência na ocorrência destes eventos pode comprometer gradativamente a resistência dos componentes do transformador em suportar esses esforços. Com relação ao tempo de duração do defeito, como as forças máximas são verificadas na primeira crista da

corrente assimétrica, pode-se considerar esse fator como de pouco impacto nos esforços eletromecânicos.

Os defeitos mecânicos internos aos transformadores de potência geralmente são de difícil detecção e não retiram de imediato o transformador de operação. No entanto, a depender da gravidade das alterações mecânicas, essas falhas podem danificar o material isolante. As falhas do isolamento interno são problemas invariavelmente graves e dispendiosos para o transformador (HEATHCOTE, 1998). Esses problemas afetam o desempenho do equipamento e reduz sua vida útil.

Os esforços eletromecânicos devido a curtos-circuitos são os principais causadores dos defeitos mecânicos mais severos em transformadores, defeitos que são caracterizados pela deformação e/ou o deslocamento dos enrolamentos, danificando as estruturas de suporte e isolamento.

Vale destacar que os cálculos analíticos aplicados para estimar as forças e os estresses radiais e axiais nos enrolamentos são particularmente dependentes dos parâmetros geométricos das estruturas do transformador, além das características mecânicas dos condutores e material isolante e do nível de curto-circuito. Esta observação vai ficar evidenciada nas equações utilizadas para se determinar as referidas grandezas.

Os principais defeitos em enrolamentos de transformadores resultantes das forças e dos estresses radiais e axiais causados pela passagem da corrente de curto-circuito, bem como as equações relativas a essas grandezas serão apresentados na sequência.

2.1.3.1 DEFEITOS DEVIDO A FORÇAS RADIAIS

Os enrolamentos concêntricos de um transformador de potência têm comportamentos diferentes quando estão submetidos aos efeitos das forças radiais. A tendência dos esforços eletromecânicos é de comprimir (estresse radial de compressão) o enrolamento interno e de expandir (estresse radial de tração) o enrolamento externo, conforme é mostrado na Figura 6.

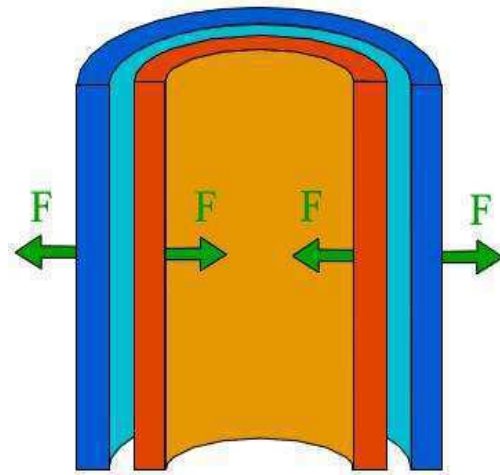


Figura 6 – Sentido das forças radiais nos enrolamentos interno e externo. (CHESF/UFU, 2009).

As deformações radiais são mais comuns no enrolamento interno e a sua resistência mecânica depende das estruturas de suporte dos condutores. Por sua vez, a resistência mecânica do enrolamento externo depende da capacidade do condutor em suportar a força de tração, e seu rompimento é mais difícil de ocorrer.

As principais consequências desse tipo de deformação podem ser resumidas entre as seguintes:

- i. Estiramento material isolante que reveste os condutores dos enrolamentos;
- ii. Diminuição das distâncias de isolamento entre o enrolamento interno e o núcleo;
- iii. Diminuição das distâncias de isolamento do enrolamento externo ao tanque ou a outro enrolamento do equipamento, no caso de transformadores trifásicos;
- iv. Afrouxamento das amarrações dos enrolamentos, permitindo certa mobilidade dos condutores, o que provoca vibrações e posterior fadiga do material isolante e das conexões.

As forças radiais F_{rad} totais que atuam em um enrolamento de diâmetro D_m e altura h podem ser calculadas mediante o emprego da expressão:

$$F_{rad} = \frac{2 \cdot \pi^2 \cdot (n \cdot I_{assim})^2 \cdot D_m}{h} \cdot 10^{-7} [N], \quad (3)$$

em que n representa o número de espiras do enrolamento; I_{assim} a máxima corrente assimétrica de curto-circuito no enrolamento [A]; D_m o diâmetro médio do enrolamento [m] e h a altura do enrolamento [m].

As forças radiais produzidas pelo campo de dispersão axial atuam no enrolamento externo produzindo um estresse de tração (também conhecido por *hoop stress*), tendendo a esticar o condutor do enrolamento. Enquanto que, para o enrolamento interno, as forças radiais atuam comprimindo o enrolamento, produzindo o estresse de compressão. O máximo valor da força radial ocorre no ponto médio dos enrolamentos (KULKARNI, 2004). Está representada na Figura 7 a ação dessas forças nos enrolamentos concêntricos de um transformador.

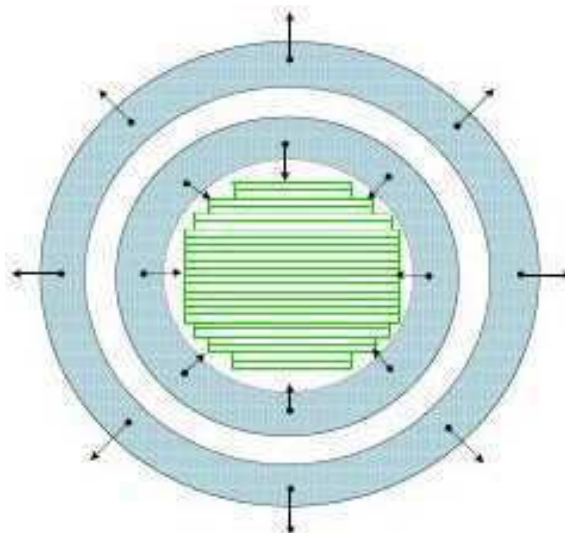


Figura 7 – Forças radiais agindo em enrolamentos concêntricos. (CHESF/UFU, 2009).

Como os condutores das bobinas estão firmemente montados, a força é transferida do condutor que experimenta a maior força para aquele que é menos solicitado. A partir desta constatação, faz-se necessário determinar um valor médio para as forças radiais (CHESF/UFU, 2009b). A força radial total F_r é equivalente à pressão sobre a circunferência de comprimento πD_m , enquanto que a força radial média F_{rmed} equivale à pressão sobre o diâmetro. Então a força radial média pode ser dada por:

$$F_{radmed} = F_{rad}/\pi \quad [N]. \quad (4)$$

Ou ainda:

$$F_{radmed} = \frac{2 \cdot \pi \cdot (n \cdot I_{assim})^2 \cdot D_m}{h} \cdot 10^{-7} [N]. \quad (5)$$

Adicionalmente, a força radial distribuída ao longo de cada espira do enrolamento pode ser obtida pela equação:

$$F_{raddist} = \frac{2 \cdot \pi \cdot n \cdot I_{assim}^2}{h} \cdot 10^{-7} [N/m], \quad (6)$$

considerando A como a seção transversal do condutor [m^2], o estresse radial médio nos enrolamentos será fornecido pela expressão:

$$\sigma_{radmed} = \frac{F_{raddist} \cdot D_m}{2 \cdot A} [N/m^2]. \quad (7)$$

Todas essas equações podem ser aplicadas tanto para os enrolamentos interno e externo do transformador para o cálculo das forças e dos estresses radiais, atentando para o uso correto dos parâmetros. No entanto, para estimar os estresses no enrolamento interno são exigidas considerações de projeto mais detalhadas.

Os níveis críticos das deformações às quais o enrolamento interno está submetido é função da seção transversal do condutor e do tipo do material utilizado. O valor do estresse radial crítico no enrolamento interno é determinado com base na utilização ou não de espaçadores axiais. As deformações podem se manifestar conforme a presença de espaçadores nos enrolamentos, os quais estão ilustrados na Figura 8.

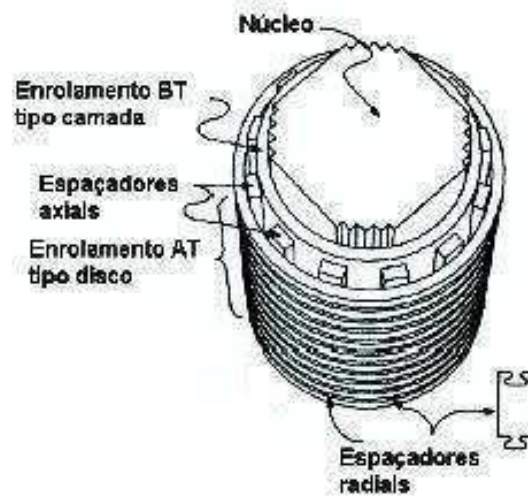


Figura 8 – Os enrolamentos e os espaçadores radiais e axiais.
Modificado de (CHESF/UFU, 2009).

Pela Equação 8 é possível calcular o estresse radial crítico para os enrolamentos que não possuem espaçadores axiais (*free buckling*).

$$\sigma_{crit-} = \frac{E \cdot e^2}{Dm^2} [N/m^2]. \quad (8)$$

Considerando E o módulo de elasticidade do material [N/m^2] e e a espessura radial do condutor [m].

Para os casos em que os enrolamentos estão providos de espaçadores axiais, o estresse crítico pode ser determinado pela seguinte expressão:

$$\sigma_{crit+} = \frac{E(\delta) \cdot (x \cdot e^2) \cdot Esp_{axial}^2}{12 \cdot Dm^2} [N/m^2]. \quad (9)$$

Em que $E(\delta)$ é o módulo de elasticidade incremental no valor crítico [N/m^2]; x a constante do fabricante para espessura equivalente do condutor e Esp_{axial} a quantidade de espaçadores axiais.

Está representado na Figura 9 o tipo de deformação que o enrolamento interno pode apresentar devido à presença de espaçadores axiais (*forced buckling*), decorrente dos esforços de compressão no enrolamento. A foto representada na Figura 10 mostra um enrolamento severamente afetado por esses esforços.

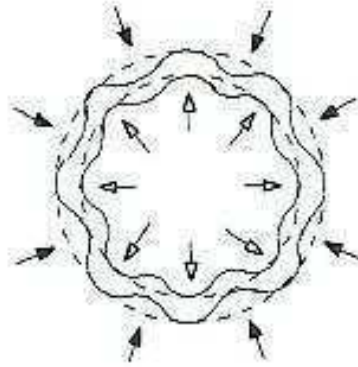


Figura 9 – Deformação forçada no enrolamento (forced buckling).
Modificado de (CHESF/UFU, 2009).



Figura 10 – Enrolamento danificado por deformação forçada (forced buckling).
Modificado de (Rosentino, 2010).

Para conferir aos enrolamentos internos resistência mecânica suficiente para suportar os esforços de compressão é utilizado um número adequado de suportes, que estejam em contato direto com o núcleo e uniformemente espaçados ao redor do mesmo, de maneira a prevenir qualquer movimento do enrolamento para dentro.

Outra forma de deformação decorrente das forças de compressão que pode afetar o enrolamento é conhecida por “curvatura livre” ou *free buckling*. Diferentemente do defeito ilustrado na Figura 9, este não está relacionado com a presença de espaçadores axiais, e se caracteriza com a projeção de um ou mais pontos da circunferência do

enrolamento tanto para fora ou para dentro, conforme pode ser observado na representação da Figura 11 e nas fotos da Figura 12.

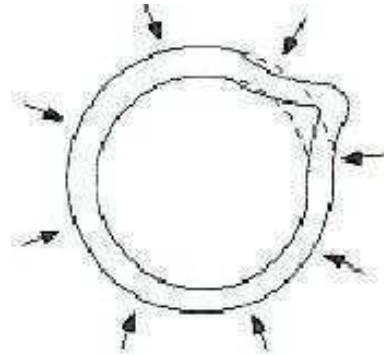


Figura 11 – Deformação livre no enrolamento (free buckling).
(CHESF/UFU, 2009).



Figura 12 – Saliências causadas por compressões radiais - free buckling.
Modificado de (Rosentino, 2010).

Os dois casos de deformações nos enrolamentos descritos podem ser considerados como um conjunto sequencial de defeitos, que se iniciam no condutor mais externo em direção ao condutor mais interno do enrolamento, próximo ao núcleo.

Conforme dito, as forças radiais produzem efeitos diferentes nos enrolamentos interno e externo de um transformador de potência de núcleo envolvido. O enrolamento externo fica submetido a um esforço de tração ou *hoop stress*, capaz de danificar a isolamento, caso o estresse de tração exceda os limites de resistência mecânica dos

condutores. Entretanto, a probabilidade desse tipo de defeito é baixa, uma vez que, geralmente, os condutores são dimensionados de maneira a resistir a esses esforços.

O projeto mecânico do enrolamento externo para resistir aos esforços de tração é relativamente mais fácil do que para os esforços de compressão. Isto se deve ao fato de que o estresse de tração permanece abaixo do limite mecânico do material condutor. Por sua vez, o enrolamento interno necessita de estruturas de suporte internas para manter sua resistência mecânica e os condutores podem se danificar, devido sua inclinação entre as estruturas de suporte. A técnica para estabelecer critérios para determinar a resistência mecânica dos enrolamentos internos aos esforços de compressão é complexa e pode variar de fabricante para fabricante.

2.1.3.2 DEFEITOS DEVIDO A FORÇAS AXIAIS

Como comentário inicial a essa seção, é importante destacar que os transformadores de potência avaliados possuem bobinas adicionais para regulação de tensão, com isso, não é característico desses transformadores a presença de derivações nos enrolamentos para esse fim, o que possibilita uma simplificação na estimativa dos esforços axiais.

No geral, as forças axiais são analisadas sob duas condições que geram forças distintas. Essas condições são denominadas de “ideal” e “não ideal”, sendo a primeira condição a aplicável aos transformadores aqui tratados, conforme será comentado mais adiante no item a.

As forças axiais atuam comprimindo verticalmente os enrolamentos dos transformadores de potência. Está representada na Figura 13 uma vista dos enrolamentos antes e após a atuação das forças radiais e as deformações resultantes.

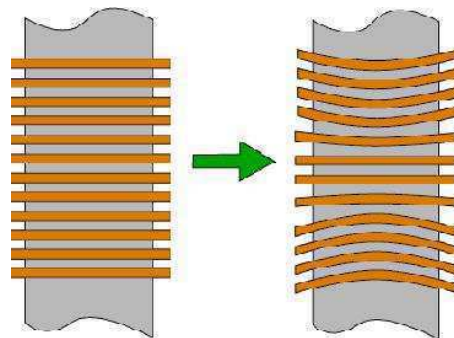


Figura 13 – Representação de uma deformação causada pelas forças axiais. (CHESF/UFU, 2009).

O cálculo das componentes das forças axiais em um transformador com enrolamentos concêntricos não é tão simples e preciso quanto o cálculo das forças na direção radial. No entanto, metodologias existentes podem fornecer resultados aproximados.

a) Enrolamentos sem derivações (tapes) e sem deslocamento axial

A “condição ideal” está presente quando transformadores têm distribuição uniforme de forças magnetomotrizes em enrolamentos concêntricos de igual comprimento, totalmente alinhados e sem derivações. As forças axiais devido ao campo de dispersão radial nas extremidades dos enrolamentos estão dirigidas para o ponto médio dos mesmos (KULKARNI, 2004).

As curvas da força de compressão axial estão representadas na Figura 14, na qual pode ser observado o comportamento da força em todos os pontos dos enrolamentos sob condições ideais. A curva pontilhada é a soma das outras duas e tem um valor praticamente constante ao longo da maior parte do enrolamento.

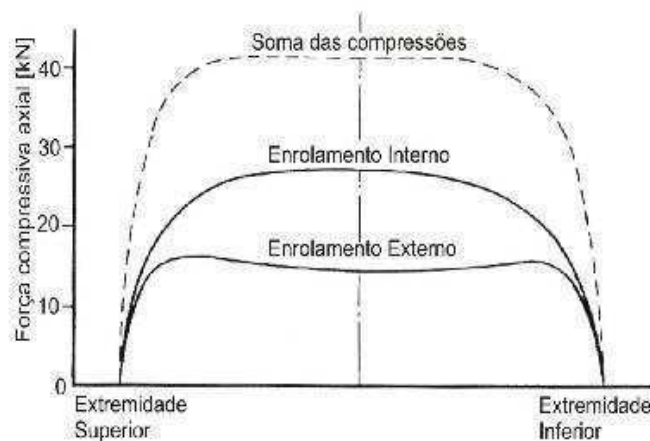


Figura 14 – Curvas de compressão axial em enrolamentos concêntricos. (CHESF/UFU, 2009).

De acordo com (CHESF/UFU, 2009b), considerando a força no pico da primeira metade do ciclo da corrente de curto-circuito, e assumindo um fator de assimetria de 2,55, o valor máximo da força compressiva total pode ser obtido por (10).

$$F_{ax+comptotal} = \frac{5,10 \cdot S \cdot 10^5}{3 \cdot Z_{pu} \cdot f \cdot h} [N], \quad (10)$$

em que S é a potência aparente por coluna [MVA]; h a altura do enrolamento [m]; Z_{pu} a impedância por unidade e f a frequência em ciclos por segundo.

O enrolamento interno, por estar mais próximo das colunas e em virtude do alto fluxo radial, experimenta uma força compressiva maior, quando comparada ao enrolamento externo. Nos casos onde não forem necessárias análises mais detalhadas, pode-se considerar que cerca de 2/3 a 3/4 desta força é aplicada ao enrolamento interno e os 1/3 a 1/4 restantes no enrolamento externo. Além disso, deve-se aplicar um acréscimo de 25% ao valor total estimado nas forças axiais no enrolamento externo, devido aos esforços axiais serem maiores para o enrolamento localizado na janela do transformador, de acordo com (CHESF/UFU, 2009b; WATERS, 1966).

b) Forças axiais em enrolamentos individuais

Para enrolamentos sem derivações, os esforços individuais mais elevados ocorrem nas extremidades dos enrolamentos, conforme as inclinações das curvas da Figura 14. Têm-se evidenciado com o auxílio de experimentos que as forças no final das bobinas de ambos os enrolamentos apresentam aproximadamente os mesmos valores. A partir dessas considerações, a força axial total na extremidade de qualquer enrolamento é dada pela Equação 11.

$$F_{ax} = 0,366 \cdot q \cdot F \cdot \log \left(1 + \frac{4 \cdot d^2}{w^2} \right) [N], \quad (11)$$

em que q representa o ampère-espira no final do enrolamento e é o resultado da razão entre a quantidade de condutores na extremidade do enrolamento e o número de espiras; w a dimensão axial do condutor, considerando sua isolação e a isolação entre espiras [m]; d é a largura equivalente do ducto do transformador e é dada por:

$$d_0 + \frac{1}{3} (d_i + d_e) [m], \quad (12)$$

em que d_i representa a largura do enrolamento interno [m] e d_e a largura do enrolamento externo [m]; e F equivale à:

$$F = \frac{2 \cdot \pi^2 \cdot (n \cdot I_{assim})^2 \cdot D_m}{10^7 \cdot h} [N]. \quad (13)$$

c) Estimativa dos estresses axiais

Entre as principais deformações causadas pelos esforços axiais estão aquelas relacionadas com a tendência de curvatura dos condutores dos enrolamentos quando são utilizados espaçadores radiais (efeito *bending*). Estão representados na Figura 15 os espaçadores dispostos radialmente, e na Figura 16 estão ilustradas as inclinações dos condutores entre os espaçadores radiais. É possível observar na foto da Figura 17 o efeito *bending* em um transformador real.

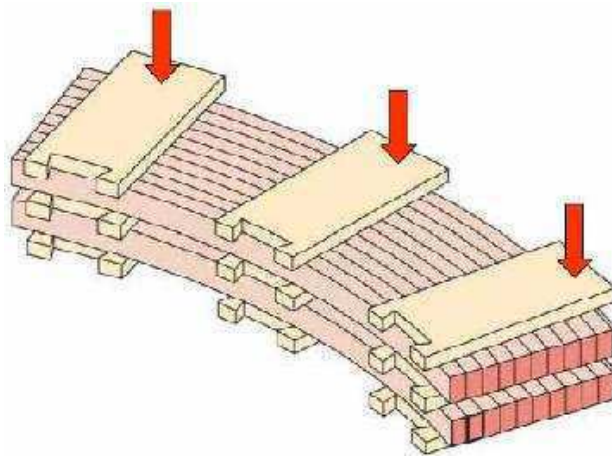


Figura 15 - Espaçadores radiais em um trecho do enrolamento.
(CHESF/UFU, 2009).

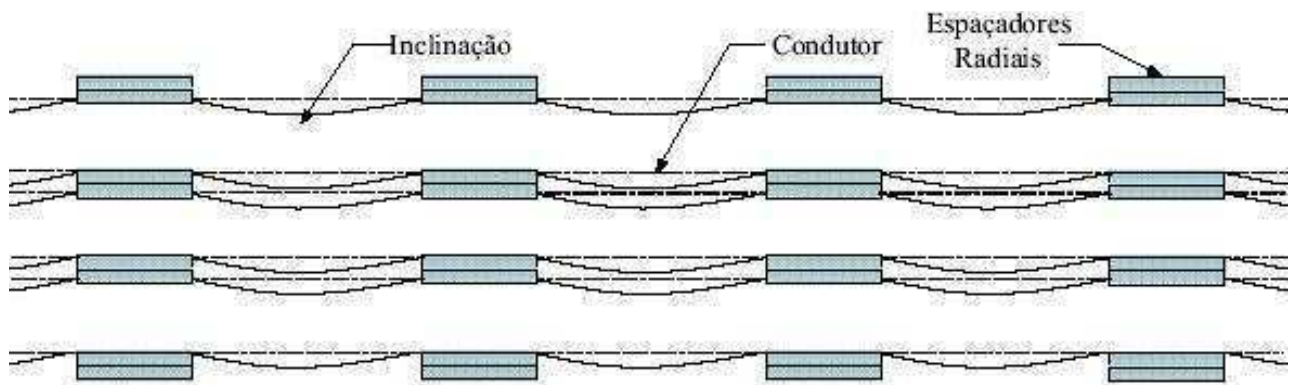


Figura 16 – Curvatura dos condutores entre os espaçadores radiais (efeito *bending*).
(CHESF/UFU, 2009).



Figura 17 – Efeito bending em um transformador real.
(CHESF/UFU, 2009).

Os estresses axiais relacionados com a curvatura dos condutores do enrolamento devido à presença de espaçadores radiais, ou efeito *bending*, pode ser determinado pela seguinte equação:

$$\sigma_{axbending} = \frac{F_{axdist} \cdot L^2}{2 \cdot e \cdot b^2} [N/m^2], \quad (14)$$

em que F_{axdist} representa a força axial distribuída ao longo da espira e pode ser calculada a partir de:

$$F_{axdist} = \frac{F_{ax}}{\pi \cdot D_m} [N/m]; \quad (15)$$

L é a distância entre os espaçadores radiais [m]; e a dimensão radial do condutor [m] e b a dimensão axial do condutor [m].

Outro tipo de defeito causado pela compressão axial cumulativa nos enrolamentos, e que é transmitida mediante o emprego de espaçadores e estruturas de fixação, é a inclinação dos condutores devido à ação de forças axiais críticas (efeito *tilting*). Estão representados na Figura 18 os condutores na posição normal e os mesmos inclinados devido à atuação das forças axiais. E as mesmas deformações podem ser vistas na foto da Figura 19. Nestas figuras é possível observar que ocorre um deslocamento da seção transversal dos condutores em torno do eixo de simetria perpendicular.

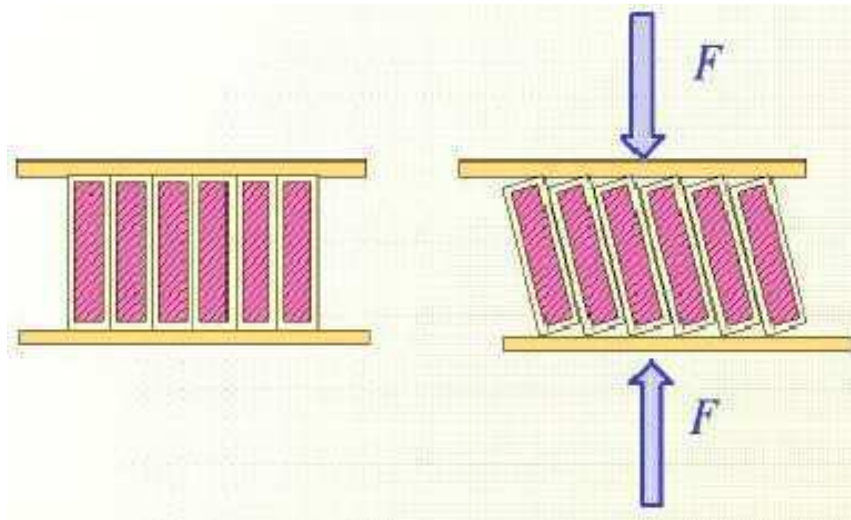


Figura 18 – Condutores inclinados devido a forças axiais (efeito *tilting*).
(CHESF/UFU, 2009).



Figura 19 – Efeito *tilting* em um transformador real.
(CHESF/UFU, 2009).

A carga crítica que o enrolamento pode tolerar é função dos parâmetros do condutor e da construção do enrolamento, incluindo a isolação entre condutores. Esta carga crítica pode ser calculada por (16).

$$F_{axcrit} = \frac{k \cdot \pi \cdot E \cdot A \cdot b}{3 \cdot D_m} [N]. \quad (16)$$

Sendo k a quantidade de condutores em cada disco do enrolamento; E o módulo de elasticidade [N/m^2]; A a área do condutor [m^2] e b a dimensão axial do condutor [m].

O estresse crítico é determinado pelas Equações 17 e 18. Sendo que para a Equação 18 está sendo considerado o efeito da isolação.

$$\sigma_{axcrit} = \frac{E \cdot b^2}{3 \cdot D_m^2} [N/m^2]; \quad (17)$$

$$\sigma_{axcrit} = \frac{E \cdot b^2}{14 \cdot R^2} + \frac{Esp_{radial} \cdot s \cdot c \cdot e^2}{12 \cdot \pi \cdot R \cdot b^2} [N/m^2]. \quad (18)$$

Em que R é o raio do enrolamento [m]; Esp_{radial} a quantidade de espaçadores radiais; s a largura dos espaçadores radiais [m]; e a dimensão radial do condutor [m] e c o módulo equivalente de elasticidade do papel isolante [N/m^2].

2.2 EMBASAMENTO TÉCNICO

Esta seção tem por objetivo apresentar as principais referências bibliográficas que embasaram o conteúdo teórico desta dissertação, acerca dos esforços eletromecânicos em transformadores, com destaque para os relatórios gerados a partir do projeto de P&D *Estresse-Din*. Também é citada como referência que contribuiu parcialmente para o desenvolvimento da dissertação o relatório gerado pela CHESF sobre as análises de adequabilidade de seus equipamentos em suportar curtos-circuitos.

Desde 2003, O relatório técnico Análises de Adequabilidade dos Equipamentos quanto à Corrente de Curto-Circuito (CHESF, 2014) é de suma importância para a CHESF, pois se trata do produto final das análises de adequabilidade dos equipamentos de alta tensão da empresa quando submetidos a curtos-circuitos. A sua atualização é anual e os processos de análise e de indicação de superação de equipamentos têm base legal em resolução normativa da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). No relatório estão indicações de equipamentos que devem ser substituídos devido à verificação de violações em suas capacidades nominais ao suportar a corrente de curto-circuito, bem como critérios para os processos de análises. Esses critérios têm como principais referências normas e relatórios técnicos, documentos regulamentadores e

publicações científicas. Conforme mencionado, a não abordagem dos efeitos dinâmicos da corrente de curto-circuito nas análises para transformadores, constituiu uma das motivações para esta dissertação.

Em 2009, foi produzido o primeiro relatório do projeto de P&D *Estresse-Din*. Tal projeto se propunha a fornecer uma metodologia para estimar os esforços eletromecânicos nos enrolamentos de transformadores causados por altas correntes transitórias e avaliar a sua adequabilidade. O período de execução do projeto teve início em outubro de 2008 e finalizado em março de 2012, tendo como principais autores o corpo técnico da UFU. O Relatório Técnico (RT1) *Bibliografia e Descrição do Estado da Arte* (CHESF, 2009a) apresenta a síntese do levantamento bibliográfico, com resumos e indicando o grau de importância de cada referência para o projeto. Na bibliografia constam normas e recomendações, livros de diversos autores, dissertações de mestrado, teses de doutorado e artigos técnicos que abrangem amplamente a temática acerca de transformadores de potência e suas generalidades, conceitos básicos, curto-circuito, falhas em transformadores, cálculo das forças eletromagnéticas e dos esforços eletromecânicos nestes equipamentos. Embora se constate a escassez de publicações específicas que abordem estudos sobre os esforços eletromecânicos em transformadores de potência, este relatório foi essencial por catalogar uma bibliografia considerável. Devido à quantidade de referências e à relativa homogeneidade dos conteúdos destas com os das referências aqui comentadas, evitou-se citá-las nesta dissertação, com a finalidade de não deixar esta seção desnecessariamente extensa. O referido relatório pode ser considerado como a principal fonte de busca de referências bibliográficas sobre o assunto.

Ainda em 2009, foi elaborado o segundo relatório do projeto de P&D (RT2) *Estresse Eletromecânico em Transformadores Causado pela Corrente de Curto-Circuito "Passante"* (CHESF/UFU, 2009b), o qual foi dividido em dois volumes. No primeiro volume foram abordados os esforços eletromecânicos nos enrolamentos do transformador causados pela corrente de curto-circuito. Este volume apresenta de forma concisa a definição dos fenômenos de curto-circuito, descreve os diversos tipos de esforços eletromecânicos, e identifica os principais tipos de falhas provocadas por estes esforços em enrolamentos concêntricos. Também define e caracteriza as forças eletromagnéticas e dos campos de dispersão, e apresenta uma metodologia analítica para o cálculo das componentes de forças axiais e radiais e os esforços eletromecânicos.

Finaliza com a descrição de um exemplo aplicando a citada metodologia analítica aos cálculos dos esforços eletromecânicos em um transformador trifásico de 5 MVA. Nesse primeiro volume no qual são apresentados os efeitos da corrente de curto-circuito, constituiu um dos principais pilares desta dissertação. O conteúdo do segundo volume complementa o que foi abordado no volume anterior, desta vez considerando os esforços eletromecânicos causados pela corrente de energização (corrente de *inrush*). Cabe ressaltar que o objetivo desta dissertação é avaliar os esforços eletromecânicos nos enrolamentos dos transformadores de potência devido à passagem corrente de curto-circuito assimétrica, e que não são abordados os efeitos da corrente de energização, apesar de a mesma ter sido tópico estudado no projeto de P&D.

No ano de 2010, com o objetivo de mostrar os resultados obtidos com as simulações computacionais para analisar o comportamento de um transformador de 15 kVA submetido a diversas condições operacionais, foram elaborados o Relatório Técnico 3 (RT3) Implementação Computacional dos Modelos (CHESF/UFU, 2010a) e o Relatório Técnico 5 (RT5) Estudos Computacionais das Modelagens de Transformadores Implementadas no ATP e no FLUX3D (CHESF/UFU, 2010b) do projeto de P&D. O RT3 apresenta as modelagens computacionais de transformadores, visando o desenvolvimento de uma estratégia computacional para estimar os esforços eletromecânicos. As modelagens computacionais foram implementadas em dois pacotes computacionais: *Alternative Transient Program* (ATP) e o *software* FLUX3D, que emprega o Método dos Elementos Finitos (MEF) para calcular grandezas elétricas, magnéticas e mecânicas. O RT5 mostra os resultados das simulações após a implementação dos modelos matemáticos nos pacotes computacionais. Os resultados serviram para comparar com os resultados obtidos pelos cálculos analíticos mostrados no RT2 e assim avaliar qual das metodologias, computacional ou analítica, oferece os resultados mais satisfatórios.

No mesmo ano de 2010, foi publicada uma dissertação de mestrado que tratava da estimativa dos esforços eletromecânicos em transformadores submetidos a um curto-circuito trifásico. Tal documento aborda de forma detalhada as características dos esforços mecânicos causados pelas forças axiais e radiais nos enrolamentos dos transformadores. Além disso, mostra os diferentes tipos de esforços eletromecânicos que podem ocorrer nos enrolamentos, identificando os principais tipos de falhas

decorrentes desses fenômenos. Também são confrontados os resultados estimados por uma metodologia analítica com os resultados obtidos mediante simulação computacional. Este documento pode ser considerado como um complemento ao projeto de P&D *Estresse-Din* (Rosentino, 2010).

Em 2011, foram emitidos os Relatórios Técnicos 4 (RT4) Ensaios Laboratoriais em um Transformador de 15 kVA (CHESF/UFU, 2011a) e 6 (RT6) Validação dos Modelos Computacionais Implementados (CHESF/UFU, 2011b). do projeto de P&D, como forma a complementar o que foi tratado nos relatórios anteriores. O RT4 apresenta os ensaios laboratoriais em um transformador de 15 kVA, executados em duas etapas. A primeira etapa incluiu medições que foram realizadas para se obter as grandezas elétricas, a fim de que fossem comparadas com os resultados obtidos nas simulações computacionais, validando, assim, os modelos matemáticos implementados computacionalmente, com a ressalva de que as grandezas magnéticas e mecânicas não puderam ser obtidas experimentalmente. A segunda etapa apresentou os resultados dos ensaios da Análise de Resposta em Frequência (do inglês *Frequency Response Analysis*, FRA), inserida no relatório apenas com a finalidade de apresentar a técnica. Também com a intenção de validar os modelos computacionais, o RT6 mostra um estudo comparativo entre as grandezas elétricas, magnéticas e mecânicas, obtidas por simulações computacionais, ensaios em laboratório e cálculos analíticos. É importante destacar que, embora o programa FLUX3D tenha se mostrado a ferramenta mais apropriada para os estudos em questão por apresentar uma representação do transformador mais próximo do real, a metodologia mediante o emprego de cálculos analíticos é a mais indicada por oferecer uma estimativa mais rápida sobre os esforços eletromecânicos em transformadores de potência resultantes de curtos-circuitos.

Ainda em 2011, fecha-se o ciclo de execução do projeto de P&D com a emissão do Relatório Técnico 7 (RT7) Metodologia para Avaliação da Vida Útil de Transformadores de Potência (CHESF/UFU, 2011c) que propõe a metodologia para avaliar a correlação dos esforços eletromecânicos e a vida útil do transformador. Este documento apresenta as três metodologias desenvolvidas para avaliar se os enrolamentos do transformador estão adequados para suportar os esforços mecânicos causados pela corrente de curto-circuito: metodologia analítica, metodologia baseada em simulações computacionais e metodologia baseada em técnicas laboratoriais. Por fim, a metodologia utilizada para as análises dos transformadores da CHESF foi a de

cálculos analíticos por sua estimativa rápida dos esforços eletromecânicos, e como forma de automatizar esse processo e torná-lo operacional, foi desenvolvida a ferramenta computacional *Estresse-Din-Trafo*. Uma observação que cabe a este relatório, é que o título “Metodologia para Avaliação da Vida Útil de Transformadores de Potência” pode ser interpretado de forma que a metodologia fornece um diagnóstico preciso sobre a vida útil do transformador. Na realidade, mostra a adequabilidade dos enrolamentos calculando os esforços eletromecânicos devido a um determinado valor de corrente e compara com os valores admissíveis desses esforços.

3 METODOLOGIA

Tendo em vista os objetivos desta dissertação, e o enfoque profissionalizante do curso de pós-graduação, procurou-se estabelecer uma estrutura metodológica que conciliasse com as atividades vinculadas com as análises de adequabilidade de equipamentos em suportar a corrente de curto-circuito, exercida pela Divisão de Estudos da Operação Elétrica (DOEL) da CHESF.

Dessa forma, buscaram-se utilizar os recursos disponíveis na Empresa, como seus próprios ativos, ferramentas computacionais, banco de dados, instalações físicas, estudos realizados, entre outros. Em outras palavras, procurou-se conciliar com a realidade técnico-empresarial. Assim, o foco da metodologia foi a realização de simulações mediante o emprego de ferramentas computacionais, como o mencionado *software Estresse-Din-Trafo*.

Posteriormente as simulações, foram feitas análises dos dados de saída, que representam os resultados calculados dos esforços eletromecânicos. As análises focaram as variações dos valores dessas grandezas conforme evoluem a partir de quatro diferentes configurações sistêmicas. Todas essas condições foram consideradas para as análises dos esforços eletromecânicos em quatro transformadores de potência trifásicos adquiridos recentemente pela Empresa, de três fabricantes diferentes, operando em quatro subestações, localizadas em diferentes subsistemas elétricos de atuação da CHESF.

Para viabilizar as simulações, foi necessário obter, inicialmente, os dados de entrada do *software*. Uma parte destas informações consiste dos dados de projeto dos transformadores, fornecidos pelos fabricantes, no caso, as grandezas elétricas e geométricas do equipamento. O outro bloco de informações necessárias como dados de entrada são os valores assimétricos das correntes de curto-circuito trifásico, passantes pelos enrolamentos de alta e baixa tensão. Para a obtenção dessas informações, foram realizadas simulações em ferramenta computacional específica para o cálculo dos valores simétricos da corrente de curto-circuito trifásico. Estas simulações consideraram condições sistêmicas conservativas, buscando assim tornar mais severos os impactos dos esforços eletromecânicos nos enrolamentos do transformador.

Na sequência, é apresentada a estrutura da metodologia utilizada nas simulações. Procurou-se seguir um esquema passo a passo.

3.1 DEFINIÇÃO DOS TRANSFORMADORES

Para se definir o conjunto de transformadores a serem analisados, selecionou-se uma amostra de quatro transformadores de propriedade da CHESF que representassem, de maneira minimamente significativa, o universo de transformadores que operam no sistema elétrico da Empresa. Ou seja, são transformadores de potência de grande porte, acima de 100 MVA de potência nominal, tensões nominais de 230/69 kV, operando em instalações com três unidades em operação, conforme está representado na Figura 20.

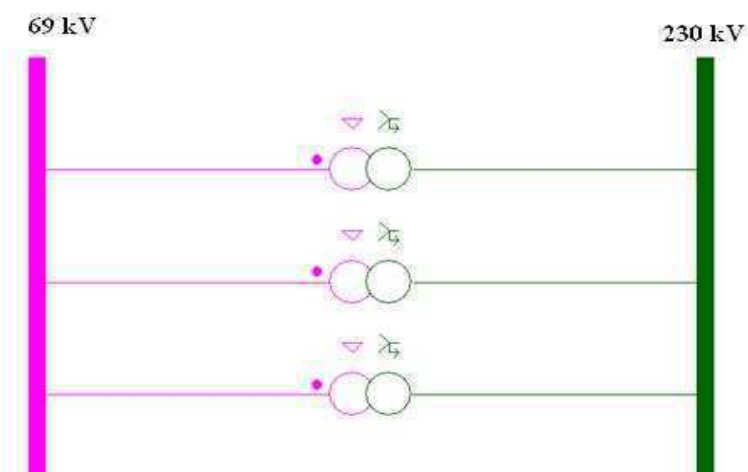


Figura 20 – Diagrama unifilar simplificado de uma subestação com três transformadores.

Seguem descritos na Tabela 3 os equipamentos selecionados para as análises com as respectivas subestações, fabricantes, e os valores nominais de potência e tensão, considerando que os enrolamentos de 69 kV e 230 kV possuem ligações em delta e estrela, respectivamente. Os diagramas unifilares das subestações constam no Anexo B, cabendo uma observação: apenas no diagrama da subestação Milagres estão representados os três transformadores na instalação, uma vez que, por ora, apenas esta subestação está operando com todos os transformadores, para as demais subestações, o terceiro transformador ainda não está em operação. Contudo, para as simulações, foram consideradas todas as subestações operando com três transformadores.

Para melhor identificação, convencionou-se identificar cada transformador por um código alfanumérico (TR 1 ao TR 4). A escolha desses transformadores levou em conta a disponibilidade das informações necessárias para possibilitar as simulações.

Tabela 3 – Transformadores da CHESF selecionados para as simulações.

	TR 1	TR 2	TR 3	TR 4
Subestação	<i>Milagres</i>	<i>Cauípe</i>	<i>Natal III</i>	<i>João Câmara II</i>
Fabricante	<i>WEG</i>	<i>Hyundai</i>	<i>Hyundai</i>	<i>ABB</i>
Potência total de transformação (MVA)	<i>3 X 100</i>	<i>3 X 100</i>	<i>3 X 150</i>	<i>3 X 180</i>
Tensão nos enrolamentos (kV)	<i>230/69</i>	<i>230/69</i>	<i>230/69</i>	<i>230/69</i>

Conforme foi comentado, parte do pacote dos dados de entrada do *software Estresse-Din-Trafo*, responsável pelos cálculos dos esforços eletromecânicos, consiste das informações de projeto do transformador, fornecidos pelo fabricante em documento impresso ou digital, contendo os dados elétricos e construtivos do equipamento, incluindo informações sobre o desempenho dos enrolamentos quando submetidos a esforços mecânicos resultantes da passagem da corrente de curto-circuito, como também os valores admissíveis desses esforços. Esses documentos são repassados pelo fabricante ao Órgão da Empresa responsável pela aquisição do equipamento, no entanto, podem ocorrer dificuldades na interpretação de algum dado e/ou a omissão de alguma outra informação, nesse caso, se faz necessário recorrer ao fabricante para os devidos esclarecimentos.

Além dos parâmetros elétricos, são necessários também os parâmetros geométricos das estruturas do transformador, as características mecânicas dos condutores e da isolação e os valores dos estresses eletromecânicos admissíveis. Todas essas grandezas, num total de 70, estão listadas no Anexo A ao final desta dissertação. É importante mais uma vez salientar que essas informações têm caráter estritamente confidencial, não podendo ser divulgados externamente à Empresa, portanto, os valores numéricos relativos a esses dados não são informados nesta dissertação.

3.2 DEFINIÇÃO DAS CONFIGURAÇÕES DO SISTEMA ELÉTRICO

O SEP é um fator importante que influencia nos níveis de curto-circuito e não pode ser ignorado nas análises dos esforços eletromecânicos em transformadores. Conforme foi discutido, os valores desses esforços são estimados na fase de projeto do

transformador sem considerar a contribuição do sistema elétrico na corrente de curto-circuito.

Para se determinar os valores da corrente de curto-circuito em projeto de transformadores, geralmente é considerada apenas a impedância percentual do transformador, com o equipamento virtualmente fora do sistema. Porém, para uma estimativa mais próxima possível do real dos níveis de curto-circuito, é necessário considerar a contribuição do sistema, incluindo a sua impedância, além de outros fatores, como proximidade com geração, interligação entre circuitos e a regulação de tensão. A depender da topologia da rede na qual está conectado o transformador, a ocorrência de uma falta poderá levar a esforços consideráveis nos enrolamentos. A impedância do sistema pode contribuir para limitar esses esforços, entretanto, deve-se levar em conta a questão da regulação da tensão, que pode comprometer medidas operacionais adotadas para reduzir os níveis de curto-circuito.

Um aspecto que deve ser destacado é a questão da regulação de tensão. Para atender aos requisitos mínimos de tensão, os níveis de tensão nos barramentos da subestação devem ser ajustados de acordo com as solicitações do sistema, o que pode ser realizado mediante a utilização dos tapes dos transformadores ou outros meios de compensação reativa. É de conhecimento geral que a tensão máxima de operação admissível no sistema elétrico é de 1,05 pu. Nessa condição, haverá um incremento nos níveis de curto-circuito do sistema.

Outro fator que deve ser considerado por influenciar nos níveis de curto-circuito é a configuração da subestação no momento da falta, ou seja, se a mesma está operando em sua configuração completa ou em contingência. Por exemplo, é comum em instalações com mais de um transformador, alguma unidade estar temporariamente fora de operação, ou por estar em manutenção, ou devido à atuação imprópria dos dispositivos de proteção, entre outros. Nestas condições, as quais podem levar ao desligamento de uma ou mais unidades de transformação, quando da ocorrência de curtos-circuitos em algum ponto do circuito suprido pelos transformadores, poderá haver um aumento da corrente de curto-circuito passante nas unidades remanescentes. Para um melhor entendimento desta situação, estão representados nas Figuras 22 e 23 os resultados de simulações para determinar os níveis de curto-circuito aplicado no barramento de 69 kV em uma subestação com três transformadores de 230/69 kV.

Pode ser observado que na Figura 21 a subestação está com a sua configuração completa e a Figura 22 está com uma das unidades fora de operação. Com isso, o fluxo total da corrente de curto-circuito será “forçado” a se redistribuir nos transformadores remanescentes, acarretando em um acréscimo no valor da corrente passante nos enrolamentos dessas unidades, apesar de o aumento da impedância do circuito reduzir o valor da corrente de curto-circuito total.

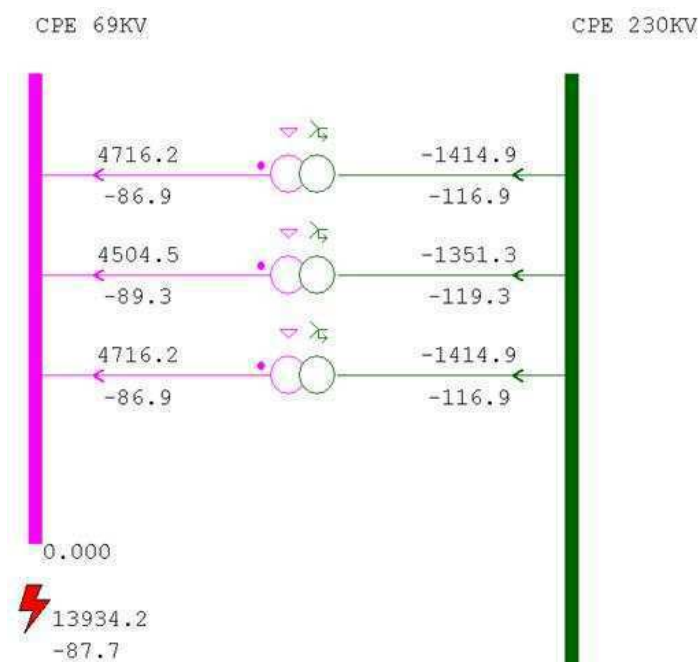


Figura 21 – Níveis da corrente de curto-circuito (A) em uma subestação com três transformadores.

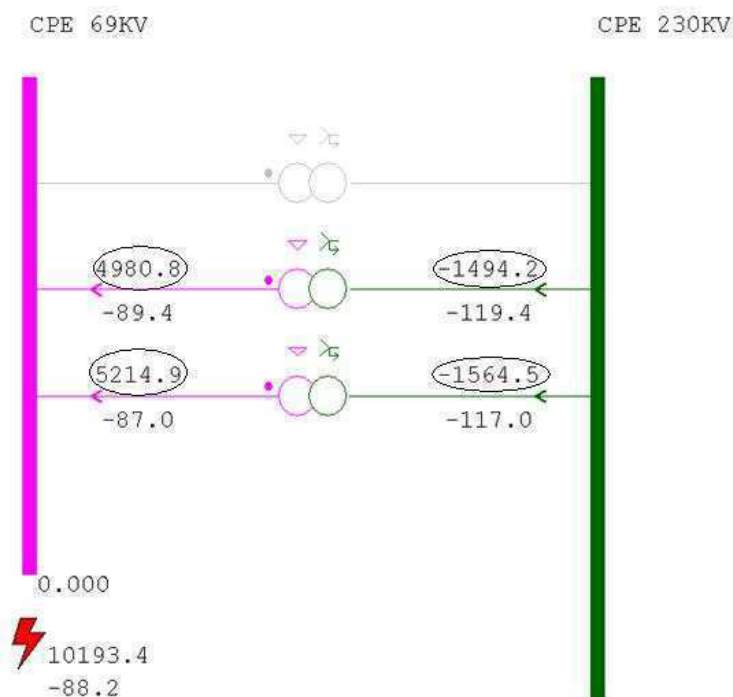


Figura 22 – Níveis da corrente de curto-circuito (A) na mesma subestação em contingência.

Todas as subestações onde operam os transformadores objeto das simulações fazem parte do sistema elétrico da CHESF, que por sua vez se conectam ao Sistema Interligado Nacional. Estes que são sistemas que podem apresentar as mais variadas topologias. Como forma de se obter uma visão ampla de um trecho do sistema da CHESF, o mapa geográfico-elétrico representado na Figura 23 mostra a localização geográfica e os circuitos de três das referidas subestações.

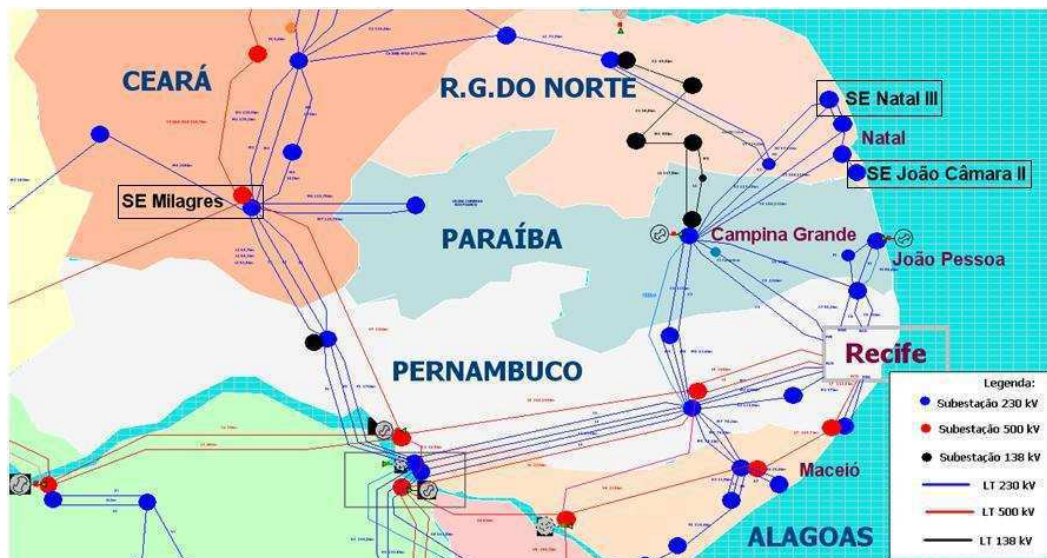


Figura 23 – Mapa eletrogeográfico e as subestações em destaque.

Diante dessas situações reais de sistema elétrico que podem influenciar nos níveis de curto-circuito, e conseqüentemente, os esforços eletromecânicos, ficaram definidas quatro configurações elétricas a serem consideradas nas simulações, de forma a tornar os efeitos dinâmicos da corrente de curto-circuito mais severos sobre os enrolamentos do transformador. As condições de configuração do sistema elétrico estão detalhadas a seguir:

1. Sistema completo, geração máxima, com os barramentos de 230 e 69 kV das subestações com 1 pu de tensão;
2. Sistema completo, geração máxima, com os barramentos de 230 e 69 kV das subestações com 1,05 pu de tensão;
3. Sistema completo, geração máxima, com um dos transformadores da subestação fora de operação e os barramentos de 230 e 69 kV com 1 pu de tensão;

4. Sistema completo, geração máxima, com um dos transformadores da subestação fora de operação e os barramentos de 230 e 69 kV com 1,05 pu de tensão.

3.3 SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS

Definidos os equipamentos objetos de estudo e as configurações do sistema elétrico, e de posse de todos os parâmetros necessários para o cálculo dos esforços eletromecânicos que devem ser fornecidos pelo fabricante, partiu-se então para as simulações computacionais. As simulações iniciais são para determinar os valores eficazes das correntes simétricas de curto-circuito trifásico, para posteriormente calcular os valores assimétricos.

Conforme descrito anteriormente, os curtos-circuitos trifásicos ocasionam os maiores esforços eletromecânicos em transformadores de potência. Por esse motivo, esse tipo de falta foi a considerada nas simulações para estimar as correntes simétricas de curto-circuito. Para esta função foi utilizado o *software* Sapre/Anafas desenvolvido pelo Cepel, que se trata de uma ferramenta computacional gráfica consolidada pelas empresas do setor elétrico para calcular os níveis de curto-circuito em sistemas elétricos.

Para se determinar os níveis de curto-circuito simétrico, foi necessário definir qual caso de referência deveria ser utilizado. Esses casos são elaborados pelo Operador Nacional do Sistema (ONS) e incorporam todo o sistema elétrico interligado, com a representação elétrica dos circuitos feita por barras e linhas de transmissão. As configurações dos casos de referência representam a situação elétrica do sistema de acordo com o período vinculado ao caso (por exemplo, caso de referência para o ano de 2014). Com o objetivo de se buscar um horizonte o mais distante possível, dessa forma abrangendo o máximo da expansão do sistema, o caso base utilizado nas simulações foi o previsto para dezembro de 2016.

Os resultados das simulações efetuadas pelo programa supracitado representam os valores simétricos da corrente de curto-circuito passante nos enrolamentos dos transformadores, resultantes de uma falta trifásica aplicada ao barramento de 69 kV de cada subestação, nas condições de configuração completa e em contingência (um dos transformadores fora de operação). Como o programa Sapre realiza as simulações

considerando uma tensão pré-falta de 1 pu, deve-se também obter esses valores corrigidos para atender as condições de máxima tensão de operação de 1,05 pu.

Para o cálculo da corrente assimétrica considerou-se o valor máximo do fator de assimetria de 2,55, conforme indicado na Tabela 2. É importante destacar que os referidos valores da corrente de curto-circuito assimétrica nos enrolamentos são inseridos manualmente no *software Estresse-Din-Trafo*, uma vez que essas grandezas são calculadas pelo programa sem considerar o sistema elétrico. Isto constitui o principal argumento para justificar o que está exposto neste item acerca da obtenção das correntes de curto-circuito, ou seja, a necessidade de se obtê-las mediante o emprego de *software* específico onde esteja considerado o sistema elétrico.

De posse de todo esse conjunto de informações, já é possível realizar as simulações para estimar as forças e os estresses eletromecânicos propriamente ditos. A utilização da ferramenta computacional *Estresse-Din-Trafo* emprega como formato de entrada dados dispostos em uma planilha do Microsoft Excel. Esses dados são exportados para o *software* que irá calcular os esforços eletromecânicos. No Anexo C consta um tutorial com guias passo a passo de instalação e operação do programa *Estresse-Din-Trafo*, ilustrações da *interface* do programa, e mostra um exemplo de aplicação para um transformador de 5 MVA.

Por fim, para resumir o que foi apresentado nesta parte da dissertação, está representado na Figura 24 um diagrama de blocos onde está representada sequencialmente a estrutura metodológica desenvolvida para as simulações computacionais.

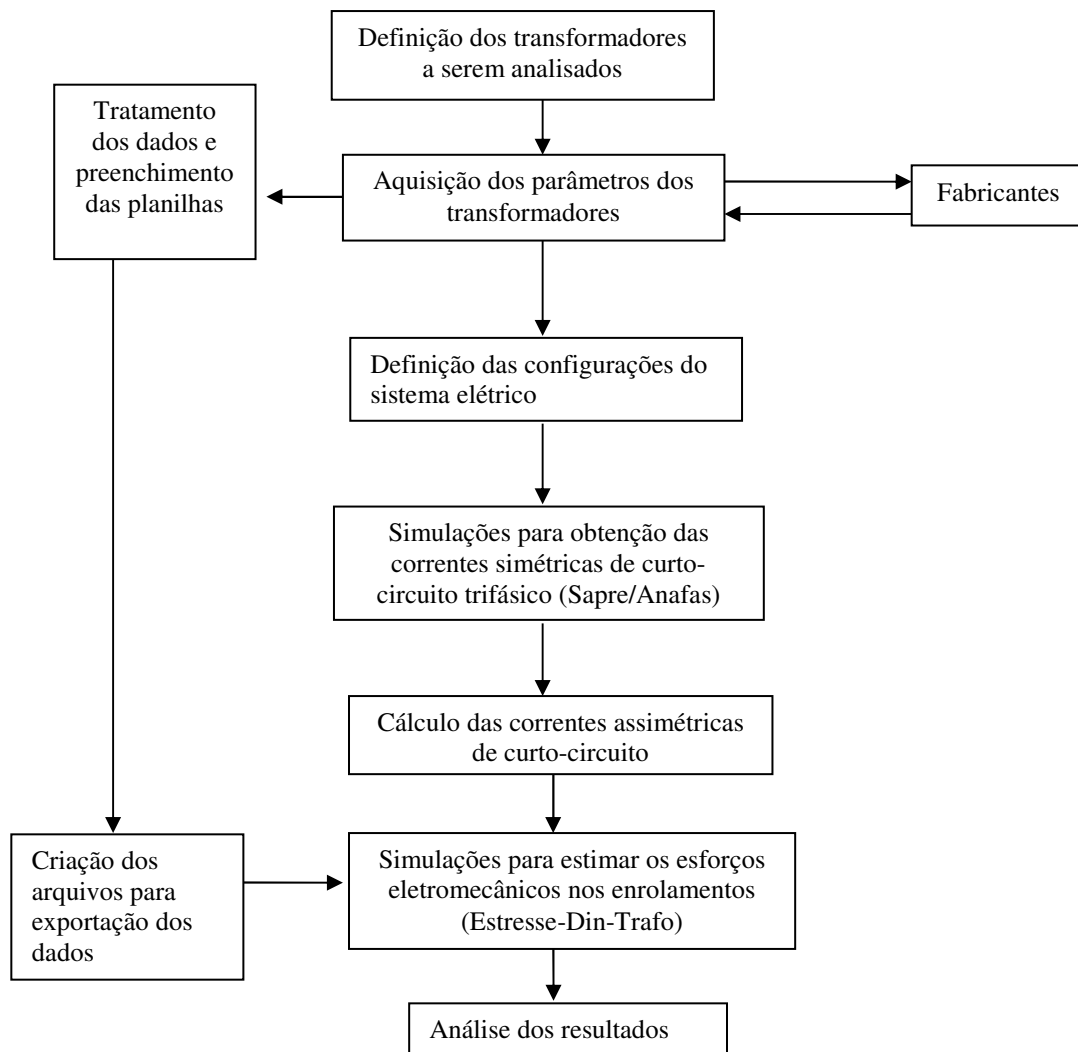


Figura 24 – Estrutura da metodologia para as simulações.

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos a partir da análise dos valores de saída das simulações. Como forma de organizar o conteúdo, optou-se por apresentar os resultados das principais grandezas envolvidas nas simulações, uma vez que os demais dados de saída mostraram resultados na mesma relação.

Para fins de adaptação às nomenclaturas usualmente adotadas no Mercado, o termo “estresse” utilizado nesta seção e nas demais partes desta dissertação nas quais é citado, está se referindo à grandeza pressão, ocasionada pelas forças eletromecânicas.

Para melhor entendimento dos gráficos, repetem-se abaixo as configurações elétricas consideradas nas simulações e a respectiva referência numérica:

1. Sistema completo, geração máxima, com os barramentos de 230 e 69 kV das subestações com 1 pu de tensão;
2. Sistema completo, geração máxima, com os barramentos de 230 e 69 kV das subestações com 1,05 pu de tensão;
3. Sistema completo, geração máxima, com um dos transformadores da subestação fora de operação e os barramentos de 230 e 69 kV com 1 pu de tensão;
4. Sistema completo, geração máxima, com um dos transformadores da subestação fora de operação e os barramentos de 230 e 69 kV com 1,05 pu de tensão.

4.1 ESFORÇOS ELETROMECÂNICOS RADIAIS

Os maiores valores das grandezas analisadas foram verificados nos enrolamentos de 69 kV dos transformadores estudados, com destaque para o transformador da subestação Natal III por apresentar os maiores níveis da corrente de curto-circuito. Estas observações podem ser confirmadas pelo gráfico representado na Figura 25.

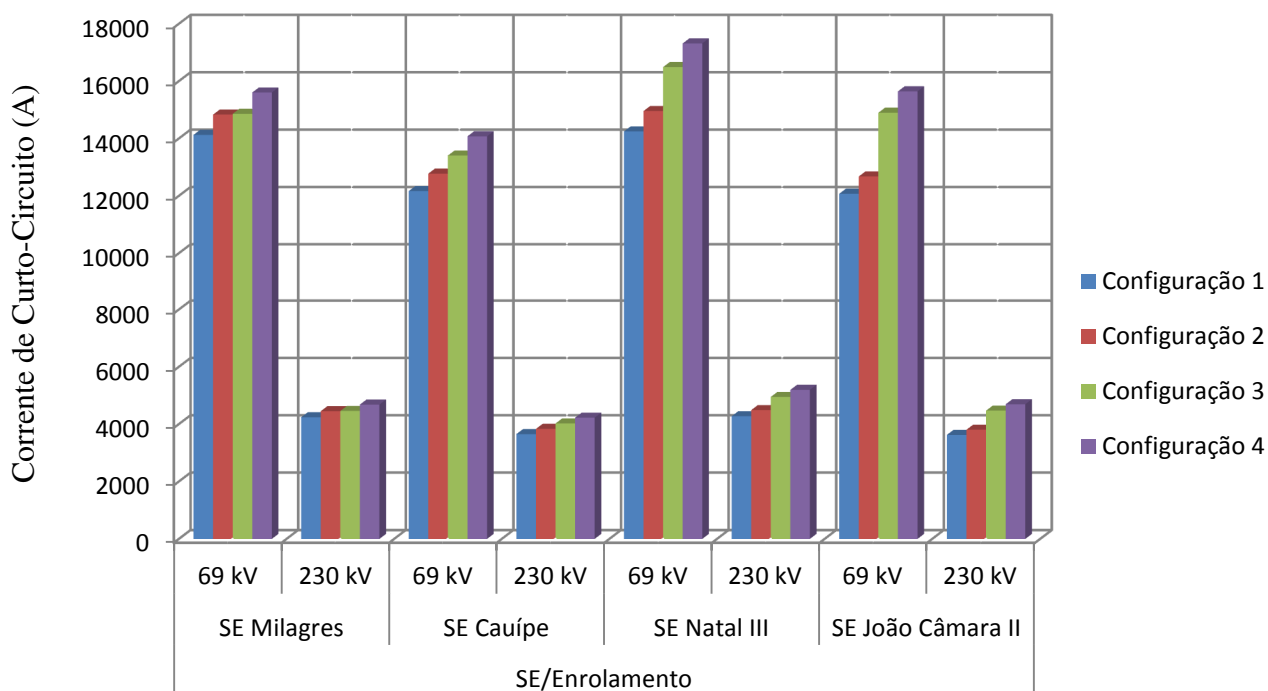


Figura 25 – Corrente de curto-circuito assimétrica.

O comportamento apresentado na SE Natal III se verificou principalmente devido à contribuição do sistema elétrico aos níveis de curto-circuito, onde se constata a presença de fontes geradoras interligadas a esta subestação. Contudo, de acordo com os gráficos das Figuras 26 e 27, os maiores esforços radiais foram observados no transformador da subestação Milagres.

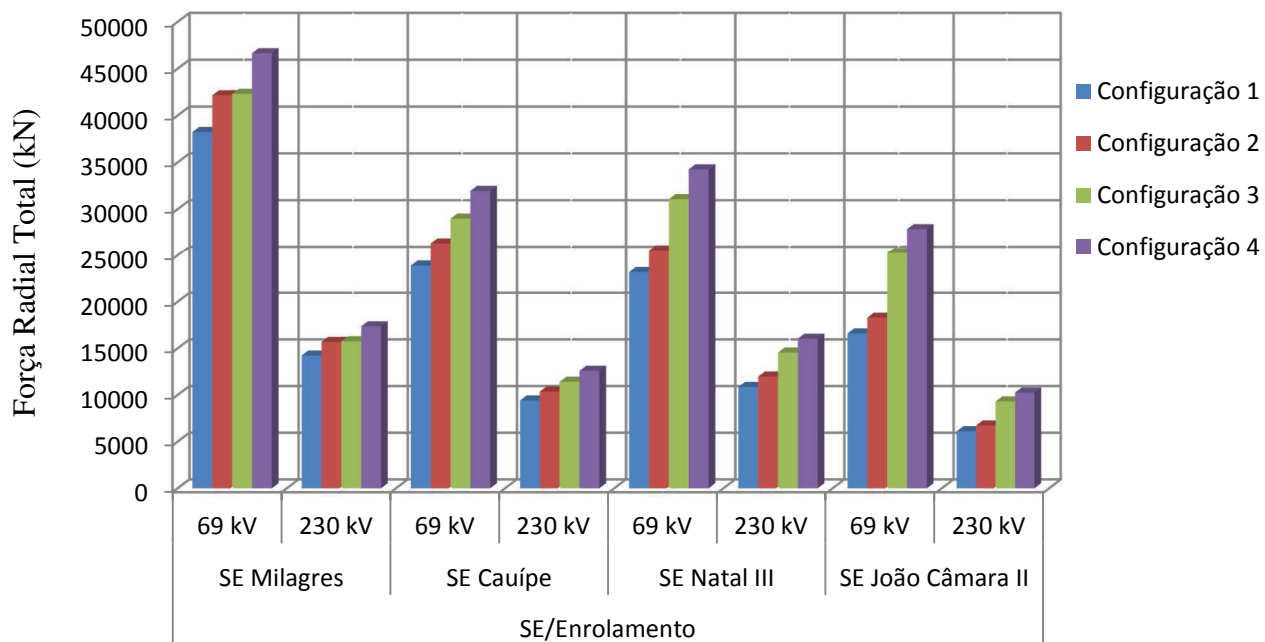


Figura 26 – Força radial total.

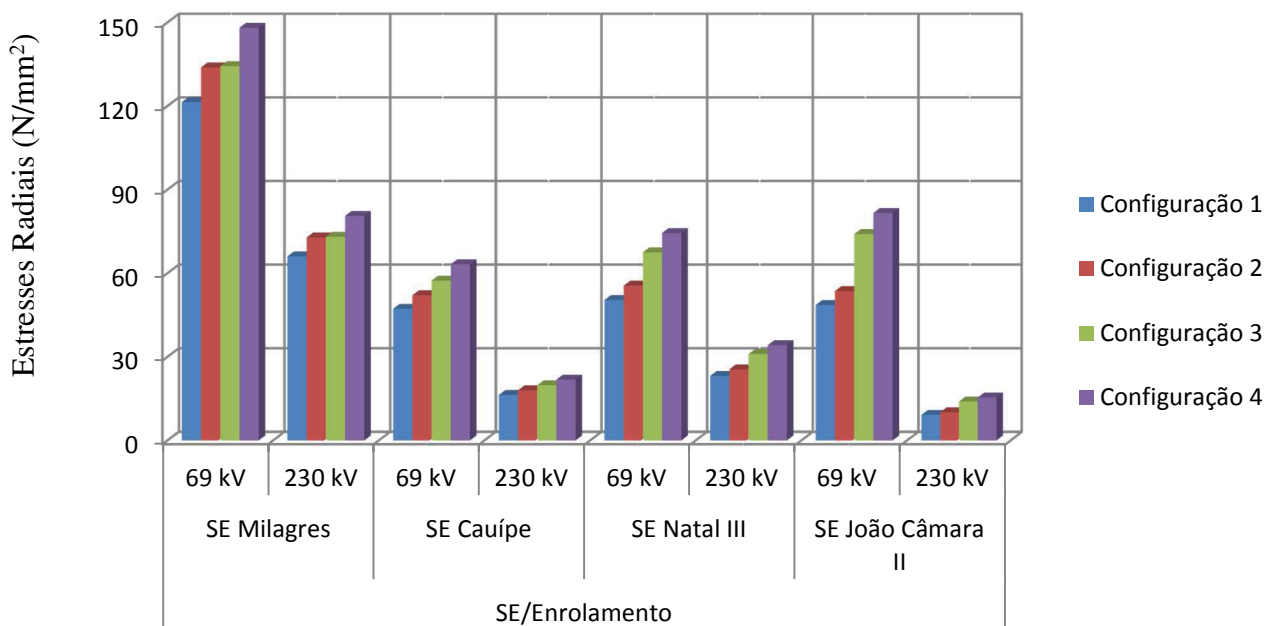


Figura 27 - Estresses radiais de compressão e tração.

A partir das análises dos gráficos das Figuras anteriores, pôde-se inferir que maiores níveis de corrente não implicam necessariamente em forças radiais mais elevadas, como também os estresses mais severos não são obrigatoriamente causados

pelas maiores forças. Estes fenômenos estão relacionados em grande parte às características construtivas e geométricas do transformador.

Está representada no gráfico da Figura 28 a evolução dos esforços radiais no transformador da subestação João Câmara II considerando as quatro configurações de sistema elétrico. Os valores das forças radiais totais culminam na configuração 4 com uma evolução de até 68 % em comparação com a configuração 1. A evolução crescente das forças radiais a partir da configuração 1 até a configuração 4 também pode ser observada nos transformadores das demais subestações.

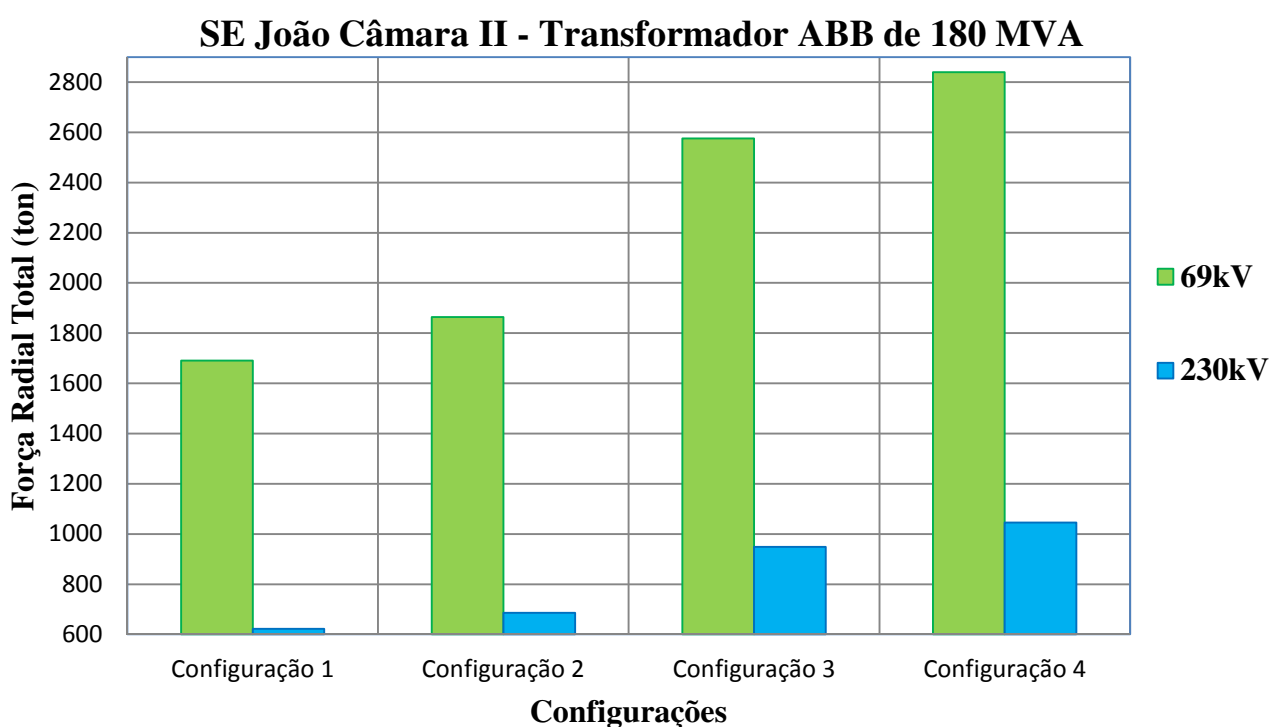


Figura 28 - Força radial total na subestação João Câmara II.

As forças radiais médias e distribuídas mostraram comportamento proporcional ao representado no gráfico da Figura 28. Conforme mencionado, no caso dos transformadores que não possuem espaçadores axiais, não é possível avaliar os efeitos radiais (*radial bending* ou *forced buckling*) no enrolamento interno.

Com base nos valores dos estresses radiais de compressão no enrolamento de 69 kV comparados com os limites admissíveis fornecidos pelos fabricantes, constatou-se a superação destes limites e a consequente possibilidade de danificação física nos enrolamentos internos dos transformadores das subestações Milagres (com 6% acima do limite na configuração 4) e João Câmara II (com 7% acima do limite na configuração 3).

e 18% acima do limite na configuração 4). Já os estresses radiais de tração no enrolamento de 230 kV apresentaram valores próximos aos nominais apenas no transformador da subestação Milagres, porém, sem a violação do limite admissível. No caso do transformador da subestação João Câmara II, também foi verificada na configuração 4 a superação de 4% dos limites nominais do enrolamento interno em suportar os estresses radiais *bending* ou *forced buckling*, uma vez que este transformador possui espaçadores axiais. Com relação aos transformadores das demais subestações, não foram detectados casos de superação dos limites admissíveis para os esforços radiais.

É importante destacar, que, apesar de os maiores níveis de curto-circuito serem verificados no transformador da subestação Natal III, os possíveis casos de danos mecânicos causados pelos estresses radiais só foram constatados nos transformadores das subestações Milagres e João Câmara II, isto pode ser devido às particularidades construtivas de cada transformador.

4.2 ESFORÇOS ELETROMECÂNICOS AXIAIS

Os esforços axiais apresentaram uma evolução crescente da configuração 1 a 4, análoga à dos esforços radiais analisados no item anterior. Para as forças axiais compressivas, os maiores valores foram observados no transformador da subestação Natal III. Esta afirmação pode ser ratificada pelo gráfico representado na Figura 29.

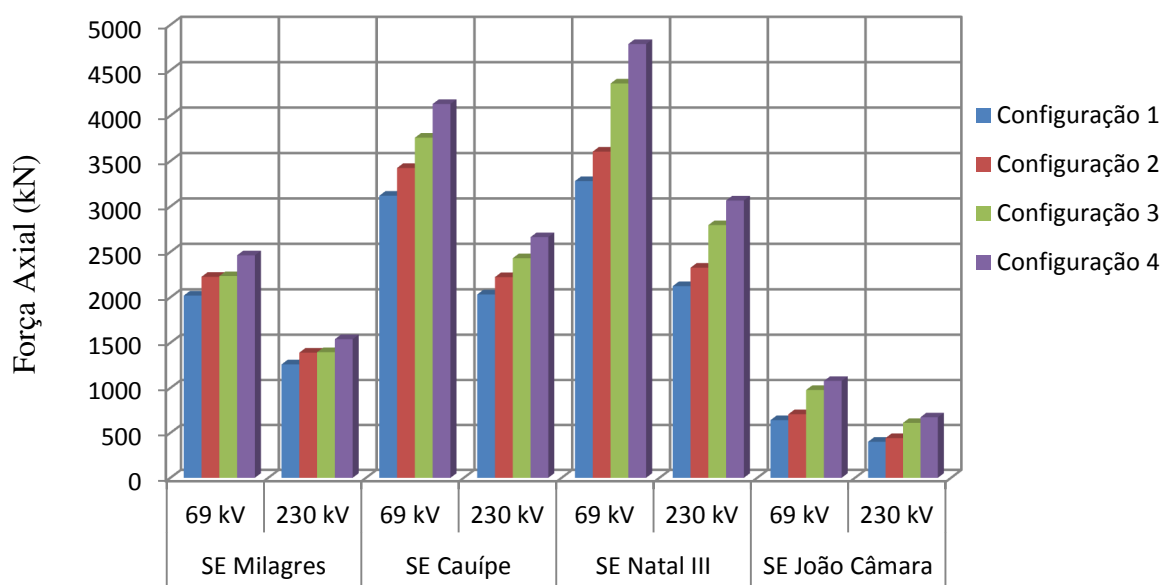


Figura 29 – Força axial compressiva.

Nas análises de adequabilidade, apesar de os maiores esforços ocorrerem no transformador da subestação Natal III, as superações dos limites admissíveis para os estresses axiais do tipo *bending* nos enrolamentos de 69 kV foram verificadas nos transformadores das subestações Milagres (equiparou ao nominal) e Cauípe (3% acima do limite nominal) na configuração 4. Com isso, as flexões causadas pelas forças axiais compressivas nos enrolamentos internos devido à presença de espaçadores radiais podem causar falhas mecânicas nesses transformadores. O gráfico da Figura 30 representa os estresses axiais compressivos nos transformadores analisados.

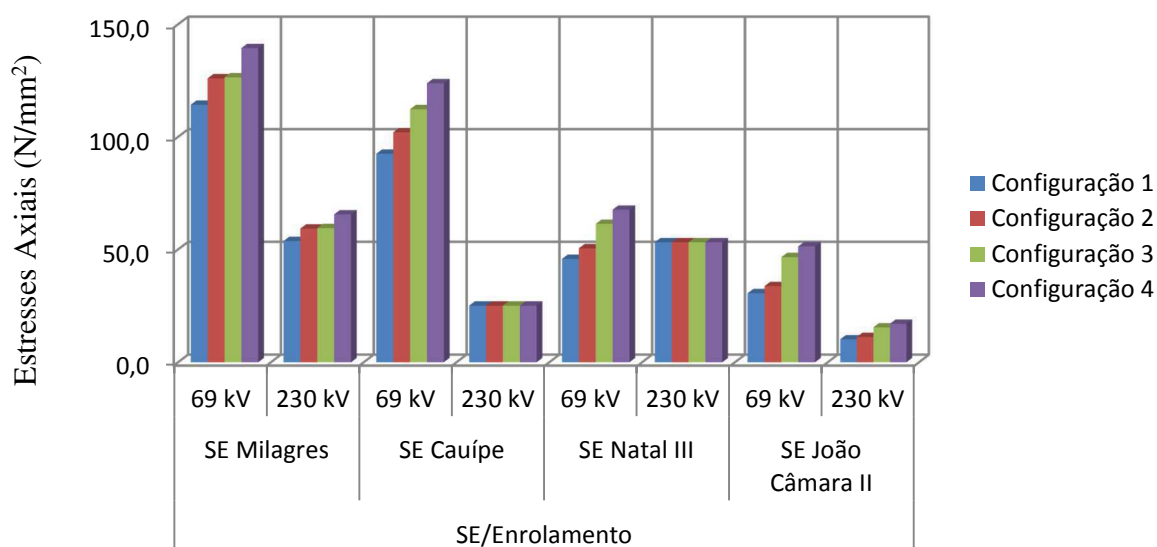


Figura 30 - Estresses axiais.

Fazendo-se uma comparação com o gráfico anterior, constatou-se que, conforme foi dito, as maiores forças axiais incidem no transformador Natal III, e os estresses mais severos ocorreram nos transformadores das subestações Milagres e Cauípe.

Analisando mais criteriosamente o gráfico da Figura 30, pôde ser verificado que os resultados dos estresses axiais nos enrolamentos de 230 kV dos transformadores das subestações Cauípe e Natal III (mesmo fabricante) não apresentam variação entre as configurações. E que, contrariando a tendência dos demais resultados, os valores dos estresses ocorridos no enrolamento de 69 kV do transformador da subestação Natal III nas configurações 1 e 2 são menores que os valores ocorridos no enrolamento de 230 kV nas mesmas configurações. Observando estes resultados, deve-se destacar o comportamento dos estresses axiais nos referidos transformadores por divergir com o comportamento dos estresses nos transformadores das demais subestações.

Diante destas constatações, mais uma vez, inferiu-se que as características construtivas e geométricas de cada transformador podem ser determinantes na capacidade dos enrolamentos em suportar os efeitos dos esforços axiais e radiais sem se danificar. Dentre estas características, deve-se destacar as associadas aos seguintes parâmetros:

- As dimensões dos enrolamentos e a distância entre eles;
- A quantidade e as dimensões dos condutores;
- A quantidade e as dimensões dos espaçadores radiais, e a distribuição destes no enrolamento;
- A resistividade mecânica do condutor, do material isolante e dos espaçadores;
- Dimensões do núcleo e da janela do transformador.

Como o objetivo de finalizar as análises dos resultados, está representado na Tabela 4 um resumo indicativo mostrando em que subestações foram registradas a ocorrência dos maiores valores das grandezas analisadas neste capítulo da dissertação, bem como as subestações nas quais os transformadores estão mais propensos a falhas por estresses eletromecânicos devido a superação dos seus valores nominais.

Tabela 4 – Resultados mais significativos e respectivas subestações de ocorrência.

Subestação	Milagres	Cauípe	Natal III	João Câmara II
Maior Corrente			X	
Maior Força Radial	X			
Superação por Estresse Radial	X			X
Maior Força Axial			X	
Superação por Estresse Axial	X	X		

5 CONCLUSÕES

No decorrer desta dissertação foi discutida a importância dos transformadores de potência para o sistema elétrico, e como os mesmos ficam submetidos a diversas solicitações elétricas durante sua vida útil. As solicitações mais severas tomam lugar quando da ocorrência de curtos-circuitos, que podem provocar danos físicos às estruturas dos enrolamentos devido aos esforços eletromecânicos causados pelas correntes que demandam.

Os resultados das simulações mostraram-se, em sua maioria, condizentes com o que se apresenta na bibliografia acerca do assunto. No geral, os resultados mostraram maior impacto na configuração 4 sobre os enrolamentos de 69 kV, conforme era esperado, uma vez que esta configuração apresenta as condições operativas mais severas para os transformadores. Por sua vez, os enrolamentos internos, por conduzirem a maior parcela da corrente de curto-circuito, ficam submetidos a esforços mecânicos mais elevados, em comparação com os enrolamentos de 230 kV. Foram constatadas superações de até 18% no valor admissível do estresse radial de compressão no transformador da subestação Milagres e de até 6% no transformador da subestação João Câmara II, neste transformador também foi verificada uma superação de 4% no estresse radial *bending*. As superações dos limites dos estresses axiais ocorreram nos transformadores das subestações Milagres (atingiu o nominal) e Cauípe (3%).

Destacou-se em alguns resultados uma relativa não proporcionalidade entre as grandezas, quando comparados os resultados entre as subestações. Por exemplo, houve casos de subestações que, mesmo apresentando níveis de curto-circuito mais elevados que outras subestações, não apresentaram necessariamente os maiores esforços, e vice-versa, como pôde ser verificado nos transformadores das subestações Natal III e Cauípe. Da mesma forma, constataram-se casos de subestações em que a ocorrência de forças elevadas não levaram a possíveis danificações mecânicas, sendo este o caso do transformador da subestação Natal III. E o fenômeno inverso, ou seja, valores menores de forças acarretando possíveis superações por estresses, ocorrendo nos transformadores das subestações João Câmara II e Milagres. Isso revela a importância dos parâmetros construtivos do transformador para determinar a capacidade do transformador em suportar esses esforços.

É de extrema importância ressaltar que os resultados fornecidos pelas simulações são aproximações obtidas mediante o emprego de cálculos analíticos, e que no caso de se verificar superações de valores admissíveis, isso deve ser tomado com um indicativo para uma investigação mais detalhada sobre possíveis danificações físicas no transformador.

Com relação ao emprego e utilização do *software Estresse-Din-Trafo*, a metodologia se mostrou aplicável, entretanto, alguns dados de saída podem, eventualmente, apresentar resultados que levem a incertezas quanto a sua coerência. Nestas situações, o recomendável é uma investigação posterior mais criteriosa do processo das simulações, consultando a bibliografia e/ou revisando os dados de entrada, e caso as dúvidas reflitam sobre os parâmetros do transformador, avaliar a possibilidade de consultar o fabricante. Por outro lado, se os resultados persistirem após a verificação dos dados de entrada, convém interagir com os desenvolvedores do *software* para verificar possíveis inconformidades no processamento dos cálculos pelo programa. Ainda assim, não sendo esse o caso, por fim ter-se-á subsídios para a corroboração da veracidade dos resultados.

O que demandou mais tempo foram as aquisições das informações técnicas dos transformadores e o preenchimento das planilhas com esses dados para inserir no *software*. Quanto a isso, algumas dificuldades foram encontradas principalmente na aquisição de todas as informações necessárias que constituem os dados de entrada do programa. Essas informações são os parâmetros elétricos e geométricos dos transformadores fornecidos pelos fabricantes, que são encaminhados à Empresa na forma de documento impresso ou digital. Entretanto, além da resistência de alguns fabricantes em fornecer determinadas informações, a maneira como estas são representadas nos documentos variam entre os fabricantes, dificultando a interpretação dos dados. Às vezes, tem-se que utilizar de artifícios empíricos para estimar valores coerentes de alguns dados exigidos pelo programa. Isso se torna uma extrema dificuldade para o usuário do *software* que não tem conhecimento estrito da estrutura interna de um transformador. As dificuldades expostas neste parágrafo representam os principais obstáculos para quaisquer iniciativas no sentido de consolidar efetivamente a metodologia proposta na dissertação nos processos das análises de adequabilidade de equipamentos internos à CHESF. A alternativa mais eficiente para dirimir esse entrave seria estabelecer como rotina no processo de compra de transformadores novos pela

Empresa o preenchimento pelos fabricantes de uma planilha idêntica a exibida no Anexo A, com todos os dados necessários para as simulações.

Por último, deve-se destacar a importância dos estudos de adequabilidade dos transformadores de potência de propriedade da CHESF, equipamentos caros, que devem ser preservados para garantir sua plena funcionalidade num SEP cada vez mais em expansão. Para isso se faz necessário buscar sempre o aperfeiçoamento das análises e possibilitar um diagnóstico cada vez mais exato das condições em que os transformadores estão operando.

Como sugestões de trabalhos futuros, são apresentados os seguintes temas:

- i. Pesquisas com medições em campo, aplicando técnicas de monitoramento para detectar possíveis deformações mecânicas resultantes da passagem da corrente de curto-circuito nos enrolamentos dos transformadores. Com isso, poderá ser feita a validação dos resultados obtidos a partir das simulações realizadas pela ferramenta computacional *Estresse-Din-Trafo*.
- ii. Desenvolvimento de uma ferramenta computacional mais avançada e intuitiva, na qual o processo de simulações possa ser aprimorado, como a implantação de textos, figuras ou fotos explicativos com conceitos associados às grandezas, principalmente as grandezas geométricas das estruturas do transformador e as dos defeitos mecânicos, oferecendo recursos visuais didáticos na *interface* do programa para um melhor entendimento do usuário. Buscar-se uma forma de normalização das grandezas relativas a força e estresse eletromecânico, a fim de permitir-se a comparação entre transformadores de diferentes potências.
- iii. Desenvolvimento de pesquisas interagindo experimentos em laboratório e medições em campo para possibilitar uma metodologia capaz de fazer a correlação entre a indicação da superação dos limites admissíveis e a natureza do dano físico no transformador. Desse modo, pretende-se auxiliar no aperfeiçoamento das análises de adequabilidade do equipamento em suportar esforços eletromecânicos devido a curtos-circuitos, e oferecer um parecer técnico mais seguro acerca da vida útil

do transformador afetado por deformações mecânicas nos enrolamentos causados por esses fenômenos.

- iv. Implantação no banco de dados de equipamentos da CHESF todas as informações técnicas referentes aos dados de projeto dos transformadores de potência de propriedade da Empresa, incluindo os dados construtivos e os associados às forças eletromecânicas. O banco de dados com essas informações deve ser de fácil acesso, porém restrito para consulta via intranet, e estar organizado de modo claro e padronizado. Para isso serão necessários pleitos junto aos fabricantes para exigir a melhor maneira possível para disponibilizar essas informações.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 5356-5 – Transformadores de potência Parte 5: Capacidade de resistir a curtos- circuitos. Rio de Janeiro, 2007.

CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELÉTRICA. CEPEL - Programa de Análise de Falhas Simultâneas. Manual do Usuário ANAFAS. Rio de Janeiro, 2006.

Companhia Hidrelétrica do São Francisco. CHESF - Relatório de adequabilidade dos equipamentos da CHESF quanto à corrente de curto-circuito. Recife, 2014.

HEATHCOTE, M. J. J & P Transformer Book. twelfth edition. Butterworth-Heinemann Linacre House. Oxford, 1998.

KINDERMANN, G. Curto-circuito. Segunda edição modificada e ampliada. Editora Sagra Luzzatto. Porto Alegre, 1997.

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

MARTIGNONI, A. Transformadores. Globo. São Paulo, 1969.

PROJETO CHESF DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO: Estresse eletromecânico em transformadores causado pelas altas correntes de energização (Inrush) e de curtos-circuitos “Passantes”. Relatórios 01/08 a 08/08. Universidade Federal de Uberlândia, 2009-2011.

PROJETO CHESF DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO: Estresse eletromecânico em transformadores causado pelas altas correntes de energização (Inrush) e de curtos-

circuitos “Passantes”. Relatório 01/08 (RT1): Bibliografia e Descrição do Estado da Arte (CHESF/UFU, 2009a).

PROJETO CHESF DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO: Estresse eletromecânico em transformadores causado pelas altas correntes de energização (Inrush) e de curtos-circuitos “Passantes”. Relatório 2.1/08 (RT2): Estresse Eletromecânico em Transformadores Causado pela Corrente de Curto-Circuito “Passante”. (CHESF/UFU, 2009b).

PROJETO CHESF DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO: Estresse eletromecânico em transformadores causado pelas altas correntes de energização (Inrush) e de curtos-circuitos “Passantes”. Relatório 03/08 (RT3): Implementação Computacional dos Modelos. (CHESF/UFU, 2010a).

PROJETO CHESF DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO: Estresse eletromecânico em transformadores causado pelas altas correntes de energização (Inrush) e de curtos-circuitos “Passantes”. Relatório 04/08 (RT4): Ensaios Laboratoriais em um Transformador de 15 kVA (CHESF/UFU, 2011a).

PROJETO CHESF DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO: Estresse eletromecânico em transformadores causado pelas altas correntes de energização (Inrush) e de curtos-circuitos “Passantes”. Relatório 05/08 (RT5): Estudos Computacionais das Modelagens de Transformadores Implementadas no ATP e no FLUX3D. (CHESF/UFU, 2010b).

PROJETO CHESF DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO: Estresse eletromecânico em transformadores causado pelas altas correntes de energização (Inrush) e de curtos-circuitos “Passantes”. Relatório 06/08 (RT6): Validação dos Modelos Computacionais Implementados (CHESF/UFU, 2011b).

PROJETO CHESF DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO: Estresse eletromecânico em transformadores causado pelas altas correntes de energização (Inrush) e de curtos-circuitos “Passantes”. Relatório 07/08 (RT7): Metodologia para Avaliação da Vida Útil de Transformadores de Potência (CHESF/UFU, 2011c)

ROSENTINO JUNIOR, A. J. P. Estimativa dos esforços eletromecânicos em transformadores submetidos a um curto-circuito trifásico. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Julho 2010.

WATERS, M. The Short-Circuit Strength of Power Transformers. Macdonald & Co. Ltd. London, 1966.

ANEXOS

ANEXO A: DADOS DOS TRANSFORMADORES

Dados Gerais	
1.	$S_{3\phi}$ = Potência trifásica do transformador (MVA)
2.	$Z_{\%}$ = Impedância percentual do transformador
3.	f = Frequência fundamental da rede (Hz)
4.	h_0 = Altura da janela do núcleo (m)
5.	D_0 = Diâmetro do núcleo (m)
6.	d_0 = Largura entre os enrolamentos do transformador (m)
7.	Há Suportes axiais?
8.	Esp_{axial} = Quantidade de suportes axiais (Caso não possuir suportes axiais, deixar campo em branco ou entrar com valor igual a 0)
9.	$e_{espaxial}$ = Dimensão radial do suporte axial (m) (Caso não possuir suportes axiais, deixar campo em branco ou entrar com valor igual a 0)
10.	L_{ax} = Distância entre os suportes axiais (m) (Caso não possuir suportes axiais, deixar campo em branco ou entrar com valor igual a 0)
11.	Disposição dos enrolamentos (tipo 1 ou 2)
12.	a = Caso a disposição seja do Tipo 2, o comprimento de a deve ser fornecido em (m) (Caso disposição for do Tipo 1, deixar campo em branco ou entrar com valor igual a 0)
13.	$desalinhamento$ = Desalinhamento entre enrolamentos (pu) (Caso não for fornecido, entrar com valor Padrão = 0,005)

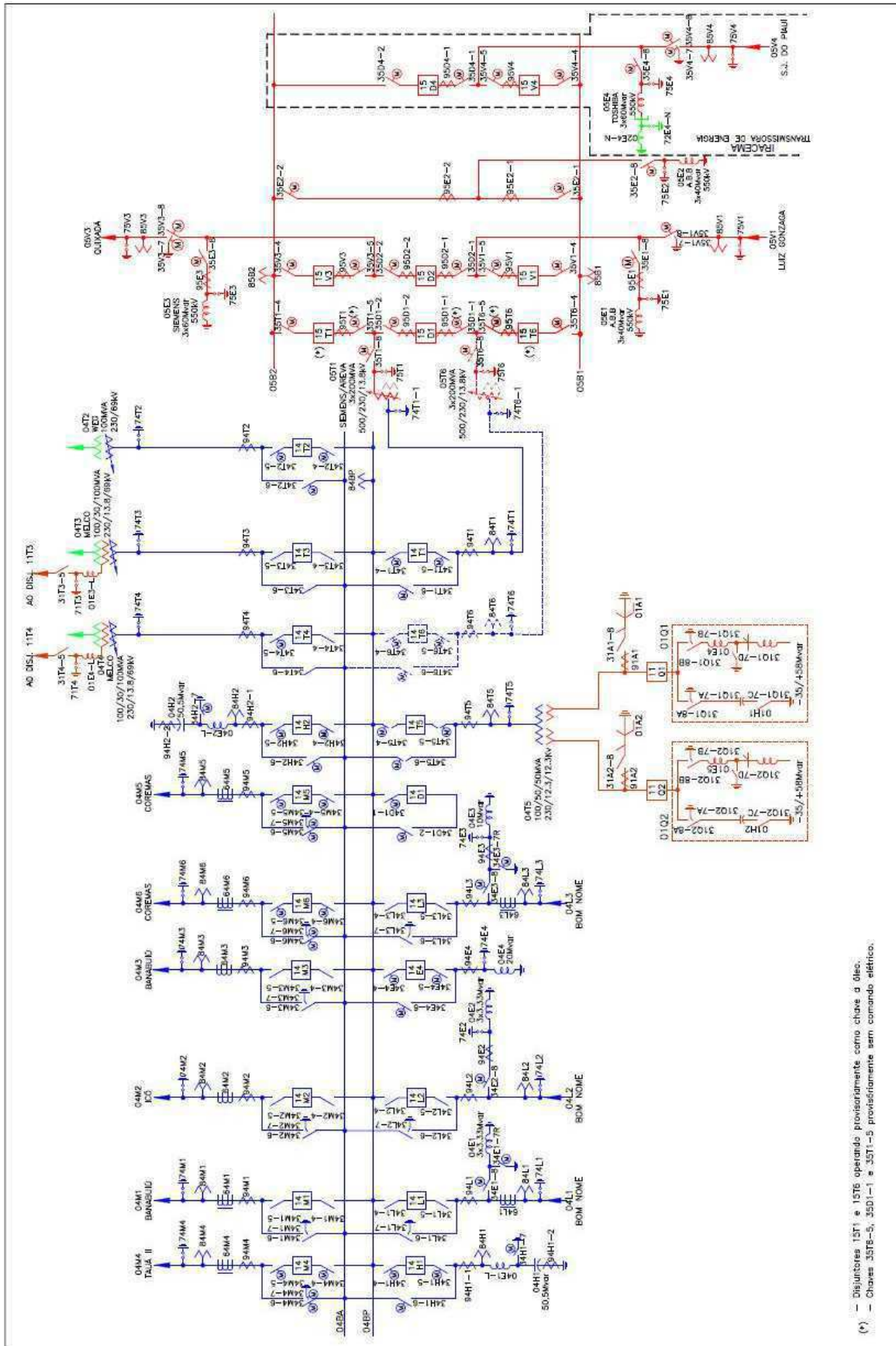
ANEXO A (CONTINUAÇÃO)

Enrolamento Interno	
14.	V_L = Tensão eficaz nominal de linha do enrolamento interno (kV)
15.	Configuração: (Delta ou Estrela)
16.	R = Resistência à 75°C do enrolamento interno (ohms) (Caso não for fornecido, deixar campo em branco ou entrar com valor = 0)
17.	n = Número de espiras do enrolamento interno para condição normal de funcionamento
18.	Tipo do enrolamento: (Camada ou Disco)
19.	C = Número de camadas (Deixar campo em branco ou digitar 0, caso enrolamento seja do tipo Disco)
20.	Q = Quantidade de discos únicos (Deixar campo em branco ou digitar 0, caso enrolamento seja do tipo Camada)
21.	$ndiscos = Espiras/Seção$ (Deixar campo em branco ou digitar 0, caso enrolamento seja do tipo Camada)
22.	d = Largura do enrolamento interno (m)
23.	h = Altura do enrolamento interno (m)
24.	D_m = Diâmetro médio do enrolamento interno (m)
25.	Quantidade de condutores na direção axial
26.	b = Dimensão axial do condutor do enrolamento interno (m)
27.	Quantidade de condutores na direção radial
28.	e = Dimensão radial do condutor do enrolamento interno (m)
29.	E_c = Módulo de Elasticidade do condutor utilizado (N/mm ²) (Caso não for fornecido, entrar com valor Padrão = 130000)
30.	w_b = Dimensão axial da isolação do condutor referente ao enrolamento interno, considerando se
31.	E_w = Módulo de Elasticidade do papel isolante (N/mm ²) (Caso não for fornecido, entrar com valor Padrão = 202,23)
32.	Há Espaçadores radiais?
33.	Esp_{radial} = Quantidade de suportes radiais (Caso não possuir espaçadores radiais, deixar campo em branco ou entrar com valor igual a 0)
34.	$e_{espradial}$ = Dimensão radial do suporte radial (m) (Caso não possuir espaçadores radiais, deixar campo em branco ou entrar com valor igual a 0)
35.	h_1 = Dimensão axial do espaçador radial (m) (Caso não possuir espaçadores radiais, deixar campo em branco ou entrar com valor igual a 0)
36.	E_1 = Módulo da elasticidade do espaçador radial (N/mm ²) (Na presença de espaçadores radiais se não for fornecido, entrar com valor Padrão = 1170,83)
37.	h_2 = Dimensão axial associada à isolação na extremidade do enrolamento (m) (Caso não for fornecido, entrar com valor Padrão = 0,0762)
38.	E_2 = Módulo da elasticidade associada à isolação na extremidade do enrolamento (N/mm ²) (Caso não for fornecido, entrar com valor Padrão = 1170,83)
39.	$\sigma_{adim-cond}$ = Estresse admissível do condutor utilizado (N/mm ²) (Caso não for fornecido, entrar com valor Padrão = 100)

ANEXO A (CONTINUAÇÃO)

Enrolamento Externo	
40.	V_L = Tensão eficaz nominal de linha do enrolamento externo (kV)
41.	Configuração: (Delta ou Estrela)
42.	R = Resistência à 75°C do enrolamento externo (ohms) (Caso não for fornecido, deixar campo em branco ou entrar com valor = 0)
43.	n = Número de espiras do enrolamento externo para condição normal de funcionamento
44.	Tipo do enrolamento: (Camada ou Disco)
45.	C = Número de camadas (Deixar campo em branco ou digitar 0, caso enrolamento seja do tipo Disco)
46.	Q = Quantidade de discos únicos (Deixar campo em branco ou digitar 0, caso enrolamento seja do tipo Camada)
47.	$ndiscos = Espiras/Seção$ (Deixar campo em branco ou digitar 0, caso enrolamento seja do tipo Camada)
48.	d = Largura do enrolamento externo (m)
49.	h = Altura do enrolamento externo (m)
50.	D_m = Diâmetro médio do enrolamento externo (m)
51.	Quantidade de condutores na direção axial
52.	b = Dimensão axial do condutor do enrolamento externo (m)
53.	Quantidade de condutores na direção radial
54.	e = Dimensão radial do condutor do enrolamento externo (m)
55.	E_c = Módulo de Elasticidade do condutor utilizado (N/mm ²) (Caso não for fornecido, entrar com valor Padrão = 130000)
56.	w_b = Dimensão axial da isolamento do condutor referente ao enrolamento externo, considerando se
57.	E_w = Módulo de Elasticidade do papel isolante (N/mm ²) (Caso não for fornecido, entrar com valor Padrão = 202,23)
58.	Há Espaçadores radiais?
59.	Esp_{radial} = Quantidade de suportes radiais (Caso não possuir espaçadores radiais, deixar campo em branco ou entrar com valor igual a 0)
60.	$e_{espradial}$ = Dimensão radial do suporte radial (m) (Caso não possuir espaçadores radiais, deixar campo em branco ou entrar com valor igual a 0)
61.	h_1 = Dimensão axial do espaçador radial (m) (Caso não possuir espaçadores radiais, deixar campo em branco ou entrar com valor igual a 0)
62.	E_1 = Módulo da elasticidade do espaçador radial (N/mm ²) (Na presença de espaçadores radiais se não for fornecido, entrar com valor Padrão = 1170,83)
63.	h_2 = Dimensão axial associada à isolamento na extremidade do enrolamento (m) (Caso não for fornecido, entrar com valor Padrão = 0,0762)
64.	E_2 = Módulo da elasticidade associada à isolamento na extremidade do enrolamento (N/mm ²) (Caso não for fornecido, entrar com valor Padrão = 1170,83)
65.	$\sigma_{adm-cond}$ = Estresse admissível do condutor utilizado (N/mm ²) (Caso não for fornecido, entrar com valor Padrão = 100)
Preencher na Presença de Tapes no proprio Enrolamento	
66.	Há Derivação no Enrolamento?
67.	Tipo de Derivação
68.	n_{deriv} = Número de espiras do enrolamento externo para condição de derivação total (Enrolamento Incompleto) (Caso não possuir tapes, deixar campo em branco ou entrar com valor igual a 0)
69.	k_{deriv} = Quantidade de condutores próximos à derivação do enrolamento externo (Caso não possuir tapes, deixar campo em branco ou entrar com valor igual a 0)
70.	a' = Comprimento da derivação do enrolamento externo (m) (Caso não possuir tapes, deixar campo em branco ou entrar com valor igual a 0)

ANEXO B: DIAGRAMAS



(*) - Disjuntores 15T1 e 15T6 operando provisoriamente como chave à óleo.
 (*) - Chaves 35T8-5, 35D1-1 e 35T1-5 provisoriamente sem comando elétrico.

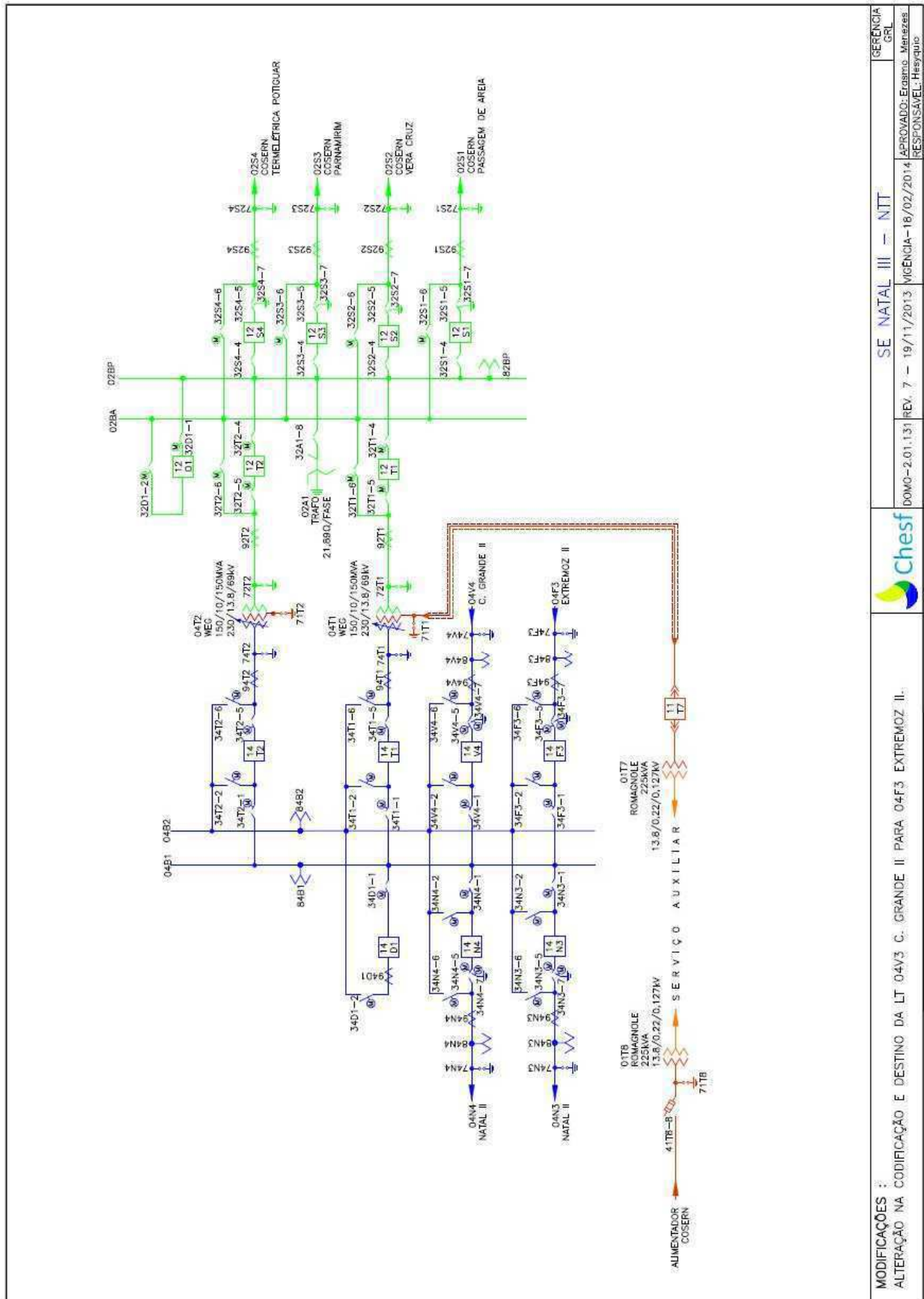
MODIFICAÇÕES :
 REPRESENTADA A CONEXÃO DO ATR. 05T1 A BARRA 05B1 ATRAVÉS DOS DISJ. 15D1 E 15T6 (OPERANDO COMO CHAVE A ÓLEO) - REPRESENTADO O FUTURO BAY DO ATR. 05T6.



SE MILAGRES 500/230KV - MLG
 DOMO-94.01.135 REV. 16 - 12/05/2014 VICINIA-12/05/2014
 APROVADO: Enano Moraes
 RESPONSÁVEL: Reijson

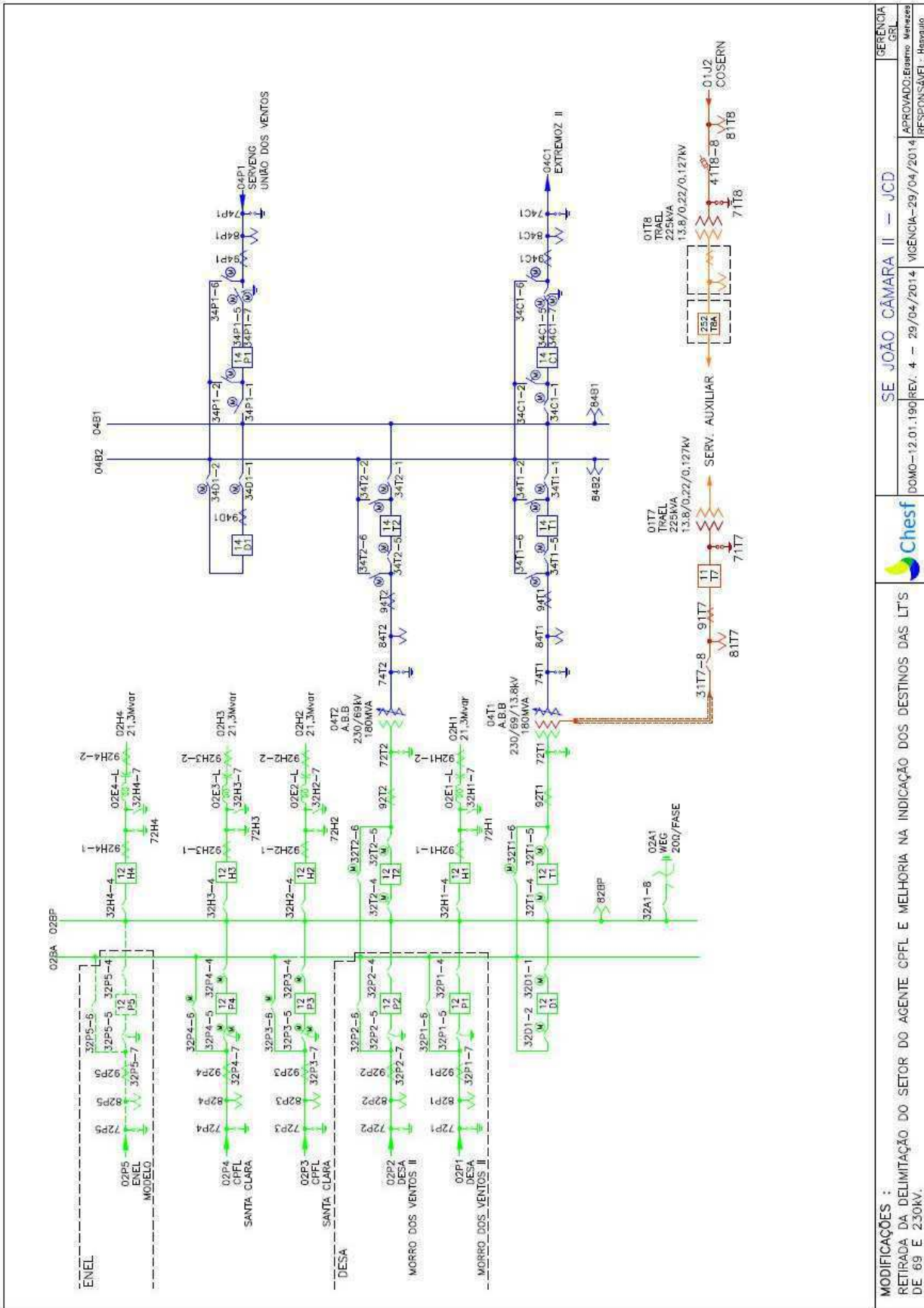
GERENCIA GRN

ANEXO B: CONTINUAÇÃO



MODIFICAÇÕES : ALTERAÇÃO NA CODIFICAÇÃO E DESTINO DA LT 04V3 C. GRANDE II PARA 04F3 EXTREMOZ II.		SE NATAL III - NIT	GERENCIA GRU
		DOMQ-2.01.131 REV. 7 - 19/11/2013	VIGENCIA-18/02/2014

ANEXO B: CONTINUAÇÃO



<p>MODIFICAÇÕES : RETRADA DA DELIMITAÇÃO DO SETOR DO AGENTE CPFL E MELHORIA NA INDICAÇÃO DOS DESTINOS DAS LITS DE 69 E 230KV.</p>	<p>SE JOÃO CÂMARA II - JCD</p>	<p>REFERÊNCIA GRL</p>
<p>Chesf</p>	<p>DOMO-12.01.190/REV. 4 - 29/04/2014</p>	<p>APROVADO: Estênio Moraes</p>
<p>028A: 028P</p>	<p>VI&ENGA-29/04/2014</p>	<p>RESPONSÁVEL: Henrique</p>

ANEXO C: TUTORIAL *ESTRESSE-DIN-TRAFO*

Programa Estresse-Din-Trafo

Finalidade

O objetivo principal deste software é apresentar ao usuário a capacidade de um transformador suportar as forças/estresses devido a uma elevada corrente de curto-circuito. Vale ressaltar que este programa não dispensa uma análise mais criteriosa dos esforços, devendo o usuário, caso necessite, utilizar de outras metodologias para avaliar a suportabilidade mecânica do transformador, como por exemplo, a utilização da técnica dos elementos finitos.

Linguagem de Programação utilizada

A versão atual do programa foi desenvolvido via dois pacotes computacionais: Microsoft Excel e LabView 8.5.

Microsoft Office Excel:

O **Microsoft Office Excel** (nome popular **Microsoft Excel**) é um programa de planilha eletrônica escrito e produzido pela Microsoft para computadores que utilizam o sistema operacional Microsoft Windows e também computadores Macintosh da Apple Inc.. Seus recursos incluem uma interface intuitiva e capacitadas ferramentas de cálculo e de construção de gráficos que, juntamente com marketing agressivo, tornaram o Excel um dos mais populares aplicativos de computador até hoje.

Devido à sua fácil operação e por ser já amplamente difundido no mercado, a função do Excel no desenvolvimento do programa Estresse-Din-Trafo é facilitar a operacionalidade do usuário na entrada e armazenamento de dados do transformador. Ou seja, seu uso se faz apenas para servir como dados de entrada ao outro programa.

NI LabView 8.5

A ferramenta computacional LabView (*Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench*) da *National Instruments* é um ambiente de programação, onde cria-se programas com notação gráfica (“Linguagem G”). A programação gráfica elimina detalhes que são necessários em linguagens baseadas em texto. Sua execução é baseada no princípio *dataflow* (fluxo de informação), no qual as funções são executadas somente após receber a informação correta.

Todo o equacionamento para estimar os esforços eletromecânicos foram desenvolvidos nesta plataforma, sendo posteriormente gerado um executável a fim de descartar a necessidade do programa LabView ser instalado no computador.

Tempo de desenvolvimento do Programa Estresse-Din-Trafo

O tempo de desenvolvimento do programa Estresse-Din-Trafo foi de aproximadamente três meses.

Guia de Instalação

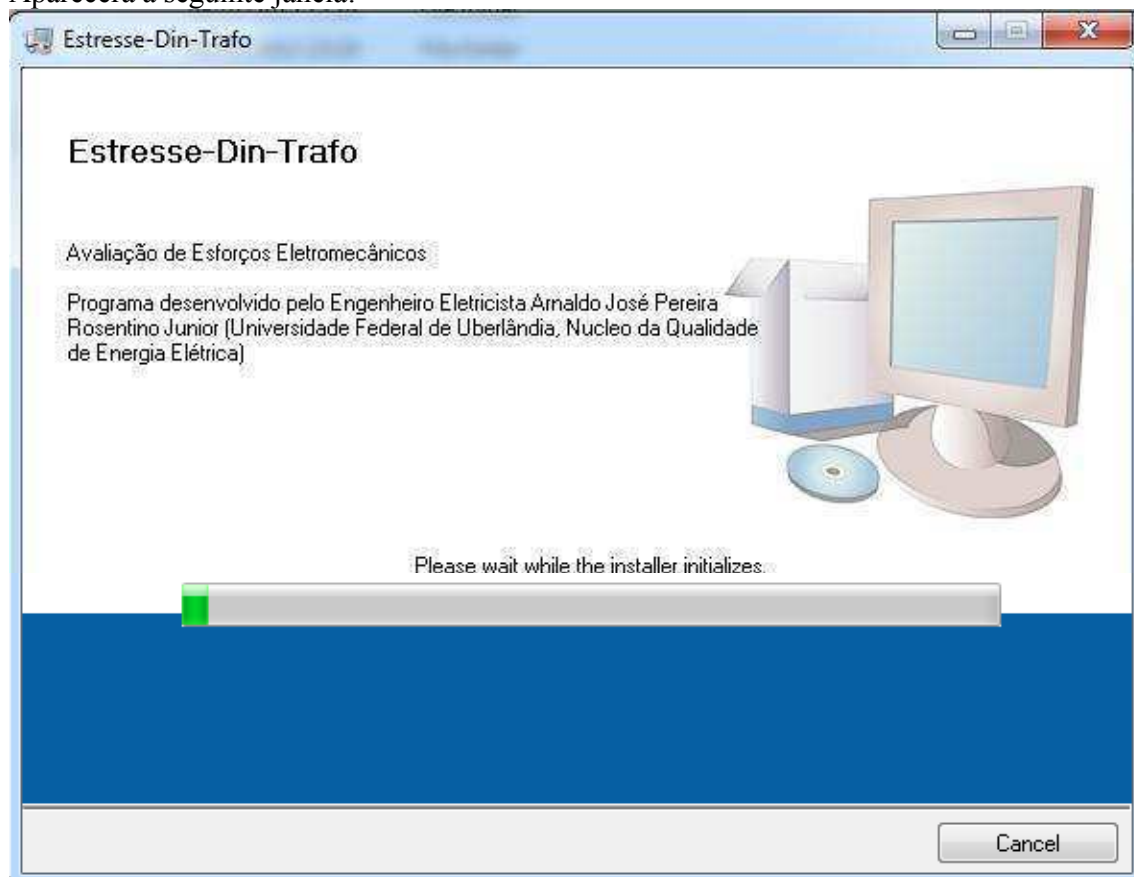
Para instalação desse programa não é necessário um computador de elevado desempenho. Exige-se apenas que o sistema operacional seja Windows XP ou superior.

Passo 1:

Execute o arquivo de instalação Setup.exe, localizado na pasta: Estr-Din-Tr\Volume\Setup.exe

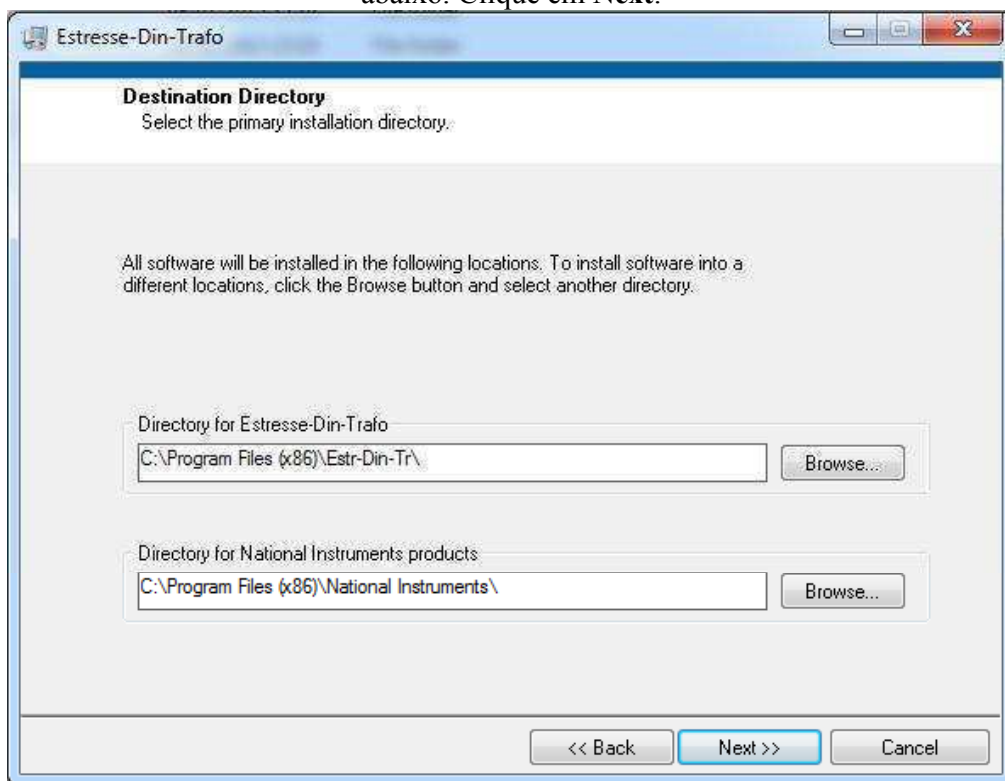
bin	09/01/2013 23:18	File folder	
license	09/01/2013 23:18	File folder	
supportfiles	09/01/2013 23:19	File folder	
nidist.id	09/01/2013 23:19	ID File	1 KB
setup.exe	06/09/2011 16:24	Application	1.382 KB
setup.ini	09/01/2013 23:19	Configuration sett...	9 KB

Aparecerá a seguinte janela:

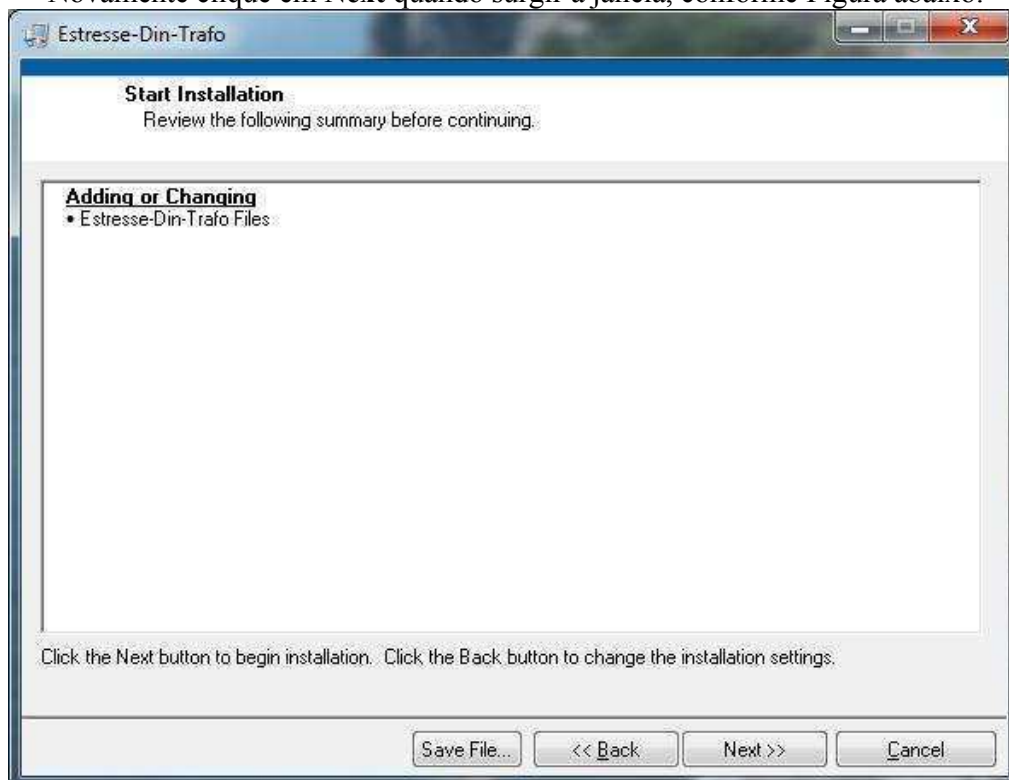


Passo 2:

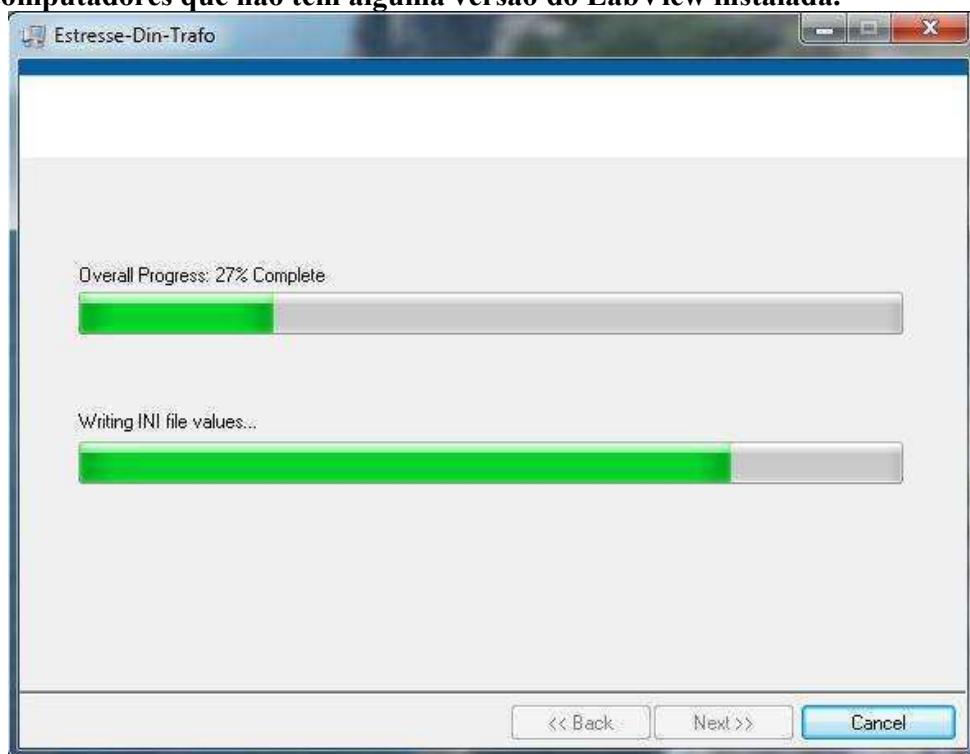
Após aceitar os termos da instalação do programa, aparecerá a janela, conforme Figura abaixo. Clique em **Next**.



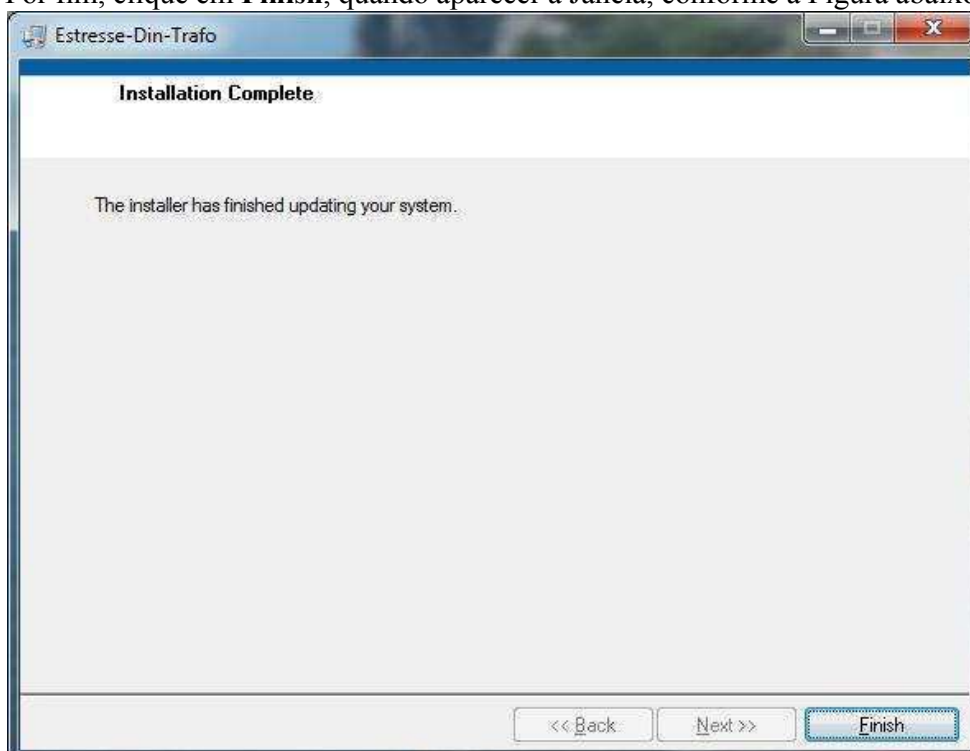
Novamente clique em **Next** quando surgir a janela, conforme Figura abaixo.



Aguarde a instalação do programa. **Obs.: A primeira instalação pode ser mais demorada para computadores que não tem alguma versão do LabView instalada.**



Por fim, clique em **Finish**, quando aparecer a Janela, conforme a Figura abaixo.



Após este procedimento, o arquivo executável do programa já pode ser localizado no Menu Iniciar do Windows, sob o nome Estresse-Din-Trafo.

Guia de Operação

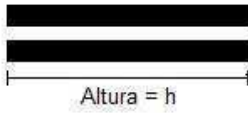
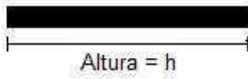
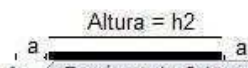
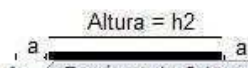
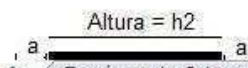
Em resumo, para estimar os esforços eletromecânicos, o usuário deve preencher os dados do transformador em uma planilha própria desenvolvida no Excel. Após todos os dados serem preenchidos, deve-se salvar a planilha sob uma extensão de arquivo especial.

Em seguida, executa-se o programa principal Estresse-Din-Trafo, o qual solicitará a importação dos dados a fim de estimar as forças e estresses eletromecânicos. A seguir apresenta-se um passo a passo ilustrativo deste procedimento.

Passo 1: Entrada de dados – Planilha Excel

Inicialmente o usuário deve preencher a planilha de dados do Excel, cujo formato é disponibilizado no CD de instalação sob o nome Input.xls. No CD de instalação há também um pequeno banco de dados de alguns transformadores que podem ser utilizados como exemplos de aplicação.

Planilha

	A	B
1	Dados Gerais	
2	1. $S_{3\phi}$ = Potência trifásica do transformador (MVA)	
3	2. $Z\%$ = Impedância percentual do transformador	
4	3. f = Frequência fundamental da rede (Hz)	
5	6. h_0 = Altura da janela do núcleo (m)	
6	7. D_0 = Diâmetro do núcleo (m)	
7	8. d_0 = Largura entre os enrolamentos do transformador (m)	
8	9. Ha Suportes axiais? (Digitar 1 ou 2) (1) Sim (2) Não	
9	10. Esp_{axial} = Quantidade de suportes axiais <i>(Caso não possuir suportes axiais, deixar campo em branco ou entrar com valor igual a 0)</i>	
10	11. $e_{especial}$ = Dimensão radial do suporte axial (m) <i>(Caso não possuir suportes axiais, deixar campo em branco ou entrar com valor igual a 0)</i>	
11	12. L_{ax} = Distância entre os suportes axiais (m) <i>(Caso não possuir suportes axiais, deixar campo em branco ou entrar com valor igual a 0)</i>	
	13. Disposição dos enrolamentos (Digitar 1 ou 2): Tipo 1:  Enr. Externo  Enr. Interno Altura = h Tipo 2:  a,  a,  Altura = h2	

Observe que a planilha de entrada de dados foi separada em quatro abas: “Dados Gerais”, “Enrolamento Interno”, “Enrolamento Externo” e “Dados a Salvar”. Durante o preenchimento dos dados, os quais são realizados exclusivamente nas três primeiras abas, todas as informações são enviadas automaticamente para as células da aba “Dados a Salvar”.

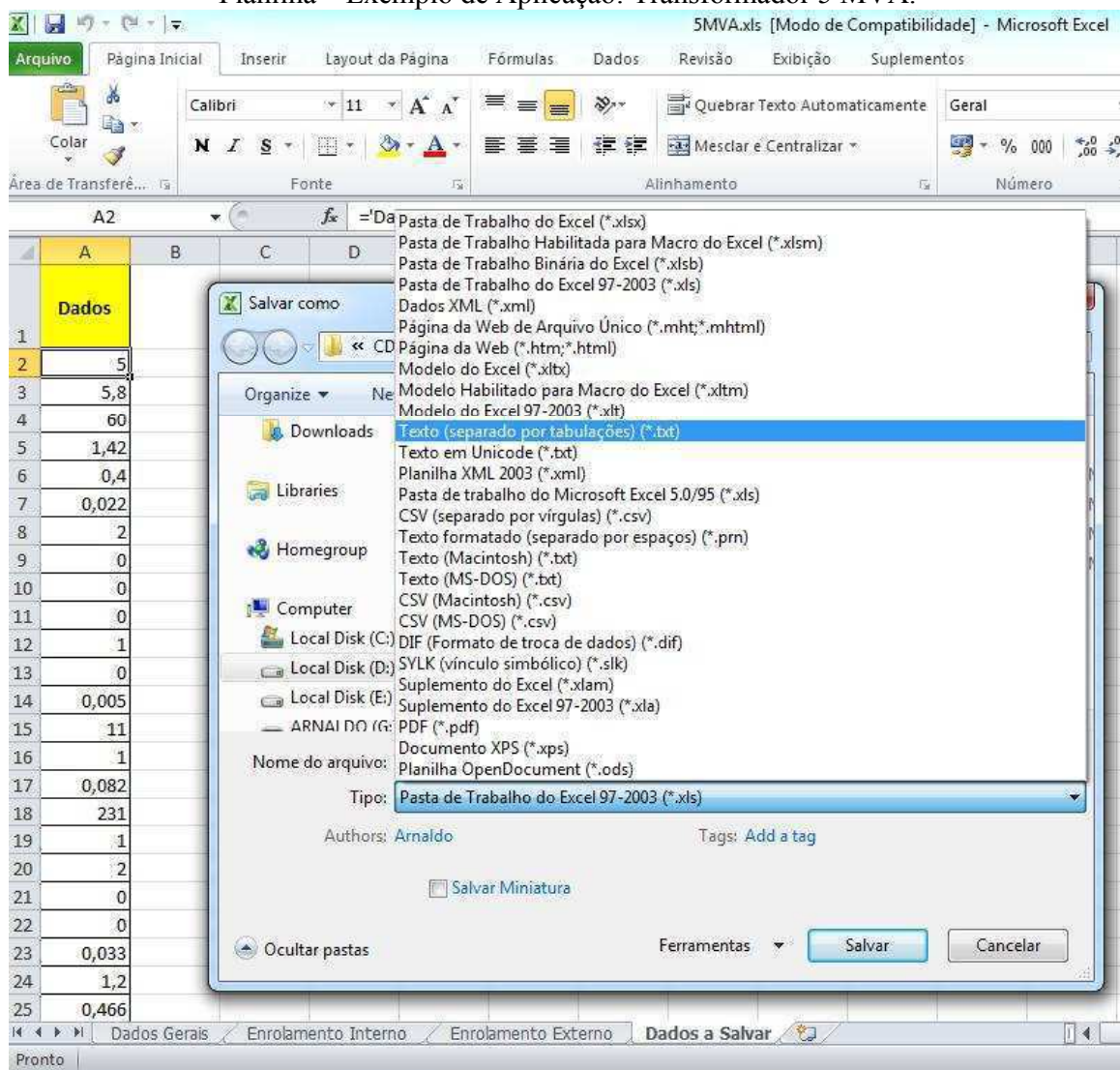
Diante disso, **recomenda-se que que não seja feita qualquer alteração na planilha**, pois isto pode acarretar no envio de dados incorretos ao programa Estresse-Din-trafo.

Após preencher todos os dados, o usuário deve abrir a aba “Dados a Salvar” e clicar em salvar como. Isto garantirá que os dados dessa aba que serão salvos. Para ilustração, tomaremos o Transformador de 5MVA, cujos dados se encontram disponíveis na referência: *WATERS, M., The Short-Circuit Strength of Power Transformers. Macdonald & Co., London, 1966.*

Passo 2: Salvar dados na extensão “*.txt”

Ao clicar em “Salvar como”, o usuário deverá escolher a opção “Texto (separado por tabulações) (*.txt)”. Esta opção pode aparecer de forma diferente para versões distintas do Excel. O importante é que os dados devem ser salvos na extensão “*.txt”. No caso deste exemplo os dados dessa aba foram salvos como 5MVA.txt.

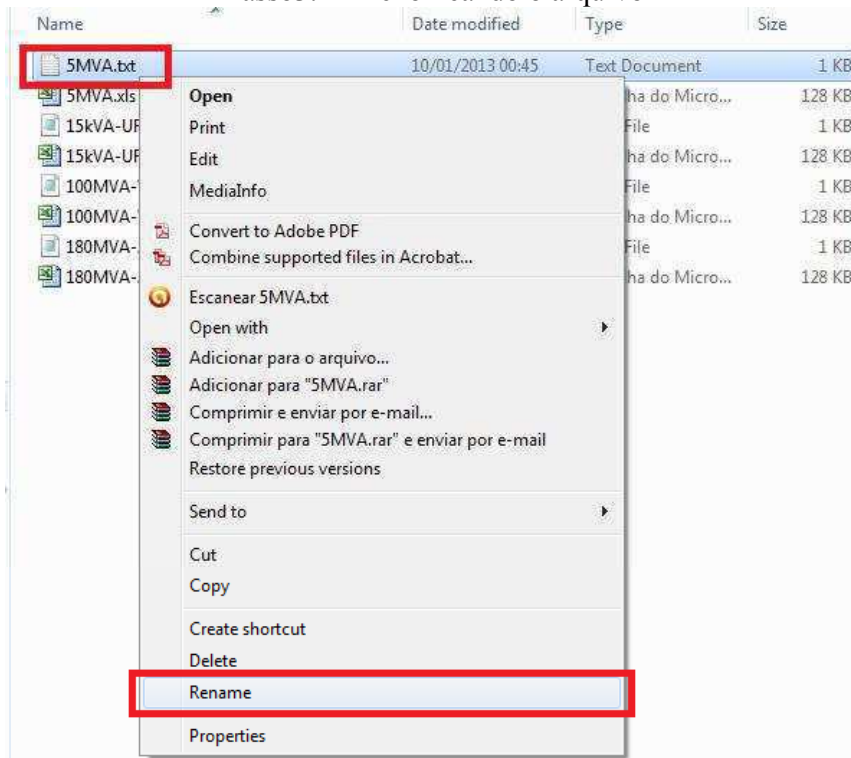
Planilha – Exemplo de Aplicação: Transformador 5 MVA.



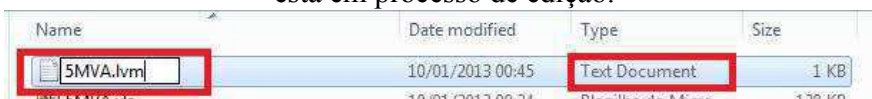
Passo 3: Renomear arquivo salvo na extensão “*.txt” para a extensão “*.lvm”

Após salvar os dados da aba “Dados a Salvar” na extensão “*.txt”, o usuário deverá renomear o arquivo salvo (neste exemplo 5MVA.txt) com a extensão “*.lvm”. Ou seja, o arquivo 5MVA.txt será renomeado para 5MVA.lvm.

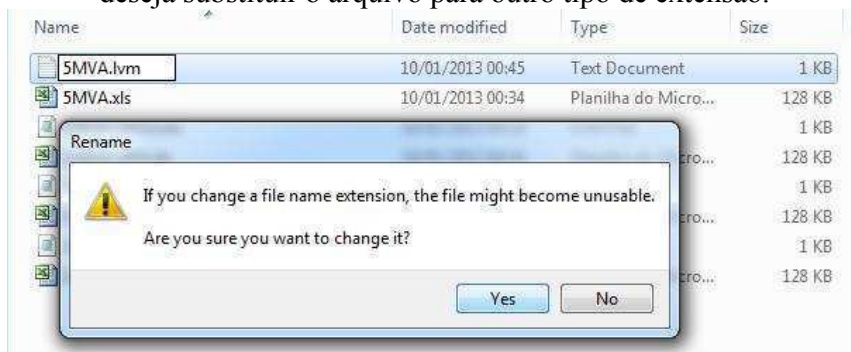
Passo3.1 - Renomeando o arquivo



Passo 3.2 - Renomeando o arquivo. Note que o arquivo ainda é do tipo texto, pois o arquivo está em processo de edição.



Passo 3.3 – Renomeando o arquivo. Após edição, o usuário deverá confirmar que realmente deseja substituir o arquivo para outro tipo de extensão.



Passo 3.4 – Renomeando o arquivo. Finalmente, após confirmação, o arquivo estará na extensão desejada, ou seja, 5MVA.lvm.

Name	Date modified	Type	Size
5MVA.lvm	10/01/2013 00:45	LVM File	1 KB

Certifique-se de que o arquivo esteja na extensão “.lvm”. Caso contrário o arquivo não será executado no Programa Estresse-Din-Trafo.

Passo 4: Executar programa Estresse-Din-Trafo

Após criação do arquivo de dados na extensão “*.lvm”, o programa Estresse-Din-Trafo poderá ser executado para analisar os esforços eletromecânicos no transformador desejado. Neste caso em questão, o transformador de 5 MVA.

Ao executar o Programa Estresse-Din-Trafo, a seguinte janela do programa será disponibilizada:



A função “Abrir Relatórios” permite ao usuário acessar o diretório, onde se encontra os relatórios do Projeto em formato “.pdf”, bem como outros arquivos no mesmo formato de

forma a auxiliar no entendimento técnico-científico deste programa e do Projeto desenvolvido.

A função “Iniciar Programa” permite o acesso às janelas de entradas de dados para execução dos cálculos.

Por fim, clicando em “SAIR”, o usuário encerra o programa.

Passo 5: Importar dados

Ao clicar em “Iniciar Programa” será aberta uma janela solicitando ao usuário importar os dados para análise dos esforços eletromecânicos. Neste exemplo importaremos o arquivo 5MVA.lvm.



Passo 6: Análise dos Resultados

Ao importar os dados o usuário será encaminhado para analisar os resultados e verificar se os dados importados estão corretos.

Janela de parâmetros principal. Note que as informações são apenas para visualização.

The screenshot shows the 'Parâmetros' window with the following sections:

- Parâmetros Gerais:**
 - Potência Trifásica do Transformador - $S_{3\phi}$: 5 [MVA]
 - Impedância Percentual do Transformador - $Z\%$: 5,8 [%]
 - Frequência Fundamental da Rede - f : 60 [Hz]
 - Diâmetro do Núcleo - D_0 : 0,4 [m]
 - Largura do Ducto - d_0 : 0,022 [m]
 - Altura da Janela do Núcleo - h_0 : 1,42 [m]
- Disposição dos Enrolamentos:**
 - Tipo 1:** Diagram showing external winding (Enr. Externo) above internal winding (Enr. Interno) with height h .
 - Tipo 2:** Diagram showing external winding (Enr. Externo) below internal winding (Enr. Interno) with height h_1 and distance a between windings.
 - Comprimento de a : 0 [m]
- Há presença de Suportes Axiais?**
 - Sim
 - Não
- Quantidade de Suportes Axiais - E_{axial} :** 0
- Dimensão Radial do Suporte Axial - e_{axial} :** 0 [m]
- Distância entre Suportes Axiais - L_{ax} :** 0 [m]

At the bottom, there is a diagram for winding displacement:

- Diagram showing external winding (Enr. Externo) and internal winding (Enr. Interno) with height h and displacement d .
- Desalinhamento: 0,005 [pu]

Parâmetros Enrolamento Interno. Nesta janela, a única variável de entrada é a **Corrente de Curto-circuito Assimétrica a ser informada pelo usuário**. Caso o mesmo não possua esta informação do sistema elétrico, pode-se entrar com valor de corrente de curto-circuito que o próprio programa calcula como referência, conforme destacado em azul. Contudo, vale ressaltar que o uso deste valor pode levar a esforços bastante elevados, visto que no cálculo desta corrente considera-se apenas a impedância percentual do transformador e o maior valor de fator de assimetria. Neste exemplo em específico foi utilizado o valor da corrente calculada pelo programa.

The screenshot shows the 'Parâmetros' window with the following data:

Field	Value	Unit
Tensão Eficaz de Linha - V_L	11	[kV]
Max. Corrente CC Estimada - I_s	11518	A
Largura - d	0,033	[m]
Número de Espiras - n	231	
Altura - h	1,2	[m]
Diâmetro - D_m	0,466	[m]
Resistência à 75°C - R	0,082	[Ohm]
Corrente Curto-Circuito Assimétrica para Cálculo	11518	A
Configuração	<input type="radio"/> Delta <input checked="" type="radio"/> Estrela	
Tipo	<input checked="" type="radio"/> Camada Quantidade - C : 2	
	<input type="radio"/> Disco Quantidade - Q : 0 Espiras/Seção - N_{discos} : 0	
Há Espaçadores Radiais?	<input type="radio"/> Sim Quantidade - $E_{spradial}$: 0 Elasticidade do Espaçador - $E1$: 1170,83 [N/m ²] Dimensão axial - $h1$: 0 [m] Dimensão radial - $\theta_{spradial}$: 0 [m]	
	<input checked="" type="radio"/> Não	

Nota-se ainda que em Parâmetros Enrolamento Interno pode ser visualizada as informações referente às características dos Condutores, conforme ilustra a Figura abaixo.

The screenshot displays the 'Parâmetros' software interface, specifically the 'Parâmetros Enrolamento Interno' tab. The 'Características' sub-tab is active, showing conductor characteristics for both Axial and Radial configurations, along with insulation properties.

Axial		Radial	
Quantidade de Condutores	1	Quantidade de Condutores	2
Altura do Condutor - b	0,0089 [m]	Largura do Condutor - e	0,004826 [m]
Altura da Isolação entre espiras - $w\delta$	0,001016 [m]		

Isolação		
Altura - $h2$	Elasticidade do Condutor - E_c	Estresse Admissível do Condutor
0,0762 [m]	110354 [N/m ²]	100 [N/m ²]
Elasticidade - $E2$	Elasticidade do Papel Isolante - E_w	
1170,83 [N/m ²]	202,23 [N/m ²]	

Parâmetros Enrolamento Externo. Novamente, nesta janela, a única variável de entrada é a **Corrente de Curto-circuito Assimétrica a ser informada pelo usuário.**

Parâmetros

Parâmetros Gerais | Parâmetros Enrolamento Interno | Parâmetros Enrolamento Externo | Análise de Resultados | SAIR

Características | Condutores | Tapes

Tensão Eficaz de Linha - V_L : 22 [kV]

Max. Corrente CC Estimada - I_s : 3324,95 A

Largura - d : 0,051 [m]

Configuração: Delta Estrela

Número de Espiras - n : 800

Altura - h : 1,2 [m]

Diâmetro - D_m : 0,59 [m]

Resistência à 75°C - R : 1,07 [Ohm]

Corrente Curto-Circuito Assimétrica para Cálculo: 3324,95 A

Tipo

Camada Quantidade - C : 0

Disco Quantidade - Q : 64 Espiras/Seção - n_{discos} : 13

Há Espaçadores Radiais?

Sim Quantidade - $E_{sradial}$: 16 Elasticidade do Espaçador - $E1$: 1170,83 [N/m²]

Dimensão Axial - $h1$: 0,00635 [m]

Dimensão Radial - $e_{sradial}$: 0,051 [m]

Não

Da mesma forma que nos parâmetros associados ao enrolamento interno, há também aqui uma aba associada à visualização dos dados vinculados aos condutores. Os dados são os mesmos apresentados para o enrolamento interno.

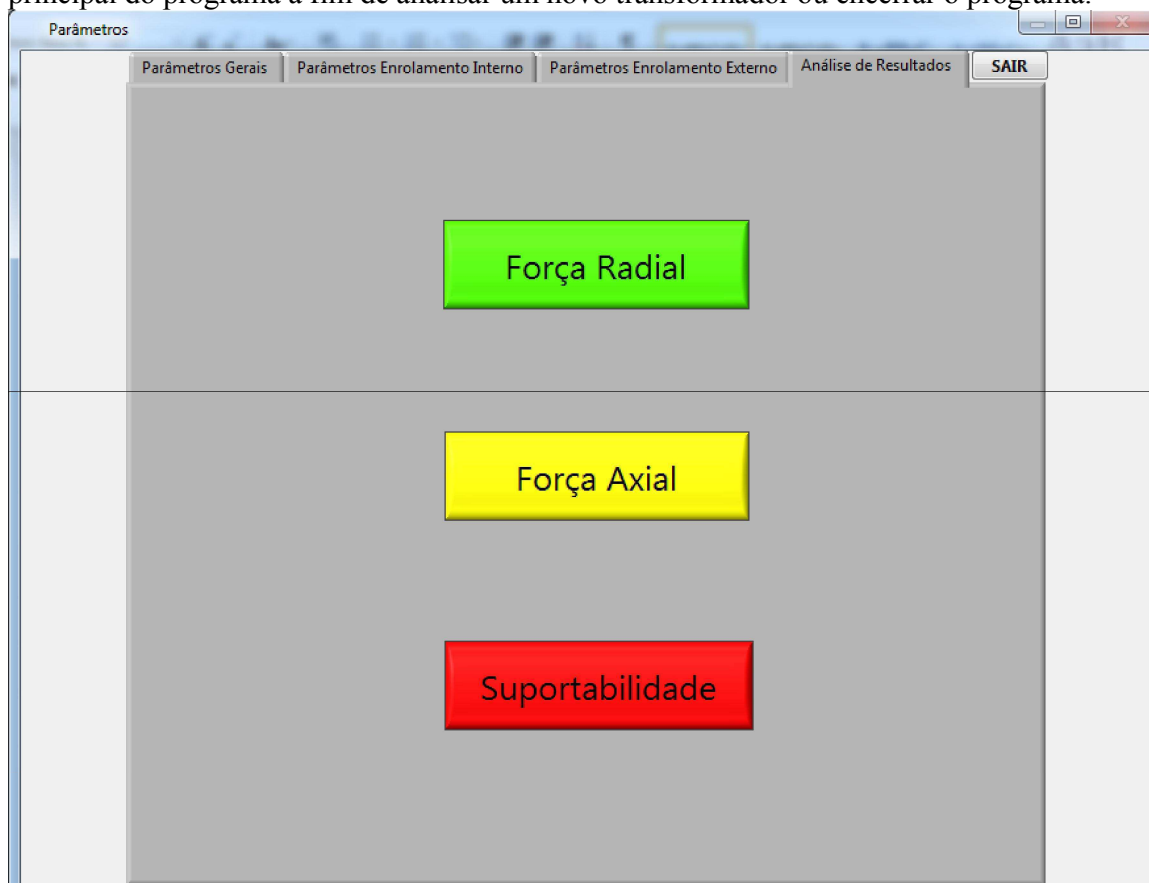
O que pode ser visualizado em Parâmetros Enrolamento Externo de forma distinta ao outro enrolamento é a aba Tapes, cujas informações estão ilustradas a seguir.

The image shows a software window titled "Parâmetros" with several tabs: "Parâmetros Gerais", "Parâmetros Enrolamento Interno", "Parâmetros Enrolamento Externo", "Análise de Resultados", and "SAIR". The "Parâmetros Enrolamento Externo" tab is active, and within it, the "Tapes" sub-tab is selected. The main content area contains the following elements:

- Há presença de Tapes?**: Radio buttons for "Sim" (selected) and "Não".
- Tipo de Derivação**: Radio buttons for "A", "B" (selected), "C", "D", and "E". Each option is accompanied by a small schematic diagram of a winding configuration.
- Comprimento da Derivação - a' [m]**: Input field with the value "0,134".
- Número de Espiras em Derivação Total - N_{deriv}** : Input field with the value "760".
- Quantidade de Condutores/espiras na Extremidade da Derivação - K_{deriv}** : Input field with the value "14".

Após visualização dos dados e verificação se não há qualquer não-conformidade o usuário pode analisar os esforços eletromecânicos. Caso seja observado algum dado incoerente, o arquivo "*.lvm" deverá ser criado e importado novamente.

Análise dos resultados. Em “Força Radial” são apresentadas as forças eletromecânicas calculadas na direção radial. Em “Força Axial” são apresentadas as forças eletromecânicas calculadas na direção axial. Em “Suportabilidade” são apresentados os estresses eletromecânicos na direção radial e axial. Clicando em “SAIR”, retorna-se para a janela principal do programa a fim de analisar um novo transformador ou encerrar o programa.



Resultados Força Radial. Transformador 5 MVA. Clicando em “SAIR”, retorna-se para a janela parâmetros.

Radial Analysis

Análise das Forças Radiais

Enrolamento Interno		Enrolamento Externo	
Força Radial Total	553,151 [ton]	Força Radial Média	176,073 [ton]
Força Radial Distribuída	16,0459 [N/mm]	Força Radial Total	699,974 [ton]
		Força Radial Média	222,809 [ton]
		Força Radial Distribuída	4,63083 [N/mm]

SAIR

Resultados Força Axial. Transformador 5 MVA. Clicando em “SAIR”, retorna-se para a janela parâmetros.

Axial Analysis

Análise das Forças Axiais

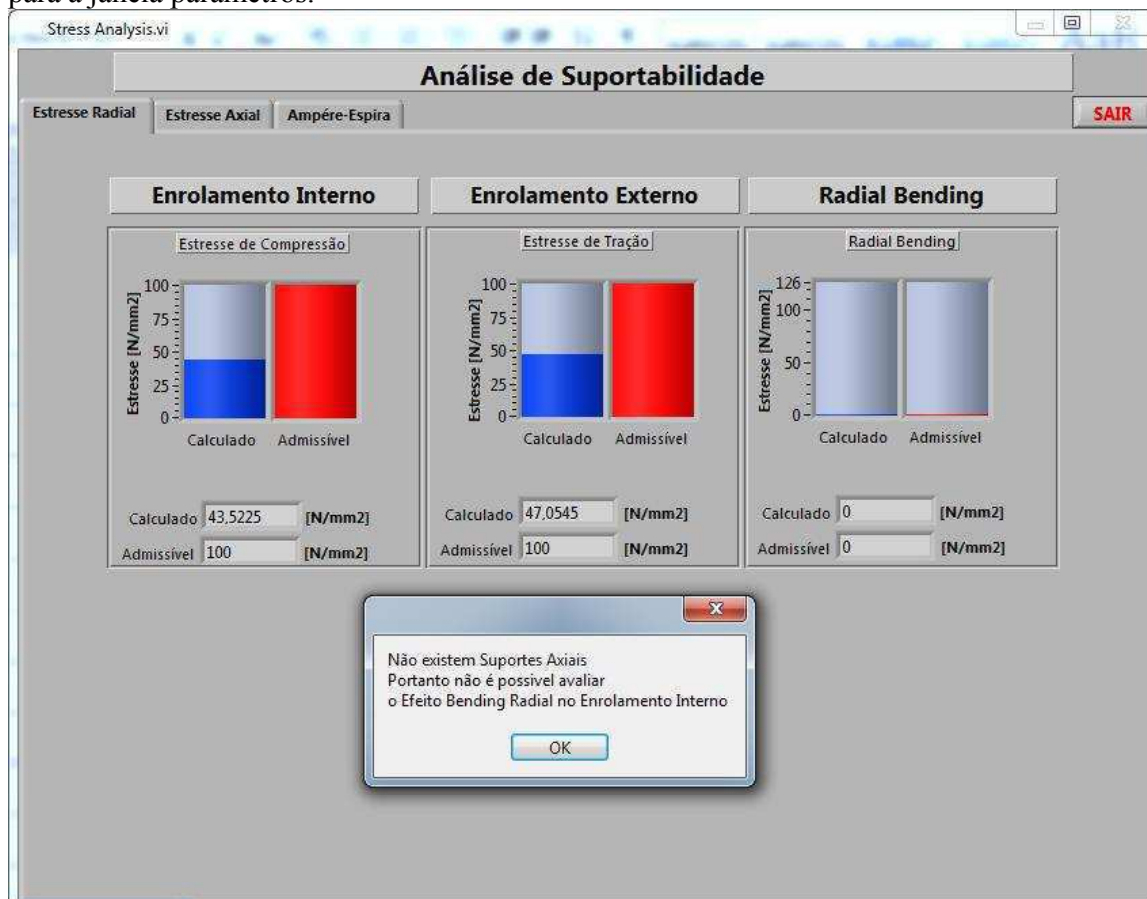
Força Total

Força Compressiva Total	201,271 [ton]
Força devido Desalinhamento	92,267 [ton]

Força Enrolamento Interno		Força Enrolamento Externo	
%Força Total	66,67 [%]	Força na Extremidade	3,9951 [ton]
Força Compressiva	94,2906 [ton]	Força Distribuída na Extremidade	26,7707 [N/mm]
		%Força Total	33,33 [%]
		Força na Extremidade	12,4555 [ton]
		Força Compressiva	106,98 [ton]
		Força Distribuída na Extremidade	65,9216 [N/mm]

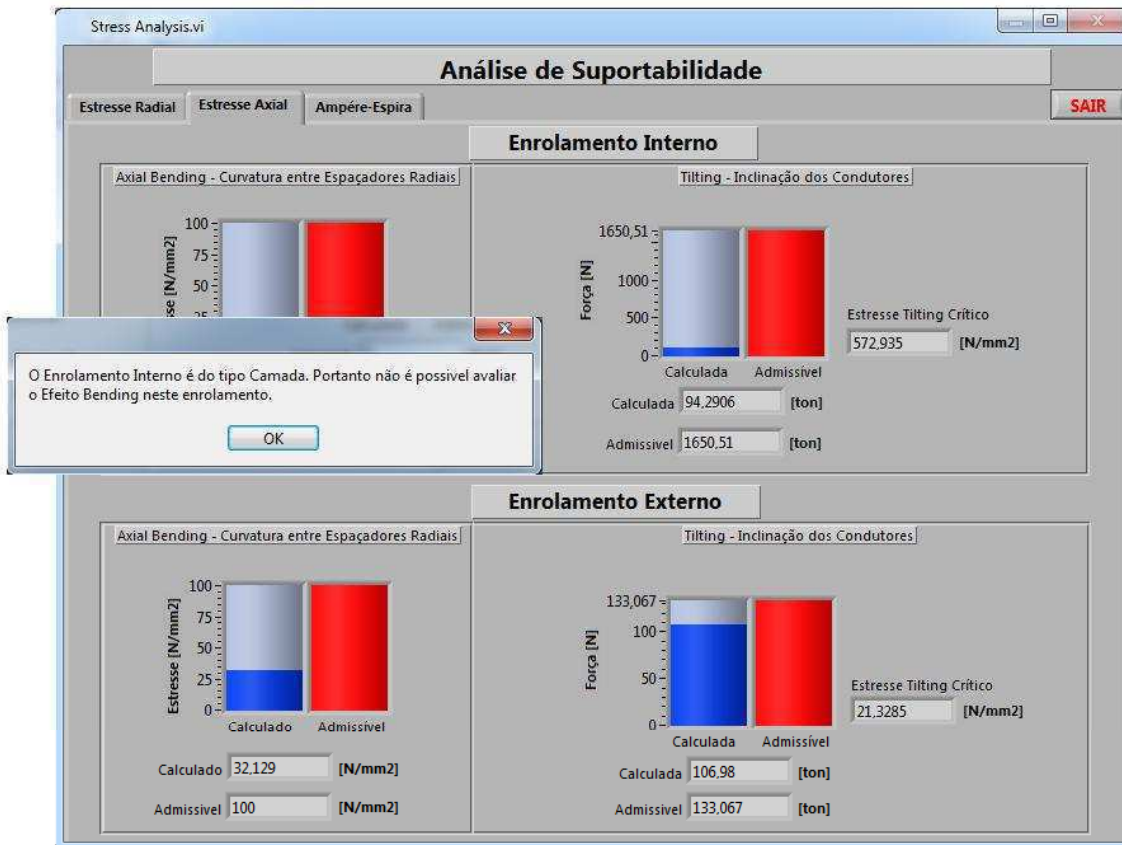
SAIR

Resultados Suportabilidade – Estresse Radial. Transformador 5 MVA. Nesta janela há três abas distintas, podendo ser visualizado os estresses radiais, estresses axiais e o efeito ampère-espira devido à força provocada por um possível desalinhamento entre enrolamentos. Na aba Estresse Radial, o programa informará que não será possível o cálculo do efeito bending quando não houver a presença de suportes axiais (*Sticks*). Clicando em “SAIR”, retorna-se para a janela parâmetros.

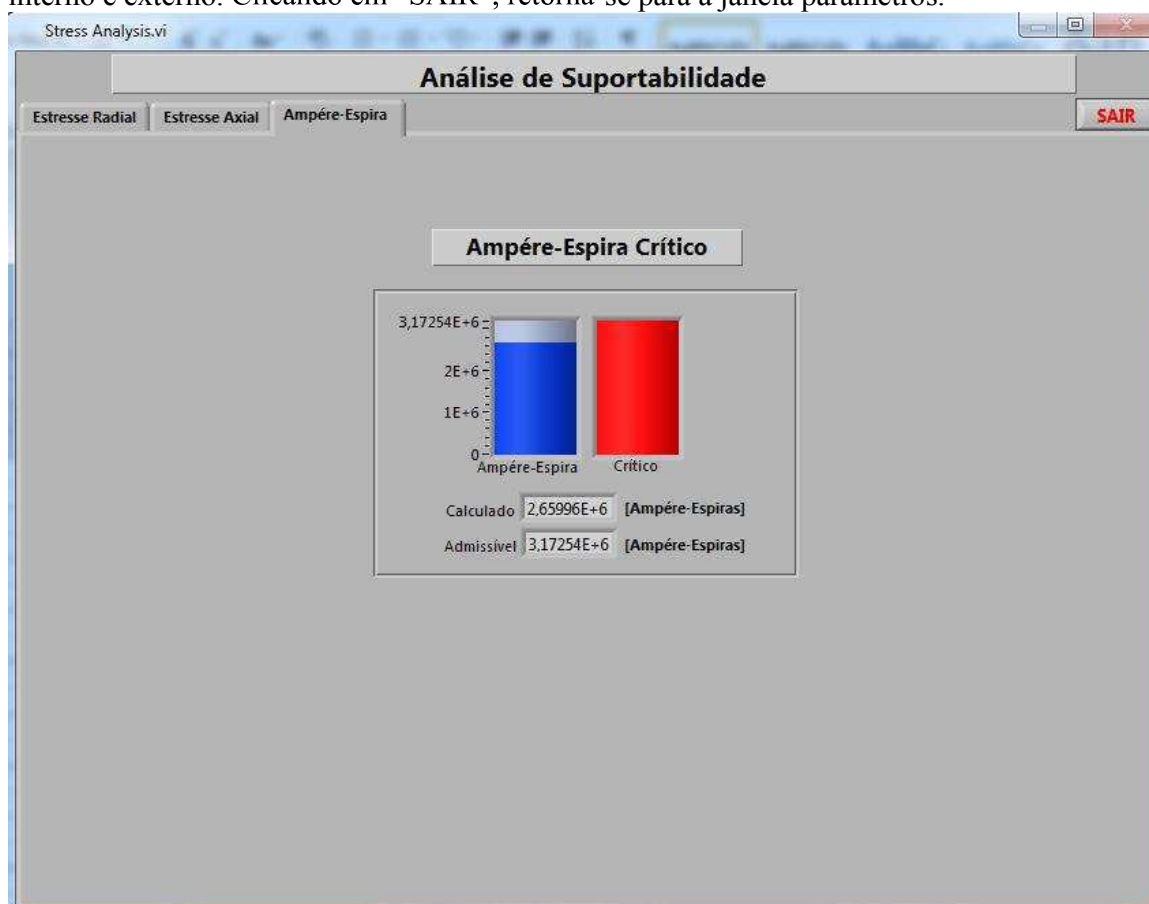


NOTA: Deve ser ressaltado que o software sempre calcula os esforços do conjunto equivalente que forma a espira. Assim, deve-se atentar ao tipo de condutor utilizado pelo fabricante, CTC ou Geminado. Para os cabos CTC, geralmente não há problema, pois o estresse eletromecânico fornecido já é do próprio conjunto resultante, ou seja de todos os condutores transpostos que formam o CTC. Por outro lado, para o cabo geminado, o estresse eletromecânico fornecido pelo fabricante é sempre referente a um fio. No entanto, em muitos casos, durante a bobinagem, uma espira é formada pelo paralelo de mais fios como divisor de corrente. Assim, em situações que utiliza-se cabos paralelos para formar uma espira, o resultado fornecido pelo programa deve ser dividido pela quantidade desses cabos em paralelo. No Anexo A, pode ser visualizado esses tipos de condutores.

Resultados Suportabilidade – Estresse Axial. Transformador 5 MVA. Na aba Estresse Axial, o programa informará que não será possível o cálculo do efeito bending quando o enrolamento for do tipo camada. Clicando em “SAIR”, retorna-se para a janela parâmetros.



Resultados Suportabilidade – Ampère-Espira. Transformador 5 MVA. Na aba Ampère-Espira, o usuário avalia a força provocada devido à um desalinhamento entre enrolamento interno e externo. Clicando em “SAIR”, retorna-se para a janela parâmetros.



Considerações Finais

Este programa avalia de forma aproximada a suportabilidade eletromecânica do transformador. Assim, permite-se ao usuário ter uma pré-análise da condição em que o equipamento encontra-se no sistema elétrico. Além disso, ressalta-se a rápida execução para obter os valores de saída.