



As Engenharias frente a Sociedade, a Economia e o Meio Ambiente 3

Henrique Ajuz Holzmann
(Organizador)

Henrique Ajuz Holzmann
(Organizador)

As Engenharias frente a Sociedade, a
Economia e o Meio Ambiente 3

Atena Editora
2019

2019 by Atena Editora
Copyright © Atena Editora
Copyright do Texto © 2019 Os Autores
Copyright da Edição © 2019 Atena Editora
Editora Executiva: Prof^a Dr^a Antonella Carvalho de Oliveira
Diagramação: Natália Sandrini
Edição de Arte: Lorena Prestes
Revisão: Os Autores

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores. Permitido o download da obra e o compartilhamento desde que sejam atribuídos créditos aos autores, mas sem a possibilidade de alterá-la de nenhuma forma ou utilizá-la para fins comerciais.

Conselho Editorial

Ciências Humanas e Sociais Aplicadas

Prof. Dr. Álvaro Augusto de Borba Barreto – Universidade Federal de Pelotas
Prof. Dr. Antonio Carlos Frasson – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Prof. Dr. Antonio Isidro-Filho – Universidade de Brasília
Prof. Dr. Constantino Ribeiro de Oliveira Junior – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Prof^a Dr^a Cristina Gaio – Universidade de Lisboa
Prof. Dr. Deyvison de Lima Oliveira – Universidade Federal de Rondônia
Prof. Dr. Gilmei Fleck – Universidade Estadual do Oeste do Paraná
Prof^a Dr^a Ivone Goulart Lopes – Istituto Internazionele delle Figlie de Maria Ausiliatrice
Prof. Dr. Julio Candido de Meirelles Junior – Universidade Federal Fluminense
Prof^a Dr^a Lina Maria Gonçalves – Universidade Federal do Tocantins
Prof^a Dr^a Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
Prof^a Dr^a Paola Andressa Scortegagna – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Prof. Dr. Urandi João Rodrigues Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará
Prof^a Dr^a Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande
Prof. Dr. Willian Douglas Guilherme – Universidade Federal do Tocantins

Ciências Agrárias e Multidisciplinar

Prof. Dr. Alan Mario Zuffo – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
Prof. Dr. Alexandre Igor Azevedo Pereira – Instituto Federal Goiano
Prof^a Dr^a Daiane Garabeli Trojan – Universidade Norte do Paraná
Prof. Dr. Darllan Collins da Cunha e Silva – Universidade Estadual Paulista
Prof. Dr. Fábio Steiner – Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul
Prof^a Dr^a Girlene Santos de Souza – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia
Prof. Dr. Jorge González Aguilera – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
Prof. Dr. Ronilson Freitas de Souza – Universidade do Estado do Pará
Prof. Dr. Valdemar Antonio Paffaro Junior – Universidade Federal de Alfenas

Ciências Biológicas e da Saúde

Prof. Dr. Benedito Rodrigues da Silva Neto – Universidade Federal de Goiás
Prof.^a Dr.^a Elane Schwinden Prudêncio – Universidade Federal de Santa Catarina
Prof. Dr. Gianfábio Pimentel Franco – Universidade Federal de Santa Maria
Prof. Dr. José Max Barbosa de Oliveira Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará

Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
Profª Drª Raissa Rachel Salustriano da Silva Matos – Universidade Federal do Maranhão
Profª Drª Vanessa Lima Gonçalves – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Profª Drª Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande

Ciências Exatas e da Terra e Engenharias

Prof. Dr. Adélio Alcino Sampaio Castro Machado – Universidade do Porto
Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Prof. Dr. Fabrício Menezes Ramos – Instituto Federal do Pará
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista

Conselho Técnico Científico

Prof. Msc. Abrãao Carvalho Nogueira – Universidade Federal do Espírito Santo
Prof. Dr. Adaylson Wagner Sousa de Vasconcelos – Ordem dos Advogados do Brasil/Seccional Paraíba
Prof. Msc. André Flávio Gonçalves Silva – Universidade Federal do Maranhão
Prof.ª Drª Andreza Lopes – Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento Acadêmico
Prof. Msc. Carlos Antônio dos Santos – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Prof. Msc. Daniel da Silva Miranda – Universidade Federal do Pará
Prof. Msc. Eliel Constantino da Silva – Universidade Estadual Paulista
Prof.ª Msc. Jaqueline Oliveira Rezende – Universidade Federal de Uberlândia
Prof. Msc. Leonardo Tullio – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Prof.ª Msc. Renata Luciane Polsaque Young Blood – UniSecal
Prof. Dr. Welleson Feitosa Gazel – Universidade Paulista

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) (eDOC BRASIL, Belo Horizonte/MG)	
E57	As engenharias frente a sociedade, a economia e o meio ambiente 3 [recurso eletrônico] / Organizador Henrique Ajuz Holzmann. – Ponta Grossa (PR): Atena Editora, 2019. – (As Engenharias Frente a Sociedade, a Economia e o Meio Ambiente; v. 3) Formato: PDF Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader Modo de acesso: World Wide Web Inclui bibliografia ISBN 978-85-7247-432-0 DOI 10.22533/at.ed.320192506 1. Engenharia – Aspectos sociais. 2. Engenharia – Aspectos econômicos. 3. Desenvolvimento sustentável. I. Holzmann, Henrique Ajuz. II. Série. CDD 658.5
Elaborado por Maurício Amormino Júnior – CRB6/2422	

Atena Editora
Ponta Grossa – Paraná - Brasil
www.atenaeditora.com.br
contato@atenaeditora.com.br

APRESENTAÇÃO

As obras As Engenharias frente a Sociedade, a Economia e o Meio Ambiente Volume 1, 2, 3 e 4 abordam os mais diversos assuntos sobre métodos e ferramentas nas diversas áreas das engenharias a fim de melhorar a relação do homem com o meio ambiente e seus recursos.

O Volume 1 está disposto em 31 capítulos, com assuntos voltados a engenharia do meio ambiente, apresentando processos de recuperação e reaproveitamento de resíduos e uma melhor aplicação dos recursos disponíveis no ambiente, além do panorama sobre novos métodos de obtenção limpa da energia.

Já o Volume 2, está organizado em 32 capítulos e apresenta uma vertente ligada ao estudo dos solos e águas, com estudos de sua melhor utilização, visando uma menor degradação do ambiente; com aplicações voltadas a construção civil de baixo impacto.

O Volume 3 apresenta estudos de materiais para aplicação eficiente e econômica em projetos, bem como o desenvolvimento de projetos mecânico e eletroeletrônicos voltados a otimização industrial e a redução de impacto ambiental, sendo organizados na forma de 28 capítulos.

No último Volume, são apresentados capítulos com temas referentes a engenharia de alimentos, e a melhoria em processos e produtos.

Desta forma um compendio de temas e abordagens que facilitam as relações entre ensino-aprendizado são apresentados, a fim de se levantar dados e propostas para novas discussões em relação ao ensino nas engenharias, de maneira atual e com a aplicação das tecnologias hoje disponíveis.

Boa leitura

Henrique Ajuz Holzmann

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	1
ANÁLISE DE PROPRIEDADES MECÂNICAS DE COMPÓSITOS CERÂMICOS DE ALUMINA-ZIRCÔNIA PARA APLICAÇÃO COMO FERRAMENTAS DE CORTE	
Miguel Adriano Inácio	
Maria do Carmo de Andrade Nono	
José Vitor Cândido de Souza	
Sergio Luiz Mineiro	
Daniel Alessander Nono	
DOI 10.22533/at.ed.3201925061	
CAPÍTULO 2	10
SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE MODELO ELASTOPLÁSTICO EM ROCHA CARBONÁTICA CARSTIFICADA	
Rayane Conceição Ribeiro da Silveira Mattos	
Daniel Araújo Farias de Melo	
Marinésio Pinheiro de Lima	
Tiago de Freitas Viana	
Igor Fernandes Gomes	
Leonardo José do Nascimento Guimarães	
DOI 10.22533/at.ed.3201925062	
CAPÍTULO 3	26
A INFLUÊNCIA DO NITROGÊNIO EM AÇOS INOXIDÁVEIS AUSTENÍTICOS COM APLICAÇÃO EM PRÓTESES ORTOPÉDICAS	
Glauber Rodrigues Cerqueira de Cerqueira	
Pedro Eliézer de Araújo Júnior	
DOI 10.22533/at.ed.3201925063	
CAPÍTULO 4	42
MICROPOROUS ACTIVATED CARBON FIBER FELT FROM BRAZILIAN TEXTILE PAN FIBER: PREPARATION, CHARACTERIZATION AND APPLICATION AS SUPERCAPACITOR ELECTRODE	
Jossano Saldanha Marcuzzo	
Aline Castilho Rodrigues	
Andres Cuña	
Nestor Tancredi	
Eduardo Mendez	
Heide Heloise Bernardi	
Mauricio Ribeiro Baldan	
DOI 10.22533/at.ed.3201925064	
CAPÍTULO 5	55
ANÁLISE COMPARADA DE UM AGREGADO DE ESCÓRIA DE ACIARIA COMO MATERIAL ALTERNATIVO PARA LASTRO DE VIAS FÉRREAS DO TIPO <i>HEAVY HAUL</i> POR MEIO DE ENSAIOS TRIAXIAIS	
Bruno Guimarães Delgado	
Antônio Viana da Fonseca	
Eduardo Fortunato	
Daniela Raquel Ferreira Coelho	
DOI 10.22533/at.ed.3201925065	

CAPÍTULO 6	71
CARACTERIZAÇÃO EM FADIGA POR FLEXÃO ROTATIVA DE FIOS DE ARAME DE SOLDA	
Ingrid Ariani Belineli Barbosa	
Heide Heloise Bernardi	
William Marcos Muniz Menezes	
DOI 10.22533/at.ed.3201925066	
CAPÍTULO 7	80
ESTUDO DA MICROESTRUTURA NA ZONA TERMICAMENTE AFETADA COM A VARIAÇÃO DOS PARÂMETROS DE SOLDAGEM	
Luís Henrique Pires da Silva	
Alex Sander Chaves da Silva	
DOI 10.22533/at.ed.3201925067	
CAPÍTULO 8	92
ESTUDO DA USINAGEM DA SUPERLIGA A BASE DE FERRO-NÍQUEL UTILIZANDO FERRAMENTA CERÂMICA	
Eduardo Pires Bonhin	
Sarah David Müzel	
Marcel Yuzo Kondo	
Lúcia de Almeida Ribeiro	
José Vitor Candido de Souza	
Marcos Valério Ribeiro	
DOI 10.22533/at.ed.3201925068	
CAPÍTULO 9	100
CONSTRUÇÃO DE UMA MÁQUINA DE NÉVOA SALINA ATENDENDO AOS REQUISITOS MÍNIMOS CONTIDOS NAS NORMAS ISO 9227 e ASTM B-117	
Leonardo de Souza Coutinho	
Alexandre Alvarenga Palmeira	
DOI 10.22533/at.ed.3201925069	
CAPÍTULO 10	111
MECANIZAÇÃO AGRÍCOLA: COLHEITADEIRAS AXIAIS X RADIAIS	
Filipi José Arantes Lemos	
João Mario Mendes de Freitas	
DOI 10.22533/at.ed.32019250610	
CAPÍTULO 11	127
MÉTODO DE OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA PARA O PROJETO DE MODELOS DE BIELAS E TIRANTES	
Jamile Maria Araujo Tavares	
Rejane Martins Fernandes Canha	
DOI 10.22533/at.ed.32019250611	
CAPÍTULO 12	142
ESTUDO NUMÉRICO DE UM EQUIPAMENTO DE SECAGEM	
Eduardo Dal Piva Schuch	
Magaiver Gabriel Lamp	
Conrado Mendes Moraes	
Ângela Beatrice Dewes Moura	
DOI 10.22533/at.ed.32019250612	

CAPÍTULO 13	153
SISTEMA DE AQUECIMENTO DE ÁGUA A COMBUSTÃO DE GASOLINA	
Felipe Michael Grein	
Jean Lucas Pereira	
Luiz Felipe Weck	
Olaf Graupmann	
DOI 10.22533/at.ed.32019250613	
CAPÍTULO 14	156
MODELAGEM DE PID PARA SISTEMA DE CONTROLE DE RAMPAS DE TEMPERATURA EM BRASSAGEM	
Gabriel Queiroz	
Marcelo Barros de Almeida	
Márcio Jose da Cunha	
DOI 10.22533/at.ed.32019250614	
CAPÍTULO 15	168
MODELAGEM MATEMÁTICA DE SISTEMAS DINÂMICOS: UMA ABORDAGEM DIDÁTICA	
Lucas Divino Alves	
Neylor Makalister Ribeiro Vieira	
Emerson Paulino dos Reis	
DOI 10.22533/at.ed.32019250615	
CAPÍTULO 16	183
APLICAÇÃO E ANÁLISE VIA MEC EM PROBLEMAS DE TERMOELASTICIDADE 2D	
Luis Vinicius Pereira Silva	
Gilberto Gomes	
João Carlos Barleta Uchôa	
DOI 10.22533/at.ed.32019250616	
CAPÍTULO 17	198
SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA INJEÇÃO DE ÁGUA EM RESERVATÓRIO DE PETRÓLEO HETEROGÊNEO	
Raquel Oliveira Lima	
José Arthur Oliveira Santos	
Antônio Jorge Vasconcellos Garcia	
Felipe Barreiros Gomes	
DOI 10.22533/at.ed.32019250617	
CAPÍTULO 18	207
TANQUES FLASH: DIMENSIONAMENTO E ANÁLISE DE CUSTOS NO SOFTWARE DE MODELAGEM E SIMULAÇÃO EMSO	
Erich Potrich	
Sérgio Correia da Silva	
Larissa Souza Amaral	
DOI 10.22533/at.ed.32019250618	

CAPÍTULO 19	215
AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE DEPOSIÇÃO ORGÂNICA EM OPERAÇÕES DE MISTURA DE PETRÓLEOS NO TANQUE DE ESTOCAGEM EM REFINARIAS DE PETRÓLEO	
Rosberguer de Almeida Camargo	
Mauren Costa da Silva	
Rafael Beltrame	
Darci Alberto Gatto	
Antônio Carlos da Silva Ramos	
DOI 10.22533/at.ed.32019250619	
CAPÍTULO 20	223
AVALIAÇÃO DE UM SISTEMA EMBARCADO PARA MENSURAR A ILUMINÂNCIA EM UM AVIÁRIO EXPERIMENTAL	
Giovanni Polette Dalla Libera	
Victor Moreira Leão	
Vitor Augusto de Sousa	
Matheus Fernando Lima Zuccherelli de Souza	
Renata Lima Zuccherelli de Oliveira	
Marcelo Eduardo de Oliveira	
Adriano Rogério Bruno Tech	
DOI 10.22533/at.ed.32019250620	
CAPÍTULO 21	230
CONTROLADOR FUZZY SINTONIZADO POR ALGORITMO GENÉTICO EM SISTEMA DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA	
Lenon Diniz Seixas	
Diego Solak Castanho	
Hugo Valadares Siqueira	
Fernanda Cristina Corrêa	
DOI 10.22533/at.ed.32019250621	
CAPÍTULO 22	243
CONTROLADORES ROBUSTO APLICADO A CONVERSORES CC-CC	
Luiz Otávio Limurci dos Santos	
Luiz Antonio Maccari Junior	
DOI 10.22533/at.ed.32019250622	
CAPÍTULO 23	261
PROPOSTA DE PLATAFORMA PARA ESTUDO DE MOTOR A RELUTÂNCIA VARIÁVEL 8/6	
Marcos José de Moraes Filho	
Luciano Coutinho Gomes	
Darizon Alves de Andrade	
Josemar Alves dos Santos Junior	
Wanberton Gabriel de Souza	
Cássio Alves de Oliveira	
DOI 10.22533/at.ed.32019250623	

CAPÍTULO 24	275
ESTUDO COMPARATIVO DE MODELAGENS DE ENROLAMENTOS DE UM TRANSFORMADOR UTILIZANDO O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS PARA ANÁLISES DE ESFORÇOS ELETROME CÂNICOS	
Pedro Henrique Aquino Barra Arnaldo José Pereira Rosentino Junior Antônio Carlos Delaiba	
DOI 10.22533/at.ed.32019250624	
CAPÍTULO 25	287
PROCEDIMENTO PARA AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DO LAÇO DE HISTERESE MAGNÉTICA	
Vitor Hörbe Pereira Da Costa Antônio Flavio Licarião Nogueira Leonardo José Amador Salas Maldonado	
DOI 10.22533/at.ed.32019250625	
CAPÍTULO 26	294
SIMULAÇÕES DE DISTRIBUIÇÃO DE CAMPO E CORRENTE ELÉTRICA EM TECIDOS BIOLÓGICOS	
Guilherme Brasil Pintarelli Afrânio de Castro Antonio Jr. Raul Guedert Sandra Cossul Daniela Ota Hisayasu Suzuki	
DOI 10.22533/at.ed.32019250626	
CAPÍTULO 27	307
SISTEMA DE PRESENÇA UTILIZANDO IDENTIFICAÇÃO POR RADIOFREQUÊNCIA	
Giovani Formaggio Mateus Ricardo Barroso Leite	
DOI 10.22533/at.ed.32019250627	
CAPÍTULO 28	322
SISTEMAS DEFASADORES EM ALTA FREQUÊNCIA UTILIZANDO MICROFITA EM SUBSTRATO FR4	
Jobson De Araújo Nascimento José Moraes Gurgel Neto Alexsandro Aleixo Pereira da Silva Regina Maria de Lima Neta	
DOI 10.22533/at.ed.32019250628	
CAPÍTULO 29	333
ANÁLISES DA RUPTURA EM TRECHO DA BR-060 NO MUNICÍPIO DE ALEXÂNIA, GOIÁS, E CONDIÇÕES APÓS SEIS ANOS DA RECUPERAÇÃO	
Rideci Farias Tiago Matias Lino Haroldo da Silva Paranhos Itamar de Souza Bezerra Ranieri Araújo Farias Dias Alexsandra Maiberg Hausser	
DOI 10.22533/at.ed.32019250629	
SOBRE O ORGANIZADOR	346

ESTUDO COMPARATIVO DE MODELAGENS DE ENROLAMENTOS DE UM TRANSFORMADOR UTILIZANDO O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS PARA ANÁLISES DE ESFORÇOS ELETROMECAÑICOS

Pedro Henrique Aquino Barra

Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos
São Carlos – SP

Arnaldo José Pereira Rosentino Junior

Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Departamento de Engenharia Elétrica
Uberaba – MG

Antônio Carlos Delaiba

Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Elétrica
Uberlândia – MG

RESUMO: Este trabalho tem por objetivo apresentar e comparar, no que tange aos esforços eletromecânicos em transformadores, três diferentes modelagens para enrolamentos de um transformador trifásico de três colunas, do tipo núcleo envolvido com dois enrolamentos de dupla camada por fase. Os esforços eletromecânicos serão estimados para a condição de um curto-circuito trifásico. As três modelagens serão comparadas entre si e também com os resultados analíticos apresentados por outros trabalhos científicos. Deve-se salientar também que as características da distribuição de fluxo magnético no interior do transformador, obtidas nas três situações também serão apresentadas e discutidas.

PALAVRAS-CHAVE: Curto-Circuito, Esforços

Eletromecânicos, Método dos Elementos Finitos, Modelagem Computacional, Transformadores.

A COMPARATIVE STUDY OF MODELING TRANSFORMER WINDINGS BY FINITE ELEMENT METHOD FOR ELECTROMECHANICAL STRESSES ANALYSIS

ABSTRACT: This work aims to present and compare, with respect to electromechanical efforts in transformers, three different types of modeling a transformer winding using finite element method. The analyzed device is made of traditional ferromagnetic core with three columns and two concentric double layered windings. In this regard, the electromechanical stresses and the distribution characteristic of magnetic flux produced by high short-circuit current will be estimated for each case.

KEYWORDS: Short-circuit, Electromechanical Stresses, Finite Element Method, Computational Modeling, Transformers.

1 | INTRODUÇÃO

As falhas em transformadores, de acordo com a literatura, podem ser classificadas como sendo de origens térmicas, dielétricas, químicas

e mecânicas (CIGRE; GROUP, 2002). Independentemente do tipo de falha ocorrida no transformador, ter-se-á como consequência um alto custo financeiro, quer seja para sua substituição, quer seja para seu reparo, pois estes são componentes essenciais nos sistemas elétricos, sendo um dos elementos de maior custo.

Acerca das falhas de origens mecânicas, tem-se que a interação entre a corrente elétrica e a densidade de campo magnético de dispersão origina forças eletromagnéticas que atuam nos enrolamentos de um transformador (YUN-QIU; JING-QIU; ZI-HONG, 1990). Quando em operação nominal, estas forças nos enrolamentos são pequenas, pois as correntes e a densidade de campo magnético de dispersão são pequenas. Sob outra perspectiva, em sua vida útil, os transformadores estão sujeitos a vários distúrbios, como por exemplo, os curtos-circuitos. Nesse tipo de situação, sobremaneira sendo o curto-circuito trifásico, as elevadas correntes implicam em elevadas forças internas nos transformadores.

A respeito das forças eletromagnéticas devido às correntes de curto-circuito trifásico, é possível encontrar no trabalho de Waters (1966) formulações analíticas para forças radiais e axiais que permitem analisar o efeito destas correntes sobre os enrolamentos. Ainda neste sentido, detalhamentos também podem ser verificados em McNutt et al. (1970).

Nessa conjuntura, os danos causados aos transformadores devido aos esforços eletromecânicos são evidentes, sabendo até mesmo que curtos trifásicos acarretam na redução da vida útil do transformador ao longo do tempo (GUIMARÃES, 2013). Por conseguinte, pesquisadores tem se esforçado em suas investigações para compreender qualitativa e quantitativamente as origens das falhas mecânicas nos transformadores. Pode-se encontrar na literatura a aplicação do método dos elementos finitos para a obtenção dos esforços frente às faltas simétricas (BARRA; ROSENTINO; DELAIBA, 2016; ROSENTINO JUNIOR, 2010), assimétricas e correntes de energização (BARRA, 2017; BARRA; ROSENTINO; DELAIBA, 2018). Têm-se também trabalhos que buscam formas de diagnosticar falhas em transformadores, ou ainda, por indícios que apontem para a operação segura de transformadores sob a perspectiva da suportabilidade mecânica (BARRA et al., 2018; FARIA NETO; BARRA; DELAIBA, 2017)

Dentro desse contexto, este artigo segue no sentido de analisar e comparar três diferentes modelagens de enrolamentos de um transformador trifásico, sob o método dos elementos finitos, objetivando encontrar os esforços eletromagnéticos oriundos de curtos-circuitos do tipo trifásico. Para tanto será utilizado o programa FEMM (*Finite Element Method Magnetics*). Para uma comparação mais consistente, a operação nominal do transformador também será analisada, e as características da distribuição de fluxo magnético no interior do transformador serão obtidas. Em uma primeira modelagem, a geometria do enrolamento do transformador será considerada como sendo um enrolamento único, ou seja, não há discretização geométrica de camadas e nem espiras. Em um segundo momento, a modelagem leva em consideração o fato do enrolamento do transformador utilizado ser constituído em duas camadas,

mas não fazendo análises espira por espira. Por fim, na terceira modelagem, será desenvolvida considerando o enrolamento o mais próximo de sua realidade física, ou seja: camada por camada e espira por espira. Destaca-se que para obtenção das correntes em condições nominais e em condições de curto-circuito, utilizou-se a ferramenta computacional ATP (*Alternative Transient Program*).

2 | MODELAGENS DO TRANSFORMADOR NO PROGRAMA FEMM

O transformador utilizado nas simulações é trifásico de três colunas do tipo núcleo envolvido com dois enrolamentos de dupla camada por fase, sendo 33 espiras por camada. Suas conexões são em estrela, com tensão nominal em cada enrolamento de 127 V e sua potência trifásica 15 kVA - 3,47%. Algumas características geométricas deste transformador podem ser encontradas na Figura 1, sendo que as características físicas e geométricas adicionais podem ser encontradas em Azevedo (2007). Para todos os casos que serão aqui mostrados, foi utilizado o modelo planar com uma profundidade de 1 [mm]. Logo, para todos os modelos os valores de força obtidos estarão na unidade [N/mm].

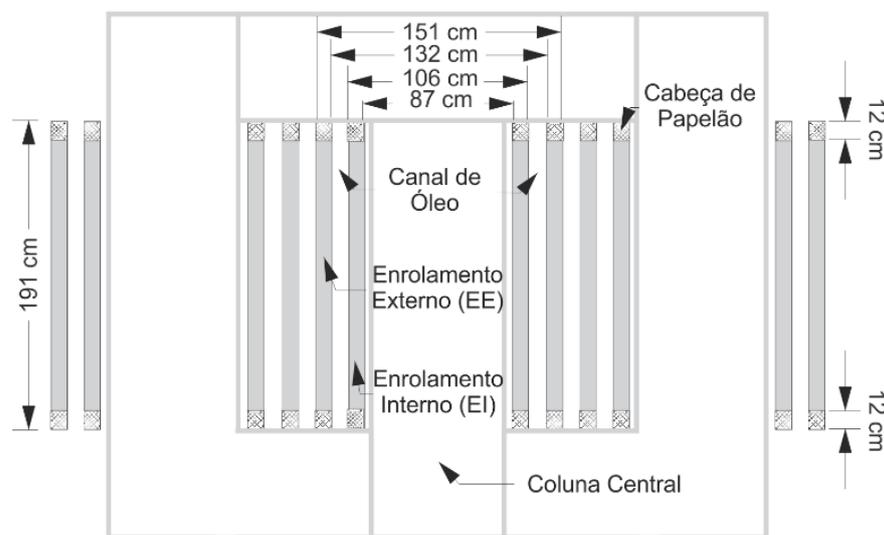


Figura 1. Vista frontal do núcleo do transformador e enrolamentos do transformador modelado.

Os três tipos de modelagens dos enrolamentos deste transformador formam os estudos de caso analisados neste trabalho, e são descritos da seguinte forma:

- **Caso A:** Modelagem considerando enrolamento único. Os enrolamentos do transformador são considerados como cilindros, isto é, de forma única. Dessa forma, algumas considerações acerca de suas características físicas foram inibidas, quais sejam, suas camadas e espiras. Para esse a geração das malhas nesse modelo, necessitou-se de 24.282 nós.
- **Caso B:** Modelagem considerando enrolamento camada por camada. Buscando-se maior precisão e riqueza em informações, a modelagem do transformador contou com enrolamentos subdivididos em suas duas camadas,

mas ainda sem considerar espira por espira. Foram necessários 37.555 nós para a geração das malhas.

- **Caso C:** Modelagem considerando enrolamento camada por camada e espira por espira. Por fim, nesse caso foi considerado o enrolamento camada por camada, espira por espira. Nesse caso, exigiu-se um maior processamento na geração das malhas, necessitando de 444.407 nós. Entretanto, verifica-se que este tipo de modelagem oferece maior precisão e também maior possibilidade de estudos e análises do tema aqui focado.

A Figura 2 apresenta parte do enrolamento ampliado para os três casos acima descritos. A Figura 3, por sua vez, exemplifica o resultado da geração das malhas para a modelagem do Caso C.

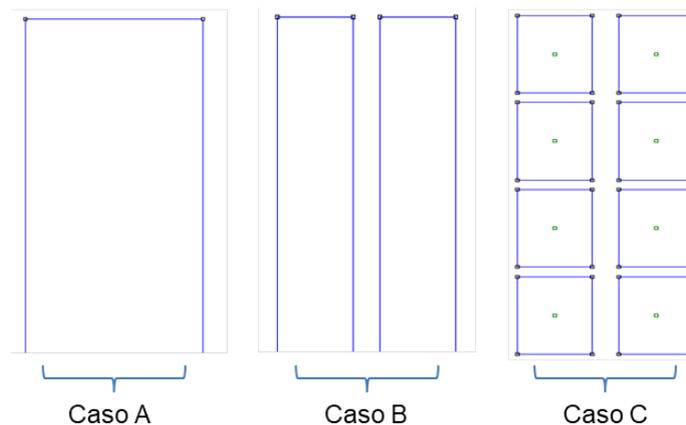


Figura 2. Parte ampliada de um enrolamento, demonstrando as três possibilidades de modelagem.

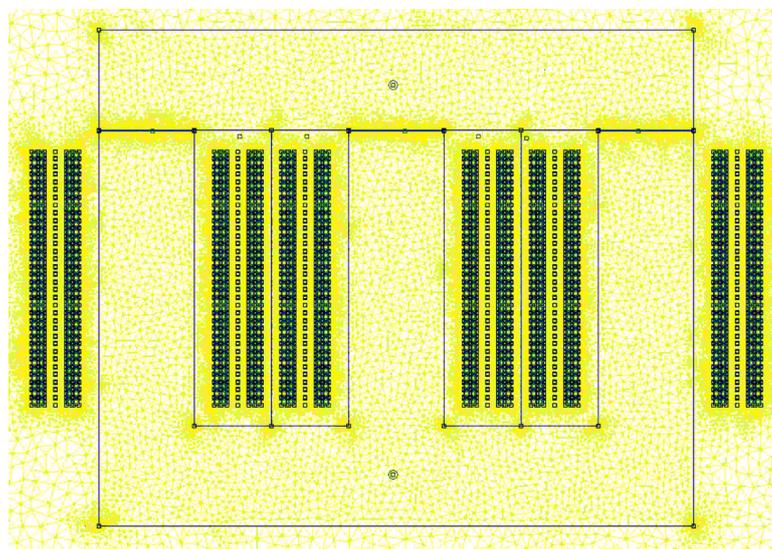


Figura 3. Malhas geradas para o caso da modelagem de enrolamento camada por camada e espira por espira.

A seguir serão apresentados os resultados das simulações considerando-se esses três estudos de caso. Para a análise sob condição nominal apresenta-se apenas a distribuição de fluxo magnético, visto que os esforços eletromecânicos nesta situação são desprezíveis. Por outro lado, para a análise sob condição de curto-circuito trifásico, apresenta-se a distribuição de fluxo magnético e as forças atuantes nos enrolamentos.

O processo como um todo de modelagem e análise baseia-se nas seguintes etapas:

- **Passo 1:** Utilização do *software* ATP para obtenção das correntes elétricas em condições normais e de curto-circuito para implementação do modelo no FEMM;
- **Passo 2:** Criação da geometria do transformador no FEMM, com as devidas considerações a respeito dos enrolamentos;
- **Passo 3:** Definição das propriedades físicas dos materiais relacionados à geometria;
- **Passo 4:** Geração das malhas;
- **Passo 5:** Solução da modelagem;
- **Passo 6:** Análise dos resultados obtidos.

3 | SIMULAÇÃO DO TRANSFORMADOR SOB CONDIÇÕES NOMINAIS

Para a implementação no FEMM dos valores das correntes para as condições nominais e sob falta utiliza-se o *software* ATP. O circuito modelado no ATP, representado na Figura 4, foi realizado conforme o trabalho de Rosentino Junior (2010). As correntes nominais obtidas são apresentadas na Tabela 1.

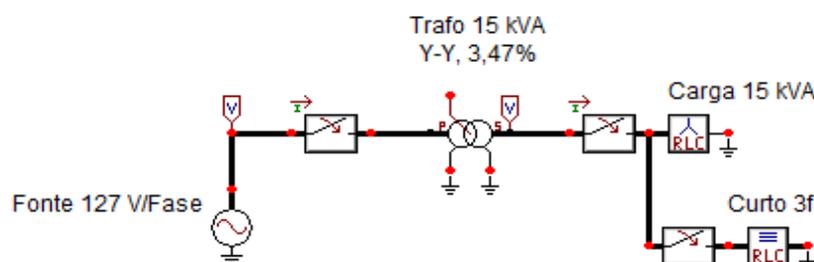


Figura 4. Circuito modelado no ATP para condições nominais e sob falta.

Corrente	Fase A [A]	Fase B [A]	Fase C [A]
Primário	-25,655	56,632	-30,977
Secundário	-25,094	55,431	-30,337

Tabela 1. Valores das correntes trifásicas obtidas em condição nominal.

Diante da similaridade dos resultados obtidos no programa FEMM para esta condição, este trabalho destaca por meio da Figura 5, a distribuição de fluxo magnético no transformador apenas para o Caso C. O fluxo na coluna central é de aproximadamente 1,55 [T], valor este também informado pelo fabricante, implicando em uma consistência nos resultados obtidos. Nota-se ainda, como esperado, que em condições normais de operação o fluxo magnético se concentra totalmente no material ferromagnético, fazendo com que o fluxo de dispersão seja muito pequeno. Dessa forma, o produto vetorial entre este fluxo de dispersão e a corrente nominal,

resulta em pequenos valores de forças eletromagnéticas. Naturalmente, esses valores são desprezíveis, no que tange à suportabilidade mecânica do transformador. Para fins de comparação, a Tabela 2 mostra os resultados encontrados para força radial total no enrolamento interno, denotado por (F_{r-EI}) e externo, denotado por (F_{r-EE}), onde nota-se boa proximidade entre as modelagens e também com a metodologia analítica desenvolvida e verificada por Rosentino Junior (2010). Quanto às forças axiais totais, são praticamente nulas e por isto, não são apresentadas nesta situação operacional.

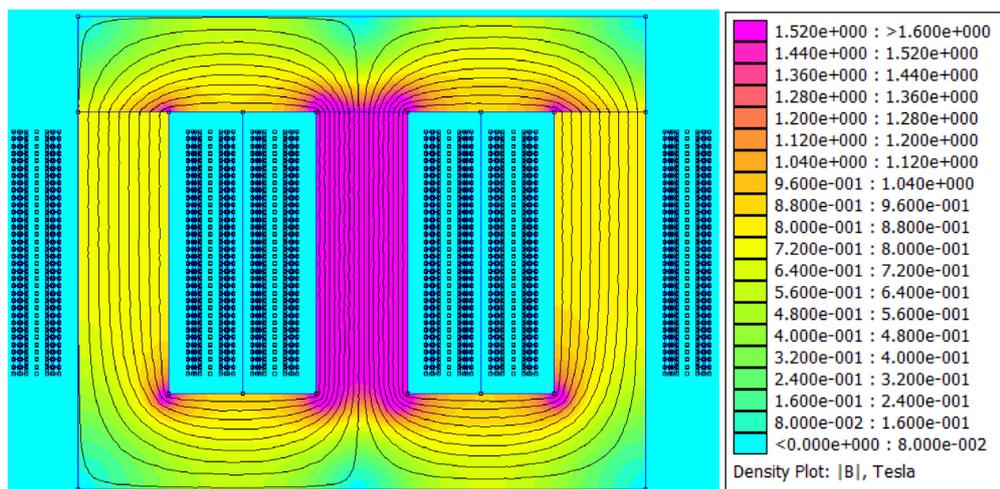


Figura 5. Densidade de fluxo em condição nominal, para modelo de enrolamento camada por camada e espira por espira.

	Metodologia Analítica	Caso A	Caso B	Caso C
F_{r-EI} [N]	15,2663	14,1388	14,1349	14,1336
F_{r-EE} [N]	23,3658	20,8160	20,8160	20,9107

Tabela 2. Comparação de resultados obtidos para forças radiais nas diferentes modelagens, sob condição nominal.

4 | SIMULAÇÃO DO TRANSFORMADOR SOB CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICO

Da mesma forma que para condições nominais, as correntes foram obtidas através de modelo no ATP, conforme Figura 4. Estas correntes são elencadas na Tabela 3.

Corrente	Fase A [A]	Fase B [A]	Fase C [A]
Primário	-769,58	2.192,1	-1.422,6
Secundário	-768,98	2.191,9	-1.422,9

Tabela 3. Valores de correntes em condição de curto-circuito trifásico.

Para a operação sob curto-circuito trifásico, foram obtidas as densidades de fluxo, bem como os esforços eletromecânicos nos enrolamentos para cada modelagem. Os resultados encontram-se apresentados nos tópicos a seguir.

4.1 Caso A: Modelagem Considerando Enrolamento Único

A Figura 6 apresenta o resultado da densidade de fluxo magnético obtido para esta modelagem. No que diz respeito aos esforços eletromecânicos no transformador, por meio do FEMM, encontra-se para o enrolamento interno da fase B uma força radial distribuída de compressão de 71,6636 [N/mm] e uma força radial distribuída de tração de 71,8582 [N/mm] para o enrolamento externo. De acordo com a geometria do enrolamento e das espiras, obtém-se um comprimento médio de $\pi \cdot 96,5$ mm para espiras no enrolamento interno e de $\pi \cdot 141,5$ mm para espiras no enrolamento externo. Dessa forma, encontra-se uma força radial total de compressão para o enrolamento interno de 21,726 [kN] e uma força radial total de tração para o enrolamento externo de 31,944 [kN]. Vale ressaltar que, o sentido das forças radiais (tração ou compressão) foi também encontrado via o FEMM. Sob a perspectiva de forças axiais, verifica-se uma força total desprezível nos enrolamentos internos e externos, não sendo possível verificar nesta modelagem, a amplitude dessas forças nas extremidades dos enrolamentos. Assim, pode-se observar uma das limitações desse tipo de modelo.

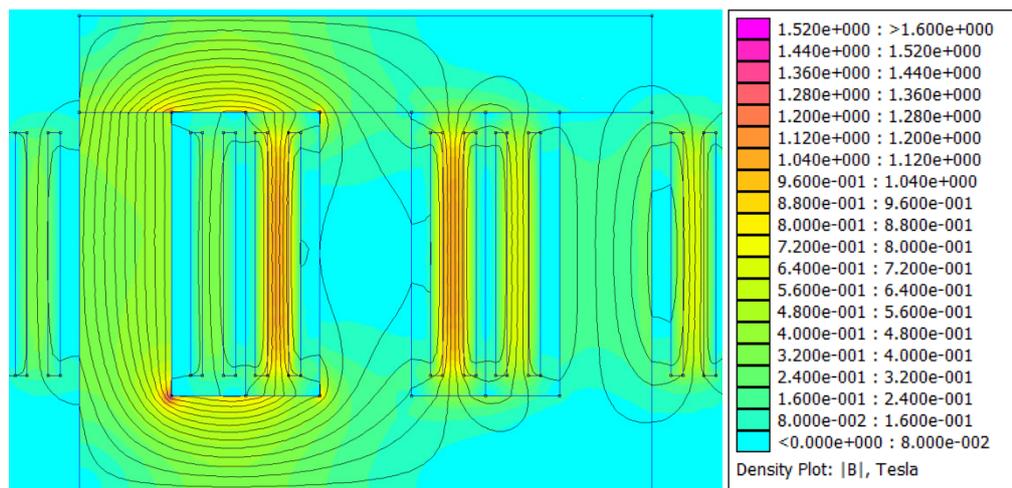


Figura 6. Densidade de fluxo em condição de curto-circuito, para modelo de enrolamento inteiro.

4.2 Caso B: Modelagem Considerando Enrolamento Camada por Camada

Para este estudo de caso, verifica-se também na Figura 7, uma grande distribuição de fluxo magnético de dispersão entre os enrolamentos externo e interno, causando solicitações mecânicas mais intensas nas camadas mais próximas, ou seja, camada externa do enrolamento interno e interna do enrolamento externo, vinculadas à fase B. Para esta modelagem, as forças radiais correspondem ao somatório das forças radiais encontradas para cada camada. Portanto, encontrou-se uma força radial distribuída de compressão de 71,6431 [N/mm] para o enrolamento interno e uma força radial distribuída de tração de 71,8565 [N/mm] para o enrolamento externo. Fazendo as mesmas considerações anteriormente adotadas, tem-se uma força radial total de

compressão de 21,720 [kN] no enrolamento interno e uma força radial distribuída de tração de 31,943 [kN] no enrolamento externo. No que tange à força axial total, encontra-se um valor nulo. Novamente, não é possível verificar forças axiais nas extremidades dos enrolamentos, indicando uma limitação do modelo referente ao Caso B.

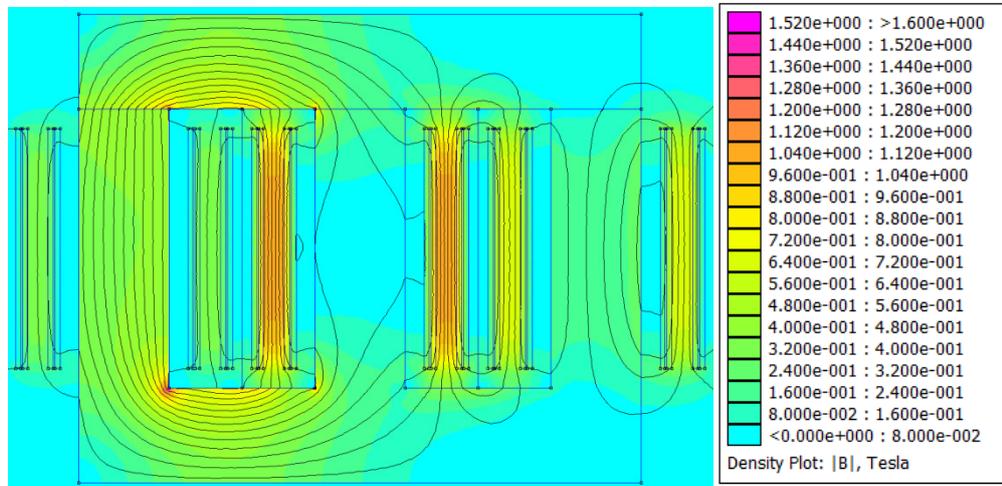


Figura 7. Densidade de fluxo em condição de curto, para modelo de enrolamento camada por camada.

4.3 Caso C: Modelagem Considerando Enrolamento Camada por Camada e Espira por Espira

A Figura 8 apresenta o resultado da densidade de fluxo magnético em condição de curto, tomando-se o modelo de enrolamento camada por camada e espira por espira.

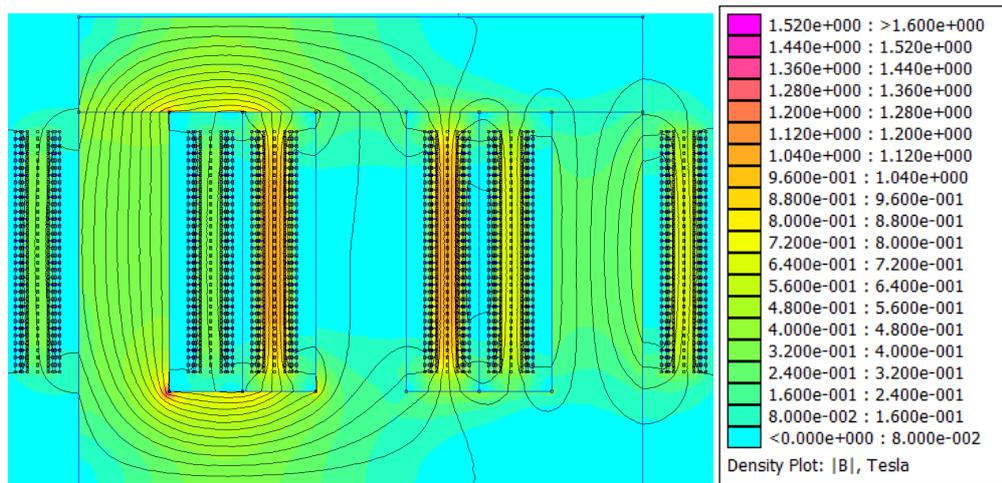


Figura 8. Densidade de fluxo em condição de curto, para modelo de enrolamento camada por camada e espira por espira.

Esta modelagem engloba de forma mais fidedigna as características físicas dos enrolamentos. Dessa forma, pode-se realizar uma análise de forças ao longo de todo o enrolamento. A força radial de compressão e tração em cada espira, podem

ser visualizadas nas Figuras 9 e 10. A força radial total no enrolamento é o somatório das forças encontradas em cada espira. Assim, obtém-se uma força radial total de compressão de 22,22 [kN] no enrolamento interno e uma força radial total de tração de 31,21 [kN] no enrolamento externo.

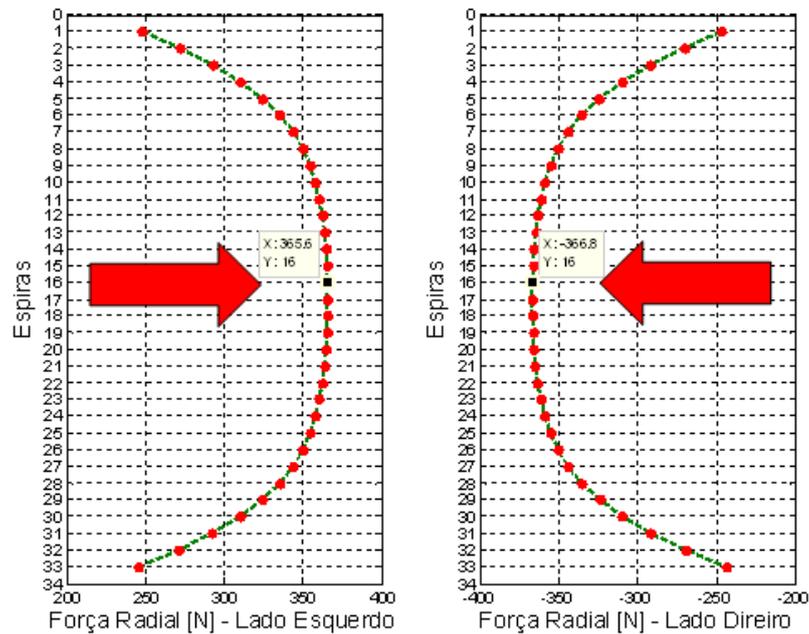


Figura 9. Força radial de compressão distribuída no enrolamento interno.

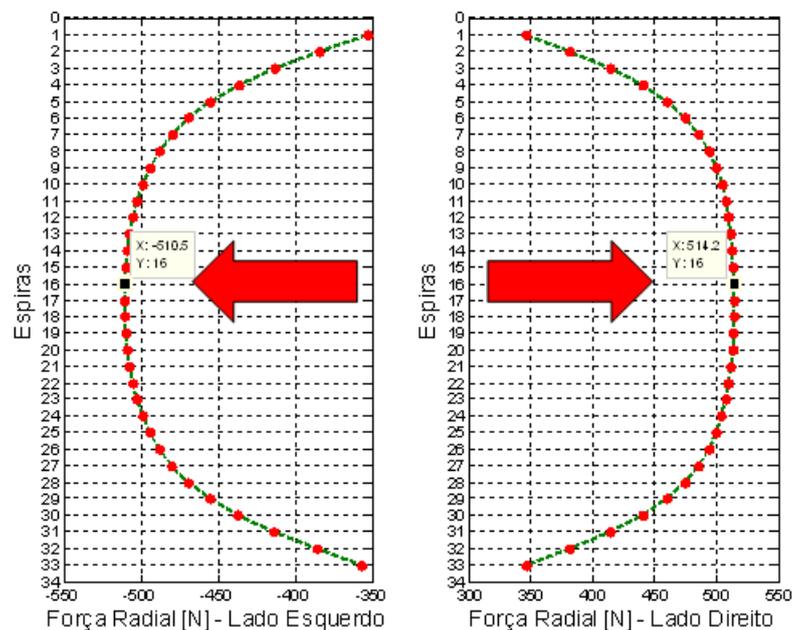


Figura 10. Força radial de tração distribuída no enrolamento externo.

Quanto às forças axiais, conforme destacam as Figuras 11 e 12, esta modelagem apresenta uma maior riqueza de informações. Verifica-se que a força axial total no enrolamento é desprezível. Entretanto, verifica-se que nas extremidades existe uma força axial considerável. Além disso, verifica-se por meio da Figura 12, a existência de uma força compressiva significativa na metade de ambos os enrolamentos.

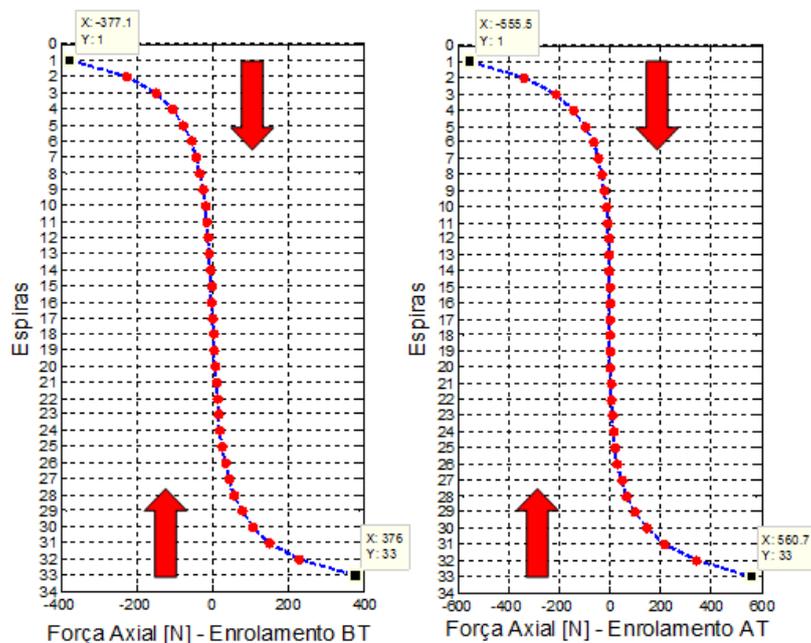


Figura 11. Força axial distribuída total em ambos os enrolamentos.

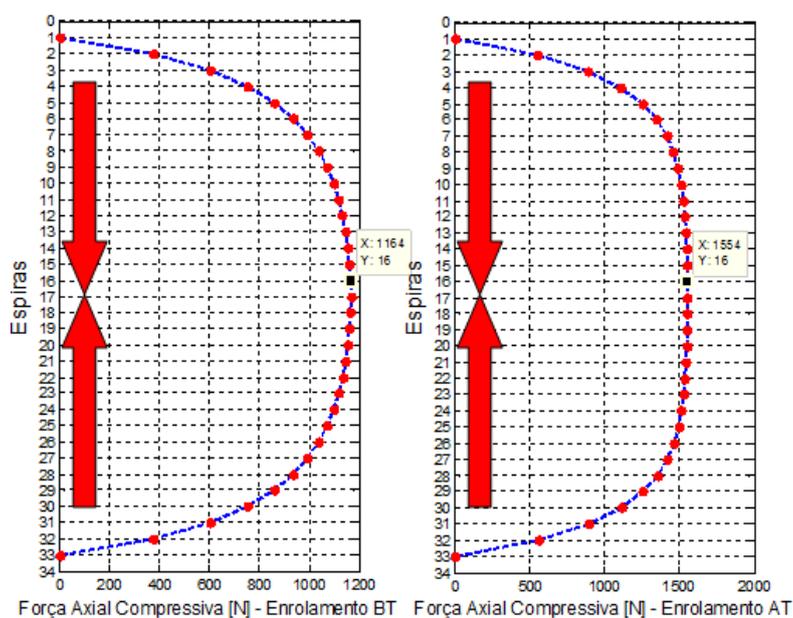


Figura 12. Força axial compressiva total na meta dos enrolamentos.

4.4 Discussão

Em condições de curto-circuito verifica-se por meio dos resultados obtidos em todas as modelagens que a densidade de fluxo se concentra no meio isolante entre os enrolamentos da fase B, igual a aproximadamente 1,1 [T], conforme Figuras 5, 6 e 7. Dessa forma, este fluxo de dispersão associado a uma elevada corrente, produziu grandes esforços eletromecânicos, que em média foi 1534 vezes maior que o esforço encontrado para a condição nominal. Observa-se também que a densidade de fluxo magnético no núcleo é consideravelmente reduzida, como esperado, tendo em vista que em situações de curto-circuito, praticamente a totalidade do fluxo magnético fica distribuído no meio isolante (ROSENTINO JUNIOR, 2010).

Ainda em relação aos esforços eletromecânicos, constata-se através da Tabela

4 que os resultados para a força radial total no enrolamento interno, denotado por (F_{r-EI}) e externo, denotado por (F_{r-EE}) possuem ótima proximidade, até mesmo com resultados analíticos desenvolvidos e encontrados em (ROSENTINO JUNIOR, 2010). Entretanto, deve-se ressaltar que a modelagem do enrolamento considerando camada por camada e espira por espira, apesar da necessidade de maior processamento, forneceu informações qualitativas e quantitativas importantes para maior compreensão dos esforços eletromecânicos em transformadores, principalmente relacionadas às forças axiais. Portanto, dentro do enfoque deste trabalho, indica-se para a análise dos esforços eletromecânicos no transformador a modelagem desenvolvida no caso C.

	Metodologia Analítica	Caso A	Caso B	Caso C
F_{r-EI} [N]	23.870	21.726	21.720	22.220
F_{r-EE} [N]	35.000	31.944	31.943	31.210

Tabela 4. Comparação de resultados obtidos para forças radiais nas diferentes modelagens, sob condição de curto-circuito trifásico.

5 | CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou a modelagem de um transformador trifásico, enfatizando e comparando o uso de três possíveis modelagens para seus enrolamentos. Verificou-se que, apesar da necessidade de maior processamento, o enrolamento sendo modelado camada por camada e espira por espira proporciona mais possibilidades de análises, oferecendo dessa forma mais informações qualitativas e quantitativas acerca dos esforços eletromecânicos atuantes nas partes ativas dos transformadores.

REFERÊNCIAS

- AZEVEDO, A. C. **Estresse Eletromecânico em Transformadores Causado por Curtos-Circuitos “Passantes” e Corrente de Energização**. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, 2007.
- BARRA, P. H. A. **Estresse eletromecânico em transformadores sob o enfoque de curtos-circuitos assimétricos: Uma abordagem analítica e computacional**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, 2017.
- BARRA, P. H. A. et al. **Power system influence in a qualitative index for mechanical withstand safety margin analysis of transformers**. 2018 Simposio Brasileiro de Sistemas Eletricos (SBSE). **Anais...IEEE**, 2018.
- BARRA, P. H. A.; ROSENTINO, A. J. P.; DELAIBA, A. C. **Análise dos esforços eletromecânicos e, transformadores devido a assimetria dos enrolamentos, utilizando o método dos elementos finitos (MEF)**. VIII Workspot - International Workshop on Power Transformers, Equipment, Substations and Materials. **Anais...2016**
- BARRA, P. H. A.; ROSENTINO, A. J. P.; DELAIBA, A. C. **Método dos Elementos Finitos para Análise de Esforços Eletromecânicos em Transformadores Devido às Falhas Assimétricas**.

IX Workspot - International workshop on power transformers, equipment, substations and materials. **Anais...**2018.

CIGRE; GROUP, W. **The Short Circuit Performance of Power Transformers**, 2002.

FARIA NETO, H. J.; BARRA, P. H. A.; DELAIBA, A. C. **Análise de resposta em frequência (FRA) para diagnóstico de falhas em transformadores**. XV Conferência de Estudos em Engenharia Elétrica. **Anais...**2017.

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

MCNUTT, W. J. et al. Power Transformen Short-Circuit Strength - Requirements, Design, and Demonstration. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, v. PAS-89, n. 8, p. 1955–1969, 1970.

ROSENTINO JUNIOR, A. J. P. **Estimativa dos Esforços Eletromecânicos em Transformadores Submetidos a um Curto-Circuito Trifásico**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, 2010.

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

YUN-QIU, T.; JING-QIU, Q.; ZI-HONG, X. Numerical calculation of short circuit electromagnetic forces on the transformer winding. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 26, n. 2, p. 1039–1041, 1990.

Agência Brasileira do ISBN
ISBN 978-85-7247-432-0

