

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

P. H. A. Barra¹, A. J. P. Rosentino Junior², A. C. Delaiba¹

¹Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Elétrica, Uberlândia - MG

²Universidade Federal do Mato Grosso, Departamento de Engenharia Elétrica Cuiabá – MT
pedrohenrique_ab@hotmail.com, arnaldoufu@gmail.com, delaiba@ufu.br

Resumo – Este artigo 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 – Transformadores, Modelagem Computacional, Método dos Elementos Finitos, Esforços Eletromecânicos, Curto-Circuito.

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

Abstract - This paper 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 – Transformers, Computational Modeling, Finite Element Method, Electromechanical Stresses, Short-circuit.

I. INTRODUÇÃO

As falhas em transformadores, de acordo com a literatura, podem ser classificadas como sendo de origens térmicas, dielétricas, químicas e mecânicas [1]. 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.

No que tange as falhas de origens mecânicas, temos que a interação entre a corrente e a densidade de campo magnético de dispersão origina forças eletromagnéticas que atuam nos enrolamentos de um transformador [2]. 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. Neste tipo de situação, sobremaneira sendo o curto-circuito trifásico, as elevadas correntes implicarão em elevadas forças internas nos transformadores.

A respeito das forças eletromagnéticas devido às correntes de curto-circuito trifásico, é possível encontrar em [3] 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 [4].

Nesta conjuntura, os danos causados aos transformadores devido aos esforços eletromecânicos são evidentes, sabendo até mesmo que curtos trifásicos acarretam redução na vida útil do transformador [5]. Por conseguinte, pesquisadores tem se esforçado em suas investigações para compreender qualitativa e quantitativamente as origens das falhas mecânicas nos transformadores.

Dentro deste contexto, este artigo segue no sentido de analisar e comparar três diferentes modelagens de enrolamentos de um transformador trifásico, fazendo uso do FEMM (*Finite Element Method Magnetics*), objetivando encontrar os esforços eletromagnéticos oriundos de curtos-circuitos do tipo trifásico. 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, o enrolamento do transformador será considerado como sendo um enrolamento único. Em um segundo momento, a modelagem leva em consideração o fato do enrolamento do transformador utilizado ser constituído



XIV CEEL - ISSN 2178-8308
03 a 07 de Outubro de 2016
Universidade Federal de Uberlândia - UFU
Uberlândia - Minas Gerais - Brasil

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*).

II. MODELAGENS DO TRANSFORMADOR UTILIZADO NO FEMM

Para todos os tipos de modelagens e situações analisadas, os procedimentos se baseiam nas seguintes etapas:

- I. Utilização do programa ATP para obtenção das correntes elétricas em condições normais e de curto-circuito para implementação do modelo no FEMM;
- II. Criação da geometria do transformador no FEMM, com as devidas considerações a respeito do enrolamento;
- III. Definição das propriedades físicas dos materiais relacionados à geometria;
- IV. Geração das malhas;
- V. Solução da modelagem com ou sem o *Lua scripting*;
- VI. Análise dos resultados obtidos.

A. Caracterização do transformador utilizado

O transformador utilizado 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 [6].

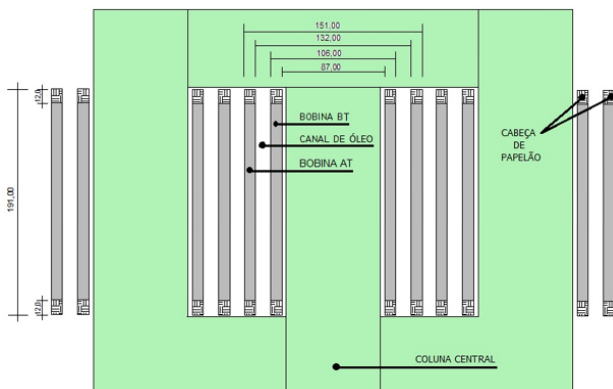


Fig. 1. Vista frontal do núcleo do transformador (dimensões em milímetros), considerando o enrolamento.

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]. Detalhamentos acerca da representação de transformadores no FEMM através de um modelo do tipo planar, bem como sua validação, podem ser encontrados em [7].

Para a representação do núcleo ferromagnético do transformador, a curva B-H da chapa de aço silício de grão orientado utilizada no transformador é fornecida pelo fabricante e foi inserida, a fim de definir a não-linearidade do núcleo, conforme Figura 2.

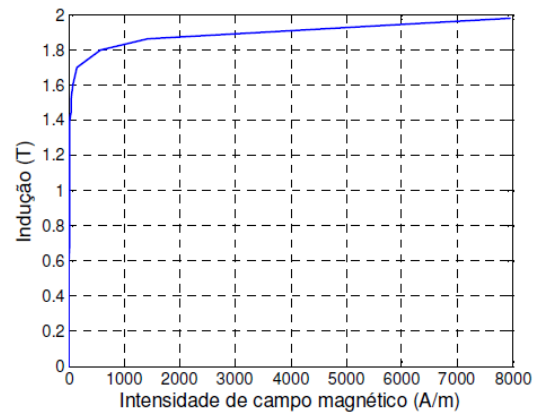


Fig. 2. Curva de magnetização do transformador estudado.

B. Modelagem considerando enrolamento único

Neste primeiro momento os enrolamentos do transformador são considerados como cilindros, isto é, de forma única. Desta forma, algumas considerações acerca de suas características físicas foram inibidas, quais sejam, suas camadas e espiras.

Maiores detalhamentos acerca desta modelagem são observados na Figura 3. Tendo definido as propriedades físicas dos materiais do transformador, conforme supracitado, as malhas foram geradas, resultando para este modelo 24.282 nós.

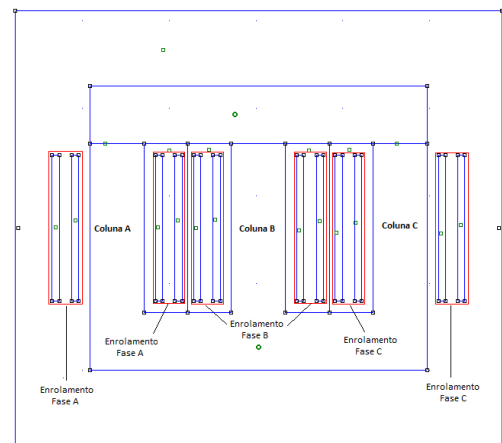


Fig. 3. Modelagem do transformador no FEMM, considerando enrolamento único.

C. Modelagem considerando enrolamento camada por camada

Nesta segunda modelagem, buscando-se maior precisão e riqueza em informações, contou-se com enrolamentos subdivididos em suas duas camadas, mas ainda sem considerar espira por espira. Neste sentido, o resultado da modelagem pode ser visto na Figura 4, sendo que na geração das malhas foram necessários 37.555 nós.

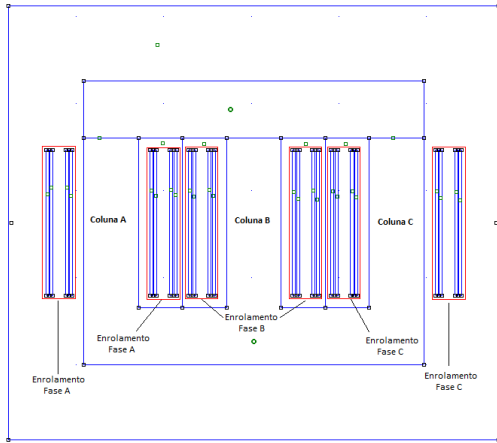


Fig. 4. Modelagem do transformador no FEMM, considerando enrolamento camada por camada.

D. Modelagem considerando enrolamento camada por camada e espira por espira

Por fim, neste caso foi considerado o enrolamento camada por camada, espira por espira. O resultado da modelagem pode ser visto na Figura 5, onde observa-se também, através de um zoom em parte do enrolamento, o detalhamento dado em cada espira. Neste caso, exigiu-se um maior processamento na geração das malhas, necessitando de 444.407 nós. Entretanto, verificar-se-á que este tipo de modelagem oferece maior precisão e também maior possibilidade de estudos e análises do tema aqui enfocado.

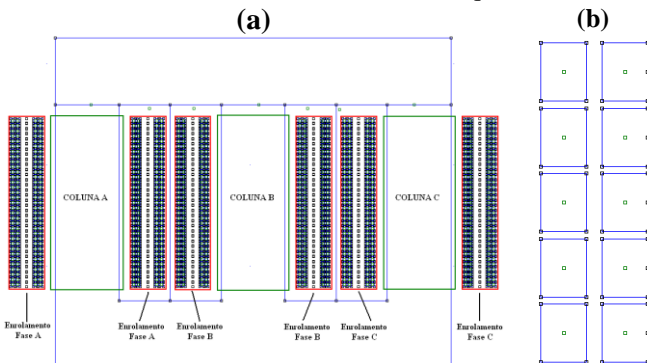


Fig. 5. (a) Modelagem do transformador no FEMM, considerando camada por camada e espira por espira; (b) Parte do enrolamento ampliado para melhor visualização.

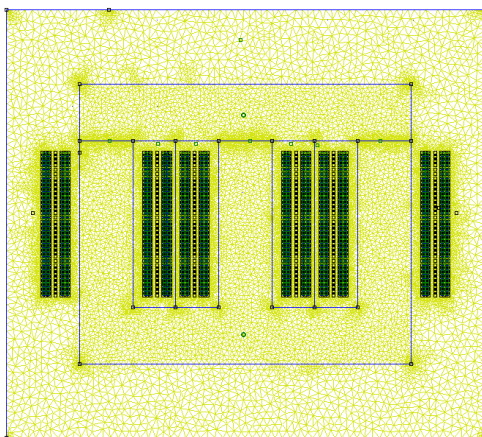


Fig. 6. Malhas geradas para o caso da modelagem de enrolamento camada por camada e espira por espira.

A Figura 6 mostra o resultado da geração das malhas para esta modelagem, objetivando ilustrar de forma geral esta parte das simulações. Ressalta-se que as malhas referentes às outras modelagens também foram obtidas, porém não exibidas neste artigo por questões de espaço.

III. SIMULAÇÃO DO TRANSFORMADOR SOB CONDIÇÕES NOMINAIS

Para a implementação no FEMM dos valores das correntes tanto para condição normal de operação, quanto para o caso de curto-circuito, foi utilizado uma simulação no programa ATP. O circuito modelado no ATP, representado pela Figura 7, foi realizado conforme [6]. Para a condição nominal, as correntes encontradas podem ser observadas na Tabela I.

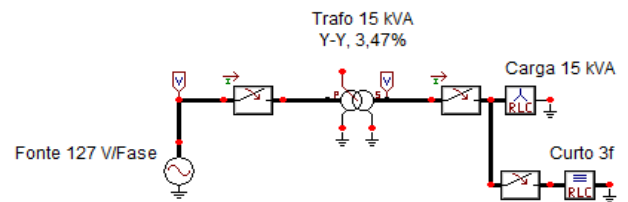


Fig. 7. Circuito modelado no ATP para obtenção das correntes em condição nominal e de curto-circuito.

Tabela I – Valores de correntes em condição nominal.

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

As características da distribuição de fluxo magnético no interior do transformador, para as três modelagens, são mostradas nas Figuras 8, 9 e 10 e discutidas de forma pontual nos itens A, B e C. Uma discussão comparativa com os resultados obtidos nas diferentes modelagens, será feita no item C.

A. Modelagem considerando enrolamento único

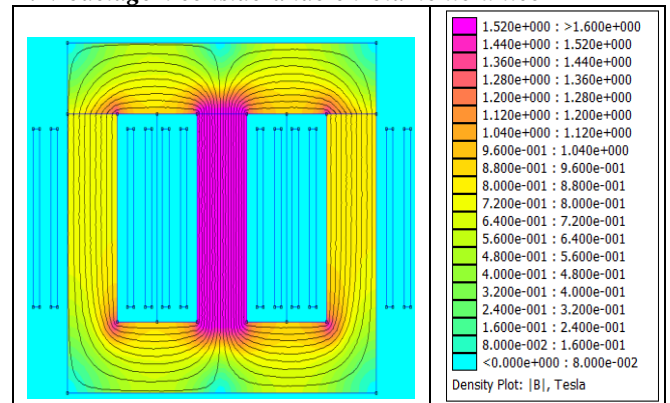


Fig. 8. Densidade de fluxo em condição nominal, para modelo de enrolamento único.

Percebe-se pela Figura 8 que a densidade de fluxo magnético concentra-se totalmente no material ferromagnético, implicando em um fluxo de dispersão pequeno. Desta forma, as forças eletromagnéticas são pequenas, quais sejam, força radial de 14,1388 [N] para o enrolamento interno e 20,8160 [N] para o enrolamento

externo. Quanto às forças axiais totais, são praticamente nulas e por isto, não serão analisadas nesta situação operacional.

B. Modelagem considerando enrolamento camada por camada

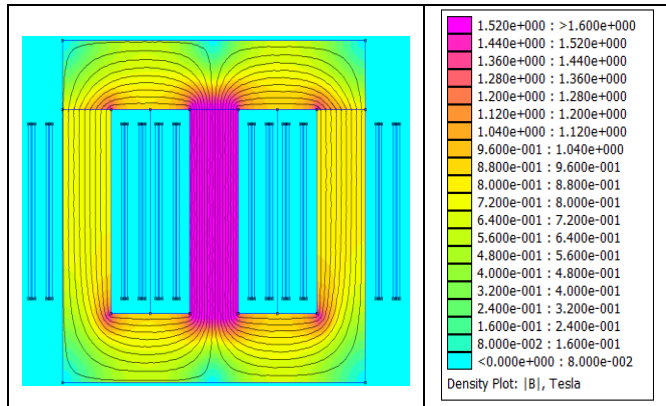


Fig. 9. Densidade de fluxo em condição nominal, para modelo de enrolamento camada por camada.

Através desta modelagem, novamente obtemos comportamentos esperados quanto à distribuição de fluxo no interior do transformador, ou seja, nesta condição operacional a densidade de fluxo magnético se concentra no material ferromagnético. Sob a perspectiva de forças eletromagnéticas, verifica-se a existência de uma força radial total de 14,1349 [N] para o enrolamento interno e 20,8160 [N] para o enrolamento externo.

C. Modelagem considerando enrolamento camada por camada e espira por espira

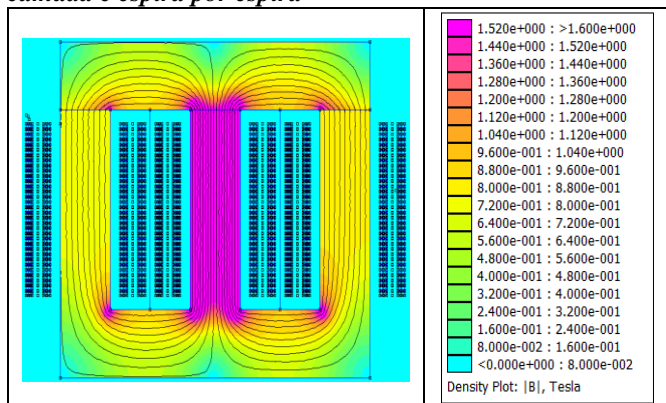


Fig. 10. Densidade de fluxo em condição nominal, para modelo de enrolamento camada por camada e espira por espira.

Por fim, para a modelagem do item C, a distribuição de fluxo magnético obtida é semelhante às modelagens anteriores. Sob a perspectiva de forças eletromagnéticas, constata-se a existência de uma força radial total de 14,1336 [N] para o enrolamento interno e 20,9107 [N] para o enrolamento externo.

D. Discussão

Através das Figuras 8, 9 e 10, percebe-se a total proximidade e convergência dos resultados obtidos para a condição nominal no que se refere à densidade de fluxo

magnético no interior do transformador. Isto é, notou-se que, como esperado, em condições normais de operação, o fluxo magnético se concentra totalmente no material ferromagnético, fazendo com que o fluxo de dispersão seja muito pequeno. Desta forma, o produto vetorial entre este fluxo de dispersão e a corrente nominal, resultará em pequenos valores de forças eletromagnéticas. Naturalmente, estes valores são desprezíveis, no que tange a suportabilidade mecânica do transformador. Para fins de comparação, a Tabela II 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 em [8].

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

	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

Observa-se também que para todas as modelagens de enrolamentos, o fluxo na coluna central está em torno de 1,55 [T], valor este também informado pelo fabricante, implicando uma consistência nos resultados obtidos.

IV. SIMULAÇÃO DO TRANSFORMADOR SOB CONDIÇÕES DE CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICO

Da mesma forma que para condições nominais, as correntes foram obtidas através de modelo no ATP, conforme Figura 7. Estas correntes podem ser observadas na Tabela III.

Tabela III - Valores de correntes em condição de curto.

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

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.

A. Modelagem considerando enrolamento único

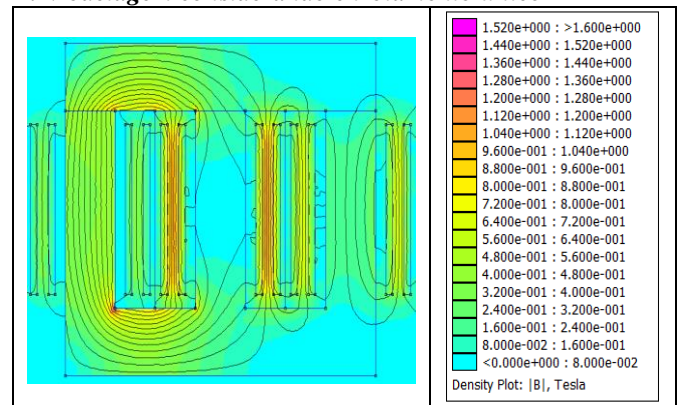


Fig. 11. Densidade de fluxo em condição de curto, para modelo de enrolamento único.

No que tange aos esforços eletromecânicos no transformador, através 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. Desta 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, isto é, tração ou compressão, foram também encontrados no 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 destas forças na extremidades dos enrolamentos. Assim, pode-se observar uma das limitações desta modelagem.

B. Modelagem considerando enrolamento camada por camada

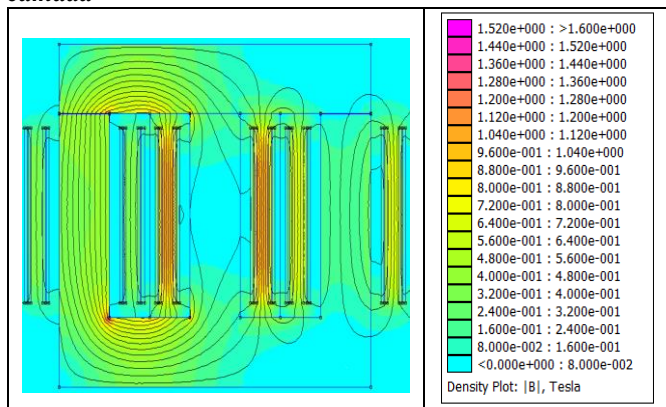


Fig. 12. Densidade de fluxo em condição de curto, para modelo de enrolamento camada por camada.

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.

Encontra-se um valor nulo para a força axial total. Novamente, não é possível verificar forças axiais nas extremidades dos enrolamentos.

Pode-se verificar através desta modelagem que as camadas mais solicitadas mecanicamente são as externas do enrolamento interno e as internas do enrolamento externo vinculadas com a fase B. Esta constatação, pode ser observada na Figura 12, onde nota-se uma grande distribuição de fluxo magnético entre os enrolamentos externo e interno, provocando solicitações mais intensas nas camadas mais próximas.

C. Modelagem considerando enrolamento camada por camada e espira por espira

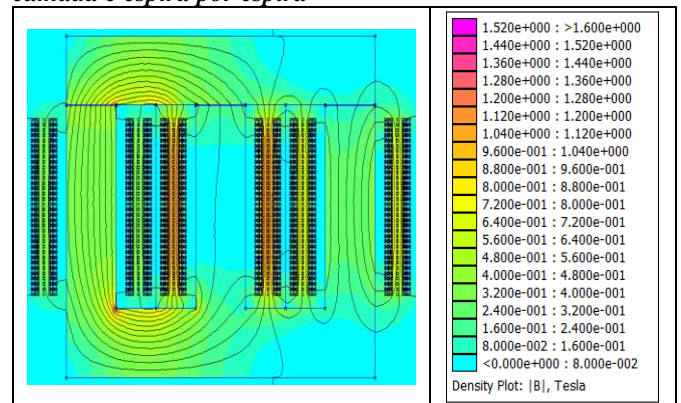


Fig. 13. Densidade de fluxo em condição de curto, para modelo de enrolamento camada por camada e espira por espira.

Finalmente esta modelagem, engloba de forma mais fidedigna as características físicas dos enrolamentos. Neste sentido, realiza-se uma análise de forças ao longo de todo o enrolamento. Através do uso do *Lua Scripting* e de um posterior tratamento com o MATLAB, a força radial de compressão e tração em cada espira, podem ser visualizadas nas Figuras 14 e 15 [8].

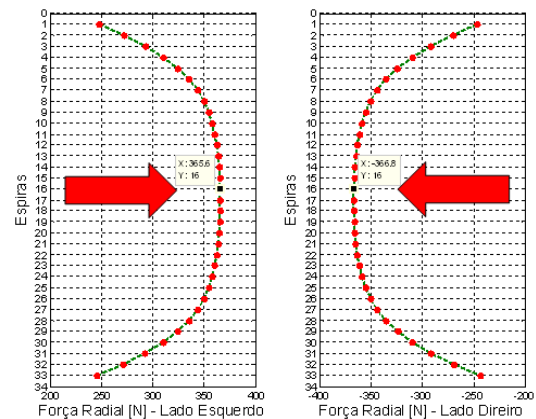


Fig. 14. Força radial de compressão distribuída no enrolamento interno.

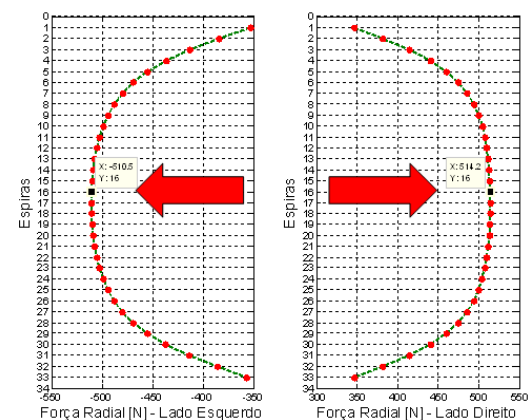


Fig. 15. Força radial de tração distribuída no enrolamento externo.

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.

Quanto às forças axiais, esta modelagem apresenta maior riqueza em informações através da Figura 16 e 17, pois pode-se perceber que de fato, a força axial total no enrolamento é desprezível. Entretanto, verifica-se que nas extremidades existe uma força axial considerável. Além disto, verifica-se na Figura 17, a existência de uma força compressiva significativa na metade de ambos os enrolamentos.

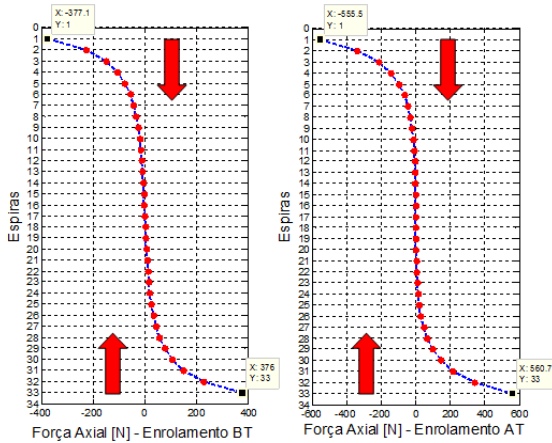


Fig. 16. Força axial distribuída total em ambos os enrolamentos.

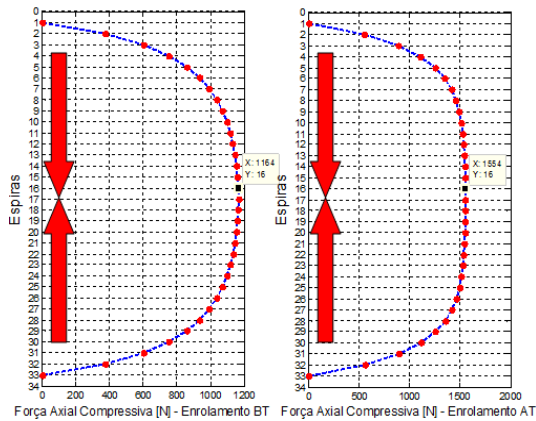


Fig. 17. Força axial compressiva total na metade dos enrolamentos.

D. Discussão

Em condições de curto-circuito verifica-se através dos resultados obtidos em todas as modelagens que a densidade de fluxo concentra-se no ar existente entre os enrolamentos da fase B, valendo aproximadamente 1,1 [T], conforme Figuras 11, 12 e 13. Desta forma, este fluxo de dispersão associado a uma elevada corrente, produziu grandes esforços eletromecânicos, que em média foram 1534 vezes maiores que os esforços encontrados para a condição nominal. Observa-se também que a densidade de fluxo magnético no núcleo é consideravelmente reduzida, como esperado, por saber que, em situações de curto, praticamente a totalidade do fluxo magnético fica distribuído no óleo [8].

Ainda em relação aos esforços eletromecânicos, constata-se através da Tabela IV que os resultados para a força radial total no enrolamento interno, denotado por (F_{T-EI}) e externo, denotado por (F_{T-EE}) , possuem ótima proximidade, até mesmo com resultados analíticos desenvolvidos e encontrados em [8]. Entretanto, deve-se ressaltar que a

modelagem do enrolamento considerando-se 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 no que tange as forças axiais. Dentro do enfoque deste trabalho, indica-se para a análise dos esforços eletromecânicos no transformador a modelagem supracitada.

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

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

V. CONCLUSÕES

Este artigo 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 maiores possibilidades de análises e por conseguinte, oferece mais informações qualitativas e quantitativas implicando em maior compreensão dos esforços eletromecânicos nos transformadores.

REFERÊNCIAS

- [1] CIGRE, Working Group. *The Short Circuit Performance of Power Transformers*. Brochure 209, CIGRE, 2002.
- [2] T. Yun-Qiu, Q. Jing-Qiu, X. Zi-Hong, “Numerical Calculation of Short Circuit Electromagnetic Forces on the Transformer Winding”, *IEEE Transactions on Magnetic*, vol. 26, no. 2, March 1990.
- [3] M. Waters, “*The Short-Circuit Strength of Power Transformers*”. Macdonald & Co., London, 1966.
- [4] W. J. McNutt, et al., “Power Transformer Short-Circuit Strength – Requirements, Design and Demonstration”, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. pas-89, no. 8, p.p. 1955-1969, December 1970.
- [5] R. Guimarães, Suportabilidade Mecânica e Vida Útil de Transformadores Submetidos a Corrente de Energização e Curto-Circuito. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Elétrica, Outubro de 2013.
- [6] A. C., Azevedo, Estresse Eletromecânico em Transformadores Causado por Curtos-Circuitos “Passantes” e Corrente de Energização. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Elétrica, Fevereiro de 2007
- [7] E. Saraiva, et al., Adjustments for a Three-Phase Distribution Transformer Two-Dimensional Representation with Finite Element Method, Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, Belém, Maio de 2010.
- [8] A. J. J. P. Rosentino, Estimativa dos Esforços Eletromecânicos em Transformadores Submetidos a um Curto-Circuito Trifásico. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Elétrica, Julho de 2010.