

21 - 25
AGOSTO DE 2016
FORTALEZA - CEARÁ

ANÁLISE ELETROMECAÂNICA DO COMPORTAMENTO DOS ENROLAMENTOS DE TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA QUANDO SUBMETIDOS A TRANSITÓRIOS ATRAVÉS DO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS.

Antonio Roniel Marques de Sousa, ronirl.pcp@gmail.com¹

Diorge de Souza Lima, diorge.lima15@gmail.com²

Wellington da Silva Fonseca, fonsaca@ufpa.br³

Marcus Vinicius Alves Nunes, mvnanprof@gmail.com⁴

¹Universidade Federal do Pará, Parque de Ciência e Tecnologia do Guamá - Avenida Perimetral 2651, Prédio

01. CEP: 66077-830 Guamá - Belém/PA

²Universidade Federal do Pará, Parque de Ciência e Tecnologia do Guamá - Avenida Perimetral 2651, Prédio

01. CEP: 66077-830 Guamá - Belém/PA

³Universidade Federal do Pará, Instalações da FAAM Ananindeua - Pará 316 Km 7, Ananindeua - Pará

⁴Universidade Federal do Pará, Parque de Ciência e Tecnologia do Guamá - Avenida Perimetral 2651, Prédio

01. CEP: 66077-830 Guamá - Belém/PA

Resumo: Atualmente, o Sistema Interligado Nacional (SIN) permite a conexão dos diversos tipos de geração no Brasil, como solar, eólica, hidráulica ou termoelétrica. Independentemente da forma, todas podem ser conectadas, permitindo a melhoria da qualidade do fornecimento do produto. Isso é possível através de linhas de transmissão. No entanto, os transformadores de potência são os verdadeiros responsáveis pela conexão entre os centros geradores e os centros consumidores. Os mesmos possibilitam a elevação da tensão aos níveis exigidos pela transmissão, diminuindo consideravelmente as perdas. No entanto, esses equipamentos estão sujeitos frequentemente a falhas. Essas falhas podem ser de origem elétrica, mecânica, química, térmica, entre outras. Todos os componentes do transformador estão sujeitos a falhas, porém neste artigo os enrolamentos serão o objeto de estudo. Outro fenômeno que pode corroborar com falhas nos transformadores é o fenômeno transitório, esse fenômeno provoca o aumento da corrente de energização nos enrolamentos podendo provocar desalinhamento das bobinas, deslocamento das espiras, defeito na isolação e até curto-circuito. Isso é possível devido à interação de forças e das componentes axial e radial. As densidades do fluxo magnético de dispersão axial e radial ao interagirem com a densidade de corrente resultam nas forças radiais e axiais. Portanto, as causas e consequências dessas componentes podem ser simuladas e analisadas preliminarmente. Para isso, utiliza-se o Método de Elementos Finitos (MEF) para a determinação e avaliação dos efeitos das forças atuantes nos enrolamentos do transformador. Esse método permite a observação do equipamento quando submetido a possíveis perturbações na rede elétrica, sendo uma ferramenta poderosa para a simulação de equações diferenciais que regem o comportamento de diversos fenômenos físicos. A solução de um fenômeno relativamente complexo é realizada através da discretização em diversos subproblemas mais simples, sendo estes em elementos triangulares ou tetraédricos. Assim, esse trabalho tem por objetivo apresentar uma análise dos estresses eletromecânicos desses dispositivos em decorrência dos esforços adicionais provocados por correntes transitórias de energização. Esse fenômeno pode ter duração de dezenas de milissegundos com efeitos atuantes somente nos enrolamentos energizados produzindo correntes com amplitudes de 6 a 8 vezes o valor da corrente nominal do transformador, afetando significativamente a vida útil deste equipamento. Dessa forma, será utilizado um transformador monofásico de 50MVA para as análises em condição nominal e em estado transitório. Todos os resultados computacionais apresentados serão comparados com os obtidos através das equações apresentadas neste trabalho.

Palavras-chave: elementos finitos¹, forças², axial³, radial⁴, transformador⁵

1 INTRODUÇÃO

O sistema elétrico nacional é algo de fundamental importância para a alimentação energética brasileira tendo em vista que o mesmo é composto por uma malha de distribuição elétrica que interligam os polos de geração energética e as unidades consumidoras sejam essas industriais ou residenciais. Para movimentar a corrente elétrica no decorrer da rede de distribuição com eficiência são necessários equipamentos controladores e reguladores de corrente e tensão,

entre os quais se destacam os transformadores de potencia, este tipo de equipamento tem as funções de elevar, rebaixar ou estabilizar a tensão de uma rede de distribuição. Devido essas funções os transformadores tem função vital na eficiência de um sistema de distribuição energética, tendo em vista que seu mau funcionamento pode comprometer o abastecimento entre os centros geradores e os centros consumidores. Existem diversos fatores que podem colaborar com eventuais falhas em transformadores de potencia diminuindo sua eficiência e até mesmo sua vida útil, porem o presente trabalho ira se concentra nos efeitos eletromecânicos provocado por correntes transitórias denominadas correntes de *inrush* que atuam diretamente na parti ativa dos equipamentos intensificando assim a ação de forças que podem deformar partes do equipamento como os enrolamentos energizados. Para a determinação destas forças atuantes devido os fenômenos transitórios será utilizado um método matemático denominado método dos elementos finitos que possibilita uma analise numérica com resultados próximos aos reais, Assim sendo este trabalho tem a finalidade de investigar a atuação e as consequências das forças eletromecânicas na estrutura dos transformadores de potencia.

2 MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS (MEF)

Segundo Alves (2007), a ideia básica do MEF consiste em subdividir, inicialmente, o domínio do problema, em subdomínios de dimensões finitas tais que, o conjunto de todos os subdomínios seja igual ao domínio original. Assim este método possibilita discretizar uma figura relativamente complexa em várias outras geometrias mais simples como ilustra a “Fig. 1”. Porém, haverá um aumento na quantidade de equações para a solução do método proporcional a quantidade de elementos finitos do problema.

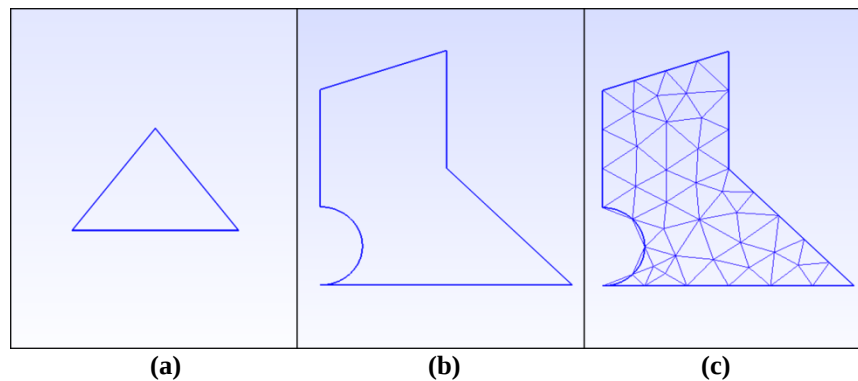


Figura 1. (a) Forma geométrica simples ‘elemento triangular’, (b) forma geométrica complexa, (c) forma complexa discretizada em formas simples.

O comportamento em cada elemento seja linear, triangular ou tetraédrico é descrito matematicamente, aproximado localmente, e o comportamento global obtido a partir da compatibilização dos diversos elementos. A partir do estudo do que ocorre no nível local, consegue-se descrever aproximadamente o comportamento global, tomando-se como base um raciocínio mecânico (BARBOSA, 2004). Neste trabalho será utilizado o elemento tetraédrico, este elemento é o mais utilizado em problemas tridimensionais, como é o caso deste artigo, a “Fig. 2” ilustra um tetraedro.

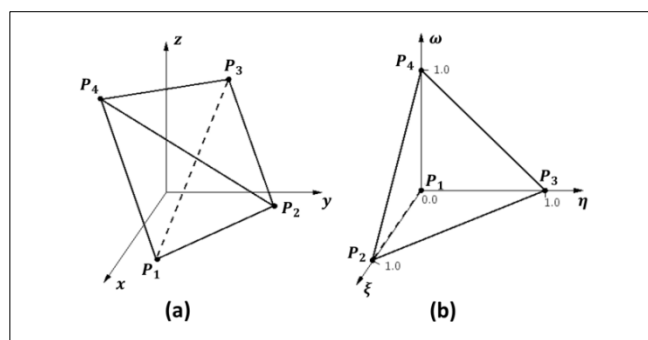


Figura 2. Elemento tetraedro (a) em posição global, (b) em posição local (Hollauer , 2007, p110. Adaptada).

Para uma analise estrutural do tetraedro é necessário determinar o volume (V), que pode ser definido a partir da Eq. (1), onde $x_{1,2,3,4}$, $y_{1,2,3,4}$ e $z_{1,2,3,4}$ são os coeficientes das coordenadas cartesianas dos nós do elemento tetraédrico e Ω^e representa o domínio do problema.

$$V = \int_{\Omega^e} d \cdot \Omega^e = \frac{1}{6} \det \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ x_1 & x_2 & x_3 & x_4 \\ y_1 & y_2 & y_3 & y_4 \\ z_1 & z_2 & z_3 & z_4 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Desta forma o volume do tetraedro pode ser definido pela Eq. (2):

$$V = x_{21}(y_{23} \cdot z_{34} - y_{34} \cdot z_{23}) + x_{32}(y_{34} \cdot z_{12} - y_{12} \cdot z_{34}) + x_{43}(y_{12} \cdot z_{23} - y_{23} \cdot z_{12}) \quad (2)$$

Para utilizar o método de resíduos ponderados as funções de forma devem ser contínuas sobre a transição de um elemento para o seu elemento vizinho. Desta forma as funções de forma são escritas apartir das coordenadas corteziadas de cada nó, como mostra a Eq. (3) :

$$N_i(x, y, z) = a_i + b_i \cdot x + c_i \cdot y + d_i \cdot z \quad i = 1, 2, 3, 4 \quad (3)$$

Uma vez que para cada nó da rede é necessária uma função de forma separada, há quatro funções de forma em um elemento de quatro nós. Os coeficientes a_i , b_i , c_i e d_i são determinados apartir de um conjunto de quatro equações para cada nó.

3 FORÇAS ATUANTES

Os enrolamentos de um transformador de potência são dimensionados mecanicamente para suportar esforços produzidos por correntes de energização (ROZENTINO, 2010). Entretanto, existem eventos transitórios que ocorrem durante a vida útil do transformador que, em algum momento, podem provocar algum tipo de falha mecânica. Neste sentido, apresentará a seguir uma descrição básica sobre as forças eletromagnéticas.

Inicialmente, será apresentada a definição teórica e caracterização de componentes da força eletromagnética nos enrolamentos do transformador em condições de regime transitório, assim como as equações para o cálculo analítico das forças radiais e axiais. O cálculo das forças eletromagnéticas é realizado de acordo com a Eq. (3) fundamentada a partir da força de Lorentz (BASTOS, 1996 *apud* LIMA, 2014), onde $\vec{F}$ representa a densidade volumétrica de força, $\vec{J}$ é a densidade superficial de corrente e $\vec{B}$ é a densidade de fluxo magnético de dispersão,

$$\vec{F} = \vec{J} \cdot \vec{B} \quad (4)$$

As forças entre espiras de um mesmo enrolamento (primário ou secundário) de um transformador são de atração. Por outro lado, as forças entre as espiras de enrolamentos distintos são de repulsão, se as correntes que circulam em ambos os enrolamentos tem sentidos opostos. Estes efeitos estarão sempre presentes quando um transformador está em operação, independente do regime de funcionamento (AZEVEDO, 2007).

Em condições normais de operações as forças e os campos de dispersão são relativamente pequenos e, por conseguinte, os esforços são suportáveis pelas estruturas dos enrolamentos. Porém, sob ação de fenômenos transitórios, como o de curto-circuito, os campos de dispersão devido as elevadas correntes de curto-circuito originam esforços que podem ser grande o suficiente para destruir total ou parcialmente os enrolamentos dos transformadores. (LIMA, 2014)

3.1 Forças Radiais

As forças radiais produzem diferentes efeitos nos enrolamentos externo e interno de transformadores. Logo, as características dos esforços eletromecânicos nas bobinas de transformadores causadas por corrente de *inrush* e de curto-circuito são diferentes. Enquanto a corrente de curto-circuito produz forças atuantes na bobina interna e externa do transformador, a corrente de *inrush* atua somente na bobina energizada (ROSENTINO, 2010). A Fig. 3 demonstra esse efeito quando a tendência dos esforços eletrodinâmicos expande o enrolamento externo, característica da ação das correntes de *inrush*.

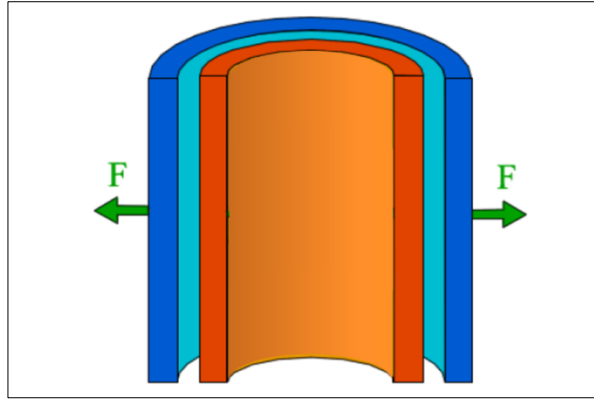


Figura 3. Sentido da força radial nos enrolamentos para a condição de *inrush* (Junior, 2010, p. 82).

Na “Fig. 3” a densidade de fluxo axial apresenta um valor máximo e constante no ponto médio dos enrolamentos. Esse valor decresce à medida que se aproxima da superfície externa do enrolamento externo e da superfície interna do enrolamento interno. Logo, pode-se considerar que nessas duas regiões extremas a densidade de fluxo de dispersão axial apresenta um valor nulo, desta forma pode-se concluir que a força radial apresenta valor máximo no ponto médio e valor mínimo nas extremidades dos enrolamentos. A força radial resultante pode ser estimada pela Eq.(5).

$$F_r = \frac{2\pi^2(n \cdot i_{0\max})^2 D_m}{h} 10^{-7} \quad (5)$$

Dividindo-se esta equação pelo valor de π , obtém-se a expressão que permite determinar o valor da força radial média, conforme Eq. (6).

$$F_{rmed} = \frac{F_r}{\pi} = \frac{2\pi(n \cdot i_{0\max})^2 D_m}{h} 10^{-7} \quad (6)$$

Onde F_r é a força radial total, F_{rmed} é a força radial média, D_m representa o diâmetro médio do enrolamento, h altura do enrolamento, $i_{0\max}$ representa o pico máximo da corrente de *inrush*.

3.2 Forças Axiais

As forças axiais originam-se pela componente de fluxo de indução magnética de dispersão radial e são responsáveis pelo esforço de compressão, assim como ilustrado na “Fig. 4” (AGUIAR, 2007 *apud* LIMA 2014).

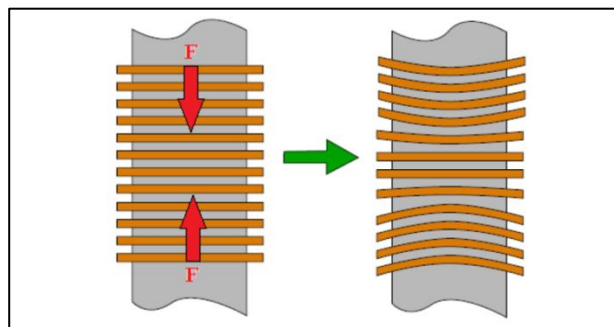


Figura 4. Deformação axial em um enrolamento de transformador (Junior, 2010, p. 87).

Neste caso, como apenas uma bobina é submetida à corrente de *inrush*, a força compressiva total é dirigida apenas ao enrolamento energizado. Assim, a força axial total nas extremidades do enrolamento pode ser avaliada pela Eq. (7)

$$F_a = 1,25 \cdot 0,366 \cdot q \cdot F \cdot \log \left(1 + \frac{4 \cdot d_1^2}{w^2} \right) \quad (7)$$

Onde q é o valor de ampère-espira no final da bobina ou da espira, w representa a dimensão axial do condutor, considerando a isolamento, d_1 é a largura equivalente do enrolamento do transformador.

4 CORRENTES DE INRUSH

Estudos sobre efeitos de forças em transformadores quando submetidos a elevadas correntes em estados nominais de operação, revelam que o fator agravante para os esforços mecânicos máximos ocorrem durante o primeiro pico de corrente. Assim, tem-se que para correntes de *inrush* o valor do primeiro pico de corrente pode ser calculado matematicamente pela Eq. (8) (KULKARNI e KHAPARDE, 2004).

$$I_{0\max} = \frac{(H \cdot h_w)}{n} \quad (8)$$

Ao contrário do que acontece com as correntes de curto-circuito em que o tempo de exposição à falta pode ser eliminado em dezenas de milissegundos, para correntes de *inrush* podem ter duração de dezenas de segundos. A seguir a “Fig. 5” ilustra a forma de onda dos primeiros picos para corrente de *inrush*. (LIMA, 2014)

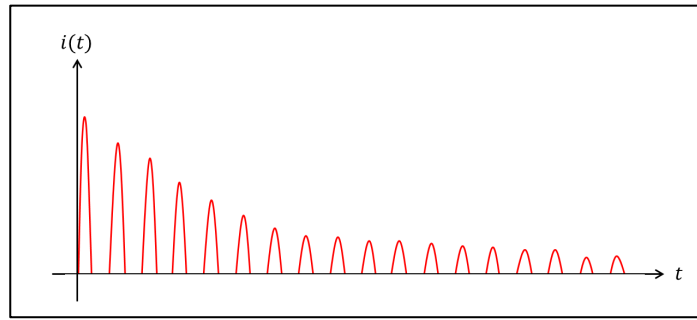


Figura 5. Forma de onda típica da corrente transitória de energização (corrente de *inrush*)

5 SIMULAÇÃO

A partir da validação da metodologia utilizada neste trabalho, será realizado análises para um transformador de potência do tipo núcleo envolvente de 50 MVA. Para as análises serão realizadas três tipos de casos. O primeiro caso será em regime permanente, o segundo em condição de curto-circuito e o último caso com o transformador sob condição de *inrush*.

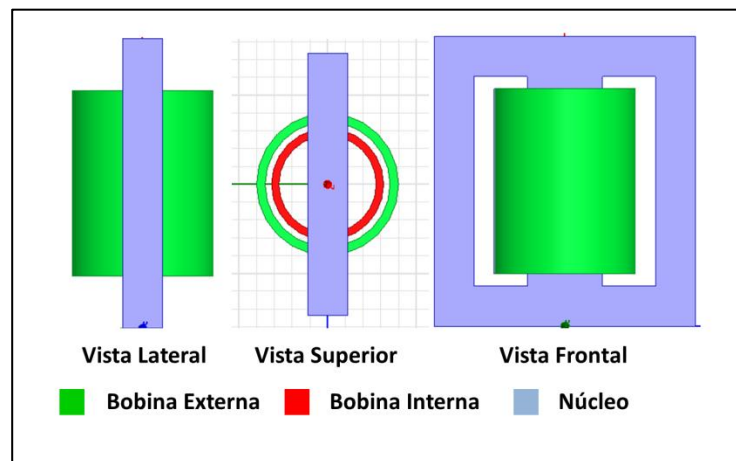


Figura 6. Esquema do transformador sob estudo.

Tomando a “Fig. 6” que mostra o esquema do transformador sob estudo é mostrado na Tabela 1 os dados da máquina utilizados na simulação.

Características	Enrolamentos	
	Externo	Interno
Diâmetro Interno (<i>mm</i>)	1406	1096
Diâmetro Externo (<i>mm</i>)	1699	1262
Altura Axial (<i>mm</i>)	2080	2080
Altura Radial (<i>mm</i>)	96	83
Número de Espirais	572	191
Frequência (H_z)	60	60
Potencia (<i>MVA</i>)	50	50
Tensão de Fase (<i>kV</i>)	132,80	39,84
Corrente de Fase (<i>A</i>)	376,55	1255,12
Ligação	Estrela	Estrela

Tabela 1. Dados do transformador de 50 MVA.

Para a simulação do referido problema foi utilizado um software denominado Maxwell para efetuar as deferidas análises

A simulação para a condição nominal de operação foi executada utilizando correntes monofásicas calculadas de acordo com os dados disponibilizados na placa do equipamento, sendo valor nominal de 376,55A no enrolamento externo e 1255,12A no enrolamento interno. O valor da corrente de *inrush* é igual a 2/3 do valor máximo de pico. Essa corrente é calculada de acordo com a Eq. (7) sendo igual a 1774A, vale ressaltar que a corrente de *inrush* atua somente no enrolamento externo, logo a corre do enrolamento interno é nula.

Para efetuar as simulações é adicionada excitação nos enrolamentos, porem as correntes tem sentido contrários como mostra a “Fig. 7”.

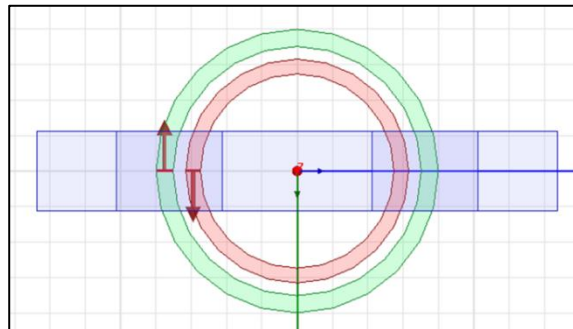


Figura 7. Sentido das correntes de excitação nos enrolamentos.

6 RESULTADOS

Após inserir os devidos dados de entrada no *software* foram analisadas as condições de convergência para uma solução aproximada como indica a “Fig. 8”.

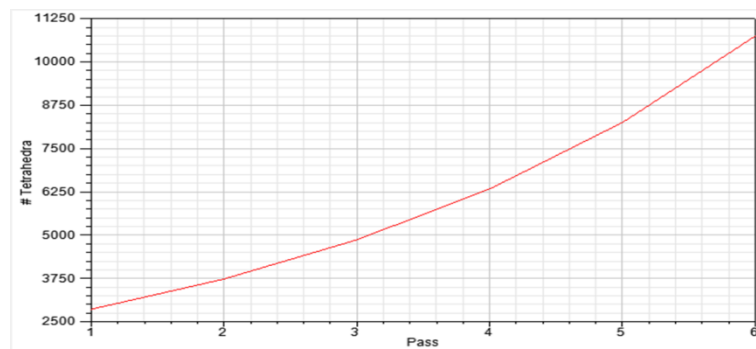


Figura 8. Convergência das simulações efetuadas.

Desta forma as análises foram efetuadas com 6 passos para minimizar os erros de cálculo utilizando uma malha composta por 10745 elementos tetraédricos.

Para evidenciar a coerência da simulação os resultados obtidos foram comparados com resultados de outros em estudos publicados como mostra a “Fig. 9”.

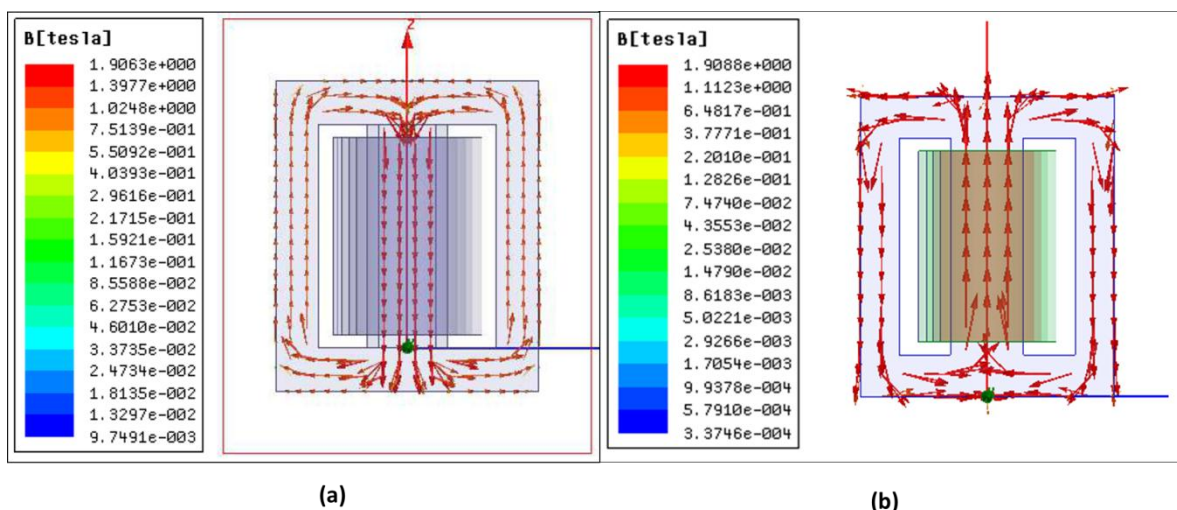


Figura 9. Comparação de resultados, (a) resultados de Lima 2014, (b) resultados obtidos na análise.

Pode-se nota que a diferença em ter os resultados é pequena girando em torno de 0,13% quando comparados os fluxos magnético em operações nominais.

Para analisar o comportamento da maquina sob condição de *inrush* é necessário observar somente o enrolamento externo tendo em vista que durante este fenômeno o enrolamento externo não apresenta corrente. A “Fig. 10” mostra o comportamento das forças axiais e radiais no enrolamento externo do transformador sob correntes de *inrush*.

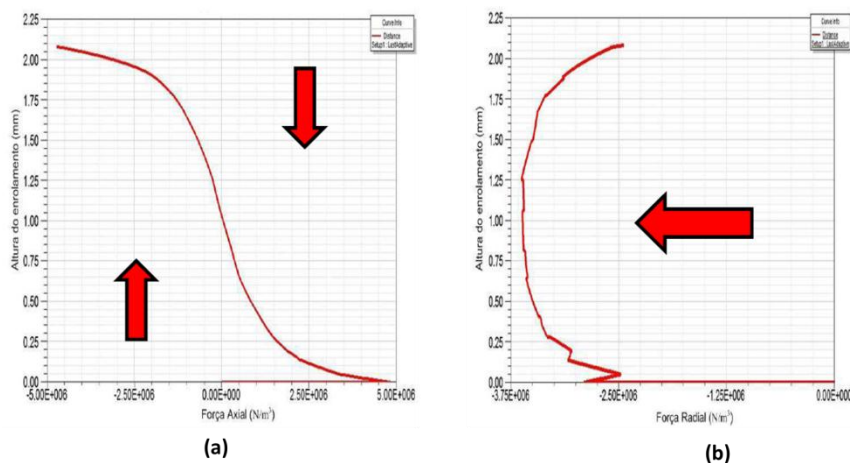


Figura 10. Comportamento das forças no enrolamento externo (a) axial, (b) radial, (Lima 2014, adaptada)

Para analisar as condições de funcionamento o mais real possível foram extraídas as forças axiais e radiais juntas em forma de campo vetorial uma vez que as mesmas embora tenham comportamentos diferentes atuam simultaneamente nas máquinas, como mostra a “Fig. 11”.

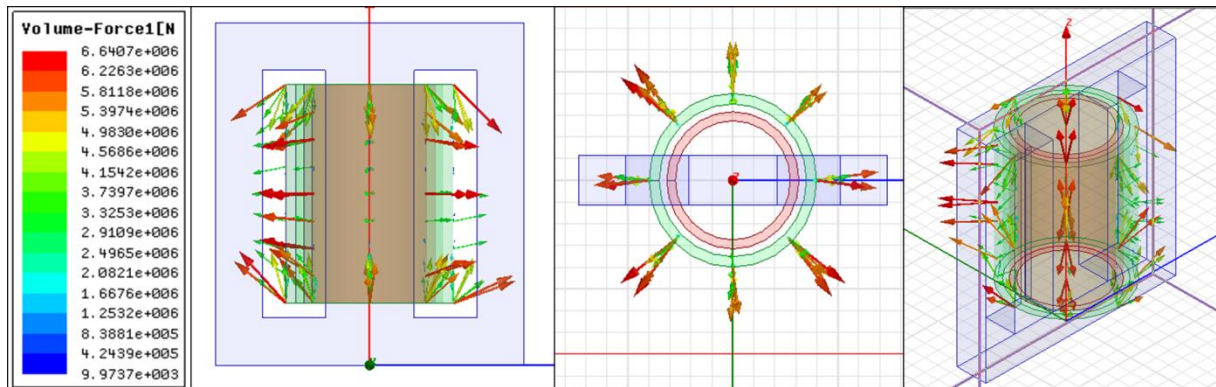


Figura 11. Ação das forças axiais e radiais durante o fenômeno de *inrush*.

É notável que as a ação dessas forças tendem a terem intensidades e sentidos diferente ao decorrer do enrolamento, a ação dessas correntes provocam um aquecimento durante o funcionamento como ilustra a “Fig. 12”.

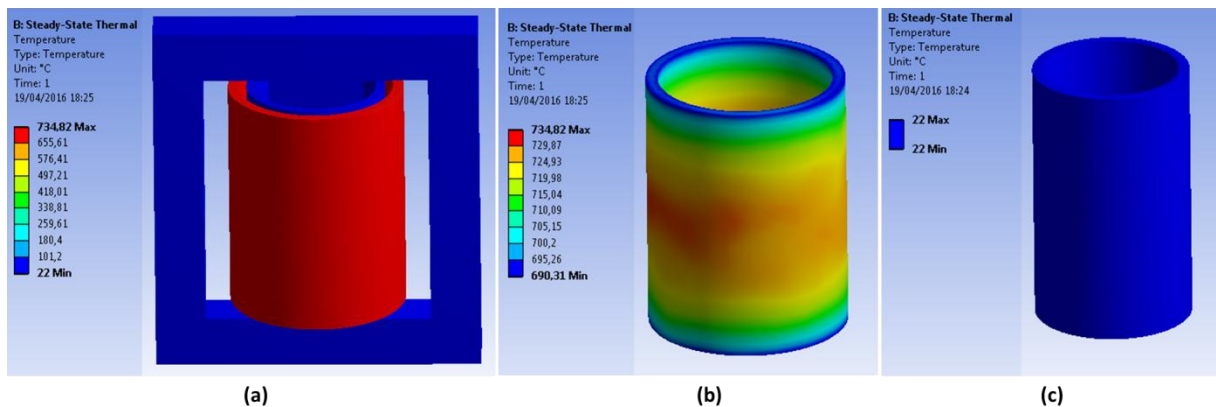


Figura 12. Análise térmica da corrente de *inrush*, (a) no transformador, (b) na bobina externa, (c) na bobina interna.

Nota-se que como a corrente só circula na bobina externa somente nesta a um aumento de temperatura em quanto que na interna permanece a temperatura ambiente já que não se tem corrente circulando.

A ação do fenômeno térmico gera nos materiais uma dilatação térmica que por sua vez pode deformar as bobinas de forma a comprometer o funcionamento da máquina, a “Fig. 13” demonstra a deformação causada pela dilatação térmica nas bobinas.

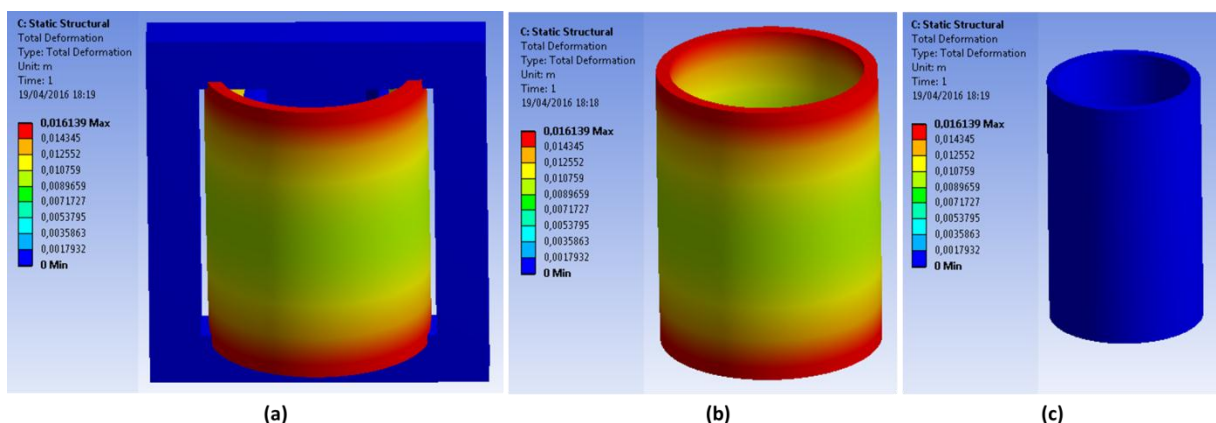


Figura 13. Dilatação térmica (a) no transformador, (b) na bobina externa, (c) na bobina interna.

Entretanto todos os fenômenos citados e analisados anterior mente atuam de forma conjunta nos transformadores ocasionando uma força resultante com intensidades e direções variáveis ao logo dos enrolamentos, desta forma a “Fig. 14” ilustra a ação desta força resultante onde estão adicionadas as componentes axiais e radiais, assim sofrida.

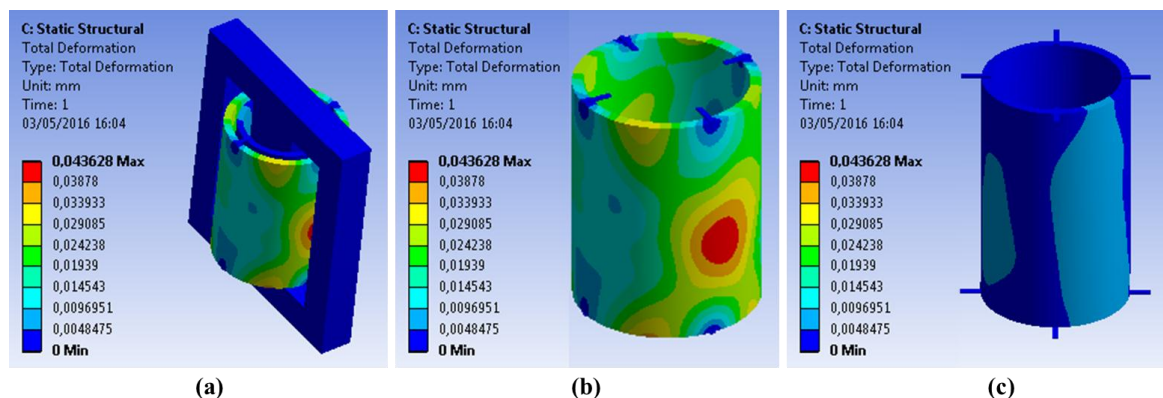


Figura 14. Deformação no transformador, (b) na bobina externa, (c) na bobina interna.

A ação da força resultante gera uma deformação nos enrolamento podendo assim compromete-los e prejudicar tanto o funcionamento da maquina como o abastecimento da rede elétrica.

Observando as figuras das análises anteriores torna-se perceptível a intensidade das forças que atuam nos enrolamentos dos transformadores durante o pico máximo da corrente de *inrush*. A “Fig. 15” ilustra as consequências dessas forças que resultam em deformações que muitas das vezes comprometem o funcionamento e a vida útil da maquina, prejudicando assim o abastecimento energético.



Figura 11. Danos provocado por forças axiais e radiais (Junior, 2010, p. 87).

Desta forma após as análises efetuadas é possível identificar algumas causas de defeitos e assim construir artifícios que evitem consequências negativas no funcionamento dos transformadores de potencia para assim melhorar a qualidade do abastecimento energético.

7 REFERENCIAS

- ALVES, M. M.; PROENÇA, P. B. “Emprego do Método de Resíduos Ponderados para Análise de Tubos”. Cadernos de Engenharia de Estruturas, São Carlos, v. 10, n. 44, p. 19-48, 2008.
- AZEVEDO, A. C. **Estresse Eletromecânico em Transformadores Causados por Curtos-circuitos passantes e correntes de Energização**. 111p. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Brasil, 2007.
- AZEVEDO, Á. F. M. **Método de Elementos Finitos**. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto Portugal, 1ª Edição. Abril 2003.
- BASTOS, J. P. A. 1996. **Eletromagnetismo e Cálculo de Campos**. (3ª ed.). Florianópolis, Santa Catarina: Editora da UFSC.
- FONSECA, W. S.; LOPES, A. C.; NUNES, M. V. “Modelagem de Esforços Eletromecânicos de Transformador de Núcleo Amorfo através do Método de Elementos Finitos,” Anais do T&D Transmition and Distribution IEEE Latino América, São Paulo, Brasil, 06p, 2010.
- GEORGILAKIS, P. S. 2009. **Spotlight on Modern Transformer Design**. (1ª ed.). London, New York. Editora: Springer Dordrecht Heidelberg London New York.

GUIMARÃES, R.; DELAIBA, A.C.; SARAIVA, E.; ROSENTINO Jr, A. J. P.; CHAVES, M. L. R.; BRONZEADO, H. S.; SILVA, C. A. "Investigação sobre Estresses Eletromecânicos em Transformadores causados pela corrente de Energização (*Inrush*)". 8th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications– INDUSCON, Poços de Caldas, Brasil, 08p, 2008.

LIMA, D. S.: Análise De Esforços Eletromagnéticos Nos Enrolamentos De Transformadores Ocasionados Por Correntes De Curto-circuito E Corrente De Inrush 143p. Universidade Federal do Pará. Tucuruí Pará. 2014

8 RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelos estudos presentes neste trabalho.

ELECTRO-MECHANICAL ANALYSIS OF THE BEHAVIOR OF THE POWER TRANSFORMER WINDINGS WHEN SUBJECTED TO TRANSIENT THROUGH THE FINITE ELEMENT METHOD.

Antonio Roniel Marques de Sousa, ronirl.pcp@gmail.com¹

Diorge de Souza Lima, diorge.lima15@gmail.com²

Wellington da Silva Fonseca, fonseca@ufpa.br³

Marcus Vinicius Alves Nunes, mvnanprof@gmail.com⁴

¹Universidade Federal do Pará, Parque de Ciência e Tecnologia do Guamá - Avenida Perimetral 2651, Prédio 01. CEP: 66077-830 Guamá - Belém/PA

²Universidade Federal do Pará, Parque de Ciência e Tecnologia do Guamá - Avenida Perimetral 2651, Prédio 01. CEP: 66077-830 Guamá - Belém/PA

³Universidade Federal do Pará, Instalações da FAAM Ananindeua - Pará 316 Km 7, Ananindeua – Pará

⁴Universidade Federal do Pará, Parque de Ciência e Tecnologia do Guamá - Avenida Perimetral 2651, Prédio 01. CEP: 66077-830 Guamá - Belém/PA

Abstract. Currently, the National Interconnected System (NIS) allows the connection of different types of generation in Brazil, such as solar, wind, hydro or thermal power. Whatever the form, all can be connected, allowing the improvement of the quality of supply of the product. This is possible through transmission lines. However, power transformers are the true responsible for the connection between the generating centers and consumer markets. They make it possible to increase the voltage to the levels required for transmission, considerably reducing losses. However, these devices are often subject to failure. These may be electric origin, mechanical, chemical, thermal, among others. All components of the transformer are subject to failure, but this article windings will be the object of study. Another phenomenon that can corroborate failures in transformers is transitory phenomenon, this phenomenon causes increased inrush current in the windings may cause misalignment of the coils, displacement of windings, defective insulation and even short circuit. This is possible due to the interplay of forces and the axial and radial components. The magnetic flux densities of the radial and axial dispersion while interacting with the current density resulting in radial and axial forces. Therefore, the causes and consequences of these components can be simulated and analyzed preliminarily. For this, it uses the Finite Element Method (MEF) for the determination and evaluation of the effects of forces acting on the transformer windings. This method allows the observation of the equipment when subjected to possible disturbances in the power grid, being a powerful tool for the simulation of differential equations governing the behavior of various physical phenomena. The solution is a relatively complex phenomenon performed by discretization in several simpler sub problems, and these triangular or tetrahedral elements. Thus, this work aims to present an analysis of electromechanical stress these devices due to the additional stresses caused by transient energizing currents. This phenomenon can have tens of milliseconds in duration with active effects only in the windings energized producing currents with amplitudes of 6 to 8 times the rated current of the transformer, significantly affecting the life of this equipment. Thus, a single-phase transformer 50MVA for analysis in nominal condition and transient state will be used. All presented computational results are compared with those obtained using the equations presented in this paper.

Keywords: finite element¹, forças², axial³ radial⁴, transformer⁵