



**XXIII SNPTEE  
SEMINÁRIO NACIONAL  
DE PRODUÇÃO E  
TRANSMISSÃO DE  
ENERGIA ELÉTRICA**

FI/GTM/02  
18 a 21 de Outubro de 2015  
Foz do Iguaçu - PR

**GRUPO – XIII**

**GRUPO DE ESTUDO DE TRANSFORMADORES, REATORES, MATERIAIS E TECNOLOGIAS EMERGENTES -  
GTM**

**ANÁLISE ELETROMAGNÉTICA DE ESFORÇOS NOS ENROLAMENTOS DE TRANSFORMADORES QUANDO  
SUBMETIDOS A CORRENTES DE ENERGIZAÇÃO E CORRENTES DE CURTO-CIRCUITO**

**Diorge de S. Lima (\*)  
UFPA**

**Wellington da S. Fonseca  
UFPA**

**Thiago M. Soares  
UFPA**

**Ubiratan H. Bezerra  
UFPA**

**RESUMO**

Devido à importância dos transformadores para o sistema elétrico, permitindo a viabilidade na ligação entre os centros geradores aos consumidores, esses dispositivos estão sujeitos frequentemente a falhas. Com isso, o presente trabalho tem o objetivo de analisar o comportamento de um transformador de potência monofásico de 50MVA quando submetido a correntes de energização e de curto-circuito. As análises realizadas através de uma resolução numérica de equações diferenciais, consistindo na discretização de um meio contínuo em pequenos elementos para representar o modelo em 3D. Portanto, a partir da solução dos problemas eletromagnéticos e com a decomposição em componentes axiais e radiais, serão apresentados os resultados dos esforços ocasionados nos enrolamentos de transformadores.

**PALAVRAS-CHAVE**

Corrente de energização, Corrente de curto-circuito, Métodos de Elementos Finitos, Transformadores.

**1.0 - INTRODUÇÃO**

Transformadores de potência são componentes indispensáveis em sistemas de conversão de energia elétrica (1), permitindo a ligação dos centros geradores aos centros consumidores, logo amplamente ligados a usinas, subestações e indústrias, sendo um equipamento importante e de elevado custo no contexto de sistemas elétricos de potência. Dessa maneira, devido a sua importância é relevante avaliar quais fatores que influenciam no desgaste e diminuição da vida útil desses equipamentos (2).

Assim, um dos motivos que podem diminuir a vida útil deste equipamento é o uso excessivo sem a manutenção prévia, gerando desgastes, como fadiga térmica e mecânica, superaquecimento, sobretensões e vibrações, ocasionando perdas e, conseqüentemente, a parada inesperada do equipamento. Tudo isso corrobora com aumento de custos para manter a continuidade do serviço (3), pois os procedimentos para sua substituição ou reparo são igualmente onerosos, podendo comprometer a receita da empresa, visto que além de seus gastos com a manutenção e/ou substituição, as concessionárias deixam de vender seu produto com a parada do fornecimento de energia elétrica, podendo até sofrer penalidades, caso haja descumprimento das regras estabelecidas pelos órgãos regulamentadores do setor elétrico brasileiro.

Com isso, alguns autores buscam estudar e analisar quais fenômenos pode comprometer o funcionamento dos transformadores. Dessa maneira, (4) mostrou estatísticas das principais causas de defeitos em transformadores, ocorrem quando os enrolamentos estão expostos as transitórias correntes de energização, pois os mesmos são submetidos a esforços mecânicos produzidos pelas forças de Lorentz, podendo até esmagar as bobinas atingidas. Outro estudo, realizado por (5), mostrou que grande parte dos defeitos que ocorrem em transformadores são provocadas por esforços mecânicos causados devido às condições de energização ou de curto-circuito, as quais frequentemente os mesmos estão expostos quando integrados à rede elétrica. Em (6) são realizadas análises 2D e 3D, ambas utilizando o MEF para o comportamento eletromagnético e mecânico em enrolamentos do tipo disco de um transformador de 220kV durante a corrente de curto-circuito, obtendo-se a força eletromagnética, a resposta dinâmica transitória de deformação dos enrolamentos e a tensão mecânica.

(\*) Parque de Ciência e Tecnologia – PCT – Guamá – CEAMAZON – CEP 66077Belém, PA, – Brasil  
Tel: (+55 91) 3231 – 8372 Fax: (+55 91) 3231 – 9287 – Email: diorgelima@ufpa.br

Uma das dificuldades encontradas para esses estudos, é em determinar a solução analítica sobre os transitórios eletromagnéticos em transformadores. Assim, os métodos numéricos surgem como uma ferramenta indispensável à modelagem dos mais diversos problemas de eletromagnetismo. Dentre os métodos numéricos utilizados para modelar transformadores pode-se destacar o Método dos Elementos Finitos (MEF), em que consiste na discretização de um meio contínuo em pequenos elementos, mantendo sempre as propriedades originais do modelo em estudo (7).

Nessa perspectiva, este artigo utiliza uma metodologia de modelagem para representação dos esforços eletromagnéticos que agem nos enrolamentos de transformadores utilizando para isto softwares baseados no MEF. Para tal, será feito o estudo de caso em um transformador de potência monofásico de 50 MVA instalado na planta da Eletrobrás Eletronorte. Nesta modelagem os efeitos das forças eletromagnéticas nos enrolamentos dos transformadores serão analisados quando os mesmos forem submetidos às correntes de energização (*inrush*) e correntes de curto-circuito.

## 2.0 - MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

O Método de Elementos Finitos (MEF) foi utilizado neste trabalho sendo uma forma de resolução numérica de um sistema de equações diferenciais parciais, consistindo na discretização de um meio contínuo em pequenos elementos, no entanto, mantendo as características e propriedades do modelo original. Para isso, foi utilizado um software comercial baseado neste método de resolução para obter os campos em todas as regiões do modelo que utiliza o Método de Galerkin para a resolução das equações diferenciais parciais.

### 2.1 Método de Galerkin

O Método de Galerkin tornou-se o mais conhecido e eficiente dos Métodos dos Resíduos Ponderados em virtude do rápido desenvolvimento e de sua perfeita combinação com o MEF, realizando aproximações para obtenção dos resultados (8). Com o princípio baseado na minimização do resíduo gerado, a solução será mais próxima do valor exato quando o resíduo tende a zero. Para isso,  $R$  é forçado a tender a zero utilizando a operação mostrada na Equação 1. Onde  $W$  é uma função de ponderação e  $D$  é o domínio do Problema (9).

$$\iiint_D W R dD = 0 \quad (1)$$

Os problemas magnetostáticos são discretizados por elementos triangulares que possuem três nós. Por ser de primeira ordem, o potencial do vetor magnético é aproximado de forma linear entre seus nós, como mostrado na Equação 2 (10).

$$A_{i(x_i, y_i)} = s_1 + s_2 \cdot x + s_3 \cdot y \quad (2)$$

A partir do sistema linear da Equação 2, poderá encontrar as incógnitas  $s_1$ ,  $s_2$ ,  $s_3$  a partir dos valores do potencial vetor magnético  $A_1$ ,  $A_2$  e  $A_3$  que são os três nós de um elemento mostrado na Figura 1 são resolvidos usando a regra de Cramer (9).

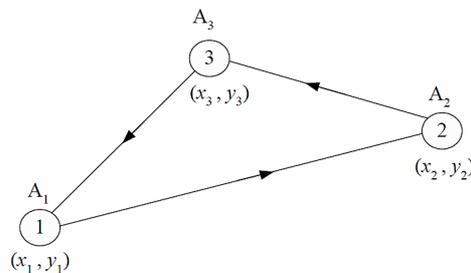


Figura 1 - Elemento finito triangular com coordenadas retangulares (10).

## 3.0 - FORÇAS ELETROMAGNÉTICAS EM TRANSFORMADORES

Os enrolamentos de um transformador de potência são dimensionados mecanicamente para suportar esforços produzidos por correntes de energização (11). Entretanto, existem eventos transitórios que 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 energização e de curto-circuito, assim como as equações para o cálculo analítico das forças radiais e axiais. O cálculo das forças eletromagnéticas é realizado de acordo com a Equação 3 fundamentada a partir da força de Lorentz (12).

$$\vec{f} = \vec{J} \times \vec{B} \quad (3)$$

Onde:  $\vec{f}$  : densidade volumétrica de forças ( $N/m^3$ );  $\vec{J}$  : densidade superficial de corrente ( $A/m^2$ );  $\vec{B}$  : densidade de fluxo magnético de dispersão (T).

O transformador quando opera em condição nominal, as forças e o campo de dispersão são relativamente pequenos, por tanto, os esforços são suportáveis pelas estruturas dos enrolamentos. Porém, sob ação de fenômenos transitórios, os esforços podem ser grande o suficiente para destruir total ou parcialmente os enrolamentos (13). A Figura 2 ilustra a distribuição de fluxo magnético de dispersão entre os enrolamentos de um transformador com bobinas concêntricas. Observa-se que as linhas de fluxo têm uma direção predominantemente axial ao longo da altura dos enrolamentos. No entanto, nas extremidades as linhas de fluxo mudam de direção na tentativa de encurtar o caminho de retorno. Desta forma, o fluxo total de dispersão pode ser decomposto em duas componentes, uma na direção axial e outra na direção radial (12).

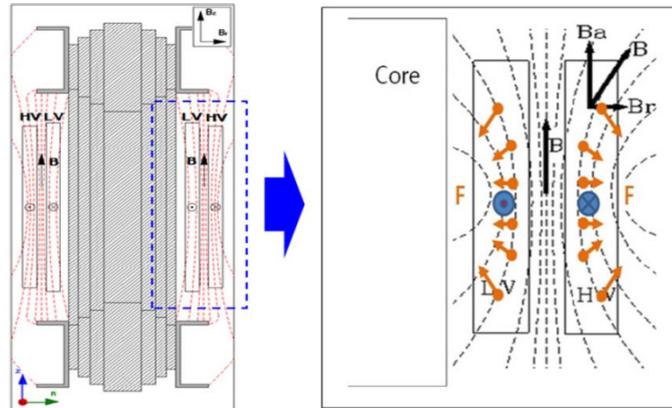


Figura 2 - Distribuição do fluxo magnético de dispersão em transformadores com enrolamentos concêntricos (13).

A interação da densidade de fluxo magnético de dispersão axial com a densidade superficial de corrente do enrolamento origina-se a força radial, sendo a responsável pela mútua repulsão entre os enrolamentos internos e externos. De forma similar, a força responsável pelo esforço de compressão axial é oriunda da interação da densidade de fluxo magnético de dispersão radial com a densidade superficial de corrente (4).

### 3.1 Correntes de Energização (*Inrush*)

Estudos sobre efeitos de forças em transformadores quando submetidos a estado nominal 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 Equação 4 (14).

$$I_{0\max} = \frac{(H \times h_w)}{n} \quad (4)$$

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. Devido a isso, mesmo com picos de 30% mais baixos do que causados por correntes de curto-circuito podem produzir forças com amplitudes semelhantes. A seguir a Figura 3 ilustra a forma de onda dos primeiros picos para corrente de *inrush* (15). É válido salientar que a corrente de *inrush* é direcionada apenas para o enrolamento energizado. Logo, para as simulações computacionais, as correntes serão aplicadas somente nos enrolamentos externos (12).

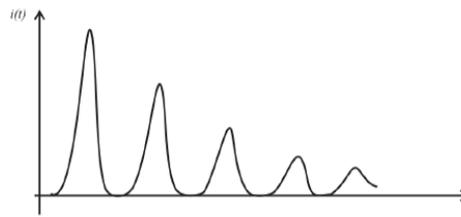


Figura 3. Forma de onda típica da corrente transitória de energização (corrente de *Inrush*) (16).

### 3.2 Correntes de curto-circuito

O fenômeno de curto-circuito na rede elétrica é sempre acompanhado na interrupção do fornecimento de energia elétrica, resultando negativamente e gerando prejuízos. A corrente de curto-circuito exercida sobre o enrolamento do transformador é calculada a partir de dados intrínsecos do dispositivo. Nesta condição, a expressão utilizada para determinar o nível máximo da corrente no transformador durante o curto-circuito trifásico pode ser representada pela Equação 5 (2).

$$I_{cc} = \frac{k\sqrt{2} \cdot S_n \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot V \cdot Z} \quad (5)$$

Sendo:

$K$ : Fator de assimetria da corrente de curto circuito;  $S_n$ : potência nominal do transformador (MVA);  $V$ : tensão nominal fase-fase do transformador (Volts);  $Z$ : impedância do transformador por unidade.

Esses tipos de transitórios, além de ser uma das mais frequentes causas de falhas em transformadores, também apresentam maior severidade, considerando o impacto sobre as estruturas de sustentação do equipamento, tendo efeitos térmicos e mecânicos (17). Por isso, os curtos-circuitos são uma das maiores ameaças a integridade do transformador quando estão em operação. Além disso, também pode ocorrer um efeito transitório conhecido como assimetria da corrente, ilustrado na Figura 4. Esse efeito ocorre quando há uma transição brusca do ângulo de fase da corrente em relação à tensão no momento do curto-circuito, elevando ainda mais os esforços mecânicos no transformador de potência.

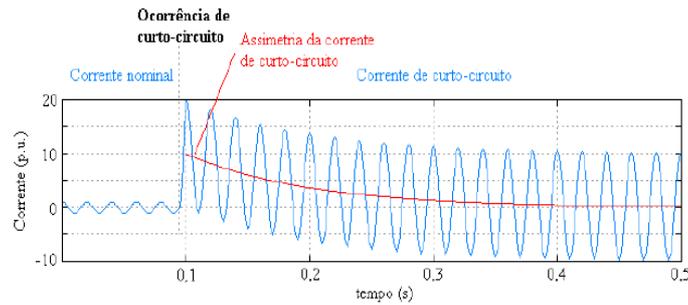


Figura 4. Assimetria da corrente de curto-circuito (18).

### 3.3 Forças Axiais

As forças axiais 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 (11). A Figura 5 (a) demonstra esse efeito quando a tendência dos esforços eletrodinâmicos expande somente o enrolamento externo e a Figura 5 (b) demonstra a tendência dos esforços eletrodinâmicos quando comprimi o enrolamento interno e expandi o enrolamento externo.

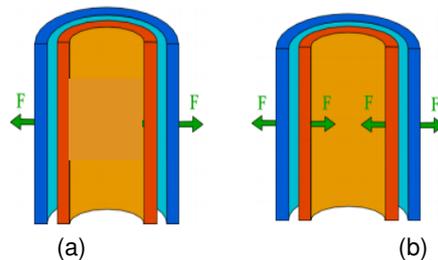


Figura 5 - Sentido da força radial do enrolamento interno e externo do transformador para a condição de (a) *inrush* e de (b) curto-circuito (18).

### 3.4 Forças Radiais

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 Figura 6.

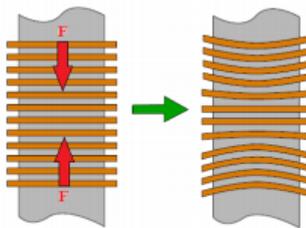


Figura 6. Representação de uma deformação axial em um enrolamento de transformador (12).

Um dos tipos de falhas devido a ação de forças axiais compressivas ocorre quando um enrolamento tipo camada não está firmemente enrolado e amarrado, facilitando a transposição do condutor adjacente. Este efeito pode danificar a isolamento do condutor, podendo levar a um curto-circuito entre espiras.

#### 4.0 - MODELAGEM DO TRANSFORMADOR

O modelo utilizado é um transformador monofásico de 50MVA com o núcleo de ferro silício do tipo envolvido. O mesmo é utilizado por uma empresa geradora de energia localizada da região Norte do Brasil. A Figura 7(a) e 7(c) apresentam as dimensões e as principais características desse dispositivo. Para a obtenção de resultados próximo ao real, foi adicionada a curva de magnetização real do material ferromagnético do transformador no banco de dados do software comercial. A Figura 7 (b) mostra a curva de magnetização do transformador de 50MVA.

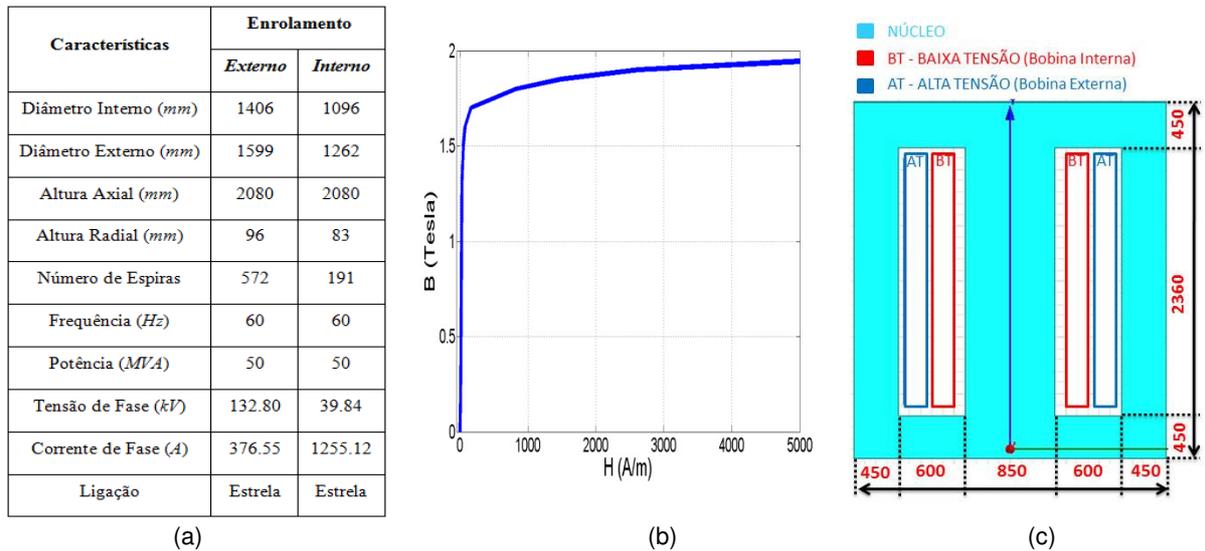


Figura 7 - (a) Características intrínsecas e dimensões, (b) curva de magnetização e (c) dimensões em milímetros (mm) do transformador.

#### 4.1 Análises Eletromagnéticas

A análise eletromagnética para a condição nominal de operação, conforme a Figura 9 foi executada utilizando correntes monofásicas calculadas de acordo com os dados disponibilizados na placa do equipamento, sendo valor nominal de 376,55A e 1255,12A, respectivamente nos enrolamentos externo e interno.

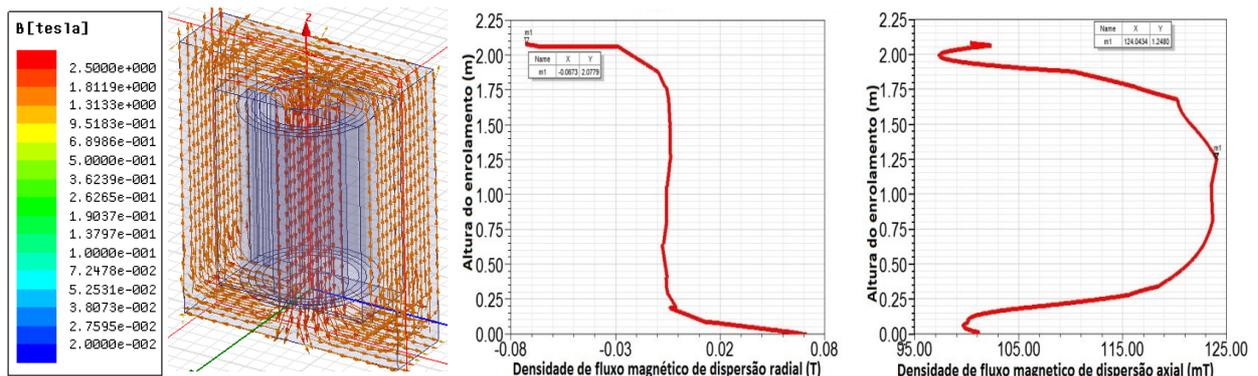


Figura 8 - Densidade de fluxo magnético de dispersão radial e axial no enrolamento do transformador de 50MVA em condição nominal.

Observa-se ainda na Figura 9, a densidade de fluxo magnético de dispersão radial com valores máximos na extremidade, com valor de pico encontrado em 0,067T. A densidade de fluxo magnético de dispersão axial os valores são mínimos nas extremidades superiores e inferiores do enrolamento. Para esta condição operacional, o valor de pico encontrado nas análises foi de 0,124T. Para análise do comportamento do transformador quando submetido a correntes de *inrush*, devido ao transformador está ligado em um banco trifásico, assume-se a 2/3 do valor máximo de pico (14). Essa corrente é calculada de acordo com a Equação 4, sendo igual a 1.774A. A Figura

10 ilustra a densidade de fluxo magnético do transformador durante as elevadas correntes de energização. Parte do fluxo magnético no interior do transformador também sofre alterações no caminho pelo núcleo magnético.

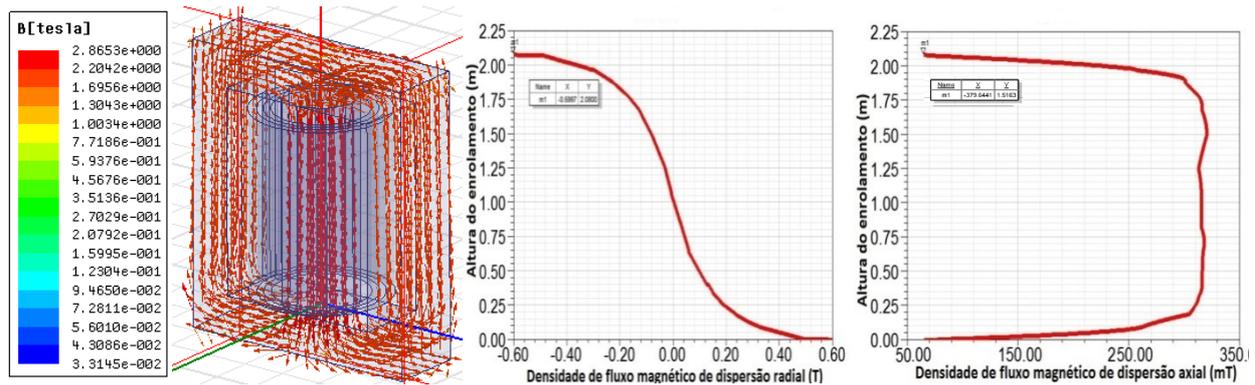


Figura 9 - Densidade de fluxo magnético de dispersão radial e axial no enrolamento do transformador de 50MVA devido a corrente de *inrush*.

A densidade de fluxo magnético de dispersão radial demonstrada na Figura 10 alcança um valor máximo de aproximadamente 0,60T quando correntes de energização atuam nos enrolamentos do transformador. A densidade de fluxo magnético de dispersão axial alcança o valor máximo 0,379T.

Para análise do comportamento do transformador quando submetido a correntes de curto-circuito, utilizou valores de correntes iguais a 8.979A e 34.586A, respectivamente nos enrolamentos externo e interno, valores calculados a partir da Equação 5, com fator de assimetria igual a 2,69. A Figura 11 ilustra a densidade de fluxo magnético de dispersão do transformador durante o curto-circuito. Como esperado, a distribuição de fluxo magnético no interior do transformador sofre alteração no caminho preferencial, passando parte do fluxo a circular pelo ar.

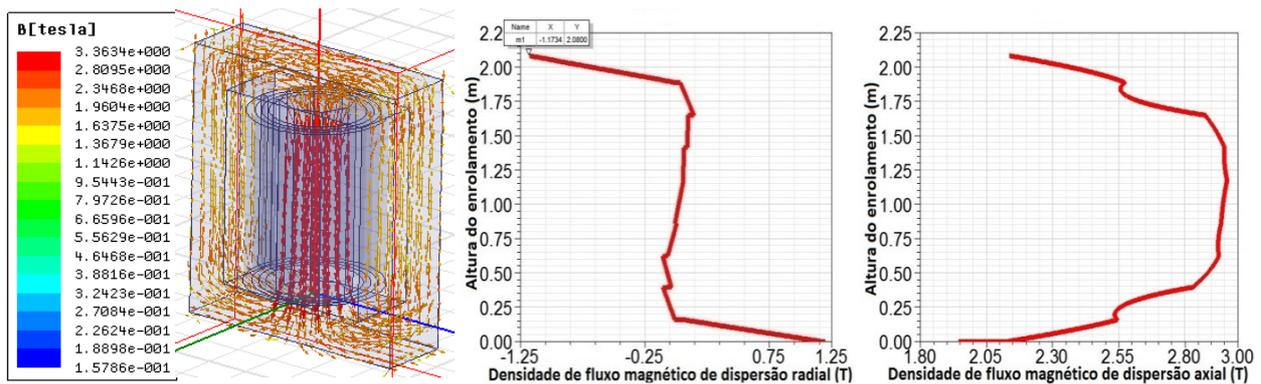


Figura 10 - Densidade de fluxo magnético de dispersão radial e axial no enrolamento do transformador de 50MVA em condição de curto-circuito.

Observa-se ainda na Figura 11, a densidade de fluxo magnético de dispersão radial com valores aproximadamente nulos no centro do enrolamento e valores máximos em suas extremidades, alcançando amplitudes de 1,173T. Para o eventual curto-circuito no equipamento, o valor de pico de densidade de fluxo magnético de dispersão axial foi de 2,942T para o enrolamento de alta tensão. Da mesma forma, para o enrolamento de baixa tensão, o valor de pico da densidade de fluxo magnético de dispersão é 3,08 T. Para melhor visualizar os resultados, na Tabela 1 é mostrada uma síntese dos resultados das densidades de fluxo magnético de dispersão radial e axial para os três diferentes casos.

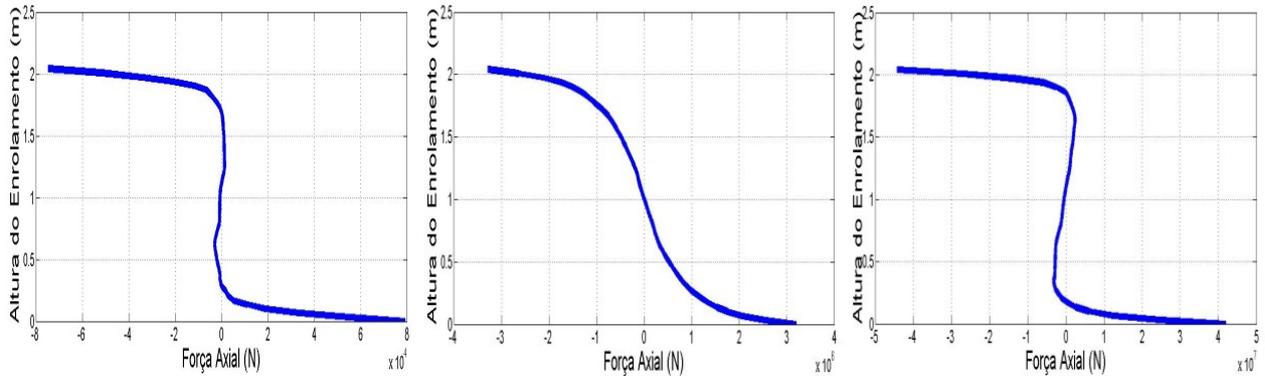
Tabela 1 – Síntese dos resultados da densidade de fluxo magnético de dispersão para o transformador.

Densidade de fluxo magnético	Condições de Operação		
	Nominal [ T ]	Inrush [ T ]	Curto-circuito [ T ]
Axial	0,124	0,379	2,942
Radial	0,067	0,600	1,173

A partir dos valores de densidade de fluxo magnético de dispersão para os três casos distintos: equipamento operando em condições nominais, com correntes de energização e em curto-circuito, será possível encontrar os valores máximos de forças em componentes axial e radial que atuam nos enrolamentos.

#### 4.2 Análises das Forças Axiais

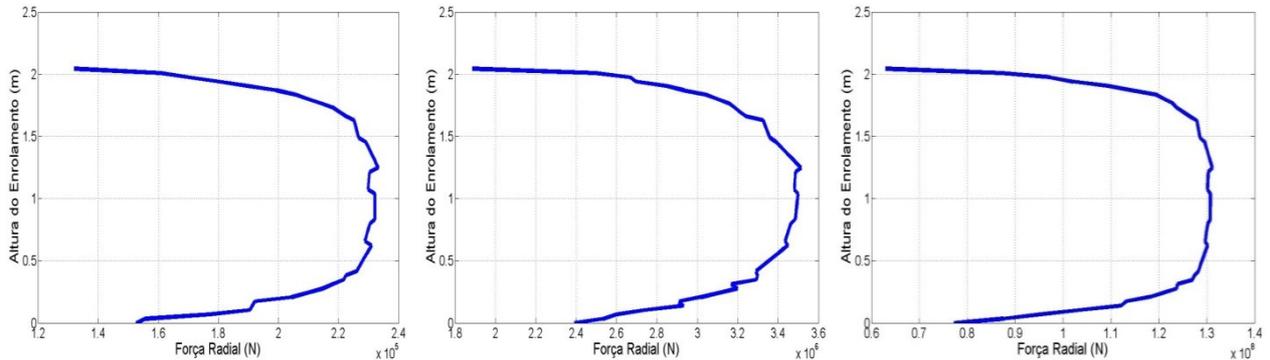
A Figura 12 apresenta a força axial distribuída em função da altura do enrolamento do transformador monofásico de 50 MVA em diferentes condições de operação. A Figura (a), o transformador opera em condição nominal de operação, (b) sob correntes de *inrush* e (c) sob correntes de curto-circuito. Como esperado, a força atuante no enrolamento tem efeito de compressão. Sendo também observado o aumento expressivo desta força quando submetidos a correntes de energização ou de curto-circuito no transformador. As maiores forças estão localizadas nas extremidades para todas as análises.



(a) Corrente nominal (b) Corrente de energização (c) Corrente de curto-circuito

Figura 11 – Força Axial no enrolamento do transformador de 50 MVA.

A Figura 13 apresenta a força radial distribuída em função da altura do enrolamento do transformador quando submetido ha três diferentes condições de operações como na análise anterior. A obtenção da força radial se dá pela interação entre a densidade superficial de corrente pela densidade de fluxo magnético de dispersão axial. Logo, é possível observar, que há um aumento progressivo dos valores destas forças quando se aumenta a amplitude das correntes atuantes nos enrolamentos dos transformadores.



(a) Corrente nominal (b) Corrente de energização (c) Corrente de curto-circuito

Figura 12 – Força Radial no enrolamento do transformador de 50 MVA.

A partir das análises das Figuras 12 e 13, sendo demonstradas as forças nos enrolamentos do transformador em componentes axiais e radiais respectivamente, é observado um aumento considerável das amplitudes das forças quando o equipamento está sujeito a um curto-circuito trifásico, o que corrobora para o aumento do risco de defeitos neste equipamento. De maneira semelhante, a corrente de *inrush* produz esforços que contribuem consideravelmente para defeitos em transformadores, porém, mesmo com amplitudes menores, devido ao maior tempo de exposição, os enrolamentos ficam mais expostos a esses defeitos. Pois, durante um curto-circuito os enrolamentos do transformador ficam expostos por dezenas de milissegundos, enquanto para a corrente de energização a duração é de dezena de segundos. Logo, mesmo com picos 30% menores do que causados por correntes de curto-circuito, a corrente de *inrush* produz forças de amplitudes semelhantes.

#### 5.0 - CONCLUSÃO

Neste trabalho são realizadas simulações computacionais utilizando um *software* comercial baseado no método de elementos finitos. Para isso, foram apresentados gráficos de campo magnético os quais mostram que devido às elevadas correntes de *inrush* e de curto-circuito que circulam nos enrolamentos concêntrico do transformador, é observável que a intensidade da densidade de fluxo magnético é intensificada e muitas vezes até alterando o caminho preferencial, o que provoca um acréscimo significativo das forças que atuam no enrolamento do

transformador. Para isso, são apresentados os gráficos que mostram o comportamento e aumento da amplitude das forças axiais e radiais para as diferentes análises apresentadas neste trabalho.

Os estudos foram realizados basicamente para três casos distintos. Inicialmente, com o transformador em condição nominal de operação. Posteriormente, sofrendo influência de elevadas correntes transitórias e por fim sob correntes de curto-circuito. A partir dos dados intrínsecos do material construtivo do equipamento e as características estruturais do mesmo, as análises em 3D do produto vetorial da densidade de fluxo magnético de dispersão com a densidade de corrente no transformador, foi possível obter os resultados de forças axiais e radiais para as diferentes análises citadas anteriormente.

Portanto, a partir das análises dos resultados do transformador quando submetidos a corrente de curto-circuito e correntes de energização, pode-se constatar um aumento significativo das amplitudes das forças, sendo estas separadas em componentes axiais e radiais. Com isso, com a corrente de curto-circuito esse aumento é preocupante devido à elevada amplitude das forças axiais e radiais se comparadas a essas componentes quando submetidas a condições nominais de operações. De maneira semelhante, porém com amplitudes menores, a corrente de energização também proporciona um aumento significativo nas componentes axiais e radiais, porém devido ao maior tempo de exposição desse transitório, os enrolamentos estão sujeitos a possíveis danos devido à atuação desta força.

## 6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY Jr, C.; UMANS, S. D. 2006. Máquinas Elétricas com Introdução a Eletrônica de Potência. (6ª ed.). Editora Bookman.
- (2) BRONZEADO, H. S.; AZEVEDO, A. C.; DELAIBA, A. C.; OLIVEIRA, J. C.; CARVALHO, B. C. "Estresse Eletromecânico em Transformadores: Análise no Domínio do Tempo," IV Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica - CITENEL, Araxá, Brasil, 07p, 2007.
- (3) FAIZ, J.; EBRAHIMI, B. M.; ELHAIJA, W. A. "Computation of Static and Dynamic Axial and Radial Forces on Power Transformer Windings Due to Inrush and Short Circuit Currents," IEEE Jordan Conference on Applied Electrical Engineering and Computing Technologies (AEECT), 08p, 2011.
- (4) 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.
- (5) 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 Transmission and Distribution IEEE Latin América, São Paulo, Brasil, 06p, 2010.
- (6) H. ZHANG, B. YANG, W. XU; S. WANG, G. WANG, Y. HUANGFU, J. ZHANG, "Dynamic Deformation Analysis of Power Transformer Windings in Short-Circuit Fault by FEM." IEEE Transactions On Applied Superconductivity, v. 24, n. 3, June 2014.
- (7) AMOIRALIS, I. ELEFTHERIOS.; TSILI, A. MARIANA.; KLADAS, G. Antonios. "Transformes Design and Optimization: A Literature Survey". IEEE Transactions on Power Delivery, v. 24, n. 4, Outubro 2009.
- (8) 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.
- (9) BASTOS, J. P. A. 1996. Eletromagnetismo e Cálculo de Campos. (3ª ed.). Florianópolis, Santa Catarina: Editora da UFSC.
- (10) GEORGILAKIS, P. S. 2009. Spotlight on Modern Transformer Design. (1ª ed.). London, New York. Editora: Springer Dordrecht Heidelberg London New York.
- (11) ROSENTINO, A. J. P. Estimativa dos Esforços Eletromecânicos em Transformadores Submetidos a um Curto-Circuito Trifásico. 200p. Tese (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Brasil, 2010.
- (12) LIMA, D. S., FONSECA, W. S., LIMA, A. K. F., SOEIRO, N.S., NUNES, M. V. A. "Análise de Esforços Eletromagneto-mecânicos no enrolamento de um transformador sob Condições de corrente de Inrush" MOMAG – Curitiba - PR, Brasil, 07p, 2014.
- (13) AHN, H. M.; LEE, J. Y.; KIM, J. K.; O, Y. H.; JUNG, S. Y.; HAHN, S. C. "Finite Element Analysis of Short-Circuit Electromagnetic Force in Power Transformer". IEEE Transactions on Industry Applications, v. 47, n. 3, p. 1267-1272, junho 2011.
- (14) KULKARNI, S. V., KHAPARDE, S. A., "Transformer Engineering – Design and Practice", Marcel Dekker, Inc, New York, 2004.
- (15) STEURER, M.; FROHLICH, K. The impact of inrush currents on the mechanical stress of high voltage power transformer coil. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 17, n.1, p. 155-160, January 2002.
- (16) 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.
- (17) WINDERS, J. Jr. "Power Transformers: Principles and Applications". MarcelDekker, Inc., 2002.
- (18) AGUIAR, E. R. Análise de Resposta em Frequência Aplicada em Transformadores. 114p. Tese (Mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, 2007.
- (19) A. BAKSHI, S.V. KULKARNI, "Coupled Electromagnetic-Structural Analysis of the Spiraling Phenomenon in a Helical Winding of a Power Transformer." IEEE Transactions On Power Delivery, v. 29, n. 1, pp. 235-240, February 2014.

## 7.0 - BIBLIOGRAFIA



**Diorge de Souza Lima**, nasceu em Santa Maria do Pará, Brasil em 1992. Graduado pela Universidade Federal do Pará em Engenharia Elétrica no ano de 2014. Atualmente, desenvolve o mestrado também na Universidade Federal do Pará em Sistemas Elétricos de Potência. Seus principais interesses em pesquisa são: distúrbios de qualidade de energia, eficiência energética, geração distribuída e energias renováveis, estudo de comportamento dos equipamentos elétricos e método de elementos finitos.



**Wellington da Silva Fonseca**, Graduado em Física em 2007 e Mestrado em 2010 pela Universidade Federal do Pará. Atualmente, desenvolve doutorado na Universidade Federal do Pará sendo professor na Faculdade de Ciência e Tecnologia do Campus de Ananindeua. Suas áreas de interesse inclui educação em engenharia, engenharia elétrica e física com ênfase em problemas eletromagnéticos e mecânicos a baixas frequências.



**Thiago Mota Soares**, nasceu em Belém – Pará, Brasil em 1985. Graduado pela Universidade Federal do Pará em engenharia elétrica. Obteve o título de mestrado pela Universidade Federal do Pará, no Brasil, sistemas elétricos de potência. Atualmente, desenvolve doutorando e é engenheiro eletricitista na Universidade Federal do Pará e seus principais interesses em pesquisa são: distúrbios de qualidade de energia, eficiência energética, geração distribuída e energias renováveis.



**Ubiratan Holanda Bezerra**, nasceu em Pereiro - Ceará - Brasil em 1950. Graduado pela Universidade Federal do Pará (UFPA) - Brasil em engenharia elétrica. Obteve o título de mestrado e doutorado pelas Universidade Federal de Itajubá e pela Universidade Federal do Rio de Janeiro. É professor titular na Universidade Federal do Pará e seus principais interesses na área de pesquisa são: avaliação da segurança em sistemas de potência, distúrbios de qualidade de energia, geração distribuída e energias renováveis.