



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

FI/GTM/03  
18 a 21 de Outubro de 2015  
Foz do Iguaçu - PR

**GRUPO – XIII**

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

**METODOLOGIA PARA VERIFICAÇÃO DE PROXIMIDADE DE FALHA EM TRANSFORMADORES UTILIZANDO  
O CRITÉRIO DE VON MISES**

**Jalberth Araújo(\*) Filipe Andrade Tarso Ferreira Renan Arruda Edson Costa Bruna Lima Cinthia Xavier**  
**UFCG UFCG UFCG UFCG UFCG UFCG CHESF**

**RESUMO**

Este trabalho foi concebido com o objetivo de contribuir com o aprimoramento das metodologias de avaliação dos efeitos dos esforços eletromecânicos em transformadores, tomando como base os critérios de falha mecânica. Desta forma, o critério de Von Mises foi utilizado para verificar a proximidade de falha dos enrolamentos de um transformador quando da ocorrência de um curto circuito. A metodologia apresentada pode ser utilizada para apoiar tomadas de decisão, com o intuito de realizar a manutenção preditiva do equipamento, e também servir de base para determinação do número de curtos circuitos suportáveis por um transformador.

**PALAVRAS-CHAVE**

Curto circuito, Enrolamento, Esforço eletromecânico, Transformador, Von Mises

**1.0 - INTRODUÇÃO**

O transformador é um dos equipamentos mais importantes dos sistemas elétricos. Desta forma, falhas nesses equipamentos podem acarretar indisponibilidade de fornecimento, isto é, perda no faturamento, multas pelo aumento dos índices Duração Equivalente de Continuidade (DEC), Frequência Equivalente de Continuidade (FEC), Duração de Interrupção Individual por Unidade Consumidora (DIC), Frequência de Interrupção Individual por Unidade Consumidora (FIC) e Duração Máxima de Interrupção Contínua por Unidade Consumidora (DMIC).

Além disso, tais cortes no fornecimento tendem a ferir a reputação da empresa fornecedora de energia e macular a imagem da mesma frente a seus consumidores. Assim, percebe-se a importância do monitoramento de transformadores a fim de se garantir a manutenção preditiva, de modo que os desligamentos não programados sejam evitados. Para tanto, as técnicas de fabricação de transformadores vem sendo aprimoradas, no sentido do aumento da confiabilidade do equipamento.

Obviamente, quando um transformador é fabricado, este apresenta uma boa suportabilidade térmica, dielétrica, química e mecânica. Entretanto, com o passar do tempo, há a redução de sua vida útil, eficiência e confiabilidade, provocando a alteração dos parâmetros característicos, desligamentos e penalizações. Todos esses problemas são causados por fenômenos eletroquímicos do óleo isolante, vibrações produzidas pelas Forças Eletromagnéticas (FE) e Estresses Mecânicos (EM) durante a operação normal do transformador, e também pelas deformações e sobreaquecimentos causados pelas altas correntes de curto circuito e energização.

Desta forma, muitas das falhas que ocorrem em transformadores são de origem mecânica, ocasionadas, principalmente, pela ocorrência de curtos circuitos, o que fomenta a execução de pesquisas focadas na compreensão dos mecanismos de falhas eletromecânicas. Espera-se que um transformador suporte um determinado número de curtos circuitos durante seu tempo de vida útil. Porém, cedo ou tarde, um novo evento

causará algum leve movimento nos enrolamentos, e a capacidade do equipamento de suportar novas FE e EM de intensidade significativa estará reduzida. Adicionalmente, a medição das FE e dos EM em transformadores não é trivial, visto que se o equipamento já estiver montado, existe a dificuldade de introdução dos sensores em pontos estratégicos. Também há a dificuldade de os fabricantes disponibilizarem acesso às suas tecnologias, quando da fabricação do transformador, para implantação dos sensores, os quais possuem custo elevado.

Sabendo disso, simulações computacionais, baseadas no Método dos Elementos Finitos (MEF), podem ser utilizadas para estimar de forma precisa as FE e os EM nos enrolamentos dos transformadores, uma vez que: não é preciso realizar a compra e implantação de sensores; há a possibilidade de previsão de comportamento da unidade; permite auxílio à tomada de decisão de acordo com as FE e os EM a que o transformador está submetido.

Portanto, neste trabalho é apresentada uma análise da sensibilidade dos enrolamentos de um transformador para diferentes intensidades de curtos circuitos, tomando como base o primeiro pico da componente assimétrica. Adicionalmente, é feita a verificação das FE, EM e Coeficientes de Segurança (CS) utilizando o Critério de Von Mises (CVM), que é um dos critérios mais utilizados na determinação de falhas de materiais dúcteis. Vale salientar que a obtenção dos resultados foi realizada baseando-se no MEF.

## 2.0 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta seção é apresentada a fundamentação teórica utilizada para determinação dos resultados obtidos neste trabalho.

### 2.1 Densidade de Fluxo Magnético

As FE nos enrolamentos dos transformadores são originadas pela densidade de fluxo magnético de dispersão que, por sua vez, é gerada pela passagem de uma corrente elétrica. A densidade de fluxo magnético de dispersão possui duas componentes, uma na direção radial e outra na direção axial (1).

As componentes, nas direções radial e axial, da densidade de fluxo magnético de dispersão estão apresentadas na expressão (2.1).

$$B_r = -\frac{\partial A_\phi}{\partial z} \quad B_z = \frac{1}{r} \frac{\partial r A_\phi}{\partial r} \quad (2.1)$$

Na expressão (2.1):  $r$ ,  $\phi$  e  $z$  são representativos dos vetores unitários em coordenadas cilíndricas;  $B_r$  e  $B_z$  são as componentes radial e axial da densidade de fluxo magnético de dispersão, respectivamente, e  $A$  é o vetor potencial magnético.

### 2.2 Forças Eletromagnéticas

A densidade de fluxo de dispersão produz FE nas direções radial e axial. Assim, a expressão para cálculo das FE está apresentada na expressão (2.2).

$$\vec{F} = \int_V J_\phi \hat{\phi} \times \left( B_r \hat{r} + B_z \hat{z} \right) dv = F_r \hat{r} + F_z \hat{z} \quad (2.2)$$

Na expressão (3):  $\vec{F}$  é a força eletromagnética;  $F_r$  e  $F_z$  são as componentes nas direções radial e axial das FE, respectivamente, e  $J$  é a densidade de corrente (1).

### 2.3 Estresses mecânicos

Os EM são gerados devido às FE ocorrentes sob uma determinada área. Para determinação dos EM utiliza-se a expressão (2.3).

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} + \frac{\sigma_r - \sigma_\phi}{r} + f_r = 0 \quad \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial r} + \frac{\tau_{rz}}{r} + f_z = 0 \quad (2.3)$$

Na expressão (2.3):  $\sigma$  é o estresse mecânico;  $\tau$  representa o estresse de cisalhamento e  $f$  a densidade volumétrica de força (2) e (3).

## 2.4 Estresse crítico

O estresse crítico ( $\sigma_{crit}$ ) é o estresse máximo que pode ocorrer no material empregado no enrolamento (no caso o cobre) antes da ocorrência da falha. Para determinar esse  $\sigma_{crit}$  são necessários os valores do módulo de elasticidade ( $E_0$ ) e do limite de escoamento ( $\sigma_y$ ) do material, em que segundo (6),  $E_0$  e  $\sigma_y$  são, respectivamente, 110 Gpa e 70 Mpa.

Desta forma, em (2) é apresentada uma metodologia para determinação do  $\sigma_{crit}$  nos enrolamentos de transformadores, em que, inicialmente, calcula-se um estresse inicial dado pela expressão (2.4).

$$\sigma_0 = \left( \frac{k}{E_0 \cdot \varepsilon_y} \right)^{\frac{1}{m}} \cdot \sigma_y^{\left( \frac{1+m}{m} \right)} \quad (2.4)$$

Na expressão (2.4):  $\varepsilon_y = 0,1\%$ ,  $k = \frac{3}{7}$  e  $m = 11,6$ .

Tendo o valor de  $\sigma_0$ , o  $\sigma_{crit}$  pode ser determinado, por meio do método de Newton-Raphson, achando a raiz da expressão (2.5).

$$\sigma_{crit}^{m+1} + \frac{\sigma_0^m}{\gamma} \cdot \sigma_{crit} - \frac{\sigma_0^m}{\gamma} \cdot E_0 \cdot \left( \frac{h}{R} \right)^2 = 0 \quad (2.5)$$

Na expressão (2.5):  $\gamma = k \cdot (m+1)$ ,  $h$  é a espessura radial do enrolamento e  $R$  é o raio médio do enrolamento.

## 2.5 Critério de Von Mises

O critério de Von Mises é um dos critérios mais utilizados para determinação de falha mecânica em materiais dúcteis. A expressão para o cálculo do Estresse de Von Mises (EVM) está apresentada na expressão (2.6).

$$\sigma_{VM} = \left[ \frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2} \right]^{\frac{1}{2}} \geq \sigma_{crit} \quad (2.6)$$

Na expressão (2.6):  $\sigma_{VM}$  é o EVM,  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  e  $\sigma_3$  são os estresses principais.

Desta forma, para que não ocorra a falha no material, utilizando o critério de Von Mises, o EVM deve estar no interior da elipse apresentada na Figura 1.

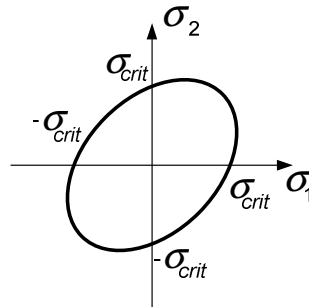


FIGURA 1 – Elipse representativa da região de segurança do critério do Von Mises.

Adicionalmente, a determinação dos CS, para verificação da proximidade de falha, é realizada por meio da expressão (2.7).

$$n = \frac{\sigma_{crit}}{\sigma_{VM}} \quad (2.7)$$

Na expressão (2.7):  $n$  é o CS.

Com isso, à medida que  $n$  se aproxima da unidade, mais próximo da falha estará o material (4) e (5).

### 3.0 - METODOLOGIA

Nesta seção é apresentada a metodologia empregada para análise da sensibilidade dos enrolamentos de um transformador para diferentes intensidades de curtos circuitos, tomando como base o primeiro pico da componente assimétrica.

#### 3.1 Material empregado

Para o desenvolvimento deste trabalho foi utilizado o transformador com as características construtivas apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Características construtivas do transformador (3).

Potência (MVA)		75
Número de fases		1
Relação de transformação (kV/kV)		22/127
Número de espiras	Enrolamento interno	115
	Enrolamento externo	667
Diâmetro médio	Enrolamento interno (mm)	994
	Enrolamento externo (mm)	1557
Área do fio de cobre	Enrolamento interno (mm <sup>2</sup> )	583
	Enrolamento externo (mm <sup>2</sup> )	229

Adicionalmente, o *software* utilizado para determinação das Fe e dos EM, por meio do MEF, foi o *Comsol Multiphysics*®.

#### 3.2 Métodos

A metodologia empregada para análise da sensibilidade dos enrolamentos de um transformador para diferentes intensidades de curtos circuitos, tomando como base o primeiro pico da componente assimétrica, foi baseada nos seguintes passos:

- Desenvolvimento do modelo tridimensional do transformador, apresentado na Tabela 1, para inserção no *Comsol Multiphysics*®;
- Realização de simulações computacionais unindo a física magnética e mecânica para a condição normal de operação e para a condição de curto circuito com diferentes fatores de assimetria;
- Determinação das FE e dos EM ocorrentes nos Enrolamentos Interno (EI) e externo (EE) do transformador;
- Avaliação da proximidade de falha do enrolamentos por meio do critério de Von Mises.

### 4.0 - RESULTADOS

Por meio da metodologia apresentada, os resultados referentes à análise da sensibilidade dos enrolamentos de um transformador para diferentes intensidades de curtos circuitos, tomando como base o primeiro pico da componente assimétrica, estão apresentados na Figura 2.

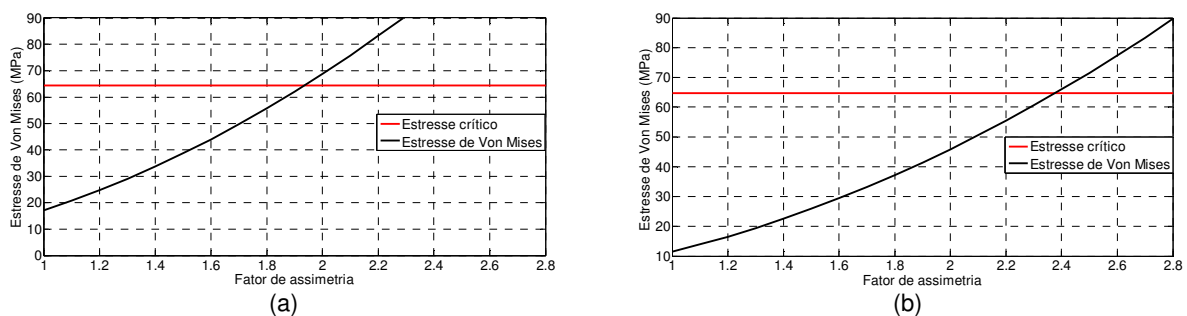


FIGURA 2 – Estresses de Von Mises com relação aos fatores de assimetria, em que: (a) Ei e (b) Ee

Ao observar a Figura 2 verifica-se que o estresse crítico foi alcançado para os dois enrolamentos numa faixa de fatores de assimetria de 1,8 a 2,4. Isso indica que, para o transformador empregado, é necessário que a componente simétrica da corrente de curto circuito seja multiplicada por valores na faixa de 1,8 a 2,4 para que a falha possa ocorrer nos enrolamentos. Além disso, verifica-se que para o mesmo fator de assimetria, não necessariamente ocorrerá falha em ambos os enrolamentos. De fato, os EVM nos enrolamentos são diferentes, uma vez que as características geométricas dos EI e EE são diferentes. Desta forma, observando os gráficos, tem-se que as correntes que causam falha nos EI e EE, respectivamente, são 40 kA (fator de assimetria igual a 1,94) e 8,5 kA (fator de assimetria igual a 2,34).

Adicionalmente, foram determinados os FS para os dois enrolamentos, e os resultados estão apresentados na Figura 3.

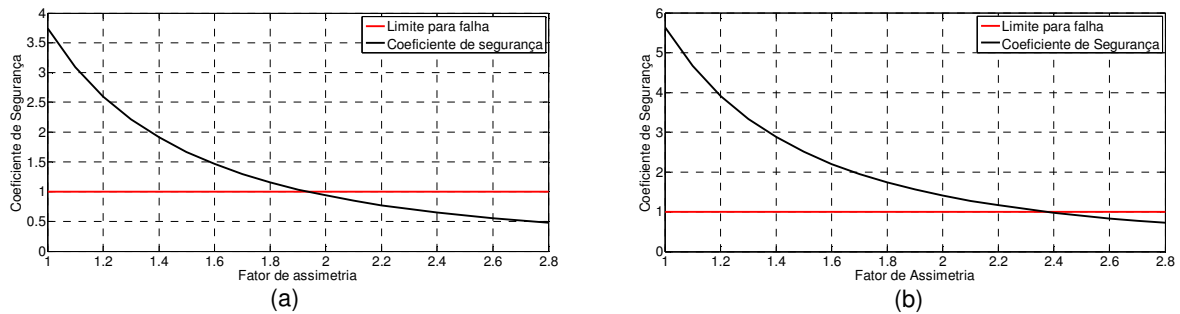


FIGURA 3 – Coeficientes de segurança com relação aos fatores de assimetria, em que : (a) EI e (b) EE.

Com relação à Figura 3 destaca-se que a proximidade de falha dos enrolamentos pode ser analisada pelo valor do CS. À medida que o valor do CS (curva em preto) se aproxima da unidade (curva em vermelho) mais perto da falha está o enrolamento.

Desta forma, a observação dos resultados apresentados nas Figuras 2 e 3 permite destacar que esses resultados podem ser utilizados durante a fase de projeto do transformador, de modo a desenvolvê-lo com maior faixa de segurança.

Complementarmente aos resultados apresentados, foram realizadas simulações com o intuito de avaliar as FE e os EM durante a Operação Normal (ON) e de Curto Circuito (CC) do equipamento. Com isso, para a condição ON foram introduzidas correntes de 4,8 kA no Ei e 835 A no Ee, e durante a condição de CC foram introduzidas correntes de 32 kA no Ei e 5,5 kA no Ee. Os resultados para as FE estão apresentados na Figura 4 e os resultados para os EM estão na Figura 5.

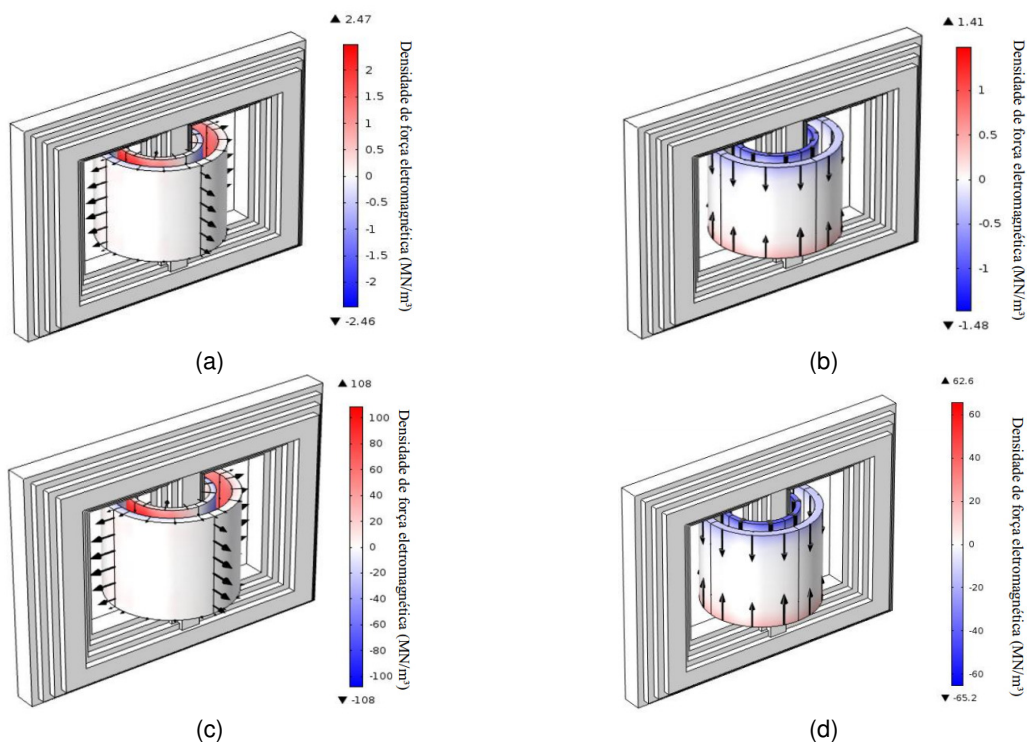


FIGURA 4 – Densidade de força eletromagnética para as condições NO (a e b) e CC (c e d).

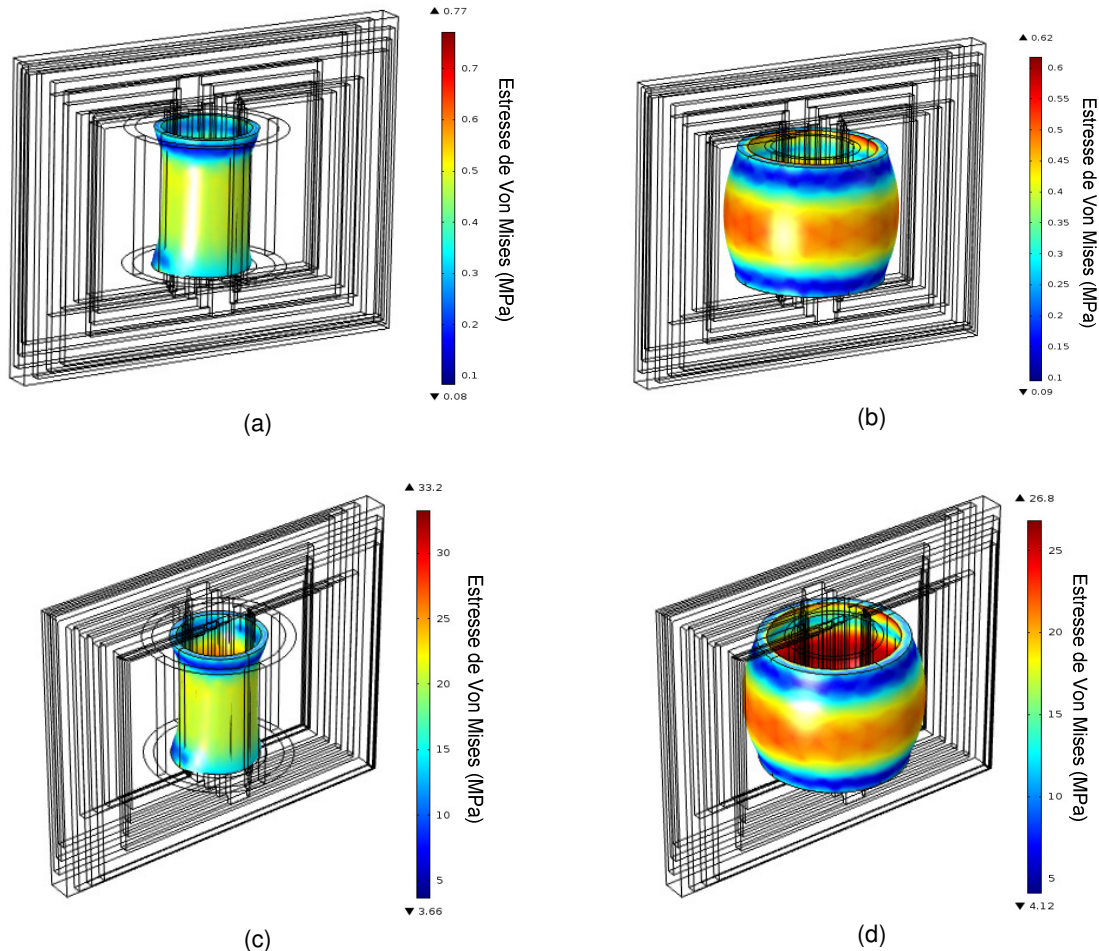


FIGURA 5 – Estresses de Von Mises para as condições NO (a e b) e CC (c e d).

Ao observar os resultados apresentados nas Figuras 4 verifica-se que as forças na direção radial são trativas no EE e compressivas no EI, enquanto que as forças na direção axial são compressivas nos enrolamentos. Além disso, os efeitos causados pelas FE na direção radial são maiores no centro dos enrolamentos, ao passo que na direção axial são maiores nas extremidades dos enrolamentos.

Os efeitos causados pelas FE podem ser mais bem observados na Figura 5. Nesta figura verificam-se as deformações trativas e compressivas dos enrolamentos, assim como os valores máximos dos EM no centro e nas extremidades dos enrolamentos.

## 5.0 - CONCLUSÃO

Neste trabalho foi apresentada uma análise da sensibilidade dos enrolamentos de um transformador de potência para diferentes intensidade de curtos circuitos, tomando como base o primeiro pico da componente assimétrica. Adicionalmente, foi feita a verificação dos estresses eletromecânicos e fatores de segurança utilizando o critério de Von Mises, que é um dos critérios mais utilizados na determinação de falhas de materiais dúcteis. Isso foi realizado tomando como base o método dos elementos finitos.

Após a obtenção dos resultados verificou-se que:

- Para uma avaliação ampla, devem-se realizar diversas simulações computacionais para determinar os estresses eletromecânicos para diferentes intensidade de curtos circuitos, até obter valores que ocasionar falha nos enrolamentos do transformador;
- Considerando o estresse crítico como estresse limite para ocorrência de falha no enrolamento, verifica-se que, para o transformador empregado, os fator de assimetria causador de falha nos enrolamentos variou de 1,8 a 2,4; possuindo valor de corrente de falha de, aproximadamente, 40 kA (fator de assimetria igual a 1,94) no enrolamento interno e 8,5 kA (fator de assimetria igual a 2,34) no externo;

- c. A proximidade de falha também pode ser verificada por meio da variação dos fatores de segurança, que quanto mais próximo da unidade, mais próximo da falha estará o enrolamento;
- d. Os resultados apresentados neste trabalho contribuem para o aprimoramento das metodologias relacionadas às avaliações dos efeitos das FE e dos EM nos enrolamentos de transformadores.
- e. A metodologia apresentada pode ser empregada durante o projeto de transformadores, com o intuito de realizar a verificação da proximidade de falha dos enrolamentos.

Salienta-se, por fim, que a metodologia adotada neste trabalho pode ser utilizada para apoiar tomadas de decisão, com o intuito de realizar a manutenção preditiva do equipamento, e também servir de base para determinação do número de curtos circuitos suportáveis por um transformador.

## 6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) HAYT JR, W. H., BUCK, J. A. Engineering Electromagnetics. The McGraw-Hill Companies, Inc., 2011.
- (2) Vecchio, R. M., Poulin, B., Feghali, P. T., Shah, D. M., Ahuja, R. Tranformer Design Principles with Applications to Core-Form Power Transformers, CRC Press Taylor & Francis Group, 2010.
- (3) Zhang, H. Yang, B. Xu, W. Wang, S. Wang, G. Huangfu, Y. Zhang, J. Dynamic Deformation Analysis of Power Transformer Windings in Short-Circuit Fault by FEM. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2014.
- (4) Shigley, J. E., Mischke, C. R., Budynas, R. G. Projeto de Engenharia Mecânica, Bookman, 2008.
- (5) Branco, C. A. G. M. Mecânica dos Materiais. Fundação Calouste Gulbenkian, 1985.
- (6) Callister Jr, W. D. Materials Science and Engineering – Na Introduction. John Wiley & Sons, Inc., 2007.

## 7.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

Jalberth Fernandes de Araújo nasceu em Campina Grande, Paraíba, Brasil, em dezembro de 1988. Possui graduação (2012) e mestrado (2013) em Engenharia Elétrica, cursados na Universidade Federal de Campina Grande, onde atualmente é doutorando em Engenharia Elétrica. Além disso, Jalberth é professor dos cursos de engenharia na Faculdade Maurício de Nassau (Unidade Campina Grande). Tem desenvolvido trabalho que envolvem, dentre outros temas: monitoramento de equipamentos elétricos baseado em ultrassom, termovisão e radiação ultravioleta; identificação de sistemas; harmônicas; resposta em frequência; monitoramento e simulação computacional; baseada em elementos finitos, de transformadores. Jalberth é membro do IEEE (2012).