

Análise Eletromagnética de Transformadores de Potência Conectados a Rede Elétrica sob Condição de Curto Circuito

D. de S. Lima, W. da S. Fonseca and U. H. Bezerra

Abstract-- *Power transformers are very important equipment for the national electric system, enabling the transmission and enable the connection of the centers generators to consumers. Because of its importance and because it is directly connected to the grid, these devices are often exposed to short circuit currents, and can result in mal function. Therefore, this paper aims to show a grid connected three transformers single phase to represent the system in permanent regime and short circuit. This equipment is installed in the power plant of region North Brazil. For this, used were work tool Alternative Transient Program (ATP) to model the possible disturbances caused in transformer when connected to grid. Therefore, held the release of the working tool with commercial software based on the finite element method for electromagnetic analysis in 3D.*

Index Terms— ATP Draw, Transformers, Short Circuit, FEM.

I. INTRODUÇÃO

TRANSFORMADORES são equipamentos utilizados para transferir energia de um circuito para o outro, sendo essenciais para a conversão de energia elétrica [1], assim, são os principais componentes para operação dos sistemas elétricos, desempenhando um importante papel para a redução de perdas o que torna viável a conexão dos centros geradores aos consumidores.

A IEC (*International Electrotechnical Commission*) define o transformador de potência como um equipamento estático, com dois ou mais enrolamentos, que por indução eletromagnética, converte de um sistema para outro, tensões e correntes diferentes e a mesma frequência [2].

Com isso, devido a sua importância é relevante avaliar quais fatores que influenciam na diminuição da vida útil desses equipamentos [3]. Pode-se considerar que o uso excessivo sem a manutenção prévia, geram desgastes, vibrações, aquecimento e tensões elevadas, corroborando para aumento das perdas e consequentemente uma parada não planejada do equipamento.

Esses equipamentos são essenciais para a continuidade do fornecimento de energia do sistema elétrico e também são os componentes de maior custo comercial [4]. Os procedimentos para a substituição ou reparo são igualmente onerosos, podendo comprometer a receita da empresa, visto que além dos gastos com a manutenção e/ou substituição, as concessionárias deixam de vender seu produto com a parada do fornecimento de energia elétrica, podendo sofrer penalidades, caso haja o descumprimento das regras estabelecidas pelos órgãos regulamentadores do setor elétrico brasileiro [5].

Todos esses problemas podem ser ocasionados por um curto circuito no sistema elétrico, causando elevação no nível das correntes e consequentemente, devido ao aumento da densidade de fluxo magnético no transformador, as forças em componentes axiais e radiais apresentaram maiores amplitudes [6].

Esse fenômeno pode ser representado por uma ligação de baixa impedância entre dois pontos com potenciais diferentes, podendo ser simétrico ou assimétrico. As correntes de curto circuito podem ter duração de dezenas de milissegundo, podendo alcançar até vinte vezes a corrente nominal, comprometendo a isolamento dos equipamentos elétricos, devido à elevada amplitude de corrente [5].

A partir disso, tornam-se necessários estudos relacionados ao comportamento de transformadores quando conectados a rede elétrica. Logo, o projeto destes equipamentos é realizado prevendo as situações mais críticas a que possa ser submetidos no local destinado a sua instalação [7]. No entanto, estatísticas mostram que esses equipamentos estão sujeitos frequentemente a falhas, provocados por esforços mecânicos, devido às condições de curtos circuitos enfrentadas no sistema elétrico [6, 8, 15].

Portanto, é apresentada neste artigo a metodologia para estudos sobre esforços eletromagnéticos nos enrolamentos de transformadores de potência. Para isso, inicialmente é modelado no ATP (*Alternative Transient Program*) a partir dos dados intrínsecos do equipamento, como curva de saturação e valores de reatância dos enrolamentos, o transformador conectado ao barramento infinito e a carga. Paralelamente a cargas, é realizado um curto circuito trifásico no sistema e, por conseguinte, os valores de correntes serão utilizadas para as simulações das forças eletromagnéticas

D. de S. Lima desenvolve o mestrado em Engenharia Elétrica na Universidade Federal do Pará, Belém, Brasil (diorgelima@ufpa.br).

A. R. A. Manito e T. M. Soares trabalham no CEAMAZON – Centro de Excelência e Eficiência Energética da Amazônia, Belém, Brasil (e-mail: allanmanito@ufpa.br, thiagosoares@ufpa.br).

W. da S. Fonseca é professor e U. H. Bezerra é professor titular em Engenharia Elétrica na Universidade Federal do Pará, Belém, Brasil (e-mail: fonseca@ufpa.br, bira@ufpa.br).

através do método de elementos finitos.

II. CORRENTE DE CURTO CIRCUITO

O fenômeno de curto circuito na rede elétrica geralmente é acompanhado da interrupção do fornecimento de energia elétrica, acarretando em prejuízos na produção, assim como riscos a segurança dos operadores [5].

Este fenômeno apresenta dois componentes básicos em sua formação, apresentado na Fig. 1, a componente simétrica predominado no curto-circuito após alguns ciclos e a componente contínua, apresentando característica contínua com valor decrescente. No entanto, os enrolamentos do transformador são dimensionados mecanicamente para suportar esforços produzidos por elevadas correntes [4, 7].

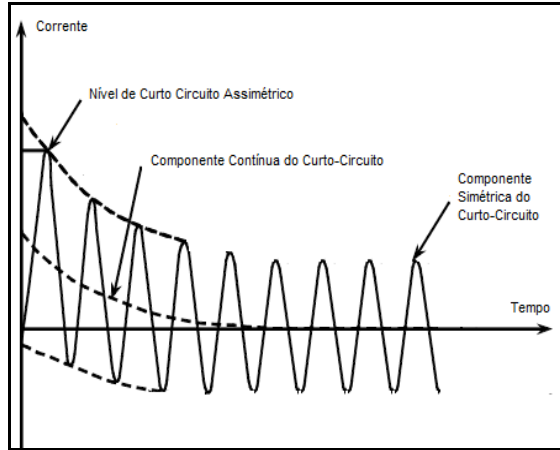


Fig. 1 – Forma de onda da corrente durante um curto circuito [2].

III. FORÇAS ELETROMAGNÉTICAS

Eventuais falhas podem ocorrer em transformadores devido a esforços ocasionados por elevadas correntes de curto circuito. O cálculo das forças eletromagnéticas é realizado de acordo com a Eq. (1) fundamentada a partir da força de Lorentz [8, 9, 10].

$$\vec{f} = \vec{J} \times \vec{B} \quad (1)$$

Onde: $\vec{f}$: densidade volumétrica de forças (N/m³); $\vec{J}$: densidade superficial de corrente (A/m²); $\vec{B}$: densidade de fluxo magnético de dispersão (T).

Durante a operação em condição nominal, o campo magnético de dispersão é relativamente pequeno quando comparado na ocorrência de um curto-circuito. Assim, os esforços podem tornar-se grandes o suficiente para danificar os enrolamentos [5, 6, 11].

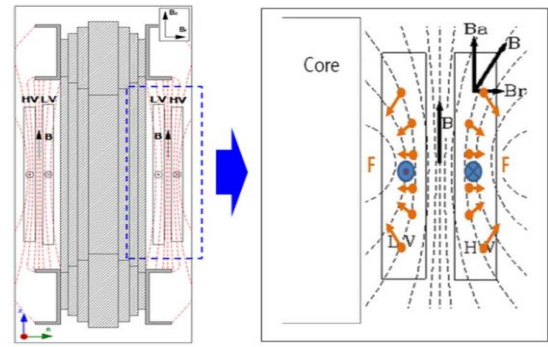


Fig. 2 - Distribuição do fluxo magnético de dispersão em transformadores com enrolamentos concêntricos [10].

A Fig. 2 demonstra que a distribuição de fluxo magnético de dispersão entre os enrolamentos de um transformador tem uma direção predominantemente axial ao longo da altura do enrolamento e nas extremidades esse fluxo muda de direção. Isso justifica a decomposição do fluxo de dispersão em componentes axiais e radiais [11].

IV. FORÇA RADIAL E FORÇA AXIAL

A. Força Radial

Originam-se pela componente de fluxo de indução magnética de dispersão axial a força radial atual em ambos os enrolamentos dos transformadores de potência, apresentando intensidades semelhantes, porém com sentidos opostos, como demonstrado na Fig. 3. [4, 5]. Cálculo da força radial está demonstrado na Eq. (3).

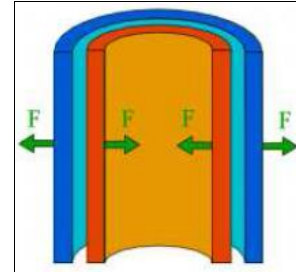


Fig. 3 - Sentido da força radial do enrolamento interno do transformador para a condição de curto circuito [6, 11].

$$\vec{f}_R = \vec{J} \times \vec{B}_A \quad (2)$$

Portanto, a força radial para esta condição tende a comprimir o enrolamento interno e expandir o externo [6, 13].

B. Força Axial

Originam-se pela componente de fluxo de indução magnética de dispersão radial, sendo responsável pelo esforço de compressão nos enrolamentos, conforme a Fig. 3 [6, 14]. O Cálculo da força axial está demonstrado na Eq. (3).

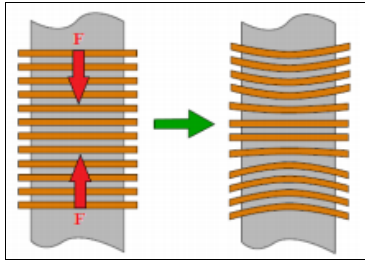


Fig. 4 - Representação de uma deformação axial em um enrolamento de transformador [6, 11].

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

Um dos tipos de falhas devido à 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 [6, 15].

V. ANÁLISE TRANSITÓRIA

Utilizando o ATP foi criado o modelo de um banco de transformadores monofásico de 50 MVA, como é utilizado nas subestações das concessionárias de energia elétrica. A Fig. 5 apresenta a curva de magnetização do transformador utilizada para fornecer resultados precisos quanto o curto circuito do equipamento.

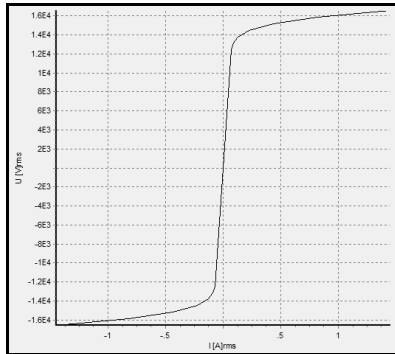


Fig. 5 - Curva de magnetização do transformador de potência.

A partir da curva de saturação, configuração de ligação e dados para o cálculo da resistência e indutância do núcleo, assim como a resistência de magnetização de magnetização do transformador, modelou-se no ATP Draw o banco de transformadores monofásicos conectados ao barramento infinito e as cargas para operação nominal e em curto circuito, conforme apresentado na Fig. 6.

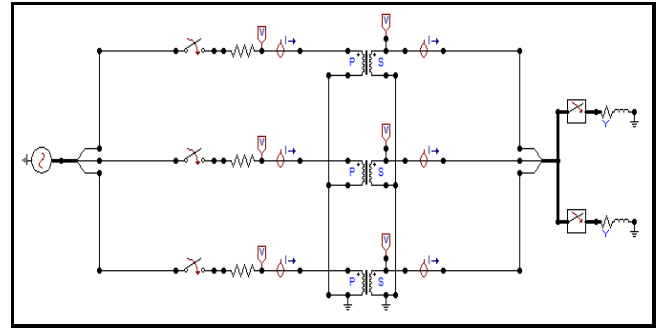


Fig. 6 - Modelagem do transformador para obtenção da curva da corrente de energização.

A partir disso, obtêm-se a curva da corrente de curto circuito no lado do secundário para este equipamento, conforme demonstrado na Fig. 7. Os máximos valores obtidos na curva serão adicionados no *software* baseado no MEF para a realização das análises do comportamento das forças eletromagnéticas desses equipamentos. O curto-circuito proposto para estudos das forças eletromagnéticas tem uma duração de 0,1 segundos, ou seja, o tempo necessário para o sistema de proteção atuar e permitir que o sistema retorne a operar em condições nominais após a ocorrência do transitório [5].

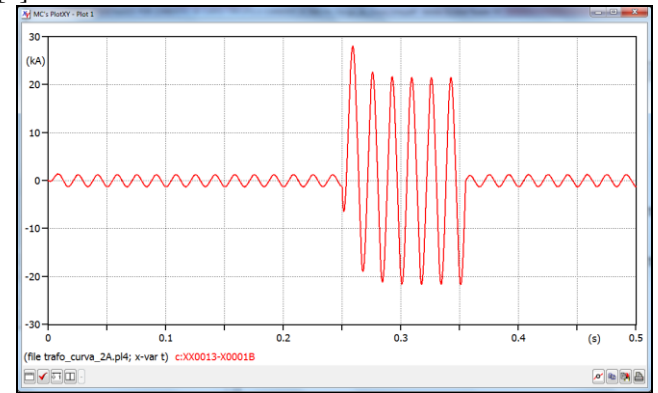


Fig. 7 - Curva da corrente de curto circuito para o transformador de 50MVA.

O ATP Draw proporcionou a modelagem da curva de curto-circuito de um transformador de potência, submetido a um transitório de 100ms. Observa-se na Fig. 7, o equipamento operando em condições nominais, com corrente de 1.240A e durante o transitório, alcança 30.000A, para o enrolamento de baixa tensão.

VI. ANÁLISE ELETROMAGNÉTICA

Para a realização da análise eletromagnética, inicialmente deve-se modelar o transformador de potência seguindo fielmente suas características construtivas, conforme demonstrado nos trabalhos [5, 6]. É válido ressaltar que todos os valores de corrente utilizado na simulação foram obtidas a partir de simulações no ATP Draw.

A. Condição Nominal

Para a condição nominal, utilizaram-se os dados simulados no ATP Draw e comparou-se com os dados de placa do equipamento. Logo, com as correntes nominais de 372A e 1.240A nos enrolamentos externo e interno, respectivamente.

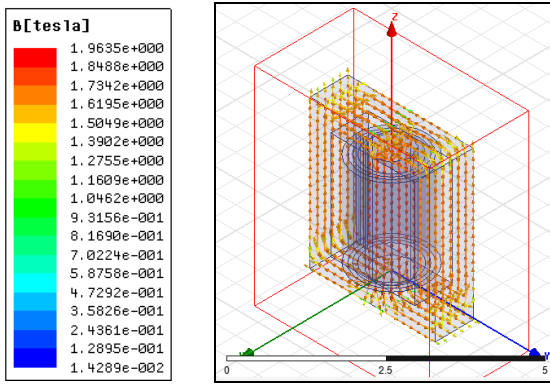


Fig. 8- Densidade de fluxo magnético de dispersão no transformador em condição nominal de operação.

A partir da representação do transformador de potência operando a potência nominal, observa-se na Fig. 10, a densidade de fluxo magnético de dispersão axial com valor máximo de 0,071T no centro do enrolamento externo. Na Fig. 10 à direita, observa-se a densidade de fluxo magnético de dispersão radial máximo nas extremidades do mesmo enrolamento, alcançando valores de 0,04T.

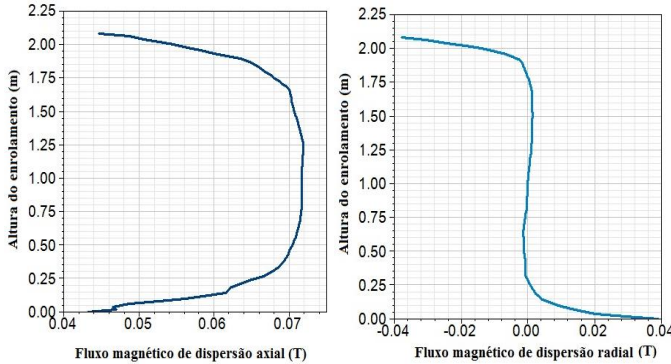


Fig. 9 – Densidade de fluxo magnético de dispersão axial (à esquerda) e radial (à direita) para a condição nominal de operação.

A Fig. 11 demonstra a densidade de fluxo de dispersão no enrolamento na área transversal dos enrolamentos do transformador de potência.

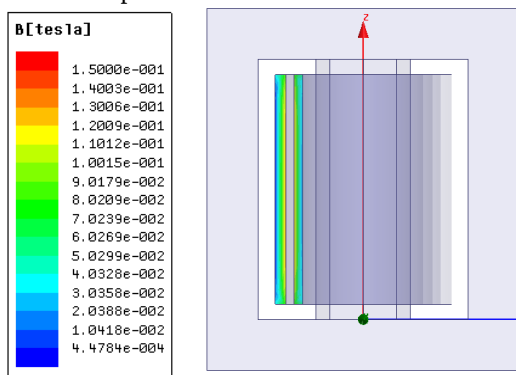


Fig. 10- Densidade de fluxo magnético de dispersão na secção do enrolamento.

A partir dos resultados obtidos com a densidade de fluxo magnético de dispersão axial e radial, ambos apresentados na Fig. 10 e na Fig. 11, pode-se realizar o produto vetorial com a densidade superficial de corrente que é conduzido no

enrolamento do transformador. Com isso, é possível obter as forças radiais e axiais, respectivamente apresentadas na Fig. 12 sob condição nominal de operação.

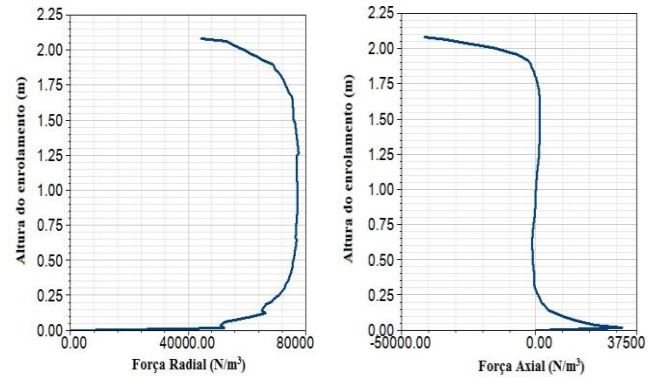


Fig. 11 – Força radial (à esquerda) e axial (à direita) para a condição nominal de operação.

A Fig. 12 (à esquerda) apresenta-se a força radial distribuída em função da altura do enrolamento do transformador quando submetido à condição nominal de operação. A obtenção desses resultados se dá pela interação entre a densidade superficial de corrente pela densidade de fluxo magnético de dispersão axial. Na Fig. 12 (à direita) apresenta-se a força axial distribuída em função da altura do enrolamento do transformador sob as condições nominais de operação. A obtenção desses resultados se dá pela interação entre a densidade superficial de corrente pela densidade de fluxo magnético de dispersão radial.

B. Condição de Curto Circuito

A corrente de curto circuito foi encontrada a partir da simulação pelo ATP Draw, alcançando valores de 9000A e 30000A nos enrolamentos e externo e interno, respectivamente. Com as correntes nos enrolamentos do transformador, obtêm-se a densidade de fluxo magnético de dispersão axial e radial conforme a Fig. 13. Observa-se que parte do fluxo magnético no interior do transformador também sofre alterações no caminho pelo núcleo magnético. Para esta condição, utilizaram-se os dados simulados no ATP Draw.

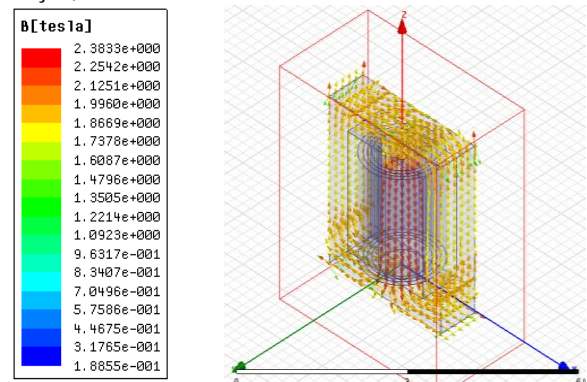


Fig. 12- Densidade de fluxo magnético de dispersão no transformador em condição de curto circuito.

A partir da representação do transformador de potência operando em curto circuito, observa-se na Fig. 14, a densidade de fluxo magnético de dispersão axial com valor máximo de

1,69T no centro do enrolamento externo. Na Fig. 14 à direita, observa-se a densidade de fluxo magnético de dispersão radial máximo nas extremidades do mesmo enrolamento, alcançando valores de 0,96T.

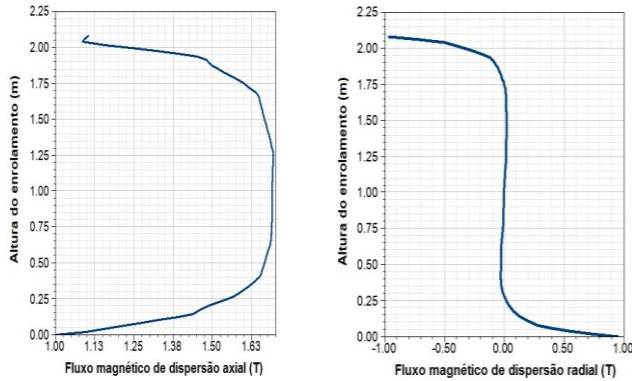


Fig. 13 – Densidade de fluxo magnético de dispersão axial (à esquerda) e radial (à direita) em condição de curto circuito.

A Fig. 15 demonstra a densidade de fluxo de dispersão no enrolamento na área transversal dos enrolamentos do transformador de potência quando submetido a curto circuito.

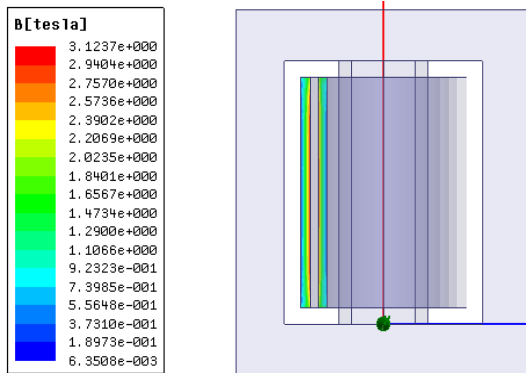


Fig. 14- Densidade de fluxo magnético de dispersão na secção do enrolamento sob curto circuito.

A partir dos resultados obtidos com a densidade de fluxo magnético de dispersão axial e radial, ambos apresentados na Fig. 14 e Fig. 15, é possível obter as forças radiais e axiais, respectivamente, apresentadas na Fig. 16 sob condição nominais de curto-circuito.

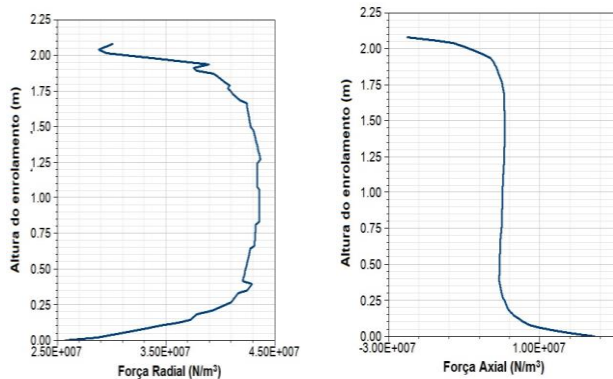


Fig. 15 – Força radial (à esquerda) e axial (à direita) em condição de curto circuito.

A Fig. 16 (à esquerda) apresenta-se a força radial distribuída em função da altura do enrolamento do transformador quando

submetido a um curto circuito. Essa força atua com efeito compreensivo nos enrolamentos do transformador tem suas amplitudes maiores quando submetidos ao curto circuito. Observa-se que nas extremidades ocorrem as maiores amplitudes

A Fig. 16 (à direita) apresenta-se a força axial distribuída em função da altura do enrolamento do transformador sob um curto circuito. Logo, observa-se que sob curto circuito, há um aumento expressivo na amplitude da corrente e concomitantemente a elevação da força axial.

C. Síntese dos Resultados

A partir dos resultados apresentados na Fig. 10 e Fig. 14 demonstrando a densidade de fluxo magnético de dispersão axial e radial para o transformador operando em condição nominal e em curto circuito, apresenta-se na Tabela 1 a síntese desses resultados.

TABELA I
DENSIDADE DE FLUXO MAGNÉTICO DE DISPERSÃO AXIAL E RADIAL

FLUXO MAGNÉTICO DE DISPERSÃO	OPERAÇÃO NOMINAL	OPERAÇÃO EM CURTO-CIRCUITO
AXIAL (T)	0,071 T	1,69 T
RADIAL (T)	0,040 T	0,96 T

A partir dos resultados apresentados Tabela I, observa-se o aumento considerável da densidade de fluxo magnético no enrolamento do transformador quando submetidos a operar em curto circuito. Isso acarreta no aumento considerável das forças axiais e radiais nos enrolamentos do transformador, conforme apresentado na Tabela II.

TABELA II
FORÇA AXIAL E RADIAL

FORÇAS ELETROMAGNÉTICAS	OPERAÇÃO NOMINAL	OPERAÇÃO EM CURTO-CIRCUITO
AXIAL (N/M³)	$4,13 \cdot 10^4$	$2,51 \cdot 10^7$
RADIAL (N/M³)	$7,75 \cdot 10^4$	$4,36 \cdot 10^7$

A partir dos resultados apresentados nas Tabelas I e II, constata-se que o aumento da densidade de fluxo magnético de dispersão, juntamente com aumento da densidade de corrente, contribui para possíveis problemas aos enrolamentos de transformadores, devido às altas forças atuantes nos mesmos.

VII. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com intuito de obter a curva de funcionamento do transformador de potência em regime permanente e sob curto circuito modelou-se uma rede no *software* ATP Draw, para representar uma perturbação de 100ms de um curto circuito trifásico de baixa impedância. A partir disso, realizaram-se as modelagem computacionais de simulações no *software* de método de elementos finitos para avaliar as densidades de fluxo magnético de dispersão axial e radial.

Os estudos sobre o comportamento dos enrolamentos do transformador quando operam em curto-circuito foram

comparados com resultados do equipamento operando em regime permanente, a suas condições ideais. 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 constata-se que devido ao aumento da amplitude da corrente, há um aumento significativo das amplitudes das forças, componentes axiais e radiais, que podem ocasionar danos a esses equipamentos.

VIII. REFERÊNCIAS

- [1] A. E. FITZGERALD, C. KINGSLEY, S. D. UMANS. Máquinas Elétricas. Editora Artmed, Nova York, 2006.
- [2] D. da S. NOGUEIRA, D. P. ALVES, Transformadores de Potência: Teoria e Aplicação – Tópicos Essenciais. 212p. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, 2009.
- [3] H. S. BRONZEADO, A. C. AZEVEDO, A. C. DELAIBA, J. C. OLIVEIRA, B. C. CARVALHO, “Estresse Eletromecânico em Transformadores: Análise no Domínio do Tempo,” IV Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica - CITENEL, Araxá, Brasil, 07p, 2007.
- [4] 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
- [5] D. de S. LIMA, W. da S. FONSECA, A. R. A. MANITO, T. M. SOARES, U. H. BEZERRA, “Análise Eletromagnética de Transformadores de Potência submetido a corrente de Inrush quando conectados a rede elétrica”. The XI LATIN - American Congress Electricity Generation and Transmission - CLAGTEE 2015 – São José dos Campos – SP, Brasil, 2015.
- [6] D. de S. LIMA, W. da S. FONSECA, T. M. SOARES, U. H. BEZERRA, “Análise Eletromagnética de Esforços nos Enrolamentos de Transformadores quando Submetidos a Correntes de Energização e Correntes de Curto-circuito”. XXIII SNTPEE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica - Foz do Iguaçu – PR, Brasil, 2015.
- [7] J. FAIZ, B. M. EBRAHIMI, W. A. ELHAJJA, “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.
- [8] W. S. Fonseca, A. C. Lopes, M. V. Nunes, “Modelagem de Esforços Eletromecânicos de Transformador de Núcleo Amorfo através do Método de Elementos Finitos,” Anais do T&D Transmission and Distribution IEEE Latino América, São Paulo, Brasil, 06p, 2010.
- [9] Bastos, J. P. A. 1996. Eletromagnetismo e Cálculo de Campos. (3ª ed.). Florianópolis, Santa Catarina: Editora da UFSC.
- [10] W. da S. FONSECA, D. de S. LIMA, A. K. F. LIMA, N. S. SOEIRO, M. V. A. NUNES, “Análise de esforços eletromagneto-mecânicos no enrolamento de um transformador sob Condições de correntes de Inrush”. MOMAG – Curitiba - PR, Brasil, 07p, 2014.
- [11] AGUIAR, E. R. Análise de Resposta em Frequência Aplicada em Transformadores. 114p. Tese (Mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, 2007.
- [12] 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.
- [13] H. AHN; Y. OH; J.K. KIM; J.S. SONG e S.C. HAHN, “Experimental Verification and Finite Element Analysis of Short-Circuit Electromagnetic Force for Dry-Type Transformer.” IEEE Transactions on Magnetics, v.28, n. 2, p. 819-822, Fevereiro 2012.

- [14] 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.
- [15] A. C. AZEVEDO, “Estresse Eletromecânico em Transformadores Causados por Curtos-circuitos passantes e correntes de Energização,” 111p. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Brasil, 2007.

IX. BIOGRAFIA



método de elementos finitos.

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



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.



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 pela Universidade Federal de Itajubá e 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