



APLICAÇÃO DO MÉTODO DE ELEMENTO FINITOS PARA ANÁLISES MULTIFÍSICAS EM TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA

Werlison Rodrigues Gomes de Sousa¹ – Unifesspa
werlison_goomes@unifesspa.edu.br
Diorge de Sousa Lima² - Unifesspa
diorgelima@unifesspa.edu.br

Agência Financiadora: FAPESPA

Eixo Temático/Área de Conhecimento: Engenharia Elétrica / Sistema Elétrico de Potência

1 INTRODUÇÃO

Dentro do cenário de modernização das atividades humana, a energia elétrica desempenha um papel fundamental. Pode-se observar atualmente a diversidade de carga dos consumidores (uso de diversos equipamentos elétricos e eletrônicos). Tudo isso corrobora para o aumento da irregularidade dos aspectos relacionados a qualidade da energia elétrica, afetando o funcionamento de todos os componentes que estão conectados no sistema elétrico de potência. Nesta perspectiva, é destacado o transformador de potência, sendo um dos equipamentos primários de maior importância, onde o seu funcionamento estável e seguro apresenta influência nas condições operacionais de uma rede elétrica (LIMA *et al*, 2019)

Os transformadores de potência possibilitam a interligação entre os centros produtores aos centros consumidores, por meio de um sistema interligado (linhas de transmissão), sendo submetido frequentemente a fenômenos diversos, tais como energizações, descargas atmosféricas, entre outras. Esses equipamentos são máquinas estáticas que transferem energia elétrica de um circuito para outro mantendo a frequência e normalmente, variando os valores de tensão e corrente (BECHERA, 2010; NYNAS, 2004).

Ainda, esses equipamentos representam um elevado custo no contexto dos sistemas elétricos, seja para manutenção e/ou substituição, ou ainda devido a parada do dispositivo e conseqüentemente o não fornecimento de energia elétrica, podendo acarretar em multas. Desta forma, torna-se importante acompanhar o funcionamento desses equipamentos, além de avaliar os principais motivos que podem acarretar em falhas e conseqüentemente na redução de sua vida útil. Logo, grande parte das falhas ocorrem em detrimento da falta de manutenção, proporcionando diversos efeitos, tais como: aquecimento excessivo, aumento de perdas elétricas, aumento de vibrações e movimentação na geometria do núcleo, deterioração do núcleo e dos enrolamentos, tudo isso proporcionando a redução em sua vida útil (LIMA, 2019 *apud* FONSECA *et al*, 2016).

Diante do importante papel desempenhado pelos transformadores de potência dentro setor elétrico, entender o seu funcionamento, tipos de falhas e os principais motivos que levam a tal ocorrência, são essenciais para o melhor aproveitamento destes sistemas, possibilitando melhores medidas preventivas a serem realizadas, buscando minimizar ocorrências que ocasionam paradas inesperadas de tais equipamentos.

Portanto, o presente trabalho tem como objetivo apresenta as análises multifísicas (fenômenos físicos acoplados a simulações computacionais) em uma bobina com material ferromagnético (sendo uma análise semelhante realizada em transformadores de potência), tendo como base o uso dessas equações de Maxwell para problemas de magnetodinâmica e magnetostática por meio do Método de Elementos Finitos (MEF). Para incrementos das simulações e modelagens computacionais optou-se pela utilização do *software* comercial ANSYS MAXWELL ELECTRONICS 2D/3D que possibilita a simulação de desempenho eletromagnético

¹Graduando em Engenharia Elétrica - Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará.

²Doutor em Engenharia Elétrica – Professor Adjunto da Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará (FACEEL/Unifesspa).

entre componentes, circuitos e *design* (2D e 3D) do sistema, permitindo avaliar temperatura, vibração e outros efeitos magnético e mecânicos críticos.

2 PROBLEMA MAGNETOSTÁTICO

Na formulação do problema magnetostático, são utilizadas as Equações de Maxwell, em que a partir disso, os fenômenos elétricos e magnéticos são descritos por meio de quatro equações, relacionando a Lei de Gauss, Lei de Ampère e a Lei de Faraday. As equações de Maxwell sob forma local são apresentados nas Equações a seguir (1 - 4):

$$\text{rot}\vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial\vec{D}}{\partial t} \quad (1)$$

$$\text{div}\vec{B} = 0 \quad (2)$$

$$\text{rot}\vec{E} = -\frac{\partial\vec{B}}{\partial t} \quad (3)$$

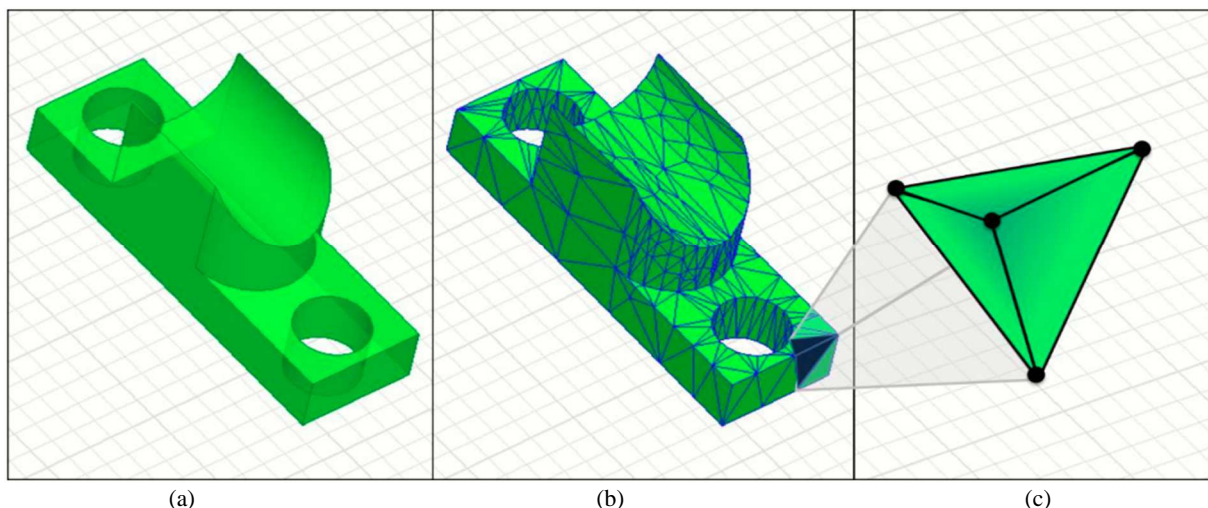
$$\text{div}\vec{D} = \rho \quad (4)$$

Onde: (\vec{H}): vetor de campo magnético (T), (\vec{E}): vetor de campo elétrico ($\frac{N}{C}$), (\vec{B}): vetor de indução magnética (T), (\vec{D}): vetor de indução elétrica (Cm²).

3 MÉTODOS DE ELEMENTOS FINITOS (MEF)

O MEF consiste em um método numérico aproximado para análise de diversos fenômenos físicos que ocorrem em meios contínuos, e que são descritos através de equações diferenciais parciais. A ideia principal do MEF resume-se em decompor (discretizar) o domínio (meio contínuo) dos problemas em sub-regiões (elementos finitos) de geometria simples (formato triangular, quadrilateral, cúbicos, etc.) que são conectados por pontos discretos, conhecidos como nós, logo esse conjunto de elementos utilizado na decomposição da geometria são denominados como malha (LIMA, 2019), conforme exemplificado na Figura 1.

Figura 1 - Definição do MEF: (a) problema geométrico completo. (b) discretização do problema em diversos elementos. (c) elemento tetraédrico.



4 SIMULAÇÃO DE PROBLEMA MAGNETOSTÁTICO

Para a realização da simulação computacional do problema magnetostático, é necessário a compreensão da fundamentação teoria sobre as leis que determinam o princípio físico do equipamento, além de compreensão necessária sobre o como utilizar os solucionadores do *software* para a realização da simulação computacional. A partir disso, pode-se realizar as simulações computacionais. Geralmente, as análises na simulação são divididas em três etapas: pré-processamento, processamento e pós-processamento.

- (a) **Pré-processamento:** Definição do problema e seu domínio de cálculo;
- (b) **Processamento:** Definição das condições de contorno, obtenção e montagem das equações dos elementos e a resolução dos sistemas linear e não-linear;
- (c) **Pós-processamento:** Análise dos resultados obtidos.

5 RESULTADOS PRELIMINÁRES

Este trabalho apresenta a etapa inicial de desenvolvimento, sendo realizado o estudo da formulação matemática para análise de fenômenos acoplados magneticamente e utilização e familiarização do *software* para a simulação de fenômenos eletromagnéticos.

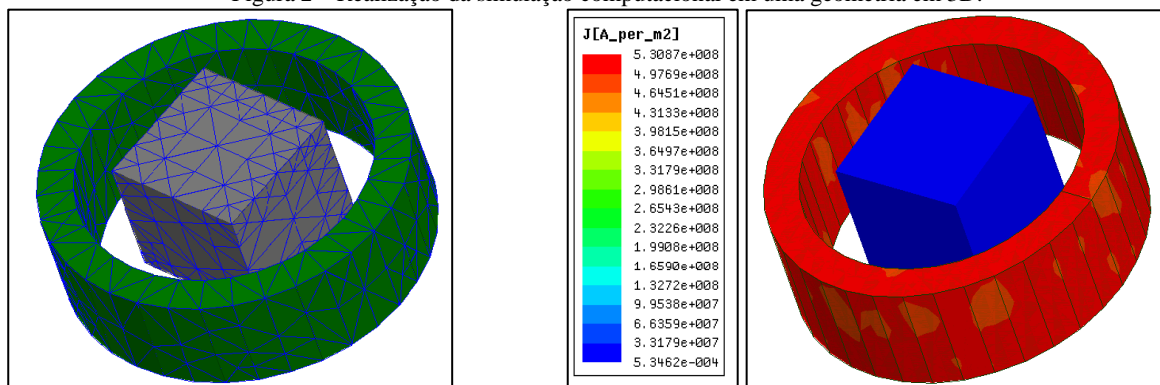
Ao longo do estudo prévio dos módulos do *software*, foram realizados estudos referentes a parte teórica dos solucionadores necessários para a realização das simulações de problemas dentro do domínio de estudo (Magnetostático e Magnetodinâmico), permitindo um melhor aproveitamento e aprendizado do *software*.

Dentre as simulações realizadas, cabe ressaltar a simulação tridimensional de uma bobina associada a um núcleo ferromagnético (Figura 2), possuindo parâmetros e características que servem como base para modelagem e entendimento sobre o funcionamento de um transformador de potência.

Na Figura (2.a) é apresentada a geometria com todos os seus 1.715 elementos tetraédricos, onde é composta principalmente por dois materiais, cobre que compõem a bobina (região em verde que sofrera a excitação de corrente) e o núcleo de ferro que sofrerá os efeitos do campo magnético (região em cinza).

Na Figura (2.b) pode-se observar o comportamento da densidade de corrente no enrolamento da bobina, sendo aplicada somente no material de cobre. Essa corrente irá induzir um campo magnético no núcleo (material ferromagnético) do equipamento, como é mostrado na Figura (2.c), sendo possível observar que as linhas de campos passam pelo material ferromagnético, tendo uma maior intensidade em suas extremidades externas, ocasionada pela proximidade com a região interna da bobina. Na Figura (2.d) é apresentado a magnitude do campo magnético, sendo possível observar uma maior intensidade na região mais interna da bobina que ocorre em virtude da proximidade com o núcleo ferromagnético.

Figura 2 – Realização da simulação computacional em uma geometria em 3D.



(a) Geometria com a malha

(b) Densidade superficial de corrente

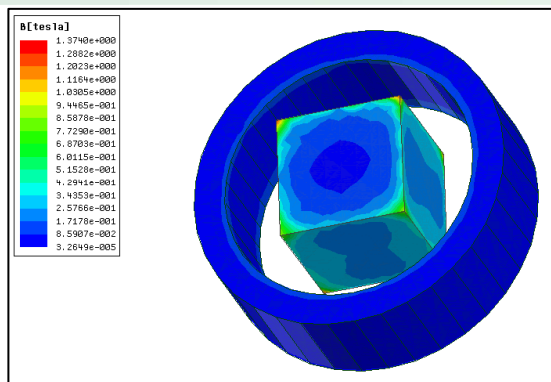
VI Seminário de Iniciação Científica

Pesquisa na Amazônia: Novos cenários

27 a 29 de Outubro de 2020

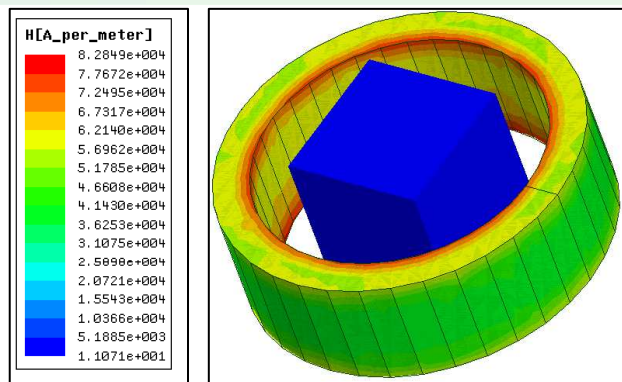
On-line pela plataforma Google Meet

UNIFESSPA | PROPIT



(c) indução magnética

Fonte: O Autor, 2020.



(d) Campo magnético

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Torna-se importante ressaltar que o presente trabalho está em processo de desenvolvimento. Com isso, neste artigo foi apresentada toda a fundamentação teórica necessária na solução do problema magnetostático e as etapas iniciais para a solução computacional. Também, ao final foi apresentado a simulação de uma bobina com material ferromagnético, tendo como principal objetivo a compreensão sobre o método de solução computacional. Com isso, podemos afirmar que até o momento uma grande relevância de estudos teóricos na realização de simulações computacionais desenvolvidas e aplicadas a análises multifísicas em problemas de magnetismo.

Desta forma, destacamos os passos que a seguir, tais como realizar o estudo complementar sobre os transformadores de potência, para uma maior familiaridade e compreensão do dispositivo, aumentar a familiaridade quanto a utilização do *software* para diferentes tipos de análises, tais como análises transitórias e realizar estudos de acoplamentos (simulação magneto-térmica-estrutural).

7 REFERÊNCIAS

BECHERA, Ricardo, **Análise de Falhas em Transformadores de Potência**, Disponível em < https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3143/tde-16082010-163504/publico/Dissertacao_Ricardo_Bechara.pdf >.

BARBOSA, Carlos R. N. **O Métodos do Elemento dos Elementos de Contorno Aplicado a Problemas de Potencial Bidimensional com Acoplamento Interativo entre Sub-Regiões**. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2005.

LIMA, Diorge de Sousa. **Análise Magnética e Mecânica em Transformadores Sob Correntes de Energização e Energização Solidária**. Dissertação de Doutorado, Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Pará, 2019.

LIMA, Diorge. S; MAHMUD, L. S; SOUSA, A. R. M, FONSECA, W. S, BEZERRA, U. H, BEZERRA. F. V. V. "Electromagnetic analysis of single-phase transformer banks under sympathetic inrush phenomenon". IJAEM - International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics. 2019.

NYNAS NAPHTHENICS AB. **Transformer oil handbook**. 1 ed., Sweden: Linderoths in Vingaker, 2004. 223 p.