

Avaliação das Perdas em Enrolamentos de Transformadores de Potência Empregando o Método de Elementos Finitos

1st Patricia Tomalak Liss
Instituto de Redes Inteligentes
Universidade Federal de Santa Maria
Santa Maria, Brasil
patricia.liss@acad.ufsm.br

2nd Leonardo Hautrive Medeiros
Instituto de Redes Inteligentes
Universidade Federal de Santa Maria
Santa Maria, Brasil
leohm.29@gmail.com

3rd João Pedro Pranke Perin
Instituto de Redes Inteligentes
Universidade Federal de Santa Maria
Santa Maria, Brasil
joaoproanke@gmail.com

4rd Micael Márcio Oliveira
Instituto de Redes Inteligentes
Universidade Federal de Santa Maria
Santa Maria, Brasil
oliveira.micael@acad.ufsm.br

5st Mateus Paiva Stochero
Instituto de Redes Inteligentes
Universidade Federal de Santa Maria
Santa Maria, Brasil
mateus.stochero@acad.ufsm.br

6st Vitor Cristiano Bender
Instituto de Redes Inteligentes
Universidade Federal de Santa Maria
Santa Maria, Brasil
vitor.bender@ufsm.br

7st Tiago Bandeira Marchesan
Instituto de Redes Inteligentes
Universidade Federal de Santa Maria
Santa Maria, Brasil
tiago@ufsm.br

Resumo—Este artigo apresenta um estudo de simulações eletromagnéticas para obtenção das perdas nos enrolamentos através do Método de Elementos Finitos (MEF) aplicado em transformadores de potência. Transformadores e a temperatura oriunda das perdas está relacionada com sua vida útil. O presente objetivo é analisar as perdas em diferentes modelagens do mesmo dispositivo através de um *software* de simulação. A metodologia aplicada é a análise das perdas com duas modelagens, uma de disco a disco e outra de condutor a condutor. Onde é utilizado um transformador de potência como objeto de estudo, as simulações desse dispositivo foram comparadas com valores obtidos em ensaio de fábrica. Os resultados obtidos comprovam a utilidade do método de elementos finitos para simulações, assim como os níveis de erro para cada modelagem realizada. Essas informações podem ser aplicadas no projeto de transformadores, visando a otimização do desempenho e a redução das perdas energéticas.

Palavras-chave—transformadores, método de elementos finitos, *Eddy Current*, perdas ôhmicas, eficiência, dissipação de energia, correntes parasitas.

I. INTRODUÇÃO

Os transformadores são dispositivos amplamente utilizados na transferência de energia elétrica entre circuitos. Por serem equipamentos antigos e de uso difundido, há uma vasta gama de estudos bem consolidados sobre esse dispositivo. Um dos pontos mais importantes a serem estudados no transformador é o aquecimento, pois o excesso de calor pode causar danos ao equipamento. A operação em temperaturas elevadas pode levar à degradação da isolamento sólida e comprometer a confiabilidade e segurança dos transformadores. Dentre as várias perdas de energia nos transformadores, as de maior interesse neste trabalho são as perdas ôhmicas nos enrolamentos [1].

Perante o exposto, observa-se o estudo da análise das perdas nos enrolamentos dos transformadores por meio de simulações

computacionais que utilizam o Método de Elementos Finitos (MEF). Esse método consiste em modelar o equipamento e, por meio do MEF, observar o comportamento eletromagnético do transformador e calcular as perdas ôhmicas nos enrolamentos. Ao utilizar simulações computacionais, será possível obter resultados próximos ao esperado de maneira eficaz, sem a necessidade de dispor de recursos financeiros para testar modificações físicas nos transformadores.

Portanto, o presente estudo tem como objetivo investigar as perdas nos enrolamentos do transformador, utilizando o MEF como uma ferramenta eficiente para analisar e compará-las as perdas obtidas em ensaios nos transformadores reais, disponibilizadas de fábrica. Serão analisadas as perdas em diferentes tipos de modelagem do mesmo transformador, disco a disco e condutor a condutor, a fim de observar a melhor simulação com menor gasto computacional.

II. PERDAS EM TRANSFORMADORES

Um aspecto importante a ser considerado nos transformadores são as perdas, uma vez que afetam a eficiência energética, confiabilidade e também a vida útil desses equipamentos. Quando em operação, os transformadores estão sujeitos a várias perdas que resultam na dissipação de energia sob a forma de calor, as quais podem ocorrer em diferentes áreas do transformador. Essas perdas são classificadas em: perdas no cobre, perdas no núcleo, perdas dielétricas e perdas por dispersão [1].

As perdas ôhmicas, conhecidas como perdas por efeito joule ou perdas cobre, é um elemento fundamental para ser estudado em transformadores, surge devido à resistência elétrica dos condutores dos enrolamentos do transformador, ou seja,

quando uma corrente elétrica flui por meio desses condutores, acontece uma dissipação de energia devido à resistência do material condutor. Representam uma parcela significativa das perdas totais em transformadores e têm impacto na eficácia energética do dispositivo [2].

A quantidade de perdas ôhmicas está diretamente relacionada à resistência elétrica do condutor e ao quadrado da corrente que o atravessa, ou seja, quanto maior a resistência do condutor em questão e maior a corrente que flui, maior vai ser a dissipação de energia. A equação (1) representa o cálculo das perdas ôhmicas, sendo I a corrente em A , R o valor da resistência em Ω , e P as perdas ôhmicas em W [2].

$$P = I^2 R \quad (1)$$

Além disso, nas aplicações de transformadores de potência, onde os enrolamentos são feitos de cobre, é válido ressaltar as perdas por correntes parasitas nos condutores, são induzidas quando o condutor está exposto a um campo magnético variável. Para condutores finos utilizados nos enrolamentos, as correntes parasitas são limitadas pela resistência, isso significa que são restringidas em razão da falta de espaço ou à alta resistividade do cobre [4].

Ao analisar essas perdas é possível utilizar a equação (2). Onde P_e são as perdas por corrente parasita em W , ω a frequência angular do campo magnético variável em rad/s , t a espessura do condutores em m , B_0 a densidade de fluxo magnético eficaz no condutor em T e ρ a resistividade elétrica do material do condutor em Ωm . É válido ressaltar que é uma perda de difícil determinação devido à complexidade da distribuição do fluxo magnético disperso [4].

$$P_e = \frac{\omega^2 B_0^2 t^2}{24\rho} \quad (2)$$

Compreender as perdas ôhmicas e as perdas parasitas nos transformadores visa em otimizar o projeto, e melhorar a eficiência energética, pois estas perdas podem ter efeitos negativos no desempenho do dispositivo. Diante do exposto, o foco principal do artigo será a análise das perdas ôhmicas nos enrolamentos do transformador por meio de simulações computacionais utilizando o MEF.

III. TRANSFORMADOR ANALISADO

Este artigo analisou as perdas nos enrolamentos de um transformador de potência, apresentado na Fig. 1. O transformador analisado é trifásico e possui enrolamentos de BT e AT concêntricos, sendo a BT divididas em duas camadas. O sistema de refrigeração, importante para dissipar o calor gerado pelas perdas para o ambiente externo e garantir a operação dentro dos níveis adequados de temperatura, é do tipo óleo dirigido e água forçada (ODWF). Para isso, faz uso de bombas hidráulicas para forçar o óleo diretamente para os canais de circulação dos enrolamentos da parte ativa, além de trocadores de calor do tipo placas compactas óleo-água. A utilização de trocadores com a água como fluido

TABELA I
CARACTERÍSTICAS DO TRANSFORMADOR ANALISADO

Potência nominal	70 MVA	Tensão Nominal	230/13,8 kV
Enrolamento de AT	132 Discos/coluna	Enrolamento de BT	124 Discos/coluna
Fases	Trifásico	Refrigeração	ODWF
Perdas na AT	66,869 kW	Perdas na BT	47,915 kW
Corrente na AT	2.731,55 A	Corrente na BT	2.514,18 A

refrigerante possibilita uma maior troca térmica e são empregados, geralmente, em aplicações onde a troca para o ar ambiente não é suficiente. Essas e mais características estão expostas na Tabela II. Importante destacar que os valores de perdas apresentados foram disponibilizados pelo fabricante do transformador, obtidos em ensaios de fábrica em corrente alternada, ensaio a vazio. Esses resultados são utilizados para comparação com os resultados obtidos através das simulações na sequência do trabalho.



Fig. 1. Transformador analisado.

IV. ANÁLISE EM ELEMENTOS FINITOS

A análise em elementos finitos é amplamente utilizada na engenharia em diversas áreas. Essa técnica consiste em

modelar e resolver problemas complexos através da divisão do domínio em pequenos elementos, nos quais são aplicadas equações matemáticas que descrevem o comportamento do sistema. O domínio é discretizado em elementos menores, como tetraedros ou triângulos, permitindo uma representação precisa e detalhada do sistema, considerando as condições de contorno e propriedades materiais específicas [3].

A análise em elementos finitos realizada pelo *software Ansys Electronics®* oferece uma ferramenta confiável para simular o comportamento eletromagnético dos transformadores. Essa tecnologia permite o estudo das correntes parasitas nos enrolamentos dos transformador. A simulação requer várias etapas como ilustra a Fig. 2.

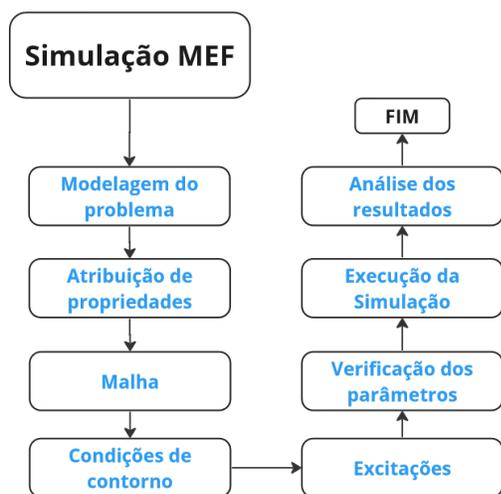


Fig. 2. Fluxograma da simulação.

O objetivo da simulação é analisar as perdas ôhmicas em uma bobina de um transformador trifásico e comparar com as perdas fornecidas pela fábrica. Importante destacar que no momento a simulação não considera os efeitos peliculares, porque a corrente está distribuída de forma homogênea nos enrolamentos. O *software* fornece a opção de simular em 3D ou 2D, o método escolhido para essa pesquisa é semi-estático 2D axis-simétrico sobre o eixo, que não considera a janela magnética. Fora realizada a configuração de duas modelagens do mesmo transformador para fins de comparação, na Fig. 3 observa-se condição de contorno *symmetry* (o tamanho da região analisada é uma representação) e a modelagem completa do transformador, com destaque para o núcleo magnético, as duas camadas da BT e a AT, em camada única. Basicamente os enrolamentos são formados por vários condutores. Devido ao aspecto construtivo e operacional, é possível analisar fazendo uma simplificação disco a disco como ilustra a modelagem de disco a disco na Fig. 4 mais simples e a de condutor a condutor mais detalhada como ilustra a Fig. 5. Os parâmetros de simulação para criação da modelagem podem ser observados na tabela II.



Fig. 3. Geometria completa da simulação do transformador abrangendo região de análise e condição de contorno.

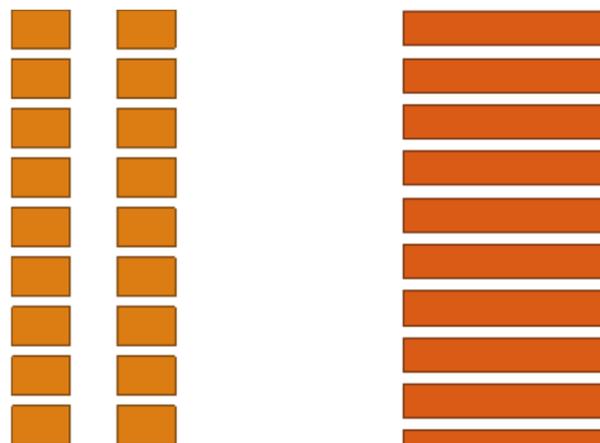


Fig. 4. Aproximação da modelagem disco a disco.

TABELA II
CARACTERÍSTICAS DO TRANSFORMADOR ESTUDADO PARA FINS DE
SIMULAÇÃO

	Discos	Espiras/Disco	Altura (mm)	Raio (mm)
BT1	124	12	2100	320
BT2	124	12	2100	376
AT	132	20	2080	454

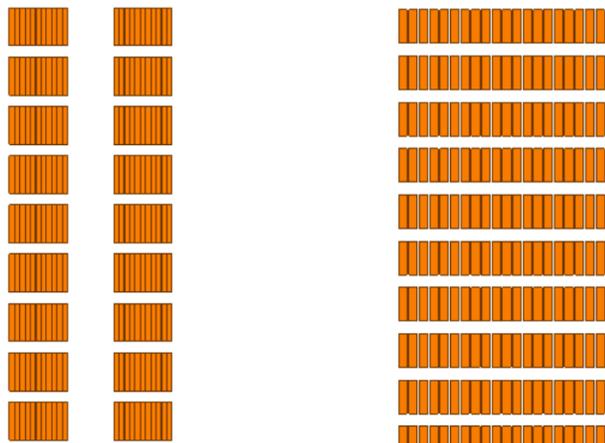


Fig. 5. Aproximação da modelagem condutor à condutor.

Na atribuição de propriedades, a condutividade do cobre, material das bobinas, foi calculado para o valor de projeto para uma temperatura de operação de 90°C. O próximo passo é definir as excitações necessárias para a simulação em questão. Basicamente, são aplicadas as correntes e seus sentidos em cada enrolamento. Para o transformador analisado neste artigo, esses dados foram disponibilizados pelo fabricante. Os valores de correntes estão expostos na Tabela I, enquanto os sentidos das mesmas estão ilustrados na Fig. 7. A camada 1 da BT possui a corrente entrando no plano, enquanto a camada 2 da BT possui a corrente saindo do plano. Já a AT é dividida no centro, com a corrente entrando no plano na parcela superior e a corrente saindo do plano na parcela inferior.

A malha original pode conter elementos grandes e uma qualidade que deixa a desejar, acarretando a erros de cálculo e de resultados. Dito isso, certifica-se que a malha seja refinada, ou seja, reduzir o tamanho e aumentar o número de elementos nas regiões onde a distribuição de corrente é mais intensa, como nas cabeceiras dos enrolamentos, para garantir uma análise precisa das perdas ôhmicas. A malha é refinada adequadamente como na Fig. 6. Vale ressaltar que, quanto maior o tamanho da malha, maior gasto computacional. O detalhamento da malha pode ser observado na tabela III, sendo $C_{m\acute{a}x}$ o comprimento máximo dos elementos.

TABELA III
DADOS ESTATÍSTICOS DA MALHA

	Num. de elementos	$C_{m\acute{a}x}$ (mm)	Valor RMS (mm)
AT	2374	0.00149	0.000894
BT	2048	0.00083	0.00054

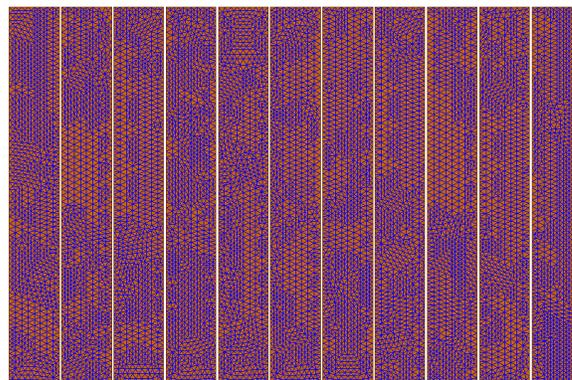


Fig. 6. Malha refinada corretamente.

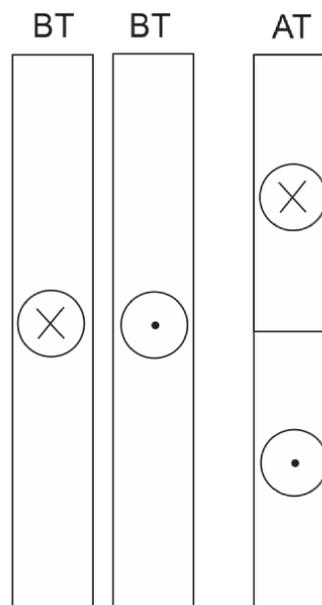


Fig. 7. Sentido das correntes.

V. RESULTADOS

Dos resultados obtidos após a conclusão das simulações, é possível perceber que o tempo de execução de cada simulação varia com a quantidade de detalhes, a execução da simulação de condutor a condutor foi finalizada em aproximadamente 1h e 30min e a de disco a disco em 30min. Através da simulação, foi possível então obter os valores das perdas ôhmicas, observado na tabela IV.

TABELA IV
TABELA COMPARATIVA DAS PERDAS

Perdas	Valor
Disco a disco	108.431 kW
Condutor a condutor	116.461 kW
Fábrica	114.783 kW

Através da tabela IV é possível calcular o erro relativo das duas simulações em comparação com o valor de ensaio e exibir na tabela V, por meio da equação (3), sendo P_{Ensaio} o valor de ensaio e P_{sim} o valor obtido na simulação. Segundo, uma vez que se obteve os valores e os erros, percebe-se que a modelagem condutor a condutor ficou mais próxima dos valores de fábrica. Logo, percebe-se que de fato a disco a disco simplifica um pouco mais a análise, levando a resultados mais distantes da prática. Um possível motivo para a diferença das perdas totais com o valor do ensaio pode ser a simulação axissimétrica que não considera a janela magnética (que na prática pode influenciar nas perdas totais), e também que a malha ainda não seja refinada o suficiente. São questões que serão investigadas na sequência do trabalho.

$$\Delta P = \frac{P_{ensaio} - P_{sim}}{P_{ensaio}} \quad (3)$$

TABELA V
TABELA COMPARATIVA DE ERROS

Erro	Valor
Disco a disco	5.53%
Condutor a condutor	1.46%

Plotando as linhas de fluxo magnético, observa-se as linhas da simulação de disco a disco na Fig. 8 e da simulação de condutor a condutor na Fig. 9, e onde há maior concentração de linhas é o local onde ocorrerá maiores perdas parasitas devido ao fluxo disperso. Ao analisar a Fig. 8 e a Fig. 9 observa-se que as linhas de fluxo magnético são muito semelhantes.

VI. CONCLUSÕES

Quando trata-se de eficiência, ao falar de simulações computacionais, analisa-se o tempo de simulação. Quanto maior é o tempo para realizar uma simulação, maior é o gasto computacional. Com os resultados é possível observar que o erro relativo é considerável, ou seja, em gasto computacional é viável uma simulação simples como a de disco a disco, pois obtém resultados próximos com um erro de 5.53%. Porém se existir a necessidade de um resultado extremamente preciso e não haja importância com gastos computacionais, a simulação de maior detalhamento é preferível, uma vez que ela reduz o erro relativo em 1.46%.

É válido ressaltar que este trabalho está inserido em um contexto maior, faz parte de um projeto de pesquisa e desenvolvimento. As pesquisas prosseguem buscando aprimorar os métodos de simulação computacional, aspirando não apenas resultados mais precisos, mas também um melhor aproveitamento dos recursos computacionais disponíveis.

Logo, uma vez que essa metodologia fora consolidada e essas análises realizadas, pretende-se dar continuidade ao estudo visando determinar e analisar a distribuição de perdas nos enrolamentos causadas pelas correntes parasitas devido ao fluxo disperso, considerando os efeitos peliculares.

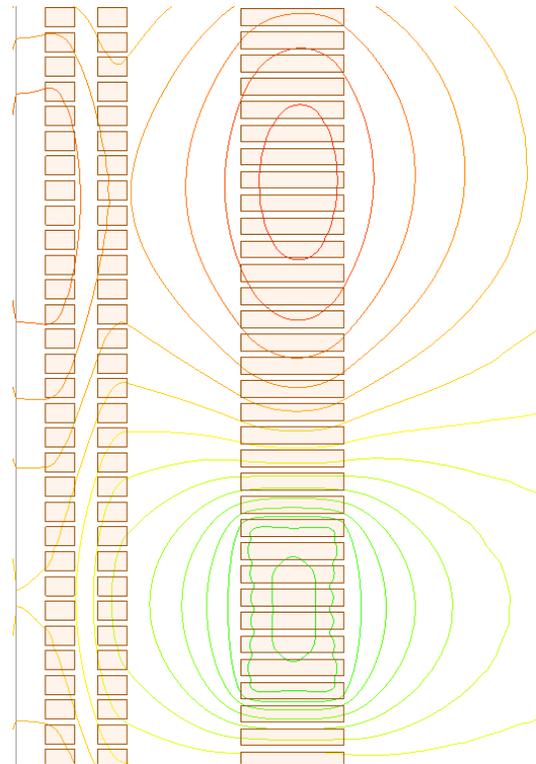


Fig. 8. Linhas de fluxo magnético na simulação de disco a disco.

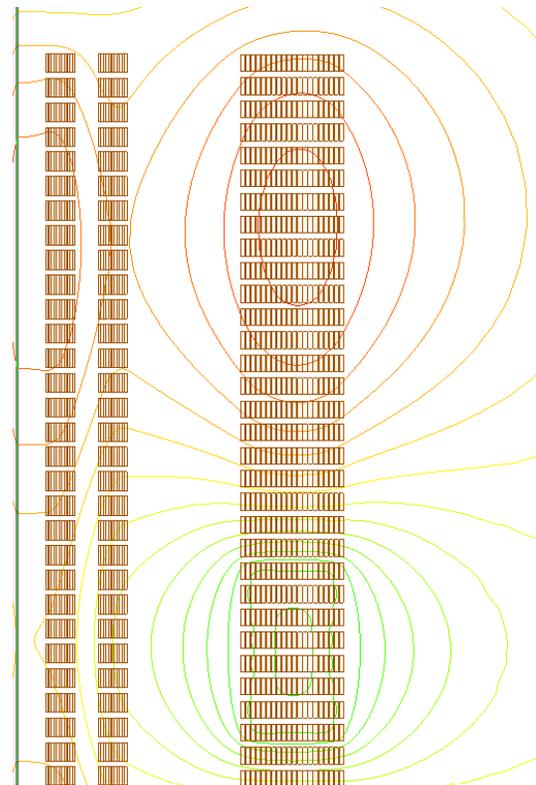


Fig. 9. Linhas de fluxo magnético na simulação de condutor a condutor.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES/PROEX) – Código de Financiamento 001. Os autores também gostariam de agradecer à CPFL Energia - Transmissão (Projeto de P&D – PD-05785-2119/2021), Universidade Federal de Santa Maria – UFSM, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFSM, Instituto de Redes Inteligentes e ao Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia – Geração Distribuída pelo apoio técnico e financeiro deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- [1] RIES, Walter. Transformadores – Fundamentos para o Projeto e Cálculo. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2007.
- [2] J. Winders, Power Transformers. CRC Press, 2002.
- [3] W.-C. Chang and C.-C. Kuo, "A novel excitation approach for power transformer simulation based on finite element analysis", Appl. Sci., vol. 11, no. 21, pp. 10334, Nov. 2021.
- [4] S. V. Kulkarni and S.A. Khaparde, Transformer Engineering. CRC Press, 2004.