



XXIV SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

CB/GTM/11

22 a 25 de outubro de 2017

Curitiba - PR

GRUPO - XIII

GRUPO DE ESTUDO DE TRANSFORMADORES, REATORES, MATERIAIS E TECNOLOGIAS EMERGENTES – GTM

UTILIZAÇÃO DO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS PARA PROJETO ELETROMAGNÉTICO DE TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA EM CONDIÇÕES DE SOBRECARGA CONFORME NBR 5356-7

Odirlan Iaronka (*)

Luiz Fernando de Oliveira

Diogo Fernando Harmel

WEG S.A. – Unidade Transmissão e Distribuição

RESUMO

Segundo a NBR 5356-7 o transformador deve suportar ciclos de carga de 120 e 140 % com duração de 240 e 30 minutos, respectivamente, sem comprometimento de sua vida útil de 35 anos. Entretanto, quando submetidos à tal condição de sobrecarga o transformador pode apresentar elevações de temperatura em regiões com potencial de degradar prematuramente suas condições nominais para funcionamento. Este trabalho almeja, através do uso de Simulações Numéricas Computacionais com base no Método de Elementos Finitos, identificar e promover ações específicas para que durante o projeto seja possível contornar possíveis pontos de aquecimentos oriundos das condições de sobrecarga.

PALAVRAS-CHAVE

Transformador, Sobrecarga em transformadores, Simulação Numérica Computacional, Método Elementos Finitos, Perdas parasitas.

1.0 - INTRODUÇÃO

Transformadores com sistema de resfriamento baseado em óleo isolante terão como orientação para operação em diferentes condições de carga a norma NBR 5356-7 – “Guia de carregamento para transformadores de potência imersos em óleo”, que será publicada em breve sendo baseada na IEC 60076-7 e que apresenta o “Anexo H – Ensaio de elevação de temperatura de transformadores em sobrecarga a ser aplicado nos transformadores da rede básica”. A proposta da parte 7 dessa norma NBR 5356 é identificar contratempos decorrentes de condições de sobrecarga em transformadores e determinar ações importantes para serem tomadas na especificação, projeto e fabricação.

Durante a operação dos transformadores são gerados intrinsecamente campos magnéticos dispersos da parte ativa, mais especificamente dos enrolamentos e dos condutores percorridos por corrente. A amplitude do campo magnético disperso depende fundamentalmente da amplitude da corrente e consequentemente da condição de carga do transformador. Quando tal campo magnético disperso atinge anteparos metálicos são induzidas correntes parasitas e, devido ao efeito joule, originam um aquecimento localizado [1] e [2].

Esse aquecimento pode comprometer o funcionamento do equipamento em relação à problemas dielétricos que surgem em função da degradação do papel isolante e do óleo com a formação de bolhas de gases dissolvidos no próprio fluido isolante. Ainda pode surgir complicações de natureza mecânica devido a dilatação e suportabilidade térmica dos materiais utilizados na fabricação do equipamento. Por isso a determinação do comportamento magnético e o cálculo das perdas por correntes parasitas em partes metálicas de transformadores são essenciais para garantir condições satisfatórias de operação [3], [4], [5] e [6].

Para apresentação da metodologia deste trabalho será utilizado um estudo de caso de um autotransformador monofásico com potência nominal de 265 MVA e tensão de 550/460 kV, operando na frequência industrial de 60 Hz com impedância nominal de $Z=12,9\%$, conforme modelo 3D do projeto mecânico mostrado na Figura 1.

(*) R. Dr. Pedro Zimmermann, n° 6751 – WEG Equipamentos Elétricos – CEP 89066-000 – Blumenau, SC, Brasil
Tel.: (+55 47) 3276-5741 – Fax: (+55 47) 3276-5911 – E-mail: odirlan1@weg.net

Esse equipamento tem como característica magnética um núcleo com duas colunas, sendo que uma tem o enrolamento principal e a coluna de retorno com o enrolamento auxiliar. Essa peculiaridade tem uma excelente relação peso/potência, entretanto a condição para operação com campo disperso deve ser analisada criteriosamente devido a concentração de todo o fluxo magnético disperso da máquina em um único enrolamento e uma única região do núcleo, ferragens da parte ativa e tanque [6]. A concentração do fluxo magnético disperso eleva consideravelmente a possibilidade de ocorrer pontos de não conformidade devido às perdas geradas por correntes parasitas nas partes metálicas e consequente aquecimento localizado nos enrolamentos, ferragens de fixação e tanque. Essa condição exige a aplicação de blindagens eletromagnéticas para controlar as perdas e consequente elevação de temperatura do equipamento. Utilizou-se do Método de Elementos Finitos (MEF) e softwares de Simulação Numéricas Computacionais para concepção e validação do projeto do transformador com as respectivas blindagens.

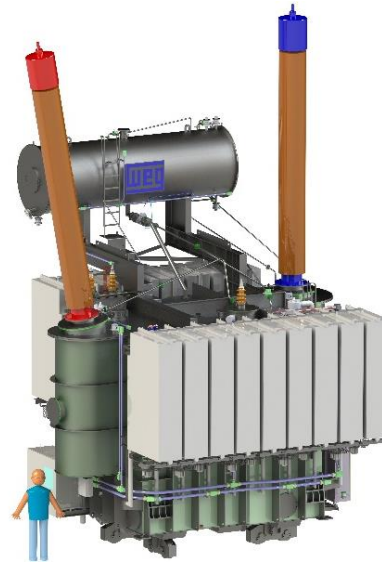


Figura 1 - Modelo 3D do projeto do transformador desenvolvido

2.0 - SIMULAÇÕES NUMÉRICAS COMPUTACIONAIS BASEADAS NO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

Para calcular as perdas envolvidas no funcionamento do equipamento utilizou-se o software de análises numéricas Ansys Maxwell® que utiliza o Método de Elementos Finitos (MEF) para simular os problemas de campos eletromagnéticos [7], determinados em um domínio específico, com condições de contorno e valores iniciais definidos. O MEF subdivide um domínio contínuo em um grupo de finitos elementos denominado malha, mantendo suas propriedades.

2.1 O Método de Elementos Finitos para cálculo de perdas

Em cada elemento da malha são geradas as equações diferenciais que descrevem o comportamento eletromagnético, sendo representadas por polinômios de segunda ordem. A solução do problema é fundamentada nas equações de Maxwell [8].

O módulo de solução utilizado no software Maxwell® foi o *3D eddy current solver* [7]. Esse módulo resolve os problemas eletromagnéticos no domínio da frequência, usando a formulação $\vec{T} - \Omega$.

Nas regiões não condutoras a intensidade do campo magnético é dada pela Equação (1). Em regiões com condutividade não nula, onde são calculadas as correntes parasitas, a intensidade do campo magnético é dada pela Equação (2).

$$\vec{H} = \vec{H}_p + \nabla \varphi \quad (1) \quad \vec{H} = \vec{H}_p + \nabla \varphi + \vec{T} \quad (2)$$

onde \vec{T} é o vetor de potencial elétrico calculado através da aresta de cada elemento.

A solução dessas equações é o campo magnético definido por $\vec{H}(x, y, z, t)$ e é calculado pela Equação (3). Nos condutores que estão sujeitos aos efeitos das correntes parasitas, o campo $\vec{H}(t)$ é calculado diretamente através das fontes de correntes e campos magnéticos aplicados. Em elementos não condutores o $\vec{H}(t)$ é calculado através do potencial escalar magnético Equação (4).

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\sigma + j\omega\epsilon} \nabla \times \vec{H} \right) = j\omega\mu \vec{H} \quad (3) \quad \nabla \cdot (\mu \nabla \varphi) = 0 \quad (4)$$

Com base no campo magnético calculado $\vec{H}(\omega)$ são determinadas as correntes induzidas e com isso as perdas nas partes metálicas através da Equação (5).

onde:

$$P = \int_{Vol} \frac{\vec{J} \cdot \vec{J}^*}{2\sigma} dVol \quad (5)$$

P : é o valor de perdas calculadas [W];
 \vec{J} : é a densidade de corrente [A/m²];
 \vec{J}^* : é o conjugado complexo da densidade de corrente [A/m²];
 σ : é a condutividade elétrica do material [S/m].

Considerou-se na análise numérica o fenômeno da profundidade de penetração de campo em materiais com características elétricas e magnéticas [2]. A profundidade de penetração de campo depende das características dos materiais da análise e da frequência, sendo definida pela Equação (6).

onde:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \sigma \mu_0 \mu_r}} \quad (6)$$

δ : é a profundidade de penetração de campo magnético [m];
 ω : é a frequência angular definida para análise [rad/s];
 σ : é a condutividade elétrica do material [S/m];
 μ_0 : é a permeabilidade do vácuo [$4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m];
 μ_r : é a permeabilidade relativa do material.

2.2 Método para controle das perdas em função do campo magnético incidente

Para controle dos efeitos do campo magnético disperso são utilizados métodos como: substituição do material e utilização de blindagens eletromagnéticas. A substituição do material utilizado consiste em utilizar um aço com características magnéticas adequadas, ou seja, com permeabilidade magnética relativa próxima ao valor unitário [9]. Porém, muitas vezes a substituição do aço não resolve o problema de perdas localizadas de forma eficaz devido sua característica de condutividade elétrica. Para contornar tal situação utilizam-se blindagens que redirecionam (*shunt*) ou repelem (*shield*) o campo magnético de regiões com potencial de causar aquecimento [10].

Conceitualmente, utilizar blindagem magnética *shunt* refere-se a aplicar um material de elevada permeabilidade magnética para desviar o campo magnético de regiões críticas, servindo como um caminho de menor relutância para o fluxo disperso retornar para os enrolamentos [11].

A blindagem *shield* consiste em aplicar um material de elevada condutividade elétrica para repelir o campo magnético de determinada região. O campo magnético induz corrente nessa blindagem e consequentemente é gerado um campo magnético oposto ao que o gerou. Esse campo magnético oriundo da corrente induzida na blindagem atenua o campo magnético disperso na região de interesse que dispõe de potencial de causar perdas parasitas [12], [13] e [14].

3.0 - SOBRECARGA E CONSEQUENTE FLUXO MAGNÉTICO DISPERSO

O campo magnético disperso em função da corrente de carga, também chamado fluxo de dispersão, ocorre em função do acoplamento magnético não ideal entre os enrolamentos, ou seja, o fluxo magnético produzido pelos enrolamentos não está totalmente concentrado no núcleo ferromagnético. A quantidade de fluxo de dispersão depende basicamente das características construtivas dos enrolamentos (valor de impedância de projeto) e da condição de carga do mesmo [10].

Os pontos mais susceptíveis aos riscos em decorrência de sobrecargas específicas e consequente aquecimentos localizados podem ser listados como: enrolamentos, tanque, ligações, ferragens da parte ativa, núcleo, elementos de fixação, isolamento celulósico e óleo isolante. Ainda cabe nessa lista, embora não sejam componentes determinantes da vida útil do equipamento: material utilizado na vedação de tampas, buchas, janelas de inspeção e a pintura interna e externa do equipamento.

O equipamento objeto de estudo deste trabalho foi projetado para suportar os ensaios de elevação de temperatura conforme determinado no anexo H da norma NBR 5356-7. Os principais pontos de melhoria de projeto foram:

3.1 Enrolamentos e ligação

Com a corrente durante uma sobrecarga, há um aquecimento extra dos enrolamentos causado por correntes parasitas induzidas pelas componentes axial e radial do campo magnético incidente nos enrolamentos. Esse mesmo efeito ocorre nas ligações, regulações, comutadores, transformadores de corrente e buchas de saída que também estão expostos ao efeito do campo magnético oriundo do aumento da corrente de carga. Devido a configuração da componente radial do fluxo disperso na cabeceira dos enrolamentos a parcela de perdas parasitas radiais se torna bastante significativa, com potencial de gerar um aquecimento excessivo e uma região com provável geração de bolhas de gás dissolvidos no óleo. Na Figura 2 é mostrado as linhas equipotenciais do vetor potencial magnético e a distribuição das perdas radiais na cabeceira superior do enrolamento calculado com o software WEG de cálculo de campos e perdas. Percebe-se que as perdas radiais estão concentradas exatamente na região onde o campo magnético incidente tem a componente praticamente radial.

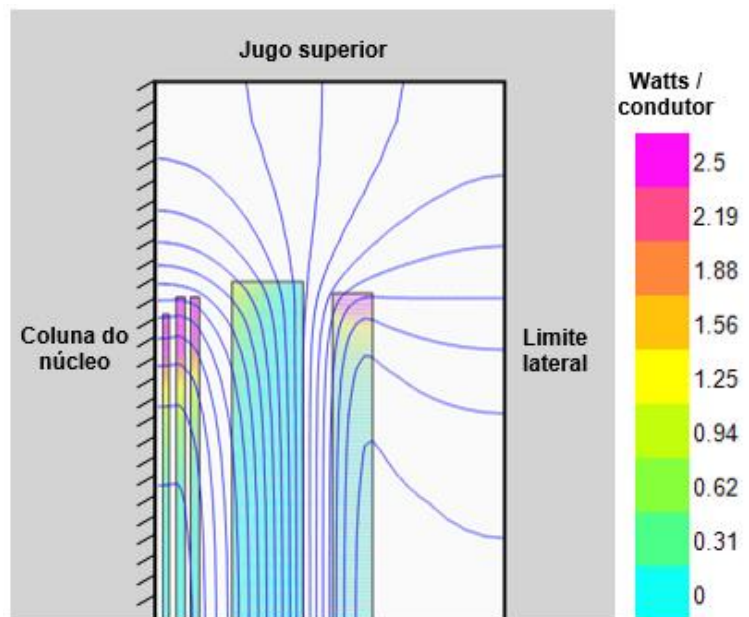


Figura 2 – Linhas equipotenciais do vetor potencial magnético e a distribuição das perdas radiais na cabeceira do enrolamento

3.2 Núcleo ferromagnético

Em relação ao campo disperso dos enrolamentos, o núcleo ferromagnético deve ser dimensionado considerando a parcela do fluxo disperso que retorna para o núcleo, conforme Figura 3. Portanto, o fluxo total no núcleo do equipamento será a soma do fluxo nominal que surge em função da tensão de operação e do fluxo disperso dos enrolamentos. Para dimensionamento da seção transversal do núcleo o valor total de fluxo deve ser levado em consideração, entretanto, essa adição deve ser analisada cuidadosamente uma vez que o fluxo nominal normalmente está defasado do fluxo disperso. A defasagem desses fluxos depende da carga do equipamento e seu fator de potência e pode determinar a saturação do núcleo caso o campo disperso seja elevado.

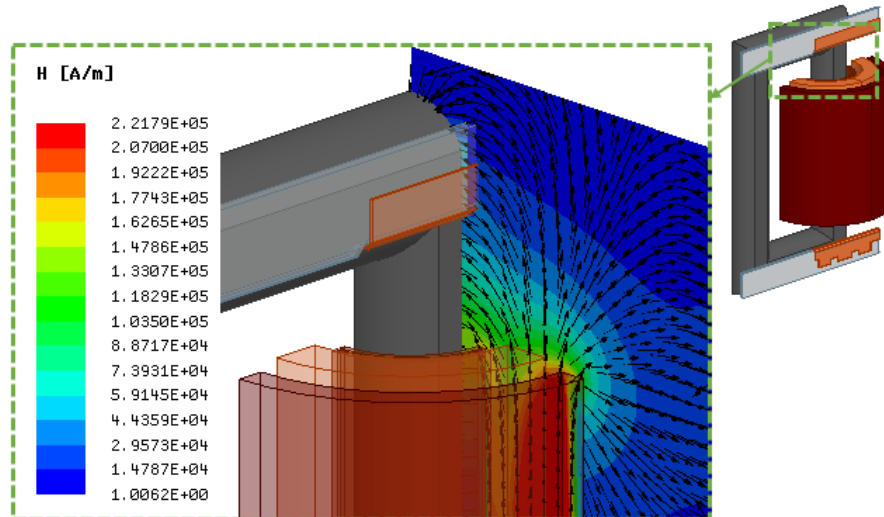


Figura 3 – Distribuição e vetores do campo magnético no plano central do enrolamento e núcleo

Na Figura 4 são mostradas as superfícies equipotenciais do campo magnético disperso na cabeceira dos enrolamentos. Percebe-se que o campo magnético disperso atinge, além dos próprios enrolamentos, o núcleo ferromagnético e as ferragens de fixação. O fluxo de dispersão tem o caminho magnético definido entre as cabeceiras dos enrolamentos. Esse caminho pode ser fechado pelo núcleo ou pelo tanque, conforme Figura 5 que mostra a distribuição do campo magnético disperso, indicando que parte do fluxo retorna pelo núcleo e parte retorna pela blindagem/tanque. A quantidade de fluxo de retorno em cada caminho depende das características do equipamento, como distância entre enrolamentos e o núcleo e presença de blindagens de aço-silício no tanque.

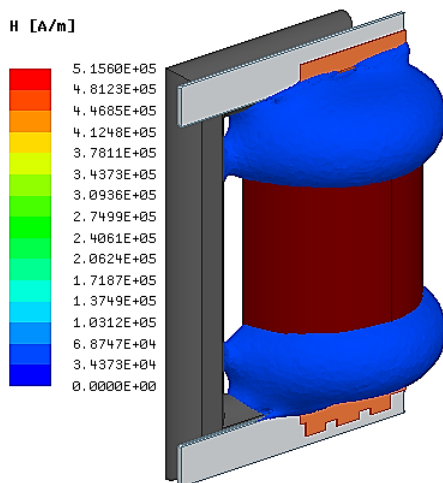


Figura 4 - Superfícies equipotenciais do campo magnético disperso da cabeceira dos enrolamentos

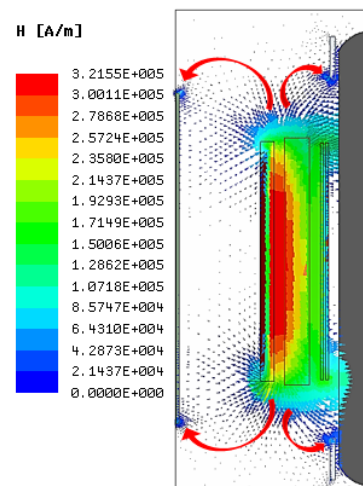
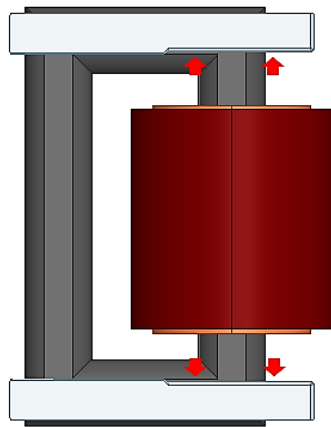


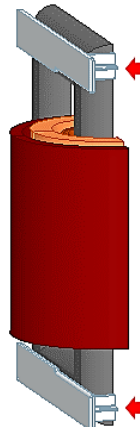
Figura 5 - Vetores da distribuição do campo magnético disperso dos enrolamentos

3.3 Ferragens de fixação da parte ativa

O fluxo disperso dos enrolamentos que atinge o núcleo passa pelas ferragens de fixação da parte ativa [15]. Mesmo com uma grande parcela do campo magnético disperso retornando pelo tanque/blindagem, ainda há uma significativa parcela que atinge as ferragens do núcleo, as quais são fabricadas normalmente com aço-carbono, um material com propriedades ferromagnéticas e condutividade elétrica considerável. A região mais susceptível a esses efeitos está localizada nas extremidades do enrolamento. A estrutura de fixação do núcleo, viga e travessa lateral, foram projetadas objetivando minimizar a área susceptível ao campo magnético disperso, conforme Figura 6.



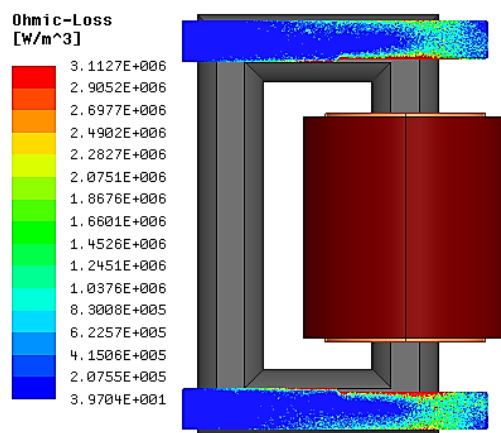
(a) - Rebaixo nas ferragens na região dos enrolamentos



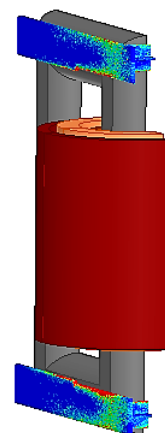
(b) - Travessa lateral com área minimizada

Figura 6 – Otimização das ferragens para diminuição da área de incidência do campo magnético disperso

Realizou-se o estudo com base no MEF para cálculo de perdas que se distribuíram conforme Figura 7.



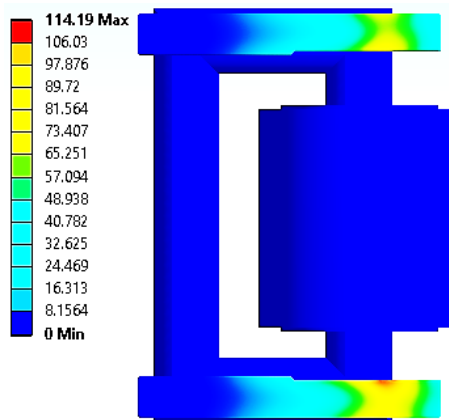
(a) – Distribuição de perdas nas ferragens da parte ativa do equipamento



(b) – Vista da travessa lateral

Figura 7 – Distribuição de perdas devido o campo magnético disperso dos enrolamentos

Com o valor de perdas calculado pela simulação numérica eletromagnética foi possível realizar a análise do comportamento térmico do modelo proposto através do software de análises térmicas em regime permanente Ansys Mechanical®. O modelo geométrico e as perdas calculadas foram exportadas para o software de análises térmicas que, com coeficientes típicos de dissipação de calor por convecção e radiação, determinou a elevação de temperatura no domínio analisado em função das perdas por correntes parasitas, mostrada na Figura 8. Os coeficientes de convecção e radiação de calor são calculados em função das propriedades do fluido, tipo de escoamento, temperatura e das características da superfície [13]. Utilizou-se um coeficiente de dissipação para o óleo isolante de 120 W/m² e de 5 W/m² para o ar externo ao tanque.



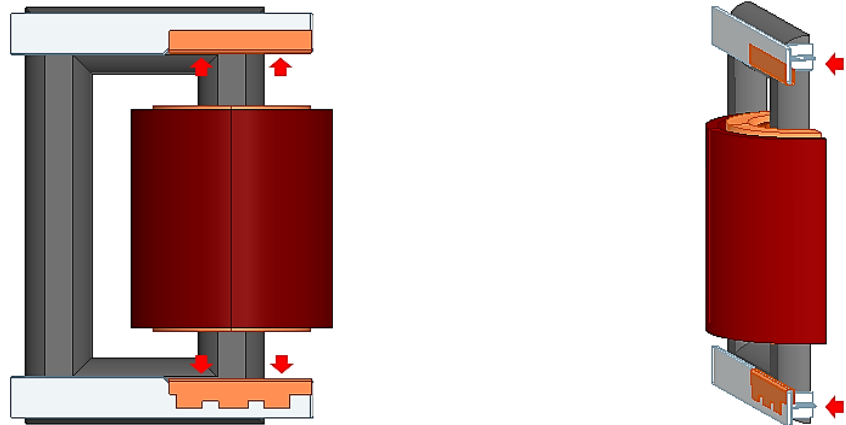
(a) - Distribuição de temperatura nas ferragens da parte ativa do equipamento



(b) - Vista da travessa lateral

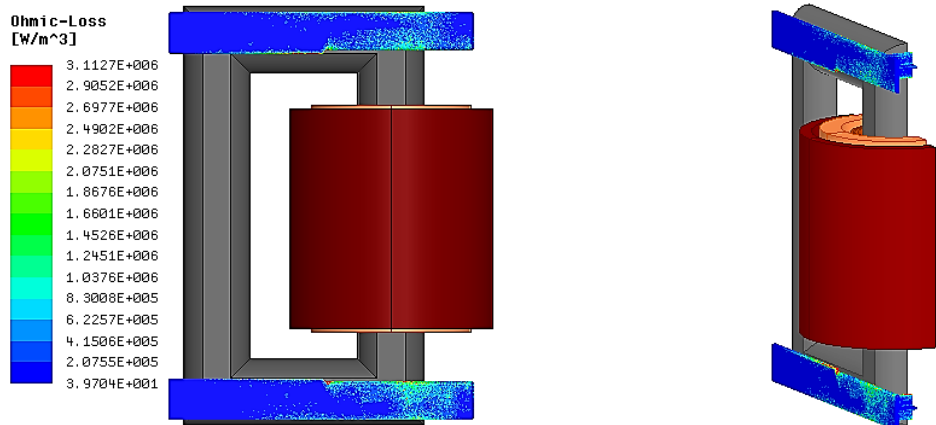
Figura 8 – Elevação de temperatura devido a incidência do campo magnético disperso dos enrolamentos [C°]

Porém devido a extrema intensidade de campo magnético disperso, a adequação das ferragens na região mais próxima dos enrolamentos não foi eficaz para atenuar satisfatoriamente a perdas. Considerando o resultado de elevação de temperatura da Figura 8, utilizou-se de blindagens de cobre na armadura para repelir o campo magnético disperso e controlar a elevação de temperatura, conforme Figura 9.



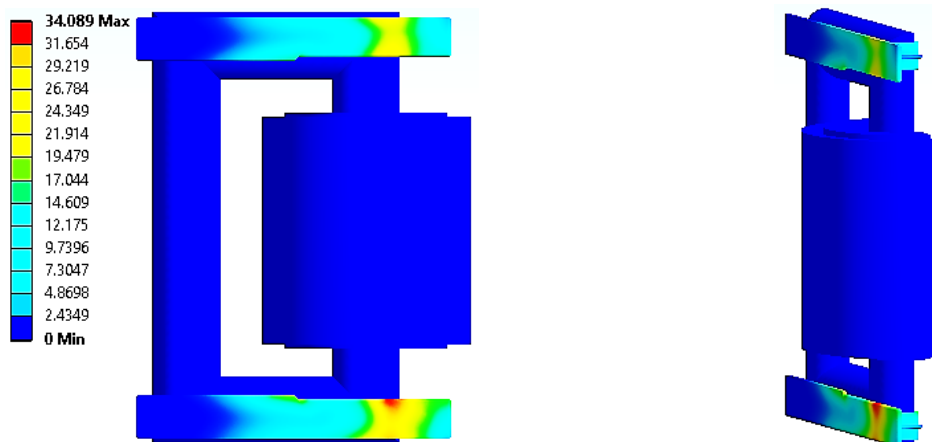
(a) – Inserção de blindagem de cobre nas ferragens de fixação (b) - Vista da travessa lateral
Figura 9 – Blindagens nas ferragens para diminuição da incidência do campo magnético disperso

Com a utilização da blindagem de cobre, a nova distribuição de perdas se mostrou conforme Figura 10.



(a) - Distribuição de perdas nas ferragens da parte ativa do equipamento (b) - Vista da travessa lateral
Figura 10 – Distribuição de perdas devido o campo magnético disperso dos enrolamentos

Com o valor de perdas calculado pela simulação numérica eletromagnética foi possível realizar a análise do comportamento térmico, conforme elevação de temperatura devido perdas parasitas mostrada na Figura 11. Observa-se uma diminuição de temperatura de aproximadamente 70 % com a utilização de blindagens.



(a) - Distribuição de temperatura nas ferragens da parte ativa do equipamento (b) - Vista da travessa lateral
Figura 11 – Elevação de temperatura devido a incidência do campo magnético disperso dos enrolamentos [$^{\circ}C$]

3.4 Perdas no tanque do equipamento

A mesma condição severa que as ferragens de fixação estão expostas é aplicada ao tanque do equipamento. O retorno do campo magnético que ocorre pelo tanque e tem uma amplitude extremamente elevada neste equipamento monofásico de potência, fazendo com que a espessura das blindagens de aço silício da parede do tanque sejam substancialmente grandes (em torno de 40 mm). Utilizou-se então blindagens de aço-silício nas paredes do tanque na forma de pacotes empilhados para conduzir o campo magnético disperso e proteger o tanque das perdas parasitas [16]. A configuração das blindagens na parede do tanque foi realizada conforme Figura 12, a qual mostra a geometria do tanque, parte ativa, ferragens e blindagens com condição de simetria para simplificação computacional da análise numérica.

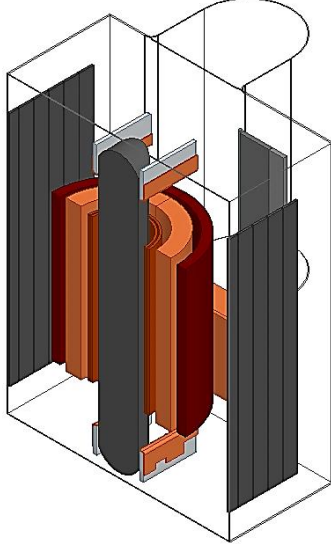


Figura 12 - Blindagens com pacotes de aço silício na parede do tanque

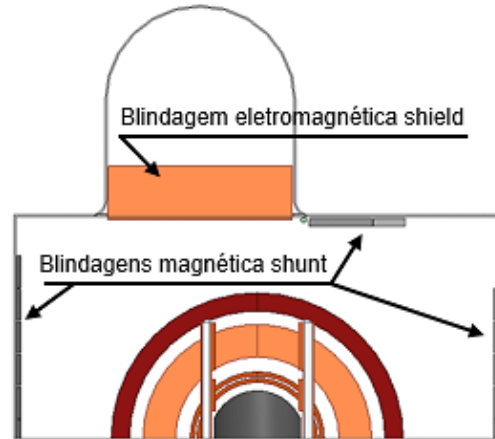


Figura 13 – Uso de blindagem eletromagnética shield de cobre no caneco de saída de alta tensão

Na Figura 13 é mostrada a vista superior do tanque do transformador com as blindagens magnéticas de aço silício nas paredes do tanque circundando o enrolamento principal. Na parede onde foi posicionado o caneco de saída de alta tensão há a necessidade de uso de blindagem magnética, porém não há possibilidade de colocar blindagem devido a geometria do caneco. Deste modo fez-se uso de blindagem eletromagnética de cobre, para proteger essa região do tanque de um possível aquecimento demasiado, conforme Figura 13. Com as blindagens de aço silício no tanque e de cobre no caneco de saída de alta tensão as perdas se distribuíram conforme Figura 14 e consequentemente a elevação de temperatura se distribuiu conforme Figura 15. O valor máximo de elevação de temperatura observado na Figura 15 é dado nas extremidades das blindagens de aço silício pois o fluxo magnético disperso que é conduzido pelas blindagens se concentra neste ponto.

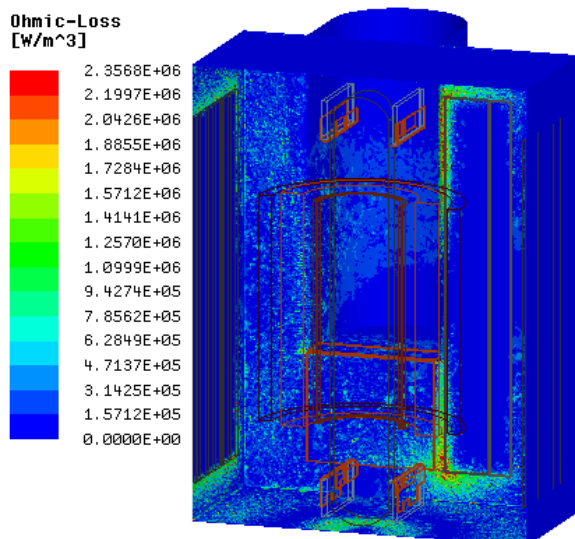


Figura 14 – Distribuição de perdas com as blindagens de aço silício nas paredes do tanque

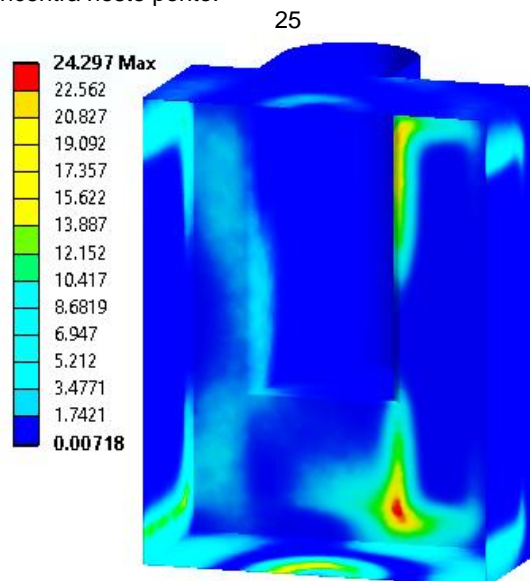


Figura 15 – Elevação de temperatura nas paredes do tanque e caneco de saída de alta tensão [C°]

4.0 - CONCLUSÃO

Transformadores com elevados níveis de campo magnético disperso em decorrência de sobrecargas específicas devem ser cuidadosamente projetados e analisados, uma vez que demandam a utilização de blindagens eletromagnéticas para controle de perdas e temperatura das partes metálicas susceptíveis a tal campo. A elevação demasiada de temperatura no equipamento pode causar degradação do sistema de isolamento celulósico, formação de gases dissolvidos no óleo e ainda uma degradação prematura de componentes estruturais do tanque e parte ativa.

O transformador objeto deste trabalho terá sua operação na rede básica do Sistema Interligado Nacional – SIN, por isso foi projetado para suportar as determinações de sobrecarga do Anexo H da NBR 5356-7 que será publicado em breve. O equipamento sob análise se tratava de um autotransformador de potência com uma única coluna de núcleo enrolada. Tal característica construtiva majora potencialmente os contratempos causados pelo campo disperso, uma vez que a quantidade total do fluxo disperso ocorre em uma única região da parte ativa do equipamento.

Para contornar as não conformidades oriundas das condições de sobrecarga do equipamento utilizou-se de blindagens magnéticas de aço silício e blindagens eletromagnéticas de cobre. Nas ferragens de fixação do núcleo utilizou-se de blindagens de cobre, ou seja, inseriu-se um material com elevada condutividade elétrica para repelir o campo magnético disperso que causaria perdas por correntes induzidas no aço. No tanque do equipamento utilizou-se a inserção de material com elevada permeabilidade magnética para conduzir o fluxo magnético disperso das cabeceiras dos enrolamentos da parte ativa que entraria em contato com o tanque. A adoção do aço-silício é preferível devido sua característica elétrica de laminação e baixa condutividade que reduzem as correntes induzidas. Tal atributo faz com que os pacotes de aço-silício conduzam o campo magnético disperso, protegendo o tanque do equipamento, sem causar praticamente nenhum nível de perdas adicionais na blindagem.

Os resultados de simulação mostram que a metodologia de projeto eletromagnético de transformador considerando as condições de sobrecarga normalizadas se mostrou eficiente. Com a fabricação do equipamento, que se encontra em andamento fabril, o mesmo será submetido aos ensaios elétricos de rotina e ainda ao ensaio de aquecimento com as sobrecargas determinadas em norma para validação do projeto e do estudo.

5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [R. S. Girgis, D. A. Yannucci e J. B. Templeton, "Performance Parameters Of Power Transformers Using 3d Magnetic Field Calculations," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-103, No. 9, Setembro 1984.
- 1] S. V. Kulkarni e S. A. Khaparde, "Stray Loss Evaluation in Power Transformers - A Review," *IEEE PES Winter Meeting 2000, Singapore, Paper No. 0-7803-5938-0/00*, 2000.
- [Turowski, Janusz e Marek Turowski, "Engineering Electrodynamics: Electric Machine, Transformer, and Power Equipment Design," *CRC Press*, 2014.
- 3] L. W. Long, "Overloading and loading limitation of large transformers," *CIGRE, Electra*, No 86, pp. 33-51, 193.
- 4] J. Turowski, "Losses and local overheating caused by stray fields," *Scientific Archives of the Technical University of Lodz "Elektryka"*, No. 11, pp. 89-179, 1963.
- 5] A. Pelikant e J. Turowski, "Field and Power Loss Distribution on Covers of Power Transformers," *COMPEL*, 17, No. 1/2/3, pp. 307-312, 1998.
- 6] ANSYS: Engineering Analysis System, *User's Manual*. Swanson Analysis Systems, Incorporated, 2017.
- 7] Yee e S. Kane, "Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media," *IEEE Trans. Antennas Propag* 14.3, pp. 302-307, 1966.
- 8] A. P. Tschiptschin e C. E. Pinedo, "Estrutura e propriedades do aço inoxidável austenítico AISI 316L Grau ASTM F138 nitretado sob plasma à baixa temperatura," *Rem: Revista Escola de Minas* 63.1, pp. 137-141, 2010.
- 9] K. Karsai, D. Kerenyi e L. Kiss, "Large Power Transformers," *New York, Elsevier*, pp. 146-186, 1987.
- 10] J. C. Olivares-Galván, P. S. Georgilakis e R. Ocon-Valdez, "A Review of Transformer Losses," *Electric Power Components and Systems*, 37, pp. 1046-1062, 2009.
- 11] Kulkarni, V. Shrikrishna e S. A. Khaparde, "Transformer engineering: design and practice," Vol. 25. *CRC*

12] Press, 2004.

[S. V. Kulkarni, J. C. Olivares, R. Escarela-Perez, V. K. Lakhiani e J. Turowski, "Evaluation of Eddy Current
13] Losses in the Cover Plates of Distribution Transformers," *IEEE Proc. Science, Measurement and Technology*,
151, N° 5, pp. 313-331, 2004.

[ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, "NBR 5356-2 - Transformadores de Potência – Parte 2:
14] Aquecimento". 2007.

[Z. Janic, V. Zvonimir e S. Zeljko, "Stray Losses in Transformer Clamping Plate," *XVII International
15] Conference on Electrical Machines, At Chania, Greece*, 2006.

[O. Iaronka e L. F. Oliveira, "Projeto, análise e simulação de blindagem eletromagnética para tanque de
16] transformador de potência sob diferentes condições de carga," *VIII Workspot - International Workshop on
Power Transformers, Equipment, Substations and Materials*, 2016.

6.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Odirlan Iaronka nasceu em Casca-RS, Brasil em 1990. Graduiu-se em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) em 2014. Atualmente cursa Mestrado pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) na área de Eletromagnetismo aplicado em Engenharia Elétrica no GRUCAD - Grupo de Concepção e Análise de Dispositivos Eletromagnéticos. Exerce a função de Engenheiro de Aplicação e Pesquisador no setor de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação da empresa WEG - Equipamentos Elétricos S.A. na Unidade de Transmissão e Distribuição de Energia. Atua na área de Simulações Numéricas Computacionais de campos eletromagnéticos e no desenvolvimento de ferramentas de análise e otimização do projeto eletromagnético e térmico de transformadores e reatores de potência, transformadores seco e chaves seccionadoras.



Luiz Fernando de Oliveira nasceu em Blumenau-SC, Brasil em 1988. Graduiu-se em Engenharia Elétrica na Universidade Regional de Blumenau (FURB) em 2013 e atualmente cursa mestrado também em Engenharia Elétrica na UFSC (GRUCAD). Trabalha na WEG T&D desde 2007, onde passou pelas áreas de produção e técnica, entre 2009 e 2013 trabalhou diretamente com cálculo e dimensionamento de transformadores e desde 2013 exerce atividades no departamento de pesquisa e desenvolvimento com foco em pesquisa, simulações numéricas e desenvolvimento de softwares para engenharia. É membro do Cigré-Brasil.



Diogo Fernando Harmel nascido em São Bento do Sul, Santa Catarina, em 05 de setembro de 1976. Mestre em Engenharia Elétrica (2013), Pós-graduação em Transformadores de Potência (2001) e graduação em Engenharia Elétrica pela Fundação Universidade Regional de Blumenau (1999). Atua desde 1998 na empresa WEG T&D, Unidade de Blumenau, no setor de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação (PD&I). Atua na área de inovação tecnológica da WEG T&D, como coordenador das atividades de Pesquisa e Desenvolvimento, focado em pesquisas envolvendo simulações numéricas aplicadas a transformadores de potência.