

Study of the Effectiveness of Magnetic Shielding for Compact Power Transformers Used on Mobile Applications

K. Salvador, D. Harmel, L. de Oliveira, S. Cabral, and H. Almaguer

Abstract—This paper presents the performance analysis of a new type of leakage flux collector, designed to act as magnetic shielding in compact power transformers for mobile applications. The analysis was made through 3-D finite-element computer program for modeling and simulating the operation of a 33.3 MVA, 69.3/13.8 kV three-phase compact transformer with and without adoption of the proposed leakage flux collector. The results show that due to its shape and its position in the core transformer this type of leakage flux collector efficiently mitigates the undesirable stray losses and hot spots in some key structural parts of the compact transformers, such as tank and beams.

Index Terms—Compact power transformer, Magnetic shields, Leakage flux collector, Stray losses, Finite element method.

I. INTRODUÇÃO

EM casos cada vez mais frequentes, transformadores de potência têm sido requisitados a operar em determinados locais por apenas um período, que pode variar desde algumas semanas até alguns meses, sendo por isso constantemente transportados, a fim de operar em outros locais, sob condições semelhantes[1]. Para esse fim, o transformador se torna o elemento principal das subestações móveis, cujas principais aplicações são em locais de mineração, de veraneio e em situações de manutenção programada em transformadores de força de subestações convencionais.

Assim, por conta da inerente condição de transporte, tanto o transformador quanto dos demais equipamentos da subestação móvel ficam sujeitos a severas restrições de peso e tamanho, exigindo que o transformador tenha um projeto especial, com ênfase na necessidade de ser inerentemente compacto [2]. Especificamente, o projeto de um transformador para subestações móveis deve não somente prezar pela redução de seu tamanho e peso, quanto permitir a operação com máxima potência nominal e, ainda, resistir aos esforços mecânicos de movimentação.

Dentre as várias consequências desses requisitos, a intrínseca redução na distância entre a parte ativa e o tanque favorecerá a

incidência de fluxo magnético disperso sobre as paredes do tanque, provocando o surgimento de correntes parasitas que, por sua vez, poderão gerar pontos excessivamente quentes em suas paredes. Por conta disso, é indispensável o uso de blindagens magnéticas para barrar esse fluxo disperso [3-5]. No entanto, pelo fato do tanque do transformador compacto apresentar uma geometria intrinsecamente irregular, a aplicação das técnicas usuais de blindagem magnética do fluxo de dispersão, adotadas em transformadores de potência convencionais, não é factível. Isso porque, na maior parte dos casos, essas técnicas se baseiam na fixação de placas metálicas ferromagnéticas, chamadas de *shieldings*, sobre as faces internas das paredes do tanque, que é uma tarefa relativamente simples somente quando a geometria dessas paredes for regular [6,7]. Por isso, torna-se necessária a adoção de outras técnicas de blindagem. Neste contexto, o presente trabalho analisa o desempenho de um outro tipo de coletor de fluxo disperso, que tem um formato específico e serve como blindagem magnética. É um tipo que se aplica diretamente no circuito magnético do transformador, tal como descrito em [8], em vez de se aplicar nas paredes internas do tanque. No caso deste trabalho, o coletor tem um formato novo, sendo denominado de braçadeira e que se mostra adequado a projetos de transformadores compactos. Para a análise do desempenho desse coletor foram realizadas simulações computacionais de um projeto real de transformador compacto, avaliando-se as perdas por fluxo disperso e a elevação da temperatura nas principais partes estruturais do transformador.

II. ESPECIFICIDADES DOS TRANSFORMADORES PARA APLICAÇÕES MÓVEIS

As características específicas de operação de um transformador para aplicações móveis exigem vários cuidados a serem tomados, já na fase de projeto. A título de ilustração, a Fig. 1 mostra uma subestação de distribuição móvel, montada sobre a carroceria de um caminhão, com o intuito de fazer perceber o quanto as dimensões do transformador, bem como o seu peso, são importantes fatores limitantes para o transporte, assim como o são para os demais equipamentos nela instalados.

Como exemplo de consequências das limitações impostas a transformadores para essa finalidade, considere a especificação de um desses com potência de 33,33 MVA e tensões 69/13,8 kV. Para tanto, enquanto um transformador convencional, para uma subestação de distribuição também convencional, tem massa de cerca de 45.000 kg, um transformador compacto para

K. J. Salvador, WEG T&D S.A., Brazil, kauej@weg.net.
 D. F. Harmel, WEG T&D S.A., Brazil, diogoh@weg.net.
 L.F. de Oliveira, WEG T&D, Brazil, luizo@weg.net.
 S. H. L. Cabral, Univ. Regional de Blumenau, Brazil, scabral@furb.br.
 H.A.D. Almaguer, Univ. Regional de Blumenau, Brazil, hugo@furb.br.
 Corresponding author: Sérgio Henrique Lopes Cabral.

uma subestação móvel tem cerca de 31.000 kg, que corresponde a uma redução de cerca de 27 %.



Fig. 1. Subestação de distribuição móvel, instalada sobre a carroceria de um caminhão – Fonte :WEG Transformadores.

Uma das mais significativas consequências dessa redução de massa é a redução de volume do transformador, que implica não somente na redução de distâncias entre a parte ativa e o tanque, como também na redução da quantidade de óleo que, com isso, tem reduzida a sua capacidade para as importantes tarefas de isolamento elétrico e de troca de calor entre os enrolamentos e o meio externo. Esses efeitos contribuem decisivamente para o surgimento de pontos de aquecimento excessivo, nas partes internas do transformador, que pode condenar seu projeto se medidas específicas não forem tomadas [2,3,8]. Dentre essas medidas, as mais elementares estão no emprego de materiais isolantes que combinam elevada rigidez dielétrica e estabilidade térmica, que garante a capacidade de isolamento elétrico quando da operação em temperaturas maiores do que aquelas encontradas no interior de transformadores convencionais [2,3].

Adicionalmente, são igualmente importantes fatores de natureza mecânica, no projeto desse tipo de transformador, tal como a definição das partes estruturais que devem garantir a suportabilidade aos movimentos contínuos de transporte. Principalmente, no que diz respeito aos momentos fletores, atuantes nas peças mais extensas, como buchas e trocadores de calor.

Nesse contexto, o tanque, do transformador deverá ter uma geometria significativamente irregular, a fim de adequar a instalação do transformador em espaços reduzidos. Dessa forma, fica claro como a inevitável proximidade entre o tanque e a parte ativa favorece à passagem de fluxo magnético disperso desde a parte ativa até a parede do tanque, induzindo correntes parasitas que tanto geram pontos de aquecimento quanto causam aumento das perdas. A fim de mitigar esse efeito, o uso de blindagens consiste numa boa prática, recaindo sobre os tipos coletores de fluxo disperso, fixados diretamente no circuito magnético do transformador, cujo formato pode ser bem variado.

III. BLINDAGENS MAGNÉTICAS EM TRANSFORMADORES - GENERALIDADES

Durante a operação de um transformador, nem todo o fluxo magnético criado nos enrolamentos fica confinado no núcleo do circuito magnético. Inerentemente, uma parcela desse fluxo se dispersa e atinge alguns elementos metálicos estruturais

internos, tais como armaduras, vigas, tirantes e parafusos, bem como as paredes do tanque do transformador a óleo. Nesses elementos, o fluxo disperso induz correntes, ditas parasitas, ou de Foucault, que provocam aquecimento e pode vir a se tornar excessivo a ponto de afetar o tempo de vida útil do transformador e até mesmo condená-lo.

Segundo [6], em transformadores de potência, as perdas decorrentes do fluxo de dispersão no tanque constituem a maior parte das perdas totais causadas por esse fluxo. Ainda segundo [6], o fluxo disperso parte radialmente desde a superfície externa dos enrolamentos, indo atingir as paredes internas do tanque de forma predominantemente perpendicular. Por isso, para se eliminar ou minimizar os seus efeitos negativos, blindagens devem não somente estar localizadas em pelo menos um dos extremos desse percurso, como também ter uma geometria adequada à maior captação desse fluxo.

Em termos constitutivos, uma blindagem pode ser material magnético ou não-magnético, sendo sempre metálicas. Segundo [6], as blindagens magnéticas são mais eficazes na redução das perdas por dispersão, em comparação com as blindagens não-magnéticas, por oferecerem um caminho de baixa relutância para o fluxo de dispersão, limitando o seu percurso.

Definido o material da blindagem, há então que se definir em qual dos extremos do percurso do fluxo de dispersão se deverá aplicar a blindagem. Frequentemente, em transformadores de potência convencionais, o local escolhido para a aplicação da blindagem são as paredes internas do tanque. Nesse caso, a blindagem é, geralmente, feita de aço-silício, que é o mesmo material ferromagnético utilizado no núcleo do transformador, enquanto o tanque é feito de aço estrutural, comumente conhecido como aço-carbono. A efetividade da blindagem se dá por dois fatores. O primeiro é que a blindagem está posicionada de forma ao fluxo disperso atingi-la justo antes de que ele pudesse atingir a parede do tanque. O segundo fator é que por conta do aço-silício ter um valor de permeabilidade magnética relativa maior do que do aço-estrutural, o fluxo disperso prefere percorrer sua estrutura, em vez de seguir pelas paredes do tanque. Além disso, o aço-silício também tem resistividade elétrica com maior valor do que a do aço-carbono, o que reduz a amplitude das correntes parasitas e, conseqüentemente, as perdas por efeito Joule e o aquecimento. Com isso, se as dimensões geométricas e o posicionamento das placas magnéticas forem adequadamente projetados, a efetividade deste tipo de blindagem pode ser relativamente elevada, sendo as perdas quase insignificantes [6, 7, 9-12].

Cumprido comentar que, apesar de possuir bem menor frequência de emprego, a blindagem não-magnética se baseia na pronta reação à incidência de fluxo disperso, criando um fluxo oposto, através de correntes parasitas circulantes em seu material de elevada condutividade elétrica. Usualmente, é uma boa opção para se aplicar como elemento de composição do tanque, em local de saída das buchas de baixa tensão [7], cujas correntes são elevadas.

Apesar de serem de aplicação prática e, por isso muito comumente utilizadas, a escolha pela fixação de blindagem nas paredes internas do tanque não são adequadas para

transformadores compactos. Primeiramente, por conta da inerente irregularidade no formato das paredes de seu tanque. Adicionalmente, pelo aquecimento que a própria blindagem gera, que pode causar uma indesejada elevação de temperatura. Por isso, se torna conveniente a escolha pela fixação de blindagem na região de saída do fluxo de dispersão desde a bobina. Usualmente, esse tipo de blindagem tem uma geometria muito específica e é posicionada na região do jugo, sendo por isso denominada de coletor de fluxo disperso, pelo fato dessa blindagem coletar a porção de fluxo que se dispersa dos enrolamentos

Segundo [8] e [11], há vários formatos para esse tipo de coletor e um formato singular desses é a essência do presente estudo, enquanto seu desempenho será abordado nas próximas seções.

IV. O COLETOR DE FLUXO DISPERSO ADOTADO

Para fins de blindagem magnética, o coletor de fluxo disperso é, essencialmente, composto do mesmo material magnético do núcleo, que é o aço-silício, não possui a geometria de uma placa, não é aplicado sobre o elemento a ser blindado, que é o tanque, e nem é fixado verticalmente. Sua aplicação pode ser dar, por exemplo, na forma de barras horizontais, colocadas paralelamente ao jugo, nas extremidades superior e inferior das bobinas de enrolamentos das fases [8, 11, 12]. Na Fig. 2 se apresenta um exemplo de aplicação de blindagem coletor de fluxo, em um projeto de transformador de potência de 500 MVA com 245 kV na alta tensão [8].

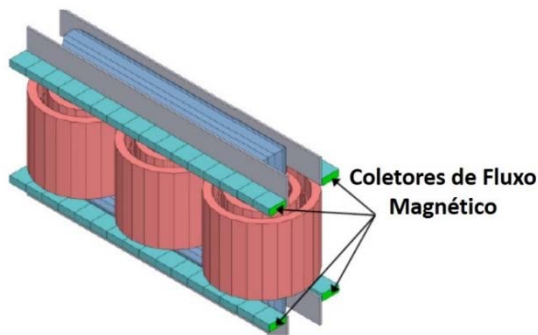


Fig. 2. Blindagem magnética do tipo coletor de fluxo, usualmente fixada nos jugos dos transformadores de potência convencionais [8].

Essa forma de blindagem tem eficácia por conta da sua aplicação contínua ao longo das cabeceiras dos enrolamentos das três fases, o que permite que a soma do fluxo disperso de cada uma das fases possa vir a se anular. Pela sua constituição material, essa forma de blindagem fornece um caminho de baixa relutância que guia o fluxo disperso de volta para o núcleo, minimizando as perdas de dispersão em componentes estruturais vulneráveis, como o tanque e as vigas, principalmente. Assim, apesar do seu custo, tanto de material quanto de processo de montagem, ser considerável, seu uso se torna viável, dada a efetividade com que mitiga os efeitos do fluxo disperso, mesmo para transformadores de potência de projeto convencional [4, 12]. No caso de transformadores compactos para soluções móveis, seu uso se torna primordial,

devido à inviabilidade da aplicação de blindagem magnética na irregular superfície do tanque.

Neste contexto, este trabalho analisa uma proposta singular da geometria de uma blindagem do tipo coletor de fluxo, com potencial aplicação em transformadores compactos. Essa geometria, que pode ser vista na Fig. 3, compõe-se de peças formadas por lâminas de aço-silício com o formato de braçadeiras, sendo fixadas diretamente nas colunas do núcleo do transformador trifásico, no interior do anelão que apoia os enrolamentos.

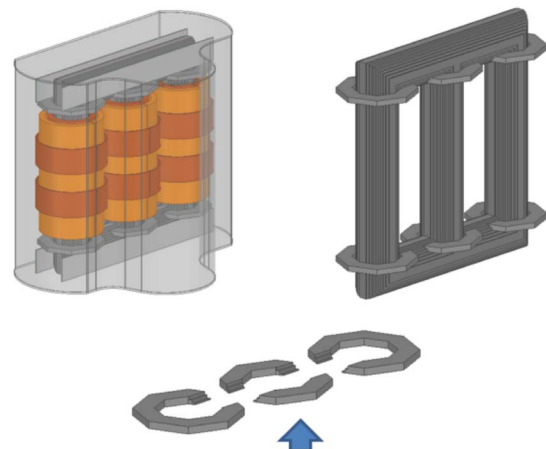


Fig. 3. Blindagem magnética do tipo coletor de fluxo em formato de braçadeira avaliada no presente estudo.

Por conta de seu formato, semelhante ao de uma braçadeira, esse coletor recebe essa denominação. Suas dimensões podem variar significativamente, segundo as limitações de projeto do transformador em que será aplicado o coletor. É, entretanto, fato de que sua fixação, feita após a montagem do núcleo, se dá através de calços e requer um certo cuidado para não haver formação de indesejáveis *gaps*, bem como seu posicionamento vai influenciar tanto nas distâncias de isolamento das cabeceiras das bobinas quanto na altura da janela e, portanto, no valor da indutância de dispersão. De uma forma geral, por conta de seu diâmetro externo ser muito específico para cada projeto, não é disponibilizado comercialmente, como ocorre com o coletor mostrado na Fig. 2. Com isso, torna-se interessante que o próprio fabricante de transformador também produza o coletor de fluxo, em virtude de ajustar o corte das lâminas do mesmo aço utilizado no núcleo para os tamanhos considerados adequados, sem a formação de *gaps*.

No que diz respeito ao seu desempenho, se apresentam a seguir simulações computacionais desenvolvidas para avaliar de forma genérica a efetividade da adoção dessa forma de blindagem de fluxo disperso.

V. SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Como caso-base para o estudo de efetividade do tipo proposto de coletor de fluxo foi considerado e modelado um transformador compacto de 33,3 MVA – 69,3kV / 13,8 kV, utilizado em subestações móveis. Na Fig. 4 se apresentam dois desenhos 3D de seu projeto, sendo um deles sem o coletor de fluxo, na Fig. 4(a), enquanto o outro com o coletor, mostrado

na Fig. 4(b) Em ambas as figuras se torna perceptível o formato irregular do tanque, que favorece a utilização desse tipo de blindagem. As dimensões adotadas para o coletor de fluxo são proporcionais às dimensões do transformador (Tabela I), uma vez que não há a intenção e se propor valores de dimensões, mas apenas avaliar, de forma genérica o desempenho do coletor com formato em questão.

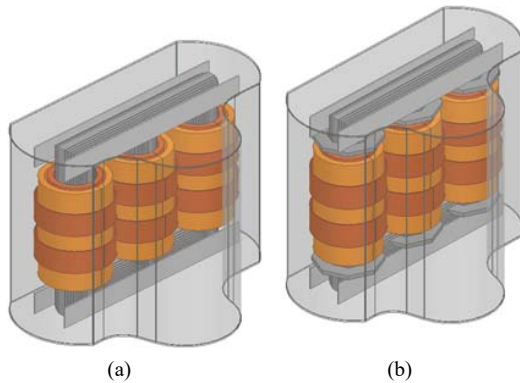


Fig. 4. Modelo 3D do transformador compacto avaliado. (a) Sem blindagem magnética. (b) Com blindagem magnética.

TABELA I
DIMENSÃO DO TRANSFORMADOR 3D COMPACTO AVALIADO

Geometria	Dimensão [mm]
Enrolamento de alta tensão (HV)	diam. interno 567 x diam. externo 691 x alt. 1270
Enrolamento de regulação (Reg.)	diam. interno 741 x dia. externo 763 x alt. 284
Enrolamento de baixa tensão (LV)	dia. interno 407 x diam. externo 515 x alt. 1290
Ferragens	12.7 x 2265 x 260
Tanque	1800 x 2725 x 2340
Núcleo	diam. 377 x entre centro colunas 795 x alt. janela 1808

As simulações foram feitas com o programa *Maxwell*, da *Ansys* [13], que se baseia na utilização do método numérico dos elementos finitos nas modelagens 2D e 3D, tanto no domínio da frequência quanto do tempo. O tipo de aço adotado, tanto para o núcleo do transformador, quanto do coletor, foi o aço silício de grão orientado M27, disponível na biblioteca do programa. Já para as vigas e o tanque se adotou o aço estrutural 1020.

No caso específico deste estudo, foi empregado o módulo *Eddy Current* para simular a operação do transformador em regime permanente, em 60 Hz, na condição de carga nominal e no menor *tap*, quando a intensidade de campo magnético disperso é maior, representada esquematicamente na Fig. 5. O enrolamento de alta tensão (*HV*) tem 1432 espiras, regulação (*Reg*) tem 144 espiras e o enrolamento de baixa tensão tem 175 espiras. A carga calculada tem uma resistência de 5.26 ohm e uma indutância de 5.945 mH. Assim, foram calculadas as perdas nos elementos estruturais, tanque e vigas, devido ao fluxo disperso. Para tanto, foi utilizada a condição de contorno chamada *Impedance Boundary*, usada para simular o efeito de

correntes induzidas em um condutor, sem calculá-las explicitamente, de forma que o condutor é excluído do modelo, economizando tempo de processamento.

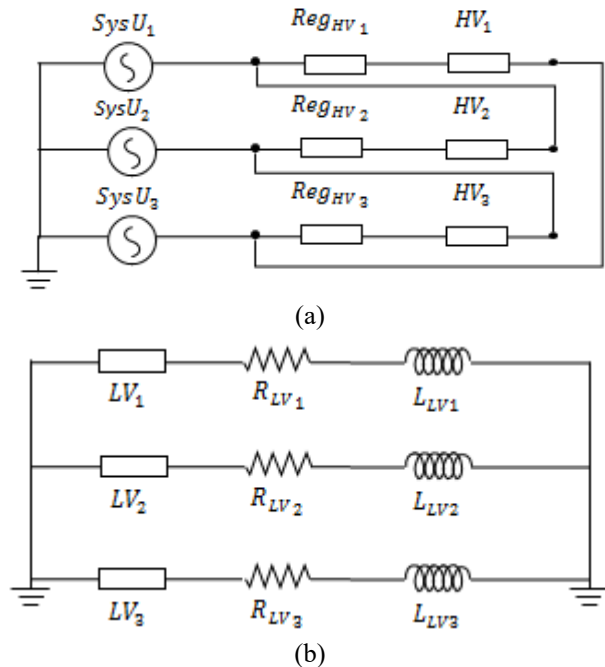


Fig. 5. Circuito elétrico para alimentação do transformador em operação para os enrolamentos (a) Primário e (b) Secundário.

VI. RESULTADOS

Inicialmente, foram avaliadas as perdas por dispersão nos diversos pontos da superfície do tanque, que estão representadas na Fig. 6, em W/m^2 , enquanto as perdas nas vigas são mostradas na Fig. 7. Na Fig. 8 é mostrado a indução magnética no núcleo e no coletor de fluxo.

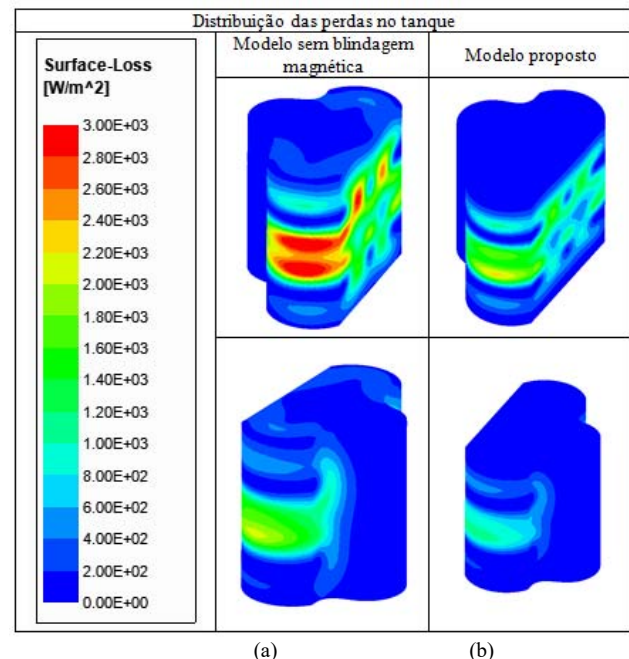


Fig. 6. Desempenho quanto às perdas por dispersão na superfície do tanque – frente e verso. (a) Sem coletor de fluxo; (b) Com coletor de fluxo.

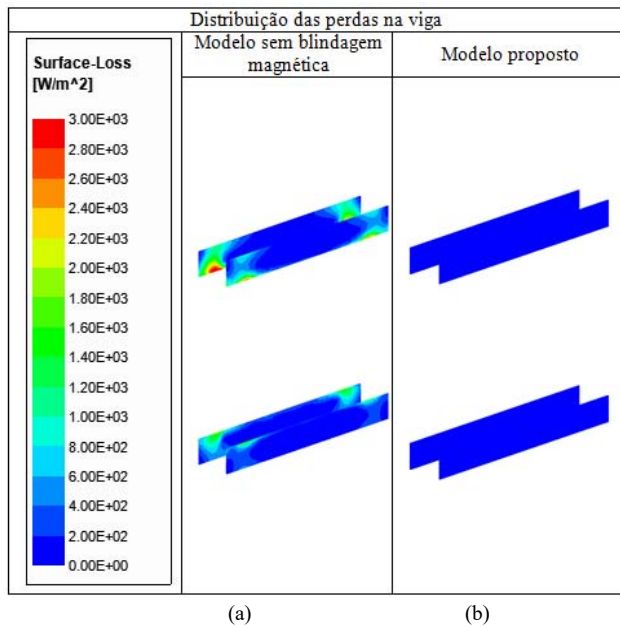


Fig. 7. Desempenho quanto às perdas por dispersão na superfície das vigas. (a) Sem coletor de fluxo; (b) Com coletor de fluxo.

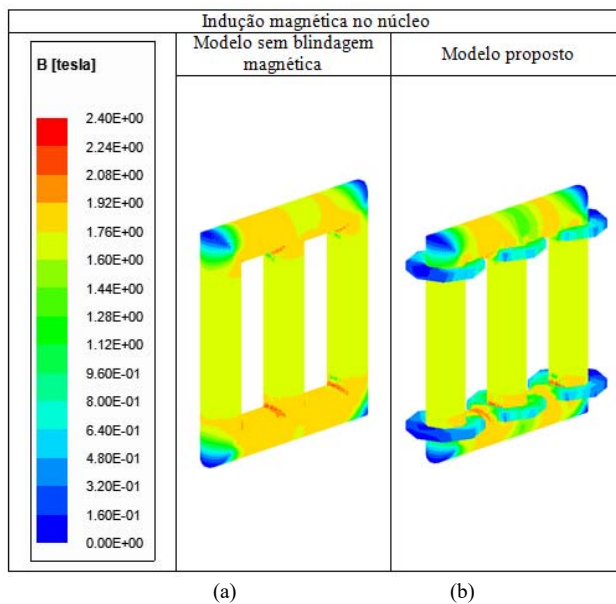


Fig. 8. Indução magnética no núcleo e no coletor de fluxo. (a) Sem coletor de fluxo; (b) Com coletor de fluxo.

A fim de melhor comparar o desempenho das opções com e sem uso de coletor, quanto às perdas por dispersão, a Tabela II mostra, de forma resumida, os valores obtidos para as diferentes regiões do tanque e nas vigas.

Na seqüência, esses resultados de perdas foram exportados para o *software* de análises térmicas, o *Ansys Mechanical*, para a determinação da elevação de temperatura nas partes de interesse do transformador avaliado, nas condições com e sem o coletor de fluxo disperso. Foram adotados os valores de coeficientes de convecção de $120 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$ para as paredes do tanque e $80 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$ para as estruturas metálicas da parte ativa. Os resultados das simulações são mostrados a seguir.

Similarmente ao que foi feito para as perdas, nas Figs. 9 e 10 se apresentam as diferentes formas de distribuição dos valores

da elevação de temperatura nas superfícies do tanque e das vigas, respectivamente.

TABELA II
PERDAS NAS COMPONENTES ESTRUTURAIS DOS TRANSFORMADORES SIMULADOS

Peça	Perdas Modelo Sem Blindagem (W)	Perdas Modelo com blindagem (W)	Redução das Perdas (%)
Lateral do tanque	12.433	4.189	66,31
Fundo do tanque	503	32	93,64
Tampa do tanque	528	48	90,91
Vigas	1.585	34	97,86
Blindagem Magnética	0	332	-
Total	15.049	4.303	71,41

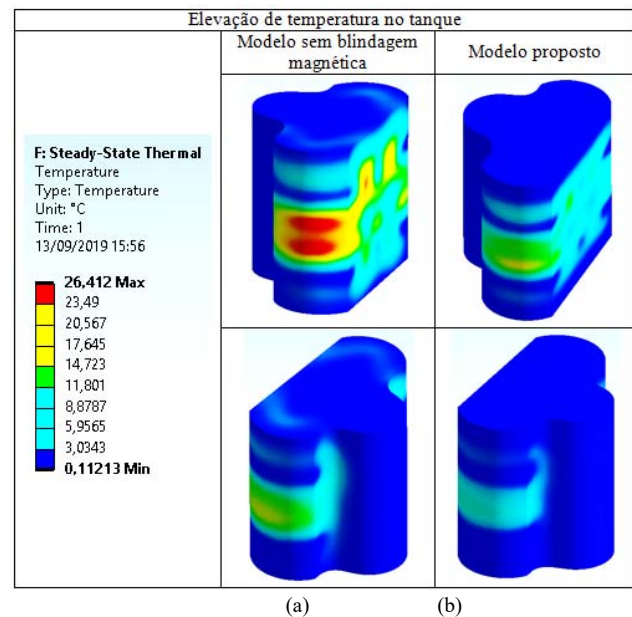


Fig. 9. Desempenho quanto à elevação da temperatura no tanque. a) Sem coletor de fluxo frente e verso ; b) Com coletor de fluxo.

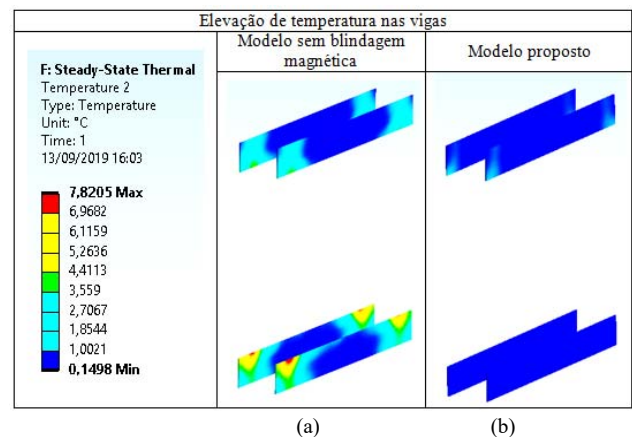


Fig. 10. Desempenho quanto à elevação da temperatura nas vigas. (a) Sem coletor de fluxo; (b) Com coletor de fluxo.

Os resultados obtidos pelas simulações indicam a significativa eficácia da blindagem magnética do tipo coletor de fluxo, aqui proposta. Com isso, para o caso estudado, se

constata que, de uma forma geral, a adoção do coletor proposto reduziu as perdas por dispersão em cerca de 71 %, em se comparando com os resultados apresentados pela simulação do transformador sem blindagem. A maior efetividade de blindagem foi conseguida nas vigas, com redução de 98% das perdas.

Em relação à temperatura, a adoção do coletor de fluxo disperso também proporcionou uma elevação significativamente menor nas peças estruturais. No tanque, os maiores valores de elevação se deram no centro das faces curvas laterais, para ambos os modelos. Entretanto, enquanto no caso sem coletor o maior valor de elevação foi de 26,4^oC, no caso com o coletor a elevação foi de apenas 11,8^oC.

No que diz respeito às vigas, há que se considerar que não houve significativa elevação de temperatura com a adoção do coletor, enquanto o valor da elevação fica em torno de 8,1 se não se adota nenhuma blindagem de fluxo disperso.

Neste caso, é importante observar que, independentemente da adoção de blindagem, as vigas inferiores sofrem maior aquecimento do que as superiores,

VII. CONCLUSÃO

A execução deste trabalho evidenciou a importância da simulação computacional como ferramenta para auxílio no projeto de transformadores compactos para subestações móveis, através da análise de desempenho de um tipo apropriado de coletor de fluxo disperso. O alcance dessa contribuição ganha dimensão considerável pelo fato de que esse tipo de transformador tem projeto muito específico, diferindo consideravelmente dos projetos-padrão de transformadores de força.

A análise computacional permite prever com segurança a ocorrência de problemas, na fase de projeto do transformador, que implicariam decisivamente na confiabilidade de sua operação.

Com os resultados alcançados se evidencia a eficácia do coletor de fluxo do tipo braçadeiras, na blindagem do fluxo disperso, contribuindo decisivamente para a redução de perdas por dispersão nos elementos estruturais do transformador, tidas como sendo parte das perdas adicionais.

Não foram considerados neste estudo questões relativas aos custos da adoção do coletor sugerido, uma vez que o trabalho esteve voltado para o desempenho técnico. Entretanto, sendo bastante significativos os resultados de redução de valores de elevação de temperatura e de perdas, é possível sugerir como viável a adoção do coletor proposto, mesmo tendo-se em conta as diferentes variáveis que incidem no custo de sua adoção, indo desde o preço de sua fabricação, ou aquisição, até os custos de processo de sua fixação, passando pelas alterações necessárias no projeto do transformador compacto, a fim de adequá-lo, mesmo com o coletor, a faixas de valores exigidos, tais como de impedância de dispersão, por exemplo,

Finalmente, considerando os favoráveis resultados obtidos, uma nova frente de trabalho se abre, voltada para a fabricação de um transformador com a adoção do coletor proposto, que poderá ratificar a importância da ferramenta computacional e será apresentada em trabalhos posteriores a este.

REFERÊNCIAS

- [1] H. Dehghan, H. Ghaemi, S. M. Shadman and S. A. Khorasani, "Using the mobile substations in 132 kV network and studying their effects on the losses of network," 2012 Proceedings of 17th Conference on Electrical Power Distribution, Tehran, 2012, pp. 1-4.
- [2] T. Sousa, J. A. Jardini, M. A. Bini, A. Nicioli, J. C. Carneiro, F. Uemura and M. Yasiro, "High Power Density Mobile Transformer Factory Tests," *IEEE PES Transmission & Distribution Conference and Exposition - Latin America*, Morelia, Mexico, 2016.
- [3] R. Marek, T. Prevost and J. C. Duart, "High Temperature Insulation Systems: An Option for Resilient Transformers," 2018 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D), Denver, CO, 2018, pp. 1-9.
- [4] X. M. López-Fernández, H. B. Ertan and J. Turowski, "Transformers: Analysis, Design, and Measurement," *CRC Press*, Boca Raton-FL, 2012.
- [5] S. V. Kulkarni and S. A. Khaparde, "Transformer Engineering: Design, Technology and Diagnostics," 2nd Edition, *CRC Press*, 2003.
- [6] S. V. Kulkarni and S. A. Khaparde, "Transformer Engineering Design and Practice," *Marcel Dekker Inc*, New York, 2005.
- [7] D. Chen, H. Yu and J. Yuan, "Analysis on the Shielding Effect of the Power Transformer Tank," *Piers online*, vol. 3, no. 6, 2007.
- [8] L. Štraca, "Three-Phase Shunts for Stray Magnetic Field," *Procedia Engineering/ScienceDirect*, vol. 202, pp. 183-188, 2017.
- [9] C. Yongbin, Y. Junyou, Y. Hainian and T. Renyuan, "Study of eddy current losses and shielding measures in large power transformers," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol.30, no. 5, pp. 3068-3071, Sep., 1994.
- [10] S. Dasara and V. P. Mishra, "Shielding Measures of Power Transformer to Mitigate Stray Loss and Hot Spot Through Coupled 3D FEA," *High Voltage/IET*, vol. 2, no. 4, pp.267-273, 2017.
- [11] L. T. S. Thiago, "Blindagens Magnéticas de Transformadores: Uma Análise Comparativa Envolvendo Materiais, Cálculos e Simulações," *Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica)*, Universidade Regional de Blumenau – FURB, Blumenau, Jun., 2013.
- [12] Marisa Rizzo, Antonio Savini, and Janusz Turowski, "Influence of Flux Collectors on Stray Losses in Transformers," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 36, no. 4, Jul., 2000.
- [13] ANSYS – Engineering Simulation & 3D Design Software. Disponível em: www.ansys.com/



K. J. Salvador, graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade Regional de Blumenau (FURB). Atualmente, é CAE *Specialist Technical* na WEG T & D, em Blumenau-SC. Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em máquinas elétricas, atuando com transformadores desde 2012.



D. F. Harmel, mestre em Engenharia Elétrica pela Universidade Regional de Blumenau (2013), Pós-Graduado (2001) em Projetos de Transformadores e Graduado (2009) pela Universidade Regional de Blumenau (FURB). Atua desde 1998 na empresa WEG Transmissão e Distribuição, Unidade de Blumenau, no setor de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação (PD & I). Atua na área de inovação tecnológica da WEG, como coordenador das atividades de pesquisa e desenvolvimento, focado em pesquisas aplicadas a transformadores de potência.



L. F. de Oliveira, formado em Engenharia Elétrica pela Universidade Regional de Blumenau (FURB), em 2013, e mestre em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Catarina (2018). 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.



Sérgio Henrique Lopes Cabral, graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal Fluminense (1989), mestrado pela COPPE/UFRJ (1994) e doutorado pela Universidade Federal de Santa Catarina (2003). Desde 1994 é professor e pesquisador da Universidade Regional de Blumenau (FURB), em Santa Catarina. Tem interesse em temas da área de Sistemas de Potência, tais como Máquinas Elétricas, Linhas de Transmissão, Técnicas de Alta-Tensão e Eletromagnetismo Aplicado em dispositivos eletromagnéticos.



Hugo Armando Domínguez Almaguer, formado em Engenharia Elétrica pela Universidade de Oriente (1994), CUBA e doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Catarina (2003). Atualmente é professor e pesquisador da Universidade Regional de Blumenau (FURB), Santa Catarina. Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase nos seguintes temas de pesquisa: modelagem numérica de dispositivos e fenômenos eletromagnéticos, sistemas de aterramento elétrico, bioeletromagnetismo e medição de sinais radiados (alta e baixa frequência).