

**A2 – TRANSFORMADORES E REATORES DE POTÊNCIA
TP1**

**CONTROLE DE PERDAS POR FLUXO DE DISPERSÃO ATRAVÉS DO USO DE
BLINDAGENS MAGNÉTICAS – ESTUDO DE CASO.**

**Ito Carlos Capinos, Paulo Fragomeni Bicca
Prolec GE Brasil
Brasil**

1. RESUMO

Transformadores e autotransformadores de potência requerem atenção especial na determinação das perdas por fluxo de dispersão previstas em cada projeto. Além disso, é fundamental controlar a temperatura das partes metálicas, que podem gerar pontos quentes e, conseqüentemente, levar à formação de gases.

Para o controle destes parâmetros em transformadores de grande porte, a solução mais utilizada é o emprego de blindagens. Este trabalho apresenta um estudo de caso de um autotransformador monofásico onde o controle das perdas por dispersão e o aquecimento das partes metálicas foi feito através do uso de blindagens magnéticas no final das cabeceiras dos enrolamentos validadas através de modelagem por elementos finitos.

2. PALAVRAS-CHAVE

Blindagem magnética, Autotransformador, Transformador de potência, Termografia, Controle de perdas.

Ito Carlos Capinos – itocarlos.capinos@prolec.energy

3. INTRODUÇÃO

Durante a fase de projeto de transformadores e autotransformadores além dos cuidados usuais com cálculo de perdas deve se tomar em conta os valores esperados para perdas por dispersão. As perdas por dispersão variam conforme as características de cada projeto e se não avaliadas corretamente podem gerar um acréscimo nas perdas em carga esperadas no projeto e no aquecimento das partes metálicas do transformador.

O método mais usual para controle de perdas adicionais geradas pelo fluxo de dispersão é o emprego de blindagens magnéticas de aço silício nas paredes do tanque, porém, também existem outros meios, como o uso de blindagens de alumínio ou cobre ou o emprego de blindagens de aço silício localizadas no final das cabeceiras dos enrolamentos [1].

Diferentemente das blindagens magnéticas de aço silício usualmente localizadas nas paredes do tanque, as blindagens de fim de cabeceira são posicionadas na extremidade superior e inferior das bobinas e por conta desta localização apresentam maior complexidade, tanto dielétrica quanto de posicionamento mecânico. Devido a estas questões, durante a fase de cálculo elétrico do transformador é exigido um alinhamento prévio com o detalhamento da parte ativa e enrolamentos, para validar as possíveis posições quanto a distância da blindagem para a lateral do núcleo e axial a bobina. Além do posicionamento mecânico também se faz necessário o alinhamento quanto a posição dos cabos de saídas dos enrolamentos, pois a blindagem de cabeceira gera um bloqueio mecânico e elétrico para os cabos de saídas dos enrolamentos principalmente onde as tensões são mais elevadas. O posicionamento da

blindagem magnética e suas dimensões determinadas pela indução magnética utilizada no projeto é o que determinará o controle das perdas por dispersão e as temperaturas nas partes metálicas.

Para a correta aplicação deste tipo de blindagem se faz necessário o uso de modelagem por elementos finitos para definir com maior precisão a indução e as perdas esperadas na mesma, a simulação também ajudará a encontrar o melhor posicionamento da blindagem, e a menor quantidade de aço silício a ser empregada no projeto da mesma.

Este trabalho apresenta um estudo de caso de um projeto de um autotransformador monofásico de 533,33MVA 525-230-34,5kV com núcleo de 4 colunas, duas colunas enroladas e duas de retorno, onde devido ao elevado fluxo de dispersão se fez necessário o uso de blindagens de final de cabeceiras dos enrolamentos.

Serão evidenciados os motivos iniciais do projeto que levaram para a definição do tipo de blindagem e o posicionamento, as definições dos cabos dos enrolamentos de AT, BT e Terciário, o estudo de cálculo de perdas por dispersão, as simulações de elementos finitos elaboradas para validar os cálculos de perdas e temperaturas nas partes metálicas. Por fim serão mostrados os resultados das medições de perdas nos ensaios finais do autotransformador e as imagens de termografia mostrando as temperaturas no tanque no ensaio de elevação de temperatura e de sobrecarga.

4. FLUXO E PERDAS POR DISPERSÃO

As perdas por dispersão em transformadores ocorrem devido à circulação de corrente em partes metálicas, como as ferragens do núcleo e o tanque, e são distintas das perdas ôhmicas no cobre (RI^2), que resultam diretamente da circulação de corrente nos enrolamentos. Essas perdas por dispersão nas partes metálicas são provocadas pela incidência do fluxo magnético de dispersão dos enrolamentos e cabos de ligação e o seu cálculo exige de estratégias mais complexas do que o cálculo da perdas no cobre, como o uso de equacionamento analítico e ou empírico ou, até mesmo, de ferramentas de simulação baseadas em métodos numéricos.

O fluxo magnético de dispersão é dado a partir da impedância do transformador e da amplitude do campo magnético que, por sua vez, é dado pela amplitude da corrente, que depende da carga aplicada ao transformador. O fluxo magnético de dispersão gerado pelas bobinas do transformador segue o caminho de menor relutância para retornar a outra extremidade da bobina. Este caminho de menor relutância é gerado, usualmente, pela tampa paredes do tanque e outras partes metálicas dentro do transformador. Ao cruzar as partes metálicas do transformador o fluxo magnético gera correntes circulantes e aquecimento das partes metálicas, este fenômeno pode ser melhor explicado através da lei de Ampère, que relaciona o campo magnético incidente com a corrente elétrica induzida[1].

A lei de Ampère é uma das leis fundamentais do eletromagnetismo e basicamente diz que a integral de um campo magnético H em um caminho fechado C é proporcional a corrente (J na equação, expressado como densidade de corrente elétrica) que circula um circuito S [2].

$$\oint_C H \cdot dl = \iint_S (J \cdot n) dS$$

Desta forma, durante a fase de projeto com as características do transformador definidas já é possível calcular o fluxo de dispersão e a amplitude do campo magnético incidente nas partes metálicas através de ferramentas analíticas ou numéricas [3][4]. Porém como cada projeto apresenta valores diferentes de potência, tensões, impedância e de distâncias para as partes metálicas, se faz de grande dificuldade o cálculo das perdas por dispersão esperadas, uma vez que cada projeto deve ser analisado com suas particularidades. Abaixo podemos ver a imagem das linhas de campo de dispersão para o transformador que será estudado neste trabalho.

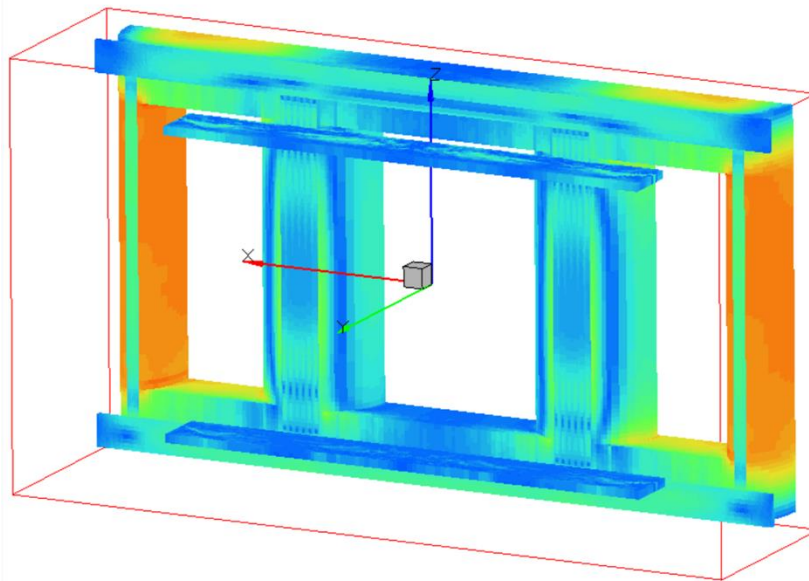


Figura 1 – Distribuição do fluxo magnético nas partes metálicas da parte ativa.

5. MÉTODOS DE CONTROLE DE FLUXO DE DISPERSÃO

O fluxo de dispersão varia conforme a potência e impedância do transformador, e para transformadores de grande potência o fluxo de dispersão apresenta valores muito elevados que, atuando nas partes metálicas da parte ativa e tanque, gera perdas elevadas por correntes induzidas impactando significativamente nas perdas em carga do transformador.

Se o cálculo não for feito corretamente e as alterações do projeto adequadamente consideradas é possível que as perdas calculadas na fase de projeto sejam inferiores aos resultados medidos nos ensaios finais, podendo gerar desde multa por excesso nas perdas e até mesmo a reprovação do transformador nos ensaios finais, caso as perdas sejam garantidas e/ou penalizadas [1].

Para não haver surpresas durante os ensaios finais usualmente as perdas por dispersão são aplicados métodos de controle de fluxo magnético, os quais podem ser de aço silício ou de alumínio ou cobre [1].

Em geral, o método de controle de fluxo de dispersão usado em transformadores pode ser dividido em dois grupos;

- coletores de fluxo – blindagens magnéticas de aço silício (shunts);
- refletores de fluxo – blindagens não-magnéticas de cobre ou alumínio (shields).

Os coletores de fluxo “coletam” o fluxo de dispersão oferecendo um caminho de baixa relutância magnética e evitando que circule no tanque ou estruturas metálicas. Os refletores de fluxo, por sua vez, “refletem” o fluxo de dispersão para longe do tanque ou estruturas metálicas porque ao serem atingidos pelo campo magnético dispersos geram correntes induzidas em sentido oposto, repelindo o fluxo de dispersão incidente. Importante considerar neste ponto do projeto que os refletores de fluxo podem direcionar esse fluxo disperso para regiões indesejadas como cabeceiras de enrolamentos e cabos de ligação, a menos que este comportamento também seja controlado através de ferramentas adequadas.

Os coletores de fluxo também são comumente conhecidos como ‘shunts’, enquanto os refletores de fluxo também são conhecidos como ‘shields’. Ambos os métodos de controle de fluxo de dispersão serão abordados com mais detalhes no decorrer deste trabalho.

5.1 BLINDAGENS MAGNÉTICAS DE AÇO SILÍCIO (*SHUNTS*)

As blindagens magnéticas de aço silício (*shunts*) são mais eficazes no controle de perdas por dispersão em comparação com as blindagens não magnéticas (cobre ou alumínio). Elas oferecem um caminho de baixa relutância para o fluxo de dispersão, restringindo seu caminho de forma pré-

determinada. No caso de blindagens de material não magnético, o fluxo repellido por elas pode encontrar um caminho através de componentes estruturais próximos, anulando as vantagens da blindagem.

As blindagens magnéticas são úteis para proteger componentes metálicos do campo de dispersão. Elas não são usadas para blindagem contra o campo de altas correntes. Se blindagens magnéticas de aço silício (*shunts*) tiverem espessura adequada e forem feitos de laminações de aço silício de grão orientado com características de watts/kg mais baixas, aliado a baixas induções utilizadas, as perdas nelas serão quase insignificantes.

Normalmente, as sobras de peças de laminações de núcleo (de rolos originais) são usadas para fazer as blindagens magnéticas. A altura das blindagens magnéticas de aço silício (*shunts*) devem ser maiores que as alturas dos enrolamentos. A altura ideal pode ser decidida com base no padrão de fluxo de dispersão resultante da análise de elementos finitos. As blindagens magnéticas de aço silício (*shunts*) podem ser colocados no tanque do nível do centro do jugo superior ao nível do centro do jugo inferior na ausência de qualquer análise detalhada.

As blindagens de aço silício são usualmente posicionadas nas laterais do tanque, porém como será visto neste trabalho, também podem ser posicionadas em outros locais, como no final das cabeceiras dos enrolamentos.

Quando posicionado na vertical, este tipo de blindagem é utilizada a fim de facilitar o caminho do fluxo de dispersão para voltar para a bobina, assim reduzindo as perdas por dispersão e o aquecimento das partes metálicas, sendo esta a prática mais comum do mercado devido a oferecer construção e montagem mais simplificadas.

Outro modo de posicionar as blindagens são horizontalmente ao tanque, este método construtivo é mais interessante para transformadores monofásicos com duas colunas enroladas e transformadores trifásicos, pois possui funcionalidade diferente das blindagens verticais, ao invés de facilitar o caminho de retorno do fluxo de dispersão ela faz com que o fluxo de dispersão das bobinas se encontre e se anule com o fluxo de dispersão de outras fases [2][5]. Comparado com o posicionamento de blindagens na vertical este tipo de projeto oferece maior dificuldade na montagem das blindagens, tendo em vista que o comprimento da mesma obrigatoriamente deve ser proporcional ao tamanho das bobinas das três fases.

O último estilo estudado de blindagens magnéticas de aço silício é o que foi aplicado para o projeto que será estudado neste trabalho. Neste caso a blindagem é posicionada no final das cabeceiras dos enrolamentos e possui aplicação similar a blindagens posicionadas horizontalmente. Essa blindagem faz com que o fluxo magnético de dispersão das duas bobinas do transformador monofásico ou as três bobinas do transformador trifásico se encontrem e se anulem [5][6][7].

Construtivamente esse método oferece mais dificuldade que ambos dois métodos apresentados anteriormente e uma maior quantidade de material para produção. Porém como veremos adiante este método apresenta um grande controle de perdas por dispersão e aquecimento das partes metálicas.

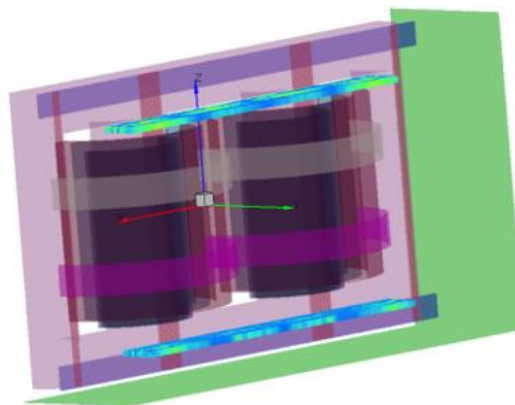


Figura 2 - Blindagem magnética posicionada no final da cabeceira do enrolamento

Para todos os métodos de posicionamento vistos acima o controle de perdas será dado tanto pela distância da blindagem para a parte ativa do transformador tanto quanto pela indução máxima calculada para a blindagem.

5.2 BLINDAGENS DE ALUMÍNIO OU COBRE (SHIELDS)

Esse tipo de blindagem geralmente é feito de material não magnético cobre ou alumínio. Eles são mais comumente usados para desviar o fluxo de dispersão para longe do tanque ou de outras estruturas metálicas [1]. As blindagens não magnéticas são comumente utilizadas nos tanques e partes metálicas da parte ativas onde existem formatos não uniformes da parede do tanque e de proximidade aos enrolamentos, conforme mostrado na Figura 3.

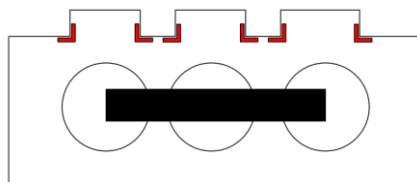


Figura 3 - Blindagem de cobre ou alumínio em tanques de formato não uniforme

Ao fixar material de alta condutividade (cobre ou alumínio) nas paredes do tanque, as correntes induzidas neles repelem o fluxo de dispersão para longe. Portanto, é importante garantir que no projeto a espessura seja pelo menos suficiente para evitar aquecimento da chapa. Se cobre ou alumínio de baixa espessura for usado, não apenas eles se tornam menos eficazes, mas as perdas neles podem ser altas [1].

O projeto e o posicionamento das blindagens de cobre ou alumínio precisam ser avaliados cuidadosamente, pois o fluxo de dispersão repellido pode causar aquecimento em partes estruturais próximas que estão desprotegidas [1].

Este método é mais comumente usado para evitar aquecimento devido a conexões de baixa tensão de alta corrente e pode ser aplicado efetivamente em conjunto com blindagens magnéticas de parede de tanque e/ou blindagens magnéticas de finais de cabeceiras para garantir que o fluxo seja redirecionado para blindagens magnéticas de aço silício (*shunts*) e, portanto, reduzindo as perdas por fluxo de dispersão.

6. CARACTERÍSTICAS DO TRANSFORMADOR ESTUDADO

O transformador objeto desta análise de caso é um autotransformador monofásico de 533,33MVA que devido as características de impedância e perdas foi necessário fazer com um núcleo de duas colunas enroladas e com duas colunas de retorno.

Abaixo está a tabela com as características do transformador objeto de estudo deste trabalho. Na sequência serão mostrados os resultados das simulações de elementos finitos e o estudo de caso com os resultados obtidos após os ensaios finais.

Autotransformador Monofásico	
Potência	533,33MVA
Frequência	60Hz
Tensões	$525/\sqrt{3} \pm 2 \times 12,5/\sqrt{3} \text{kV} - 230/\sqrt{3} - 34,5 \text{kV}$
Impedância máxima	14,66%
Sobrecarga	125% @ 8 horas

Tabela 1 – Características do transformador

Elevações de Temperatura	
Topo do óleo	55°C
Enrolamento médio	55°C
Ponto mais quente do enrolamento	65°C
Partes metálicas @ 125% sobrecarga	83°C

Tabela 2 – Elevações de temperatura do transformador.

Durante o desenvolvimento do projeto, inicialmente foram calculadas as perdas por dispersão sem uso de blindagens, onde o valor calculado foi de 230kW, com esse valor além das perdas ficarem acima das garantias se fazia imprescindível aplicação de uso de blindagens magnéticas para evitar pontos quentes nas partes metálicas da parte ativa e tanque.

Como o estilo construtivo permitiu a aplicação de blindagens de finais de cabeceira, e com isso foram avaliadas as vantagens e desvantagens do uso de blindagens nas laterais do tanque versus o uso de blindagens de finais de cabeceiras. Devido ao alto fluxo de dispersão, os requerimentos de limites de indução nas blindagens exigidas na especificação técnica do cliente e para garantir elevação de temperatura adequada nas partes metálicas se optou por seguir o projeto com as blindagens de finais de cabeceiras.

Para o dimensionamento inicial foi feito um pré-cálculo do transformador a fim alinhar os possíveis posicionamentos da blindagem com os projetos da parte ativa e enrolamentos.

Após definidas as dimensões e as distâncias preliminares foram feitas iterações com a ferramenta de modelagem por elementos finitos, buscando a melhor solução em perdas por fluxo de dispersão e indução na blindagem utilizando a menor espessura de aço silício, buscando assim o melhor custo-benefício para o projeto [6][7].

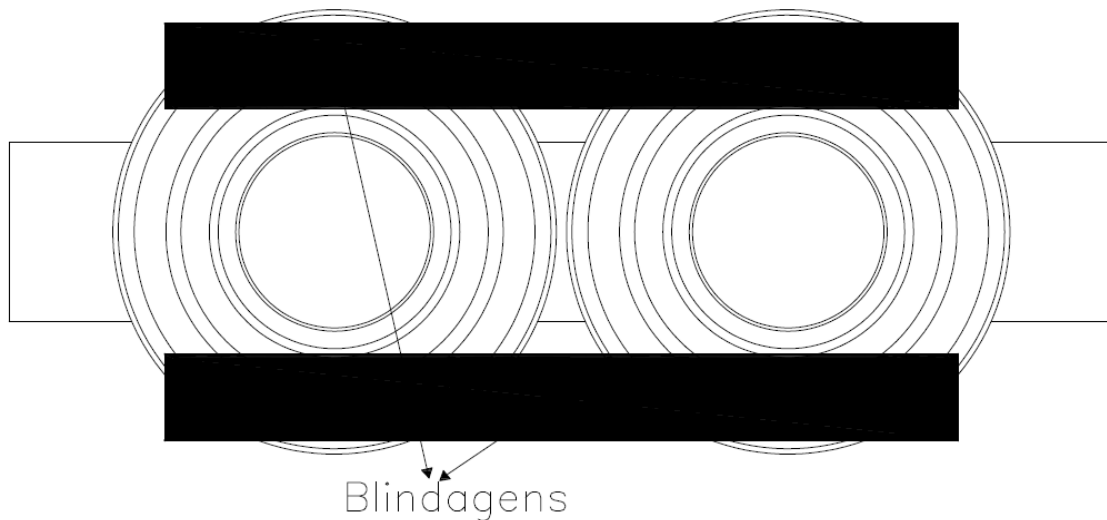


Figura 4 - Croqui de visão superior do posicionamento da blindagem magnética

Como pode-se notar no croqui da blindagem, o posicionamento acaba por bloquear as saídas do enrolamento série e comum. Para o projeto em questão, para viabilizar o uso da blindagem, foi necessário fazer as saídas dos enrolamentos pela parte frontal da bobina e não pela parte superior. Com isso, durante o cálculo elétrico já se faz necessário prever espaço suficiente nas cabeceiras das bobinas para tal. Como blindagem não bloqueia o enrolamento de terciário, essa saída se fez pela parte superior simplificando o projeto destas saídas.

7. SIMULAÇÃO ELEMENTOS FINITOS E ESTUDO DE CASO

Após definido a posição, dimensões e distâncias da parte ativa das blindagens magnéticas foi finalizado a modelagem por estudo de elementos finitos. Nesta seção será verificado os valores da simulação e comparados com os valores medidos nos ensaios finais do transformador.

O modelo foi simulado considerando operação em carga nominal ONAF2 (533,33MVA).

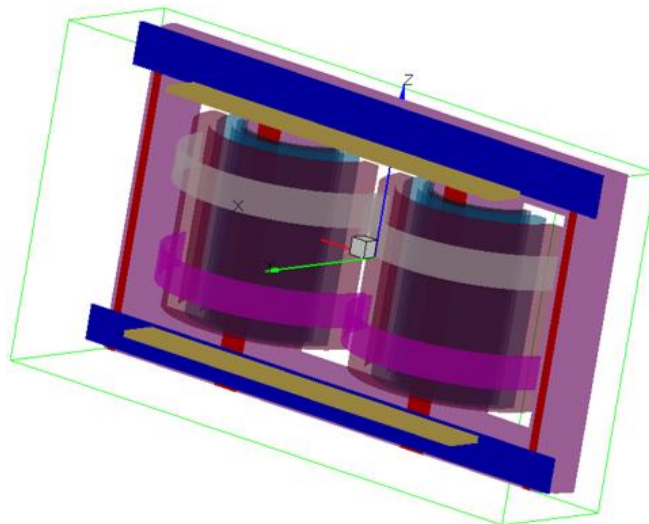


Figura 5 - Modelo 3D da simulação

Para validar a acuracidade do modelo por elementos finitos, inicialmente foi verificado o valor da impedância do modelo e comparado com os valores calculados no cálculo elétrico. Na tabela a seguir, também podemos ver o valor medido nos ensaios finais.

	Calculado	Simulado	Medido
Potência (MVA)	533,33	533,33	533,33
Impedância (%)	14,79	14,63	15,30
Diferença para o valor medido	3,45%	4,58%	-

Tabela 1 - Impedância calculada x medida

A máxima indução nas blindagens foi limitada em 1,2T atendendo o requisito da especificação do cliente, e na simulação foi validado que nenhum ponto excedia o valor.

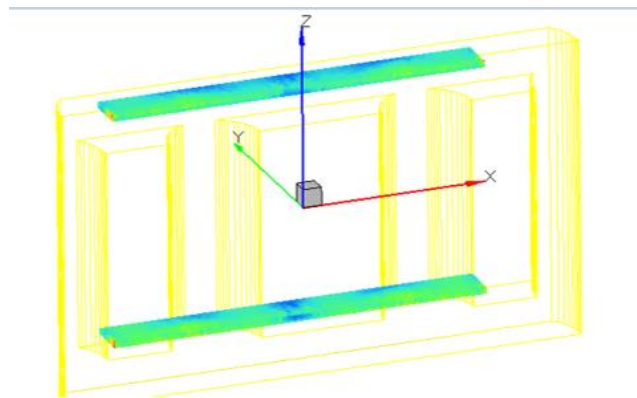


Figura 6 - Indução nas blindagens magnéticas

Com a impedância simulada dentro dos valores esperados e o valor máximo de indução na blindagem validado, foram verificadas as perdas por dispersão calculadas para o modelo.

Para os valores de perdas por dispersão esperados x medidos podemos verificar a tabela abaixo:

	Calculado	Medido
Potência (MVA)	533,33	533,33
Perdas por dispersão (kW)	138,70	124,44
Dif. Calculado x Medido	-10,28%	

Tabela 2 - Valores de perdas por dispersão calculado x medidos

Por fim foi verificada a temperatura máxima nas partes metálicas para condição simulada.

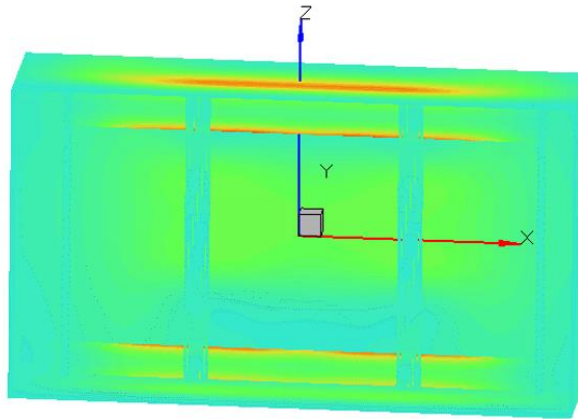


Figura 7 - Temperaturas no tanque

Na tabela a seguir podemos comparar o valor calculado de elevação de temperatura do ponto mais quente contra o valor medido.

	Calculado	Medido
Potência (MVA)	533,33	533,33
Elevação de temperatura no tanque (°C)	57,30	51,40
Dif. Calculado x Medido	-10,30%	

Tabela 3 - Valor calculado x medido de elevação de temperatura

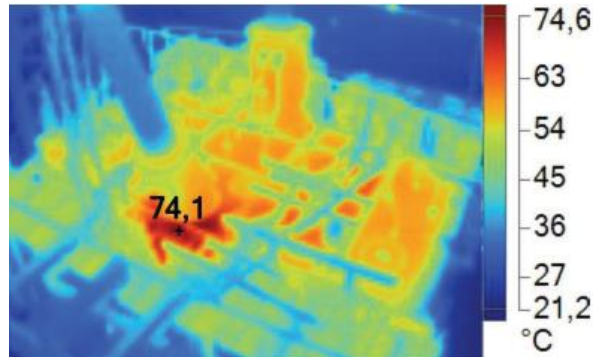


Figura 8 – Termografia do transformador no ensaio de elevação de temperatura - ponto mais quente do transformador (temperatura ambiente de 22.7°C)

8. CONCLUSÃO

Com base no que foi apresentado ao longo do trabalho, pode-se compreender a origem e o comportamento do fluxo magnético de dispersão nos transformadores. Verificou-se que existem várias formas de controlar esse fenômeno, e que é possível combinar diferentes tipos de soluções para alcançar os melhores resultados.

Além disso, destacou-se a importância das simulações numéricas na avaliação das possíveis alternativas de projeto, permitindo antecipar eventuais problemas e validar as soluções propostas muito antes da fase de produção dos transformadores. Essas simulações proporcionam uma visão detalhada das variáveis envolvidas, minimizando riscos e otimizando o processo de desenvolvimento.

O estudo das blindagens, associado à simulação numérica e analisado em conjunto com os resultados dos ensaios finais realizados no autotransformador, demonstrou que a solução proposta

foi eficaz e atendeu plenamente aos critérios técnicos estabelecidos para o transformador. Assim, a abordagem utilizada confirma a relevância da integração entre análise computacional e ensaios práticos para garantir o sucesso do projeto e o desempenho adequado do equipamento para operar durante a sua vida útil especificada.

9. BIBLIOGRAFIA

- [1] S. Kulkarni and S. Khaparde, *Transformer Engineering: Design, Technology and Diagnostics*, CRC Press, 2013.
- [2] G. Maschio, O. Iaronka, L. F. d. Oliveira, J. P. Vieira, “Estudo de caso com aplicação de blindagens magnéticas horizontais em autotransformador de 500 MVA e classe 500kV”, XXVI SNPTEE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, 2022.
- [3] O. Iaronka, L. F. d. Oliveira, “Projeto, análise e simulação de blindagem eletromagnética para tanque de transformador de potência sob diferentes condições de carga”, VIII – Workspot, 2016.
- [4] O. Iaronka, L. F. d. Oliveira e D. F. Harmel, “Utilização do método de elementos finitos para projeto eletromagnético de transformadores de potência em condições de sobrecarga conforme NBR5356-7,” XXIV SNPTEE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, 2017.
- [5] M. Moghaddami, A. Sarwat, F. d. Leon, “Reduction of Stray Loss in Power Transformers Using Horizontal Magnetic Wall Shunts”, *IEEE transactions on magnetics*, vol. 53, no. 2, february 2017.
- [6] M. Djurovic, J.E. Monson, “Stray losses in the step of a transformer yoke with a horizontal magnetic shunt”, *IEEE Transactions on power apparatus and systems*, Vol. PAS-101, No. 8 August 1982.
- [7] M. Djurovic, J. E. Monson, “3-Dimensional computation of the effect of the horizontal magnetic shunt on transformer leakage fields” *IEEE Transactions on magnetics* Vlo. MAG-13, No. 5, September 1977.