

Desenvolvimento de Transformadores de Distribuição de Elevada Eficiência Empregando Núcleo Amorfo e Óleo Vegetal Isolante

Development of High Efficiency Distribution Transformers Employing Amorphous Core and Insulating Vegetable Oil

Leonardo Hautrive Medeiros, leohm.29@gmail.com

Dion Lenon Prediger Feil

Tiago Bandeira Marchesan

Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Rio Grande do Sul

Submetido em 10/05/2016

Revisado em 20/07/2016

Aprovado em 10/08/2016

Resumo: Os transformadores de distribuição são empregados em grande número no sistema de distribuição de energia elétrica, e são responsáveis por grande parte das perdas e falhas deste setor. Para um melhor desempenho desses equipamentos, foram estudados e otimizados parâmetros de projeto elétrico, núcleo magnético, óleo isolante e sistema de refrigeração. Assim, projetou-se um dispositivo de maior eficiência e vida útil que os convencionais transformadores de distribuição, acarretando em menos perdas no setor de distribuição.

Palavras chave: Transformadores de distribuição. Núcleo amorfo. Óleo vegetal isolante. Elevada eficiência.

Abstract: The distribution transformers are employed aplenty in power distribution system, and are the responsible for the majority of losses and failures in this sector. For better performance of these equipments, parameters of electrical design, magnetic core, insulating oil and cooling system were studied and optimized. Thus, a greater efficiency and life cycle device than the conventional distribution transformers was projected, resulting in fewer losses in distribution sector.

Keywords: Distribution transformers. Amorphous core. Insulating vegetable oil. High efficiency.

1. INTRODUÇÃO

Atualmente estima-se que, no Brasil, cerca de 15% da energia elétrica é perdida desde sua geração, e que o sistema de distribuição é responsável por 70% dessas perdas. Este setor tem como seu principal equipamento o transformador de distribuição, que, responsável por adequar os níveis de tensão da rede primária às necessidades de consumo, é empregado em grande número ao longo de todo o sistema.

Tendo em vista o impacto do setor de distribuição sobre o sistema elétrico brasileiro e a importância dos transformadores de distribuição nesse contexto, o presente trabalho traz um estudo sobre parâmetros importantes do funcionamento e de grande influência no desempenho e vida útil desses equipamentos.

Como existem perdas nos enrolamentos e no núcleo magnético, elementos que compõem a parte ativa, existe uma geração de calor que acaba elevando a temperatura do ambiente interno do tanque do transformador. Esse aumento, por sua vez, degrada os componentes e, como consequência, gera-se mais perdas e tem-se mais elevação de temperatura, configurando um ciclo. Dessa forma, o desempenho e vida útil desses equipamentos estão atrelados às temperaturas atingidas no seu interior.

Para evitar um grande aumento das temperaturas internas, o calor gerado no interior é dissipado para o exterior através de um sistema de refrigeração. Esse sistema é composto por um conjunto de radiadores, de diversas topologias, que servem como caminho para o óleo quente circular e realizar a transferência de calor entre os meios. O sistema mais simples é aquele em que a troca de calor se dá apenas pela diferença de densidade do fluido envolvido, no caso o óleo quente menos denso entra na parte superior do radiador, perde calor, aumenta sua densidade e desce até voltar ao tanque pela parte inferior, chamado “Óleo Natural Ar Natural” (ONAN). Existem sistemas com mais alguns elementos, como, por exemplo, um ventilador que força a circulação de ar ou uma bomba que força a circulação do óleo.

Conhecendo o funcionamento dos transformadores, foram estudados aspectos sobre o projeto elétrico, núcleo magnético, óleo isolante e sistema de refrigeração, a partir de um modelo base, que opera nas redes elétricas,

fabricado por uma empresa parceira no projeto. Com o intuito de encontrar alternativas para reduzir as perdas elétricas da parte ativa e aumentar a dissipação do calor interno, aumentando a eficiência, todos os estudos foram verificados com simulações computacionais empregando o método de elementos finitos. A partir disso foram realizadas otimizações e projetou-se um equipamento que foi fabricado pela mesma empresa do transformador tido como modelo base. O protótipo foi submetido a simulações, ensaios de campo e de laboratório para verificar se seu funcionamento atendia às normas, mostrando-se mais eficiente que os convencionais. Os resultados apresentaram maior desempenho e vida útil, o que acarreta em menos gastos com manutenção e perdas no setor de distribuição, elevando o grau de confiabilidade do mesmo.

2. MODELO BASE

Como já mencionado, o trabalho partiu de estudos em cima de um transformador tomado como modelo base. Esse equipamento opera em redes de distribuição e tem características semelhantes à grande maioria dos transformadores instalados no setor de distribuição. É um modelo trifásico, com classe de tensão de 15 kV e potência de 45 kVA, utilizando um núcleo magnético de Aço-Silício (FeSi) e óleo mineral isolante (OMI). O seu sistema de refrigeração é do tipo ONAN, formado por 23 aletas simples, de formato elíptico, dispostas igualmente ao longo da face frontal do tanque. Uma reprodução 3D do modelo e seu sistema de refrigeração podem ser visualizados na Figura 1.

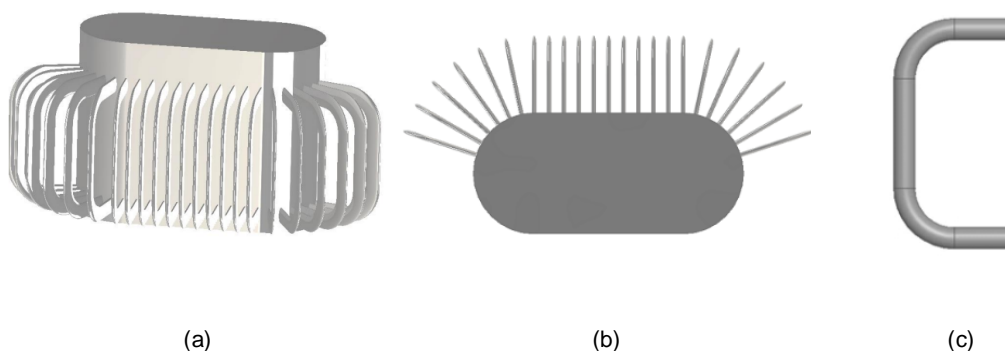


Figura 1 - Modelo base com (a) vista frontal, (b) vista superior e (c) aleta.

3. SIMULAÇÕES EM ELEMENTOS FINITOS

As simulações computacionais utilizadas em todo o trabalho, empregando o método de elementos finitos, foram realizadas através do *software* ANSYS®. Por possibilitar testar cada topologia e modificação no modelo, retornar resultados em um curto período de tempo para decidir um próximo passo sem precisar construir um protótipo real e apresentar uma alta confiabilidade do resultado final, é uma ferramenta que vem sendo muito utilizada em diversas áreas. Ela gera uma economia principalmente por permitir a verificação de um defeito em um equipamento, por exemplo, antes de ir para o processo de produção.

Essas simulações apresentam basicamente cinco etapas. A primeira etapa é a definição e a reprodução em 3D dos domínios que serão simulados. O desenho é feito em um software CAD e deve conter todos os domínios a serem avaliados com suas características.

A segunda etapa é talvez a mais importante. Depois de desenhar os domínios, é feita a malha sobre ele. A malha é o que divide o domínio original em vários outros elementos, caracterizando o nome do método. Em cada um desses elementos é aplicada uma série de equações de resolução separadamente que retornará um resultado final, vindo da associação do resultado de cada elemento. Logo, a malha é responsável pelo grau de fidelidade da simulação. Uma malha ruim gera poucos elementos, ou uma má distribuição dos mesmos, acarretando em erros no resultado final. Um exemplo de domínio com a malha feita sobre ele é mostrado na Figura 2.

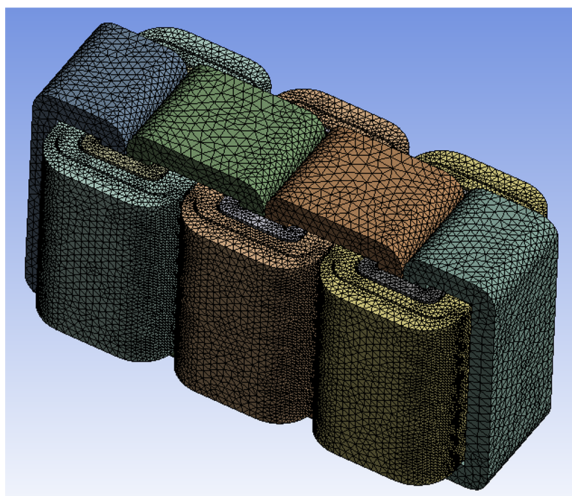


Figura 2 - Exemplo de domínio com malha feita sobre ele.

Na sequência, características dos materiais de cada domínio, bem como as condições de contorno do problema e o controle da simulação são definidas. Essa etapa é chamada de pré-processamento. O processamento é a quarta etapa, em que o software aplica suas equações de resolução do problema e retorna ao usuário gráficos de monitoramento do andamento da simulação.

A última etapa é o pós-processamento, em que o usuário tem acesso aos resultados finais e diversas formas de manuseá-los. É possível verificar temperaturas, velocidades, pressões e esforços através de gráficos e animações.

Como já foi dito, a simulação pode conter erros, e, por isso, é preciso ter cuidado para não avaliar um resultado errado como certo e atenção em cada uma das etapas. Contudo, como a simulação é uma reprodução da realidade, sempre vai haver alguma simplificação, e por motivos de capacidade computacional, essas simplificações podem ser maiores ou menores, e um pequeno erro deve surgir no resultado. Por isso, geralmente se aceita um erro de até 10% em simulações que empregam o método de elementos finitos, que levam em conta tudo isso.

4. PROJETO DE TRANSFORMADOR EFICIENTE

Os pontos de projeto analisados foram o núcleo magnético, óleo isolante, sistema de refrigeração e projeto elétrico. Partindo das características do modelo base já descritas, buscaram-se alternativas mais eficientes para cada ponto e para o conjunto.

4.1. ÓLEO ISOLANTE

O óleo mineral é o isolante líquido mais utilizado pelos transformadores até então, pois apresenta boas propriedades dielétricas e bom desempenho na dissipação do calor interno. Contudo, é um óleo derivado do petróleo, e por isso tem pontos negativos, como os problemas de mercado que o envolvem, e a questão de não ser biodegradável no meio ambiente. O último ponto, principalmente, estimulou a busca por um substituto do óleo mineral para tornar o transformador um equipamento ambientalmente correto.

Estudos encontraram no óleo vegetal propriedades semelhantes, que garantem tanto a boa função de manter o meio dielétrico, quando o bom desempenho na dissipação do calor. Outro ponto importante é o fato de que o isolante sólido apresenta menor degradação (e maior vida útil) quando imerso no óleo vegetal do que em comparação ao mineral, como pode ser visto na Figura 3. Além disso, o óleo vegetal tem uma alta biodegradabilidade, eliminando os riscos de contaminação do meio ambiente por qualquer exposição do mesmo.

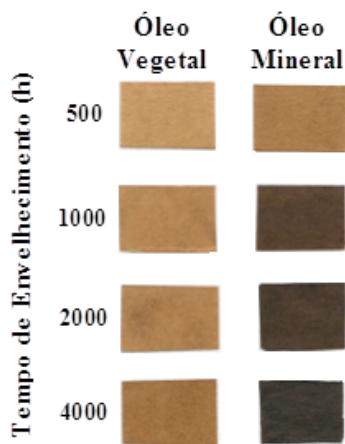


Figura 3 - Comparativo do tempo de envelhecimento do isolante sólido em óleo mineral e vegetal.

Com isso, o óleo vegetal se mostra um substituto com vantagens sobre o óleo mineral, proporcionando melhor rendimento e maior vida útil dos componentes do transformador.

4.2. NÚCLEO MAGNÉTICO

O núcleo magnético é fundamental no funcionamento desses equipamentos, uma vez que é o meio por onde circula o fluxo magnético e se consegue uma ótima conversão entre níveis de tensão. Como já foi mencionado, o núcleo faz parte da parte ativa do transformador, e está sujeito às perdas que geram calor.

Por esse motivo, se torna um fator de grande relevância para a eficiência do equipamento. Assim como o óleo mineral, o núcleo de aço-silício (FeSi) é o mais utilizado nos transformadores até agora, mas já possui um substituto que está crescendo no mercado. O metal amorfo garante a diminuição significativa das perdas à vazio, além de ser mais favorável à indução magnética, exigindo baixas correntes de magnetização, e ter chapas de espessuras muito menores

que as de FeSi. Essa combinação de fatores diminui também as perdas por histerese e correntes parasitas. Uma comparação das curvas de histerese dos dois materiais é mostrada na Figura 4.

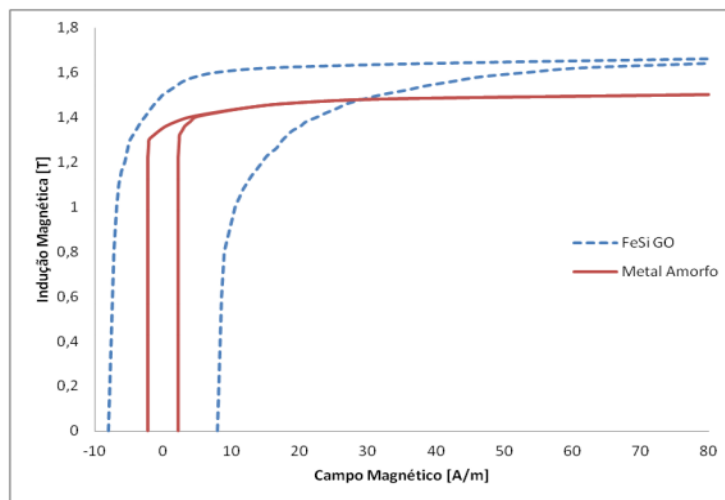


Figura 4 - Comparação entre as curvas de histerese do FeSi e metal amorfo.

Em meio às vantagens apresentadas, o metal amorfo é mais caro que FeSi, e, em virtude principalmente da espessura de suas chapas ser muito pequena, acaba elevando o preço total do núcleo e do equipamento como um todo.

4.3. SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO

A partir de simulações térmicas em elementos finitos para um melhor entendimento da dinâmica do óleo no sistema de refrigeração do modelo base, estudaram-se novas topologias para compor um radiador de maior capacidade de dissipação de calor.

Foi feita uma variação nas distâncias das aletas, em relação ao tanque e em relação entre a sua entrada e saída. Em ambas as avaliações, constatou-se que quanto maior for a distância, melhor será a dissipação, devido ao efeito positivo que o ar causa circulando por entre as aletas no meio externo. Portanto, é preciso respeitar as dimensões físicas do equipamento e do espaço em que será instalado para escolher o tamanho do radiador. Ambas avaliações podem ser vistas na Figura 5 e na Figura 6.

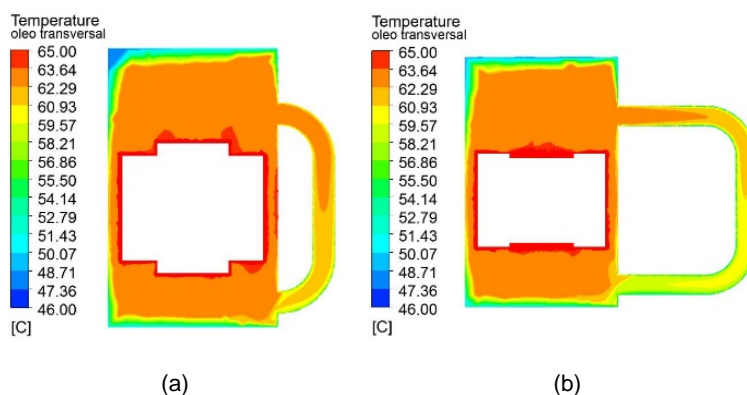


Figura 5 - Comparação das distâncias entre a aleta e o tanque.

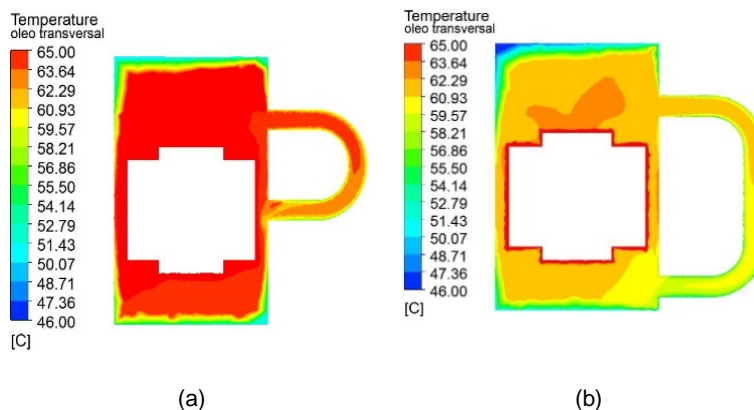


Figura 6 - Comparação das distâncias entre a entrada e saída da aleta.

Uma topologia tubular também foi testada, porém verificou-se um melhor rendimento no modelo elíptico. A aleta tubular ocupa mais espaço que a elíptica no tanque, sendo empregada em menor número para a mesma área. Ainda, notou-se que o canal de óleo que circula pela tubular é maior que na elíptica, contudo, a camada que realiza efetivamente a troca térmica é praticamente a mesma, conforme mostra a Figura 7, resultando em mais óleo circulando pela tubular sem realizar troca térmica.

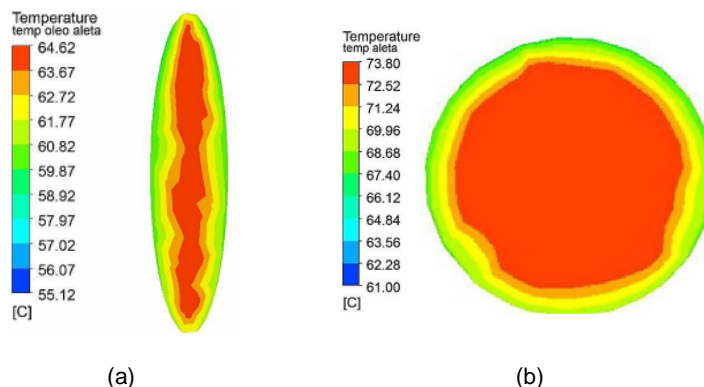


Figura 7 - Comparação do canal de óleo na aleta (a) elíptica e (b) tubular.

Uma última topologia foi simulada, adicionando ramos centrais às aletas, com o intuito de prover um maior caminho para o óleo percorrer e uma maior área de dissipação. A mudança mostrou que a adição de ramos centrais torna o sistema de refrigeração mais eficiente, como pode ser visualizado na Figura 8.

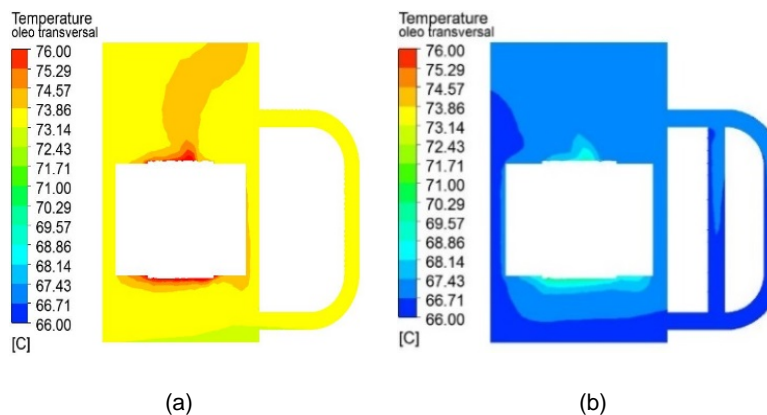


Figura 8 - Comparação entre aleta (a) simples e (b) com ramo central.

4.4. PROJETO ELÉTRICO

Construiu-se uma metodologia de cálculo otimizada para o projeto elétrico do novo transformador, que pode ser visualizada no fluxograma da Figura 9, seguindo algumas etapas. A primeira delas é a definição de alguns parâmetros do transformador, como a potência e a tensão de operação dos terminais de alta tensão (AT) e de baixa tensão (BT).

Depois, estipula-se um valor inicial para o número de espiras da BT. Com a relação de transformação, tem-se o número de espiras da AT e é possível realizar os cálculos das dimensões físicas do núcleo e dos enrolamentos.

A etapa que se segue é a determinação das perdas à vazio e com carga do transformador, que devem ser comparadas com as perdas estipuladas pela NBR 5440. Se as perdas estiverem dentro dos limites, calcula-se a corrente de excitação, caso contrário, é preciso adotar outro valor de espiras para BT e realizar todos os cálculos novamente até obter um valor admissível para as perdas.

De maneira semelhante, a corrente de excitação também deve seguir a NBR 5440 e caso esteja acima do limite estipulado, adota-se outro número de espiras para a BT e os cálculos são refeitos até satisfazer a norma. Uma vez que

o valor calculado for abaixo dos valores admissíveis, determina-se a impedância do transformador.

A impedância também é comparada com os valores admissíveis pela NBR 5440 e, assim como as perdas e a corrente de excitação, se não respeitar a norma, se determina todos os parâmetros novamente com outro valor para o número de espiras da BT.

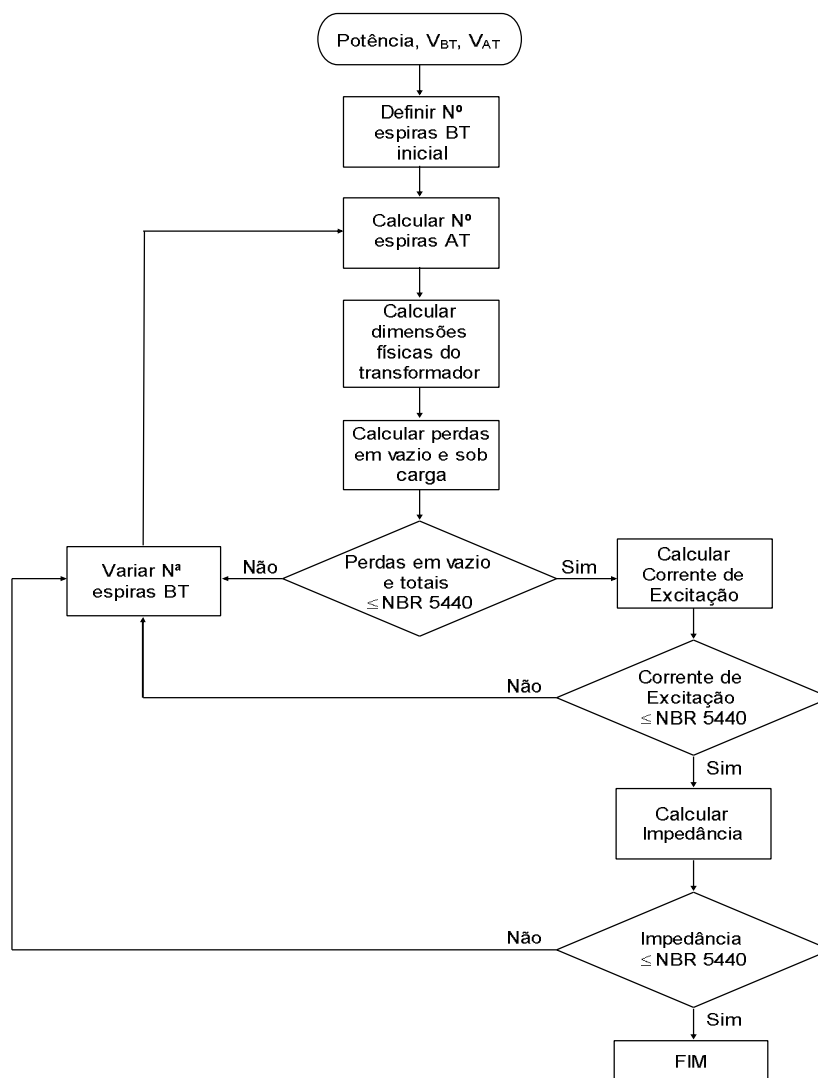


Figura 9 - Fluxograma da metodologia de cálculo para o projeto elétrico.

5. RESULTADOS

Com os estudos realizados sobre o núcleo magnético, óleo isolante, sistema de refrigeração e projeto elétrico, concluiu-se sobre cada um e, em conjunto com a mesma empresa responsável pelo modelo base, desenvolveu-

se um novo transformador, mais eficiente que os convencionais. Uma reprodução 3D do transformador projetado pode ser visualizada na Figura 10.

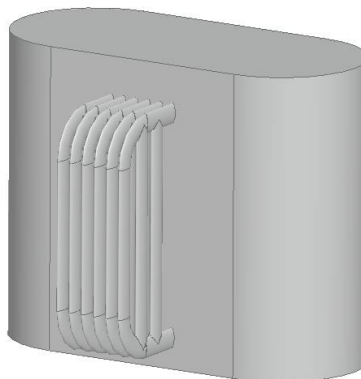


Figura 10 – Modelo do transformador projetado.

O núcleo magnético de FeSi foi substituído pelo de metal amorfo, reduzindo significativamente as suas perdas, principalmente a vazia, implicando em uma redução do calor gerado no seu interior. O óleo isolante escolhido foi o vegetal, em função das suas propriedades de isolação e de dissipação do calor, mas também por ser ambientalmente correto.

Para refrigerar melhor, o radiador adotado foi um conjunto de 6 aletas elípticas, com dois ramos centrais cada, colocadas bem ao centro da face frontal do tanque. A Figura 11 mostra com detalhe a aleta adotada.

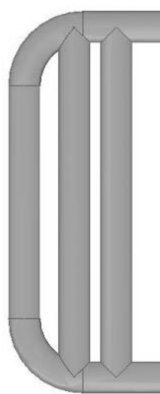


Figura 11 - Aleta elíptica com dois ramos centrais adotada.

Com essas substituições, houve uma significativa redução das perdas no núcleo e um aumento na dissipação do calor com o novo sistema de refrigeração. Reunido essas mudanças, através da metodologia de cálculo do projeto elétrico, foi possível elevar a potência do equipamento, de 45 kVA para 75 kVA.

Com todas as características definidas, o equipamento foi simulado no *software* ANSYS® em elementos finitos para verificar seu funcionamento, principalmente suas temperaturas internas. Os resultados podem ser vistos na Figura 12.

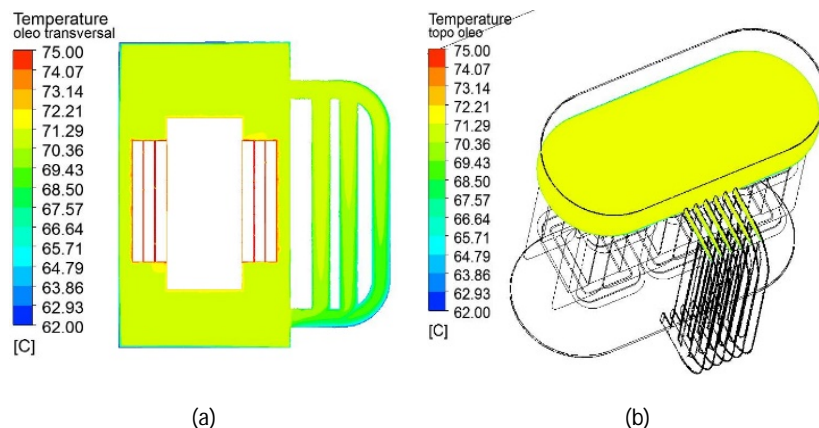


Figura 12 - Temperatura do óleo (a) transversal e (b) topo.

A norma admite uma elevação de temperatura dos enrolamentos sobre o ambiente de 55°C e para o topo de óleo de 50°C. As simulações foram realizadas com uma temperatura ambiente de 25°C, e os resultados mostraram-se dentro dos limites.

O transformador projetado foi fabricado e a empresa o submeteu a ensaios e teste de campo, fornecendo os resultados das temperaturas internas para comparação com as simulações feitas. Os resultados das simulações ficaram próximos dos encontrados pelos ensaios práticos, se encaixando dentro da faixa de erro admissível de 10%.

Para finalizar os estudos da construção do transformador mais eficiente, foi feito em laboratório o ensaio de elevação da temperatura, através de um *setup* que foi montado, para verificação e comparação dos resultados com aqueles dos ensaios de campo e das simulações. O transformador fabricado e o *setup* montado em laboratório estão mostrados na Figura 13 e Figura 14, respectivamente.



Figura 13 - Transformador projetado e fabricado.

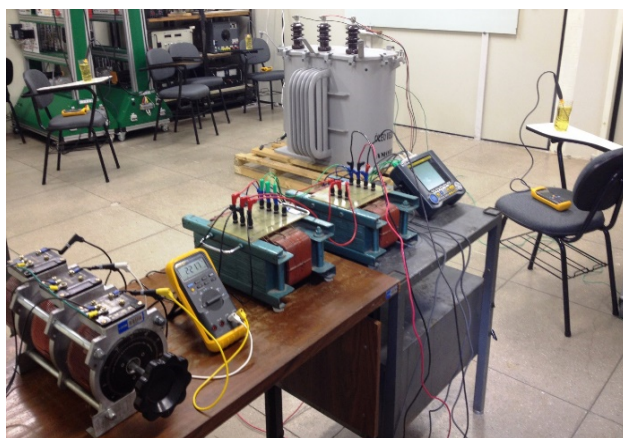


Figura 14 - Setup montado para ensaio de elevação de temperatura.

O ensaio de elevação de temperatura, ou de curto-circuito, como a NBR 5356-2 também chama, estabelece a elevação de temperatura do topo de óleo isolante em regime permanente com dissipação das perdas totais do transformador. Estabelece também a elevação de temperatura dos enrolamentos com corrente nominal. Durante o ensaio são monitoradas as temperaturas do ambiente e do topo de óleo por meio de termômetros dispostos adequadamente. Com as medições, determina-se o gradiente de temperatura do óleo, e a norma determina que o ensaio esteja finalizado quando esse gradiente é menor que 1°C nas últimas três horas. A Figura 15 mostra as curvas de temperaturas (temperatura ambiente, de topo de óleo e gradiente) obtidas ao longo do ensaio. Junto com as medições dos termômetros, foram feitas imagens térmicas do transformador, mostradas na Figura 16.

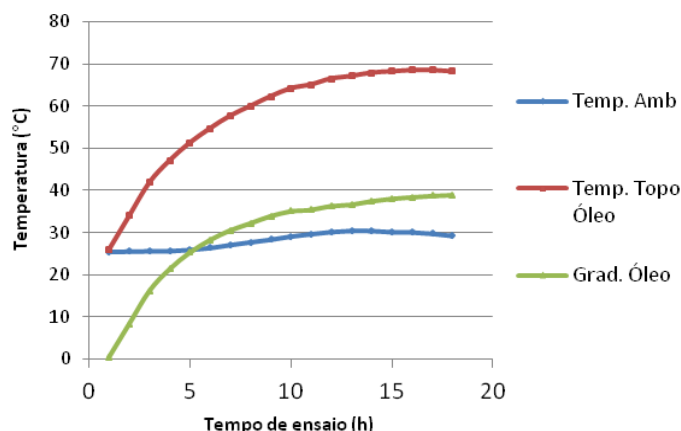


Figura 15 - Ensaio de elevação de temperatura.

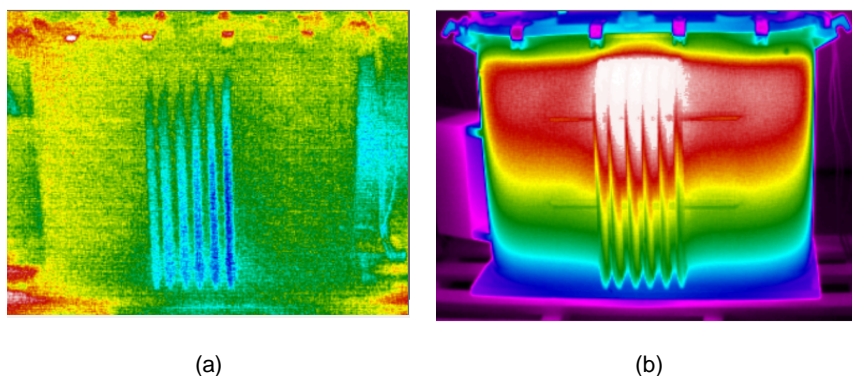


Figura 16 - Imagens térmicas durante o ensaio (a) no início e (b) após 17 horas.

Os resultados da simulação em elementos finitos, ensaios de campo da fabricante e ensaio de elevação de temperatura no laboratório estão resumidos na Tabela 1.

Tabela 1 – Resultados térmicos para o topo de óleo para cada método.

Teste	Temperatura média do topo de óleo	Gradiente de temperatura em relação ao ambiente
Ensaio de campo	64,32°C	39,78°C
Simulação em elementos finitos	69,67°C	44,67°C
Ensaio de elevação de temperatura	68,2°C	38,93°C

6. CONCLUSÕES

A partir de um transformador de distribuição convencional tido como modelo base, desenvolveu-se um protótipo de elevada eficiência e ambientalmente correto, utilizando núcleo magnético de metal amorfo, óleo

vegetal isolante e um sistema de refrigeração otimizado. Essas características garantiram, em relação ao modelo base, uma redução de aproximadamente 75% das perdas a vazio e cerca de 20% das perdas totais, além de uma redução de 30% na massa total do radiador utilizado.

As mudanças feitas no projeto também acarretaram em um aumento de 60% no custo inicial do transformador em relação a um convencional. Entretanto, com a redução das perdas utilizando metal amorfo no núcleo e uma maior vida útil dos isolantes sólidos imersos no óleo vegetal, o transformador projetado possui maior eficiência e vida útil, fazendo com que o investimento inicial se pague em até 6 anos. Prevendo uma produção em escala deste protótipo, esse retorno econômico deve se tornar mais atrativo.

Com isso, o estudo desenvolvido apresenta um protótipo de transformador de distribuição de elevada eficiência, integrando vários pontos otimizados no seu projeto, que visa aumentar a eficiência e confiabilidade do sistema de distribuição de energia elétrica como um todo.

Referências

- Salustiano, R. **Análise técnica de transformadores para redes de média tensão**. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade Federal de São Paulo, São Paulo, 2010.
- KIM, M., CHO, S. M., KIM, J. K. **Prediction and evaluation of the cooling performance of radiators used in oil-filled power transformer applications with non-direct and direct-oil-forced flow**. Experimental Thermal and Fluid Science, vol. 44, Ed. Elsevier, 2013, pp. 392-397.
- A. F. D. S. Maurício. **Construção e caracterização de um transformador de 535,5 VA com núcleo de ferro amorfo**. Dissertação de Mestrado, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2014.
- Uhren, W. **Aplicação de óleo vegetal como meio isolante em equipamentos elétricos, em substituição ao OMI**. Dissertação de Mestrado Profissionalizante, Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento e Instituto de Engenharia do Paraná, Curitiba, 2007.
- ABNT NBR 5356-2. **ABNT NBR 5356-2: 2007 Transformadores de Potência – Parte 2: Aquecimento**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, p. 27. 2007.
- ABNT NBR 5440. **ABNT NBR 5440: 2014 Transformadores para Redes Aéreas de Distribuição – Requisitos**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, p. 52. 2014.