

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Alexander do Canto Dutra

**ANÁLISE ELETROMAGNÉTICA E TÉRMICA DE
TRANSFORMADORES DE DISTRIBUIÇÃO UTILIZANDO
SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS E ENSAIOS LABORATORIAIS**

Santa Maria, RS
2020

Alexander do Canto Dutra

**ANÁLISE ELETROMAGNÉTICA E TÉRMICA DE TRANSFORMADORES DE
DISTRIBUIÇÃO UTILIZANDO SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS E ENSAIOS
LABORATORIAIS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Engenheiro Eletricista**.

Orientador: Tiago Bandeira Marchesan, Dr. Eng.

Santa Maria, RS
2020

© 2020

Todos os direitos autorais reservados a Alexander do Canto Dutra. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita com autorização por escrito do autor. Endereço: Av. Medianeira, 1845, APTO 302, Centro, Rio Grande do Sul, CEP 97060-001.

Fone +55 55 9 91415686. E-mail: alexander.dutr@gmail.com

Alexander do Canto Dutra

**ANÁLISE ELETROMAGNÉTICA E TÉRMICA DE TRANSFORMADORES DE
DISTRIBUIÇÃO UTILIZANDO SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS E ENSAIOS
LABORATORIAIS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso de Engenharia Elétrica, da
Universidade Federal de Santa Maria (UFSM,
RS), como requisito parcial para obtenção do
grau de **Engenheiro Eletricista**.

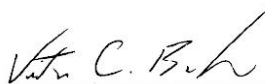
Aprovado em 17 de agosto de 2020:



Tiago Bandeira Marchesan, Dr. Eng. (UFSM)
(Presidente/Orientador)



Leonardo Hautrive Medeiros, Me. Eng. (UFSM)
(Membro Convidado)



Vitor C. Bender, Dr. Eng. (UFSM)
(Membro Convidado)

Santa Maria, RS
2020

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Tiago Bandeira Marchesan, não só por aceitar ser meu orientador, mas também por contribuir na minha formação acadêmica e por confiar em meu trabalho nesses últimos anos.

Também agradeço ao grupo GEDRE e seus colaboradores, onde tive a oportunidade de aprender como nunca havia aprendido e onde passei boa parte de minha graduação. Em especial aos integrantes: Nórton Barth, Flávio Reck e Guilherme M.

A banca examinadora, Leonardo Hautrive Medeiros e Vitor Bender, pelo tempo disponibilizado na avaliação deste trabalho. Sinto-me honrado de ser avaliado por vocês que sempre estiveram presentes no grupo de pesquisa durante todos esses anos e sempre estão dispostos a ajudar o próximo.

Aos colegas e amigos que tive a felicidade de conhecer e crescer junto durante esses anos.

Agradeço imensamente a minha namorada, Claudia Müller, pelo companheirismo, pelo carinho e principalmente pela paciência durante todos esses anos. O teu sorriso me dá forças diariamente. Sem você isso não seria possível.

“‘Todo homem que precise dizer ‘eu sou o rei’ não é um rei de verdade’”

Tywin Lannister

RESUMO

ANÁLISE ELETROMAGNÉTICA E TÉRMICA DE TRANSFORMADORES DE DISTRIBUIÇÃO UTILIZANDO SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS E ENSAIOS LABORATORIAIS

AUTOR: ALEXANDER DO CANTO DUTRA

ORIENTADOR: TIAGO BANDEIRA MARCHESAN

Um transformador de distribuição está apto a atuar quando atende aos requisitos elétricos e mecânicos impostos pela norma ABNT NBR 5440; nesse sentido, dois modelos de transformadores, com mesmo volume de tanque, porém com diferenças de geometrias são estudados e comparados, sob condições normativas. Para estudar as consequências das diferenças físicas e verificar se os protótipos atendem a normativa, realiza-se simulações térmicas, eletromagnéticas e ensaios laboratoriais, após é realizada uma análise comparativa. Assim o objetivo do trabalho se resume a simular e ensaiar dois protótipos de transformadores, diferenciados pela presença e ausência de radiador, posteriormente comparar as simulações com ensaios e verificar se os modelos atendem as normas regulamentadoras.

Palavras-chave: Transformadores de distribuição; Radiador; Método dos Elementos finitos.

ABSTRACT

ELECTROMAGNETIC AND THERMAL ANALYSIS OF DISTRIBUTION TRANSFORMERS USING COMPUTATIONAL SIMULATIONS AND LABORATORY TESTS

AUTOR: ALEXANDER DO CANTO DUTRA

ORIENTADOR: TIAGO BANDEIRA MARCHESAN

A distribution transformer is able to operate when it attends to the electrical and mechanical requirements that norm ABNT NBR 5440 imposes. In this way, two transformer models, with the same tank volume but with geometrical differences are studied and compared under normative conditions. To study the consequences of the physical differences and to verify whether the prototypes are in accordance with the normative, thermal and electromagnetic simulations, and prototype tests are made. After this, the results can be compared. Thus, the objective of this work is to simulate and test two transformer prototypes, one having a radiator and the other not having it. After the simulations and tests, comparisons and norm accordance can be verified for the two designed models.

Keywords: Finite Element Method; Distribution transformers; Radiator.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|---|----|
| Figura 1 – Exemplo de um Transformador de Distribuição Trifásico..... | 14 |
| Figura 2 – Transformador de núcleo de ferro, indutivamente acoplado..... | 15 |
| Figura 3 – Comparação entre as curvas de histerese do FeSi e metal amorfo..... | 19 |
| Figura 4 – Sistemática da etapa de desenvolvimento | 25 |
| Figura 5 – Exemplo de malha gerada sobre uma geométrica no Software Maxwell ... | 27 |
| Figura 6 – Interface gráfica do Software Ansys Maxwell..... | 27 |
| Figura 7 – Ambiente do <i>software</i> ANSYS ® Maxwell..... | 28 |
| Figura 8 – Modelos de transformadores para simulações térmicas | 30 |
| Figura 9 – Modelos de transformadores | 33 |
| Figura 10 – Modelo com radiador(a), Modelo sem radiador (b)..... | 36 |
| Figura 11 – Gráfico comparativo de perdas eletromagnéticas | 37 |
| Figura 12 – Gráficos com linha de interpolação dos pontos da temperatura | 38 |
| Figura 13 – Gráficos com linha de interpolação dos pontos da temperatura (°C) em função do tempo (h) das simulações térmicas: (a) transformador com aletas (b) transformador sem aletas | 39 |
| Figura 14 – Renderização das simulações térmicas: (a) perspectiva tridimensional da configuração sem aletas, (b) perspectiva tridimensional da configuração com aletas, (c) vista frontal com transparência do tanque, na configuração sem aletas, (d) vista lateral com transparência do tanque, na configuração com aletas..... | 40 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 – Classificação dos transformadores quanto ao tipo de resfriamento..... | 24 |
| Tabela 2 – Materiais utilizados..... | 26 |
| Tabela 3 – Dados de perdas magnéticas | 26 |
| Tabela 4 – Equipamentos utilizados nos ensaios..... | 26 |
| Tabela 5 – Tabela informativa de ensaios | 31 |
| Tabela 6 – Parâmetros de entrada para o projeto de transformadores | 34 |
| Tabela 7 – Materiais utilizados para simulação..... | 35 |
| Tabela 8 – Resultados de perdas magnéticas..... | 35 |

LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|----------|--------------------------------|
| V_1 | Tensão no Primário |
| N_1 | Número de Espiras Primário |
| I_1 | Corrente no Primário |
| E_1 | Tensão Produzida no Primário |
| I_1' | Corrente de Reação no Primário |
| V_2 | Tensão no Secundário |
| N_2 | Número de Espiras Secundário |
| I_2 | Corrente no Secundário |
| V_2 | Tensão no Secundário |
| I_μ | Corrente de Magnetização |
| F.E.M | Força Eletromotriz |
| Φ_1 | Fluxo no Primário |
| Φ_2 | Fluxo no Secundário |
| Φ_m | Fluxo Mutuo |
| p | Perdas no núcleo |
| ω | Frequência Angular |

SUMÁRIO

| | | |
|--------------|--|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 12 |
| 1.1 | OBJETIVOS | 12 |
| 1.2 | ESTRUTURA DO TRABALHO | 12 |
| 2 | TRANSFORMADORES ELÉTRICOS | 13 |
| 2.1 | PRINCIPIO DE FUNCIONAMENTO | 14 |
| 2.2 | COMPONENTES CONSTRUTIVOS..... | 16 |
| 2.2.1 | TANQUE..... | 17 |
| 2.3 | Perdas Técnicas dos Transformadores | 22 |
| 3 | METODOLOGIA DE SIMULAÇÕES EM ELEMENTOS FINITOS..... | 25 |
| 3.1 | ANÁLISE DE ELEMENTOS FINITOS..... | 26 |
| 3.2 | ESTUDO ELETROMAGNÉTICO DE TRANSFORMADORES | 29 |
| 3.3 | ESTUDO TERMICO DE TRANSFORMADORES | 29 |
| 3.4 | ENSAIOS TERMICOS DE TRANSFORMADORES..... | 31 |
| 4 | RESULTADOS E DISCUSSÃO | 33 |
| 4.1 | ANÁLISE DE ENSAIOS TÉRMICOS EM TRANSFORMADORES ELÉTRICOS..... | 34 |
| 4.2 | ANÁLISE ELETROMAGNETICA EM ELEMENTOS FINITOS PARA TRANSFORMADORES ELÉTRICOS | 35 |
| 4.3 | ANÁLISE TÉRMICA EM ELEMENTOS FINITOS PARA TRANSFORMADORES | 38 |
| 5 | CONSIDERAÇÕES FINAIS..... | 42 |
| | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 43 |
| | APÊNDICE – RELATÓRIO DOS ENSAIOS DE TRANSFORMADOR..... | 48 |

1 INTRODUÇÃO

A vida útil de transformadores é de suma importância em seu projeto e depende de alguns fatores que interferem diretamente, entre eles as perdas magnéticas e a elevação de temperatura em operação. Visto isso, é necessário um bom projeto construtivo para evitar a redução da sua vida útil e uma maneira eficaz de examinar estas grandezas térmicas e magnéticas para assim comprovar a eficácia do projeto. Uma maneira eficaz de analisar o transformador é através da realização de ensaios laboratoriais de rotina, os quais demandam de tempo para serem realizados e conseqüentemente possuem um custo elevado, em função dos equipamentos e infraestrutura necessária. Assim torna-se oportuno uma validação através de simulações computacionais que determine se o projeto é eficaz ou precisa ser modificado.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho é apresentar um estudo para obtenção de dados de projeto tais como perdas magnéticas e elevação de temperatura de um transformador, são obtidos dados do projeto a partir de ensaios laboratoriais e os resultados são validados através de simulações utilizando o *software* ANSYS ® com suas plataformas Maxwell e CFD.

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho é dividido em cinco capítulos, sendo este o primeiro.

No Capítulo 2, realiza-se revisão bibliográfica apresentando os fundamentos de transformadores de distribuição e potência, além de detalhar os seus principais componentes construtivos.

No Capítulo 3, apresenta-se o *software* utilizado para simulações de elementos finitos juntamente com a descrição do procedimento para a simulação desses componentes utilizando o método de elementos finitos e os métodos de ensaios térmicos feitos de modo a comparar com as simulações.

No Capítulo 4 são descritos os resultados obtidos para a simulação magnéticas e térmicas no *software* de análise de elementos finitos juntamente com comparações com os ensaios térmicos feitos em laboratório.

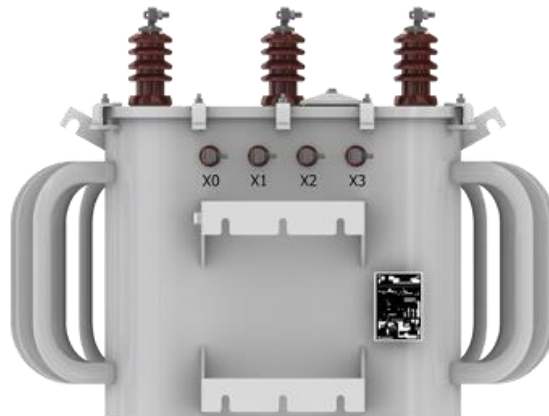
No Capítulo 5, considerações finais são descritas, apontando os principais resultados e o que foi desenvolvido no trabalho, bem como sugestões para trabalhos futuros.

2 TRANSFORMADORES ELÉTRICOS

O transformador é um equipamento de grande importância no sistema elétrico de potência, uma vez que tem a função de reduzir ou elevar níveis de tensão ou corrente, viabilizando, assim, a transmissão e o fornecimento de energia elétrica (MONIZ, 2007) (NUNES, 2011).

A invenção do transformador e o desenvolvimento simultâneo de estações geradoras de Corrente Alternada (CA) eliminaram as restrições de alcance e de capacidade dos sistemas de energia elétrica. Idealmente, um transformador converte um nível de tensão CA em outro nível de tensão CA sem afetar a potência elétrica real fornecida. Se um transformador elevar o nível de tensão de um circuito, ele deverá diminuir a corrente para manter a potência que chega ao dispositivo igual à potência que o deixa. Portanto, a energia elétrica CA pode ser gerada em um local centralizado, em seguida sua tensão é elevada para ser transmitida a longa distância, com perdas muito baixas, e finalmente sua tensão é rebaixada novamente para seu uso final. Em um sistema de energia elétrica, as perdas de transmissão são proporcionais ao quadrado da corrente que circula nas linhas. Desse modo, usando transformadores, uma elevação da tensão de transmissão por um fator de 10 permitirá reduzir as perdas de transmissão elétrica em 100 vezes devido à redução das correntes de transmissão pelo mesmo fator. Sem o transformador, simplesmente não seria possível usar a energia elétrica em muitas das formas em que é utilizada hoje (CHAPMAN,2013). A figura 1 ilustra um exemplo de um transformador de distribuição.

Figura 1. – Exemplo de um Transformador de Distribuição Trifásico.

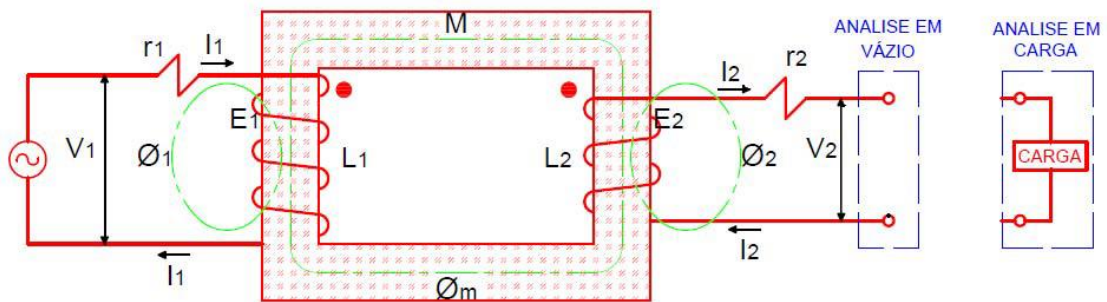


Fonte: ROMAGNOLE PRODUTOS ELÉTRICOS S.A., 2014.

2.1 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

Um transformador é um dispositivo que converte, por meio da ação de um campo magnético, a energia elétrica CA de uma dada frequência e nível de tensão em energia elétrica CA de mesma frequência, mas outro nível de tensão. Ele consiste em duas ou mais bobinas de condutores enrolados em torno de um núcleo ferromagnético comum. A única conexão entre as bobinas é o fluxo magnético comum presente dentro do núcleo. Um dos enrolamentos do transformador é ligado a uma fonte de energia elétrica CA e o segundo (e possivelmente um terceiro) enrolamento do transformador fornece energia às cargas. O enrolamento do transformador ligado à fonte de energia é denominado enrolamento primário ou enrolamento de entrada e o enrolamento conectado às cargas é denominado enrolamento secundário ou enrolamento de saída. Se houver um terceiro enrolamento, ele será denominado enrolamento terciário (CHAPMAN,2013).

Figura 2 – Transformador de núcleo de ferro, indutivamente acoplado.



Fonte: (LAQEE,2015).

Em uma análise em vazio quando V_1 é aplicada nos extremos do enrolamento primário de N_1 espiras, o primário comporta-se como um circuito puramente indutivo. Esse absorverá, portanto, determinada corrente I_μ (corrente de magnetização), defasada de 90° em atraso com respeito à tensão aplicada V_1 , que circula mesmo quando o transformador não está conectado á cargas. Essa corrente produzirá um fluxo Φ_m , que fica concatenado no núcleo. Este fluxo é um fluxo alternado que varia com a mesma fase de I_μ que o produz. O fluxo induz em cada espira uma Força Eletromotriz (F.E.M). E_1 , defasada de 90° em atraso com respeito ao fluxo (LAQEE,2015)

No enrolamento primário composto de N_1 espiras agrupadas em série, gera-se uma f.e.m. E_1 total que adquire seu valor máximo:

$$E_1 = 10^{-8} w \Phi_m N_1 \quad (1)$$

Analogamente o mesmo fluxo induz no outro enrolamento composto por N_2 espiras, a f.e.m. secundária E_2 , cujo valor máximo será:

$$E_2 = 10^{-8} w \Phi_m N_2 \quad (2)$$

Dividindo-se membro a membro a razão entre as f.e.m induzidas (1) e (2), tem:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (3)$$

Assim se obtém a relação das tensões do transformador, onde E_1 e E_2 estão entre si na relação direta dos números das espiras de seus respectivos enrolamentos (LAQEE,2015).

Partindo para uma análise com carga temos uma carga indutiva ligada aos terminais do secundário do transformador ideal, produz uma corrente I_2 , atrasada em relação a E_2 de um ângulo θ_2 . A corrente I_2 produz sobre o núcleo uma força magneto-motriz $N_2 I_2$ em fase com I_2 , a qual tende a alterar o fluxo produzido pela f.m.m. $N_1 I_\mu$, agindo como um fluxo desmagnetizante que reduz o fluxo mútuo Φ_m , e as f.e.m. induzidas E_2 e E_1 , instantaneamente.

A redução de E_1 obriga o enrolamento primário a absorver da linha que o alimenta, além de I_μ , também outra corrente I_1' (corrente primária de reação) que circula no primário, tal que $N_1 I_1' = N_2 I_2$, restabelecendo Φ_m em seu valor original. Esta igualdade é necessária a fim de que f.m.m. primárias restauradas sejam iguais e opostas a f.m.m. secundárias desmagnetizante. Assim se obtém a relação das correntes, onde a razão entre as correntes no primário e secundário é inversamente proporcional à relação de espiras:

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1} \quad (4)$$

A corrente I_1 resulta defasada com respeito à tensão $V_1 = -E_1$ de um ângulo Φ_1 , o qual depende do valor e da defasagem Φ_2 de I_2 . Assim variando I_2 , fica inalterada I_μ , mas varia junto à corrente I_2 a corrente I_1' (LAQEE,2015).

2.2 COMPONENTES CONSTRUTIVOS

A fase de construção e montagem de um transformador são muito importantes, além de que, cada fabricante possui uma forma particular para a construção dos seus transformadores. Os aspectos básicos são essencialmente os mesmos, permitindo um padrão construtivo (NOGUEIRA & ALVES, 2009).

É possível identificar alguns tópicos essenciais da construção de um transformador: tanque, enrolamentos, núcleo, isolamento e sistema de refrigeração. Os enrolamentos têm a função de gerar o fluxo através da passagem da corrente. O núcleo tem a função de conduzir o fluxo gerado pelos enrolamentos, por um caminho de alta permeabilidade magnética, realizando o

acoplamento magnético entre os enrolamentos. Juntos, os enrolamentos e o núcleo magnético, compõem a parte ativa do transformador. A isolamento de um transformador é de extrema importância, já que é ela que mantém os componentes do transformador isolados e permite o seu correto funcionamento. O sistema de refrigeração tem o papel de permitir a circulação do fluido isolante e resfriar o interior do transformador. (FEIL, 2015) (IARONKA, 2014).

2.2.1 TANQUE

O tanque de um transformador é uma estrutura fechada, feita de chapas de aço. Isso se comporta como uma estrutura de placa. Os reforços são geralmente fornecidos em todos os lados e também na tampa superior do tanque para reduzir tensões e desvios nas placas sob vários tipos de cargas (KULKARNI S.V. & KHAPARDE S.A).

Os tanques do transformador são projetados para uma pressão mais alta do que o operacional, conforme especificado pelos padrões. O projeto do tanque e sua fabricação são complicados devido a limitações impostas pelo transporte (peso e tamanho), exigência de que a quantidade de óleo seja ótima, pressão e vácuo, a estrutura do transformador deve suportar outras cargas como elevação, transporte, etc (KULKARNI S.V. & KHAPARDE S.A).

Dependendo do local de instalação do transformador, a força da estrutura do transformador contra uma carga sísmica também precisa ser verificada.

As formas do tanque são geralmente complexas e a aplicação de métodos analíticos é difícil. Por exemplo, se o tanque estiver não retangular e se houver muitos bolsos (estruturas de extrusão) ou aberturas, métodos numéricos como o Método do Elementos Finitos (MEF) são usados para determinar tensões e desvios sob várias condições de carregamento (KULKARNI S.V. & KHAPARDE S.A).

2.2.2 ENROLAMENTOS

Pelas suas características elétricas e mecânicas, além de seu custo, as bobinas, ou enrolamentos, constituem uma importante parte do projeto de transformadores. Elas devem possuir as características de isolamento e suportar temperaturas de acordo com sua classe de operação. Mecanicamente, as bobinas estão sujeitas aos altíssimos esforços derivados das forças eletromagnéticas durante os curtos-circuitos no sistema elétrico do qual o transformador faz parte. Com isso, devem ter propriedades mecânicas para suportar as máximas correntes e

forças previstas em projeto. Além do mais, uma parcela muito significativa do custo do transformador está concentrada nos enrolamentos (RIES,2007).

As bobinas são condutores isolados, que podem ser de cobre ou alumínio, enrolados no núcleo do transformador, para assim criar o circuito eletromagnético. Mesmo o alumínio sendo mais leve e barato que o cobre, a sua capacidade de condução de corrente é menor se comparado com um condutor de cobre de mesma seção (HARLOW, 2004), (NOGUEIRA & ALVES, 2009), (NUNES, 2011).

2.2.3 NÚCLEO

No caso dos transformadores, a principal função do núcleo é transferir a potência do primário para o secundário, provendo um caminho para o fluxo magnético. Para tanto, utiliza-se, em geral, materiais ferromagnéticos, com o propósito de se criar um caminho de alta permeabilidade magnética, favorecendo a circulação do fluxo magnético por esse meio. A elevada razão do fluxo mútuo pelo fluxo disperso, devido ao uso de materiais ferromagnéticos no núcleo de transformadores, resultam em um alto grau de acoplamento entre os enrolamentos primário e secundário, podendo chegar a valores próximos ao unitário (FEIL, 2015) (IARONKA, 2014) (SALUSTIANO, 2012).

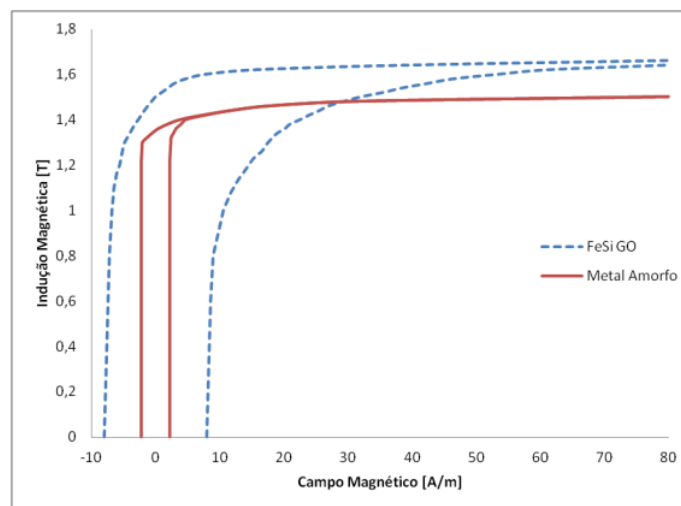
Sempre deve ser levado em consideração a qualidade do material que é empregado no núcleo do transformador, que está atrelado ao aquecimento em virtude das perdas quando em operação, devido a isso, os núcleos devem ser feitos de materiais ferromagnéticos (ATS, 2020)

A alta resistividade elétrica também é desejada no núcleo de transformadores, a fim de se diminuir as perdas por correntes parasitas. O aumento da resistividade pode ser obtido através da adição de silício em ligas de ferro. Outra maneira de reduzir as perdas por correntes parasitas, ou seja, as perdas pelo surgimento de corrente elétrica pelo núcleo magnético, é a utilização de chapas finas eletricamente isoladas na construção do núcleo de transformadores, evitando, deste modo, o contato entre as chapas e, conseqüentemente, reduzindo os possíveis caminhos para as correntes parasitas (FEIL, 2015) (IARONKA, 2014) (JORDÃO, 2002) (SALUSTIANO, 2012).

Para baixas frequências é utilizado ferro silício e ligas amorfas. Os núcleos de Ferro-Silício, são constituídos de Si 0,25% a 4,75% e o restante de Ferro. O ferro possui as características magnéticas, que ajudam no desempenho e o silício atua como um isolante do núcleo. As Ligas Amorfas, possuem propriedades únicas. Feitas a partir da rápida solidificação de ligas metálicas, apresentam fácil magnetização devido ao fato de seus átomos se encontrarem arranjados de maneira aleatória, facilitando a orientação dos domínios magnéticos (ATS, 2020)

Os materiais magnéticos mais produzidos e utilizados em núcleos de máquinas elétricas são os chamados *aços elétricos*. Estes materiais dividem-se basicamente em três grupos: aços de baixo carbono, aços de grão não orientado (GNO) e aços de grão orientado (GO), sendo estes dois últimos conhecidos por aços silícios, e são os mais utilizados na fabricação de transformadores (FEIL, 2015) (IARONKA, 2014) (PRONTO, 2010). Mas o metal é um grande substituto destes outros ferros magnéticos pois ele 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 aço silício (FeSi). Essa combinação de fatores diminui também as perdas por histerese e correntes parasitas. Pode-se conferir uma comparação das curvas de histerese dos dois materiais na Figura 3.

Figura 3 - Comparação entre as curvas de histerese do FeSi e metal amorfo.



Fonte: FEIL,2015

Entretanto mesmo com as vantagens apresentadas, o metal amorfo é um material de custo mais elevado que o aço silício, e principalmente por a espessura de suas chapas ser muito pequena cerca de dez vezes menor que a espessura das lâminas de aço-silício, o que diminui muito as perdas por corrente de *Foucault*, mas acarreta em um elevado custo de produção, aumentando o preço total do núcleo e do equipamento como um todo (FEIL,2015), (MAURÍCIO, 2014). Por apresentar um estreito ciclo de histerese e alta permeabilidade magnética, apresentando menores perdas por histerese e por corrente de *Foucault* (SALUSTIANO, 2012). Assim pela sua curva de histerese apresenta uma redução de perdas no núcleo que pode atingir valores entre 60% e 90%, sendo uma grande vantagem a utilização deste tipo de metal em núcleos de transformadores (HASEGAWA & PRUESS, 2001).

2.2.4 SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO

Nos transformadores, assim como em qualquer dispositivo elétrico, nem toda a potência de entrada é fornecida a carga, ou seja, ocorre perda de energia. As perdas, por sua vez, ocasionam o aumento de temperatura em várias partes do transformador. As principais fontes de perdas são o núcleo e os enrolamentos. As perdas podem ser divididas, basicamente, em perdas no núcleo e perdas nos enrolamentos, sendo estas as principais responsáveis pelo aumento de temperatura no transformador. As perdas no núcleo dependem da tensão, enquanto as perdas nos enrolamentos dependem da carga do equipamento (KULKARNI & KHAPARDE, 2004), (MCLYMAN, 2004)(MEDEIROS, 2017).

A transferência de calor das diversas partes de um transformador é feita por um ou mais dos seguintes modos: condução, convecção e radiação. Na transferência de calor por condução, o fluxo de calor se dá a partir do centro do núcleo e dos enrolamentos para as superfícies externas dos mesmos, as quais estão em contato com o meio de arrefecimento (ar ou óleo). O processo de condução também é realizado através das paredes do tanque e dos radiadores do transformador. No processo de convecção, o calor é transferido das superfícies externas do núcleo e dos enrolamentos para o fluido isolante e refrigerante (ar ou óleo). Quando isso ocorre, a temperatura do fluido aumenta e conseqüentemente a sua densidade diminui. Além disso, o calor é transferido do fluido isolante e refrigerante para as paredes internas do tanque e dos radiadores, comumente formados por conjunto de aletas que facilitam a refrigeração, proporcionando a redução da temperatura do fluido e o aumento de sua densidade, permitindo assim, a continuação de circulação do fluido isolante e refrigerante. O processo de convecção também ocorre das paredes externas do tanque e dos radiadores para o ar ambiente ou outro meio de refrigeração. Por fim, o processo de transferência de calor por radiação ocorre das paredes externas do tanque e dos radiadores ao ar, bem como das superfícies externa do núcleo e dos enrolamentos para o fluído isolante (FEIL, 2015), (IARONKA, 2014), (KULKARNI & KHAPARDE, 2004), (RIES, 2007),(MEDEIROS, 2017).

Nos transformadores a seco, a refrigeração é realizada pela simples circulação de ar em torno da bobina e do núcleo, podendo ser por convecção natural ou por fluxo de ar forçado. Este tipo de refrigeração é, normalmente, limitado para transformadores de baixa tensão (até 5 kV), com potência inferior a 1.500 kVA e que se localizam em ambientes cobertos. Desse modo, para tensões maiores, o emprego de óleo para isolamento das bobinas faz-se necessário,

impedindo o uso de ar para o arrefecimento direto do núcleo e dos enrolamentos (FEIL, 2015) (WINDERS, 2002).

Os transformadores imersos em fluido isolante podem ser classificados quanto ao tipo de seu sistema de refrigeração (WINDERS, 2002). Essa classificação é definida pela norma (IEC 60076-2, 1993), (MEDEIROS, 2017), a qual é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 – Classificação dos transformadores quanto ao tipo de resfriamento.

| <i>Nomenclatura IEC</i> | <i>Descrição</i> |
|-------------------------|--|
| ONAN | Óleo natural, ar natural |
| ONAF | Óleo natural, ar forçado |
| OFAF | Óleo forçado, ar forçado |
| ODAF | Óleo direcional forçado, ar forçado |
| OFWF | Óleo forçado, água forçada |
| ODWF | Óleo direcional forçado, água forçada |
| ONAN/ONAF/ONAF | Óleo natural, ar natural no primeiro estágio e nos dois estágios seguintes é utilizado ar forçado |
| ONAN/ODAF | Óleo natural, ar natural no primeiro estágio, no segundo estágio é utilizado óleo direcional forçado e ar forçado |
| ONAN/ODAF/ODAF | Óleo natural, ar natural no primeiro estágio, nos dois estágios seguintes é utilizado óleo direcional forçado e ar forçado |

Fonte: (MEDEIROS, 2017).

2.2.5 SISTEMA DE ISOLAÇÃO

O sistema da isolação é um dos pontos essenciais do projeto de um transformador, além da sua função principal, que é evitar a ocorrência de curtos-circuitos na parte ativa, também deve atuar na transferência de calor gerado na parte ativa deste equipamento, bem como suportar os esforços eletromecânicos e apresentar estabilidade química dentro de níveis que possam garantir as suas funções como material isolante (FEIL, 2015), (MORAIS, 2004).

É composto basicamente pelo fluido, que age como refrigerante e isolante, e por uma isolação sólida. Nos transformadores imersos em óleo, o isolamento sólido é constituído por produtos compostos por celulose especialmente tratada, como papel Kraft de alta resistência mecânica, papel crepado, estruturas com papel laminado como o papelão presspahn, e madeira

tratada (RIES, 2007). Como fluido isolante é utilizado o óleo mineral, o óleo vegetal e, também, alguns óleos sintéticos (SILVA,2015).

O sistema de isolamento é o principal item afetado com o aquecimento do sistema e responsável pela vida útil do transformador (IARONKA, 2014), (PORTELLA, 2010).

Ao longo da utilização do transformador, o sistema de isolamento fica sujeito a uma série de processos de desgaste e envelhecimento. A degradação térmica do material isolante está diretamente relacionada com a vida útil do transformador. O papel utilizado na isolamento diferentemente do óleo isolante, não pode ser regenerado ou substituído ao longo da operação do transformador, pois este é inserido entre as bobinas no momento da fabricação do equipamento (FEIL, 2015) (IARONKA, 2014) (PORTELLA, 2010). Assim, a sua degradação que irá definir a vida útil do equipamento (SILVA,2015).

Nos transformadores imersos em líquidos isolantes, a isolamento sólida é a base de celulose, como o papel *Kraft* de alta resistência mecânica, papel crepado, madeira tratada, e como fluido isolante o óleo mineral para transformadores e também alguns óleos sintéticos (FEIL, 2015) (RIES, 2007).

O óleo isolante tem como principal função a refrigeração interna, transferindo o calor gerado pela parte ativa, núcleo e bobinas, para as paredes do mesmo e para o trocador de calor. Outra função do óleo é atuar como um dielétrico ou extintor de arco, bem como suportar os esforços eletromecânicos e apresentar estabilidade química dentro de níveis que possam garantir as suas funções como material isolante (MORAIS, 2004)(SILVA,2015).

As principais características físico-químicas utilizadas como parâmetros de classificação do óleo isolante são: a sua cor, ponto de fulgor, ponto de fluidez, densidade, viscosidade, teor de umidade e rigidez dielétrica (SILVA,2015).

As características ideais para um óleo isolante são baixa viscosidade; alto poder dielétrico e alto ponto de fulgor; além de ser isento de ácidos e enxofre corrosivo. Deve ser resistente à oxidação e à formação de borras; ter baixo ponto de fluidez; ter baixa perda dielétrica e não conter substâncias que possam agredir o homem ou o meio ambiente.

Cabe ressaltar que a rigidez dielétrica representa a capacidade do óleo isolante suportar aplicação de campos elétricos sem a perda de sua característica dielétrica (MORAIS, 2004).

Da mesma forma que em qualquer dispositivo elétrico, ao longo da vida útil dos transformadores, o sistema de isolamento fica sujeito a uma série de processos de desgaste e envelhecimento. Dessa maneira, o monitoramento constante do funcionamento, juntamente com manutenção preventiva e preditiva, ajuda a evitar paradas no funcionamento da máquina,

consequentemente aumenta a confiabilidade do sistema elétrico e durabilidade transformador (FEIL, 2015), (IARONKA, 2014), (PORTELLA, 2010).

2.3 PERDAS TÉCNICAS DOS TRANSFORMADORES

Em condições normais de operação, os transformadores apresentam perdas de energia elétrica no enrolamento primário, enrolamento secundário e núcleo, que são representados através de elementos de circuitos elétricos (resistências e indutâncias) formando seu circuito equivalente (MARTIGNOMI, 1979).

Existem dois grupos fundamentais de perdas nos transformadores, sendo denominadas perdas no ferro e perdas no cobre, as quais estão associadas ao núcleo magnético e aos condutores, respectivamente (MARTIGNOMI, 1979).

As perdas no núcleo ou no ferro são constituídas por duas parcelas, sendo a primeira devido ao fenômeno de histerese e a outra, correspondente às correntes parasitas que circulam no núcleo, também denominada perda por Foucault. Estas perdas são pertinentes aos dispositivos eletromagnéticos que envolvem fluxos variáveis no tempo para sua operação.

Admitindo-se a frequência de operação constante, as perdas no núcleo dos transformadores dependem unicamente da tensão de alimentação. Considerando-se que a tensão varia dentro de limites estreitos e controlados é comum admitir-se as perdas no núcleo como sendo constantes ao longo de toda a vida útil do transformador. Por esta razão as perdas no núcleo são denominadas simplesmente como perdas constantes (DOS SANTOS, 2006).

É importante considerar essas perdas com atenção, pois têm uma influência importante na elevação da temperatura, na eficiência e na capacidade dos dispositivos eletromagnéticos.

As perdas por histerese ocorrem no núcleo magnético dos transformadores que estão naturalmente associadas ao processo de histerese.

As perdas por correntes parasitas são também chamadas de perdas por Foucault. Esse termo é empregado para descrever as perdas de potência associadas com as correntes circulantes que existem em percursos fechados dentro do corpo de um material ferromagnético e causam uma perda indesejável por aquecimento. (DOS SANTOS, 2006).

Essas correntes circulantes são geradas pelas diferenças de potencial magnético existentes por todo o corpo do material, devido à ação do fluxo variável. Se o circuito magnético for composto de ferro sólido, a perda de potência resultante é significativa porque as correntes circulantes encontram relativamente pouca resistência. Para se aumentar de forma significativa a resistência encontrada por essas correntes parasitas, o circuito magnético é invariavelmente

composto de lâminas finas sempre que o dispositivo magnético é tal que um fluxo variável se difunde nele, em operação normal. Esse é o caso com transformadores e também em todos os motores e geradores em CA (DOS SANTOS, 2006).

Conforme mencionado anteriormente, as perdas nos enrolamentos são denominadas perdas no cobre e possuem duas componentes. A principal parcela se refere às perdas por efeito Joule devidas à resistência ôhmica dos enrolamentos. Essas perdas variam de acordo com o aumento ou diminuição da carga no transformador. Mais precisamente com o quadrado da corrente drenada pela carga. A outra parcela é consequência do fluxo de dispersão do transformador, que dá origem a circulação de correntes parasitas em seus condutores e nas suas partes metálicas. Estas perdas dependem da corrente, do carregamento elétrico e da geometria dos condutores das bobinas. Sua determinação analítica não é simples, entretanto sua contribuição para as perdas totais no cobre, quando da operação normal dos transformadores é relativamente pequena (DOS SANTOS, 2006).

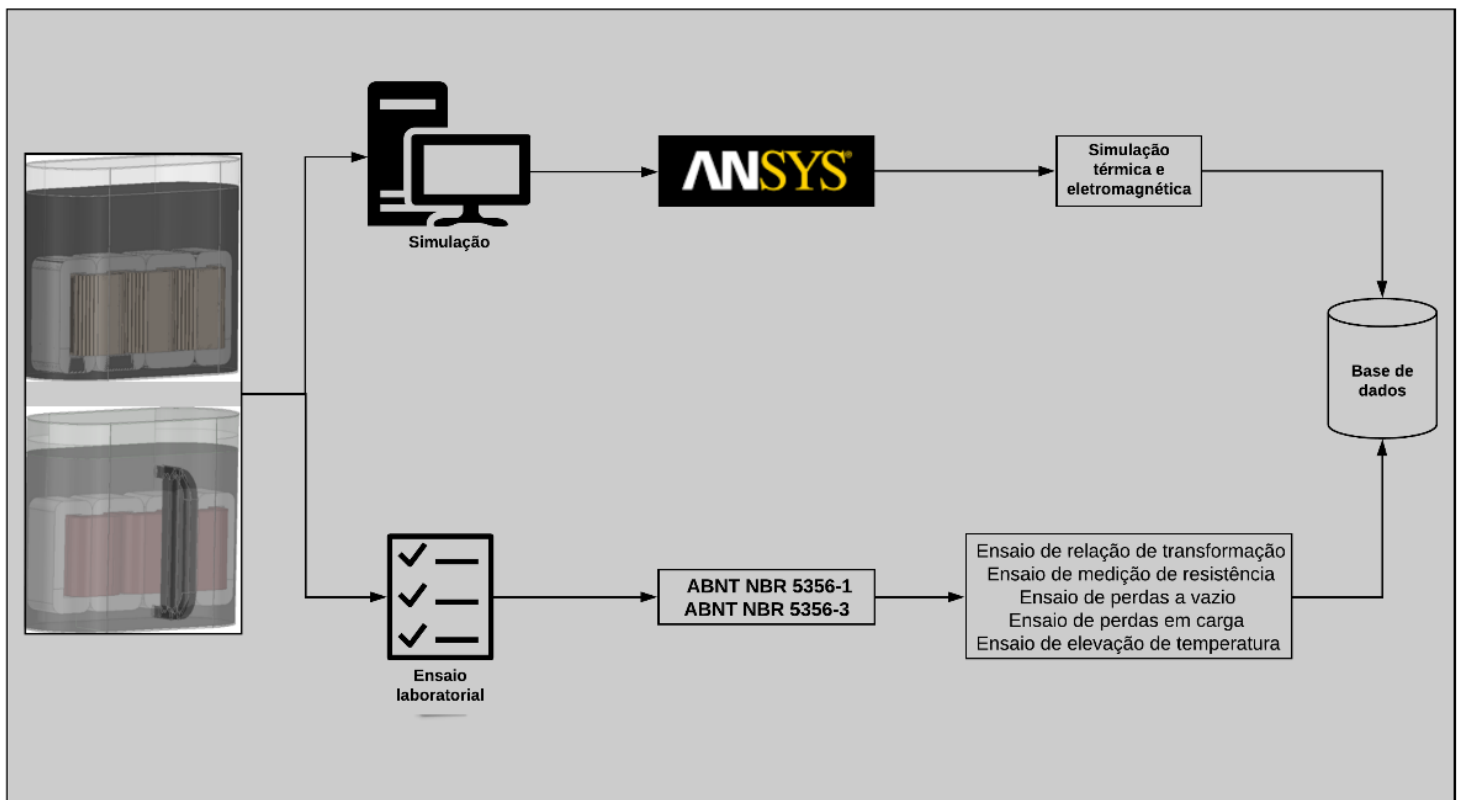
Atualmente os transformadores são alvos de diversos estudos que visam analisar as condições elétricas, térmicas, a vida útil e também as perdas técnicas. Como consequências diretas dessas perdas apresentadas, tem-se a diminuição do carregamento máximo admissível, a diminuição da vida útil e o aumento dos custos operacionais (GONZALES, 2002).

3 METODOLOGIA DE SIMULAÇÕES EM ELEMENTOS FINITOS

Nesta seção, são apresentados estudos feitos em elementos finitos em transformadores elétricos visando a obtenção dos parâmetros eletromagnéticos e térmicos, também apresentando os métodos de ensaios térmicos.

A sistemática referente a etapa de desenvolvimento é mostrada na Figura 4. Todo o estudo, simulações e ensaios foram desenvolvidos no Laboratório de Simulações Computacionais Avançadas (INRI LabSim) e no Laboratório de Ensaios em Média Tensão (INRI MT), ambos parte do Instituto de Redes Inteligentes (INRI) da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) em Santa Maria-RS.

Figura 4 – Sistemática da etapa de desenvolvimento.



Fonte: Autor.

A partir dos projetos já existentes foram elaborados os desenhos no *software ANSYS® Maxwell* em ambiente 3D para assim serem submetidos as devidas simulações que este *software* nos possibilita.

3.1 ANÁLISE DE ELEMENTOS FINITOS

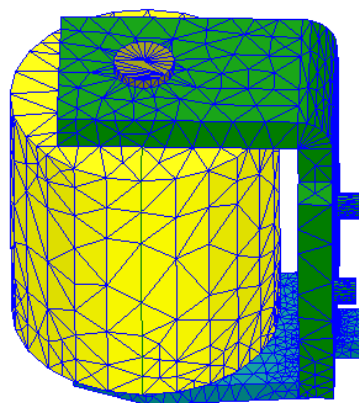
O Método dos Elementos Finitos (MEF) é uma análise matemática que consiste na discretização de um meio contínuo em pequenos elementos, mantendo as mesmas propriedades do meio original. (LOTTI, et al., 2006), (ALVES, 2007). Esses elementos são descritos por equações diferenciais parciais, com determinadas condições de contorno, e possivelmente condições iniciais (FEIL, 2015), (IARONKA, 2014), (SOUZA, 2003).

A análise empregando o MEF pode ser usada para otimização de material, aprimoramento da confiabilidade, análise de falhas e ação corretiva, verificação de novos projetos etc. Antes do advento do MEF, muitas aproximações tiveram que ser feitas nos métodos analíticos para geometrias complexas de tanques, e era quase impossível prever exatamente desempenho das estruturas nas condições de carga fornecidas. Não era possível ao projetista conhecer a margem ou o fator de segurança para novos projetos.

Devido a esse desconhecimento, o projetista teve que colocar material extra aumentando o custo do transformador. Utilizando a análise MEF, é possível detectar alta zonas de estresse e tomar ações corretivas / preventivas adequadas (KULKARNI S.V. & KHAPARDE S.A).

Os elementos finitos utilizados na discretização do domínio original do problema são conectados entre si por pontos denominados de nós. Esse conjunto de nós chama-se, usualmente, de malha de elementos finitos como mostra a Figura 5.

Figura 5 – Exemplo de malha gerada sobre uma geométrica no Software Maxwell.



Fonte: Autor

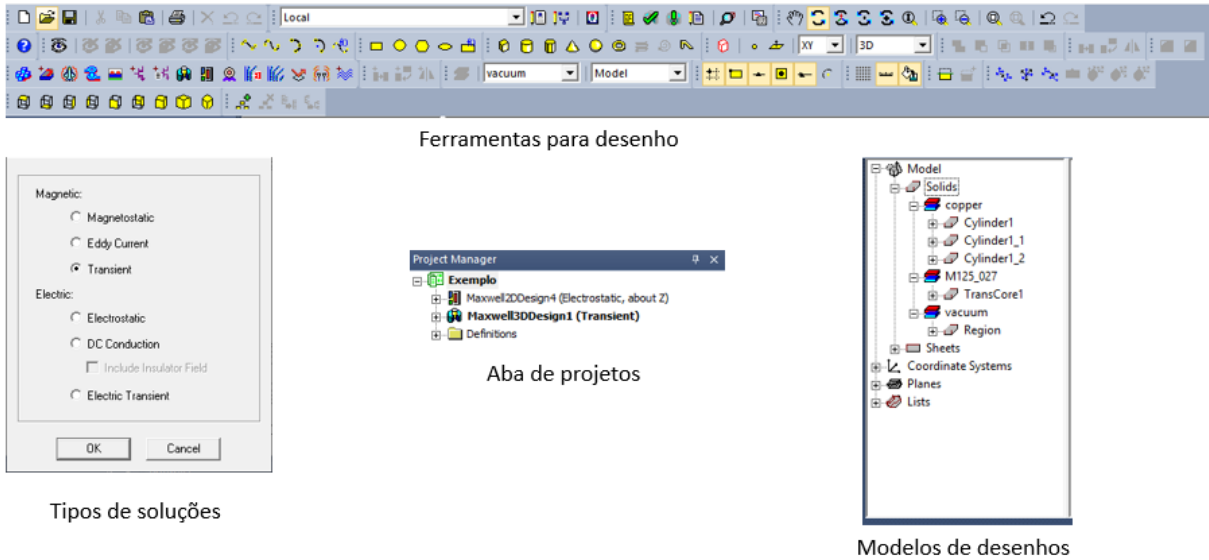
O refinamento dos elementos da malha é um dos fatores determinantes na precisão do método, uma vez que a convergência é um dos aspectos mais importantes do Método dos elementos finitos.

Segundo (IARONKA, 2014) e (SÁNCHEZ, 2001) a simulação em elementos finitos consiste basicamente em três etapas consideradas padrão: pré-processamento, processamento e pós-processamento. Na etapa de pré-processamento, a geometria do problema, as propriedades físicas dos materiais, a densidade das malhas e as condições de contorno (perdas, temperatura, velocidade, tensão elétrica, corrente elétrica) são descritas através de uma estrutura que define estes parâmetros. Nesta etapa, a malha de elementos finitos pode ser criada e visualizada, sendo que quanto menor cada elemento da análise, mais preciso e confiável é o resultado da simulação (FEIL, 2015), (IARONKA, 2014).

O método pode ser aplicado em diversas áreas da engenharia, se difundindo em tópicos como deformações mecânicas, transferência de calor, mecânica de fluidos e eletromagnetismo (IARONKA, 2014). Ainda, as simulações são desenvolvidas no *software* dedicado ao método de elementos finitos ANSYS® sendo as simulações de eletromagnetismo feitas na plataforma Maxwell e simulações de transferência de calor e fluidos na plataforma CFD.

O software ANSYS® possui plataformas de simulações tanto eletromagnéticas quanto térmicas, com projeto e análise em 2D e 3D de dispositivos eletromagnéticos e eletromecânicos, como motores, atuadores, transformadores, sensores e bobinas. Utiliza o Método de Elementos Finitos para resolver simulações magnéticas (magnetostáticas, correntes parasitas, transientes), elétricas (eletrostáticas, condução CC, transiente elétrico) na plataforma ANSYS Maxwell e térmicas (CFX, Fluent). (ANSYS, 2010) na plataforma ANSYS CFX.

Figura 6 – Interface gráfica do Software ANSYS Maxwell.



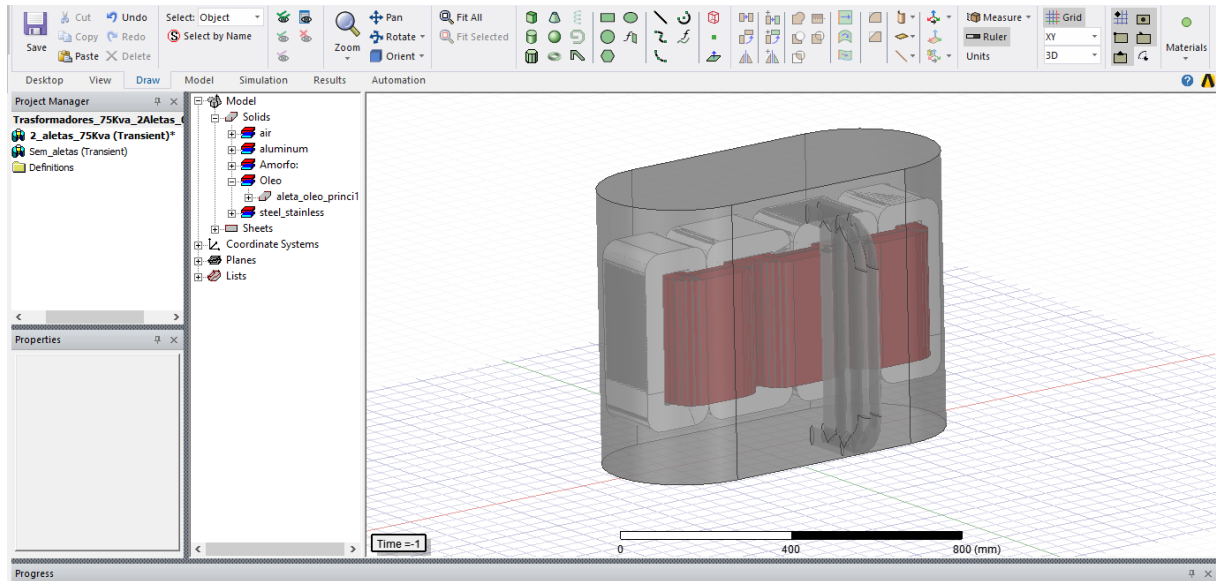
Fonte: Autor

Basicamente, a simulação em elementos finitos no software ANSYS[®] é constituída das etapas: pré-processamento, processamento e pós-processamento (SÁNCHEZ, 2001). Na primeira etapa, descreve-se a geometria do problema, considerando as características físicas dos materiais, a densidade da malha gerada pelos elementos finitos, as condições de contorno e o tipo de simulação desejada, observando parâmetros como excitação de corrente, excitação de tensão, isolamento, entre outros.

A segunda etapa consiste na solução das equações parciais com os valores de contorno gerados a partir da malha de elementos finitos através de algoritmos numéricos. Enfim, na terceira e última etapa, inspeciona-se a solução gerada pelo simulador, onde é possível plotar curvas relevantes à simulação buscando a comprovação da teoria abordada e a verificação de projetos (IARONKA, 2014).

Com base no estudo abordado anteriormente e com objetivo de exemplificar simulações no *software* ANSYS[®], é possível analisar transformadores elétricos no ambiente ANSYS Maxwell, conforme ilustrado na Figura 7. Após realização da simulação, observando os parâmetros envolvidos nesta, são apresentados os resultados obtidos, sendo o mais relevante desses os dados referentes as perdas magnéticas.

Figura 7 – Ambiente do *software* ANSYS Maxwell.



Fonte: Autor

3.2 ESTUDO ELETROMAGNÉTICO DE TRANSFORMADORES

O método de eletromagnetismo computacional (CEM) associa campos eletromagnéticos e eletricidade a métodos numéricos. Deste modo é possível resolver problemas elétricos e magnéticos, com a aplicação da análise por elementos finitos (FEA) às equações de Maxwell.

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho_v \quad (5)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (6)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (7)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (8)$$

Diante dessas equações aplicadas a geometrias complexas, a simulação também demanda um método de cálculo eficiente, e o mais aplicado em CEM é o MEF (método dos elementos finitos).

A grande vantagem do MEF é a sua flexibilidade de aplicação, pois as formulações são aplicadas através da discretização do domínio de estudo em elementos menores, denominados elementos finitos, obtidos através de processos de geração de malha que discretizam o domínio de forma automática (NUNES, 2018).

Além disso, o processo em torno da simulação CEM é similar a simulação CFD (Dinâmica de fluidos computacional), respectivamente: gerar a malha, definir os materiais,

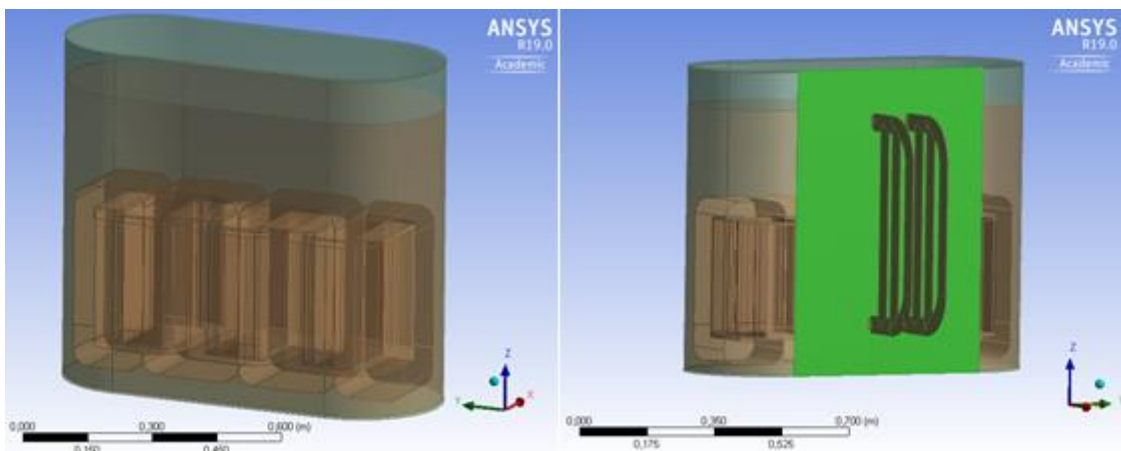
indicar as condições de contorno e condições iniciais, configurar o solucionador, analisar a convergência e posteriormente o pós-processamento.

Na etapa de pós-processamento, realiza-se a análise dos resultados. Isso inclui a plotagem de contornos, exibições de vetores, formas deformadas e listagens dos resultados em formato tabular (MADENCI & GUVEN, 2015).

3.3 ESTUDO TÉRMICO DE TRANSFORMADORES

Primeiramente, a simulação térmica baseia-se no sistema físico fornecido pelo programa ANSYS Maxwell®, dessa forma, inicialmente, a geometria CAD fornecida foi refeita no software ANSYS® em sua plataforma ANSYS CFX, esse processo torna a mesma dinâmica, pois melhora a compatibilidade com o sistema térmico e além de que possibilita aumentar o desempenho computacional para realizar a simulação. As geometrias dos equipamentos, sem radiador e com radiador, são mostradas respectivamente nas Figuras 8.

Figura 8 – Modelos de transformadores para simulações térmicas.



Fonte: Autor.

Configurada a geometria, inicia-se o processo de configuração e definição do sistema físico dos modelos; nessa etapa, destacam-se os materiais, na qual foram especificados de acordo com a tabela 2, mostrada abaixo:

Tabela 2 – Materiais utilizados.

| Domínio | Material |
|----------------|-----------------|
| Ar | Ar gás ideal |
| Carcaça | Aço |
| Óleo isolante | Óleo vegetal |
| Núcleo | Aço |
| Enrolamentos | Alumínio |

Fator pertinente nas simulações, são os valores das perdas atribuídas as bobinas de alta e baixa tensão e ao núcleo, esses valores são encontrados nos ensaios e podem ser observados conforme a tabela 3.

Tabela 3 – Dados de perdas magnéticas.

| | Sem radiador | Com radiador |
|--------|--------------|--------------|
| AT | 657 [W] | 657 [W] |
| BT | 558 [W] | 558 [W] |
| Núcleo | 88,82 [W] | 95,2 [W] |

Além disso, ressalta-se que todos os domínios trocam energia, os fluidos (óleo e ar) são interpretados como fluxo laminar e as condições iniciais do sistema são de 1 atmosfera a 25 graus Celsius.

Por fim, as configurações da simulação foram estabelecidas, visando reduzir erros foi escolhido o modo transiente de simulação; esse modelo difere-se, pois leva em conta o tempo real como fator de convergência; isso é de suma importância, uma vez que possibilita aplicar os critérios de regime impostos pela (ABNT NBR 5356-2, 2007), ou seja, é possível realizar o estudo da simulação a partir de fatores aplicados a equipamentos reais.

3.4 ENSAIOS TÉRMICOS DE TRANSFORMADORES

Os transformadores foram submetidos a 3 ensaios, todos de acordo com as normativas a seguir: (ABNT NBR 5356-1:2007), (ABNT NBR 5356-2, 2007), (ABNT NBR 5356-3:2007).

Para cada ensaio foi descrito abaixo o que deve ser feito para montagem e execução do mesmo.

Ensaio de perdas em vazio. Realizado utilizando-se a fonte emuladora de rede CA, controlada remotamente via *software*, em conjunto com o transformador elevador, alimentando o lado de baixa tensão com a tensão nominal do enrolamento. A medição foi realizada utilizando-se os transformadores de potencial e de corrente para a obtenção dos valores instantâneos e o analisador digital trifásico de grandezas elétricas MONITEK 9451, que oferece um sistema de supervisão através do seu *software*.

Ensaio de perdas em carga. Realizado utilizando-se a fonte emuladora de rede CA, controlada remotamente via *software*, em conjunto com o transformador elevador, alimentando o lado de alta tensão com a corrente nominal do enrolamento, enquanto o lado de baixa tensão é curto-circuitado. A medição foi realizada utilizando-se os transformadores de potencial e de corrente para a obtenção dos valores instantâneos e o analisador digital trifásico de grandezas elétricas MONITEK 9451, que oferece um sistema de supervisão através do seu *software*. O ensaio foi realizado nos taps nominal e crítico (menor tensão) do transformador.

Ensaio de elevação de temperatura. Foi utilizada a mesma configuração do ensaio de perdas em carga. Entretanto, para este ensaio, foram aplicadas as perdas totais (perdas à vazio somadas as perdas em carga) considerando o tap crítico (menor tensão). Um sensor de temperatura foi instalado dentro do transformador, para acompanhar a temperatura do óleo, e outros três sensores foram alocados às proximidades do transformador sob ensaio. O transformador então entrou em processo de aquecimento, até a estabilização da temperatura, julga-se por estabilizada a temperatura quando durante um período de 3 horas não há variação da mesma, desse modo o ensaio é finalizado. Assim como no ensaio de perdas em vazio e perdas em carga, o analisador de energia oferece um sistema supervisorio através de seu *software*, que alerta o usuário ao fim do ensaio de aquecimento. Após o aquecimento do transformador, foi aplicada a corrente nominal do enrolamento e aguardado mais uma hora. Ao final desta hora, foi utilizado o medidor digital de resistência ôhmica para obtenção da resistência à quente, respeitando a norma em relação ao tempo limite para essa medição.

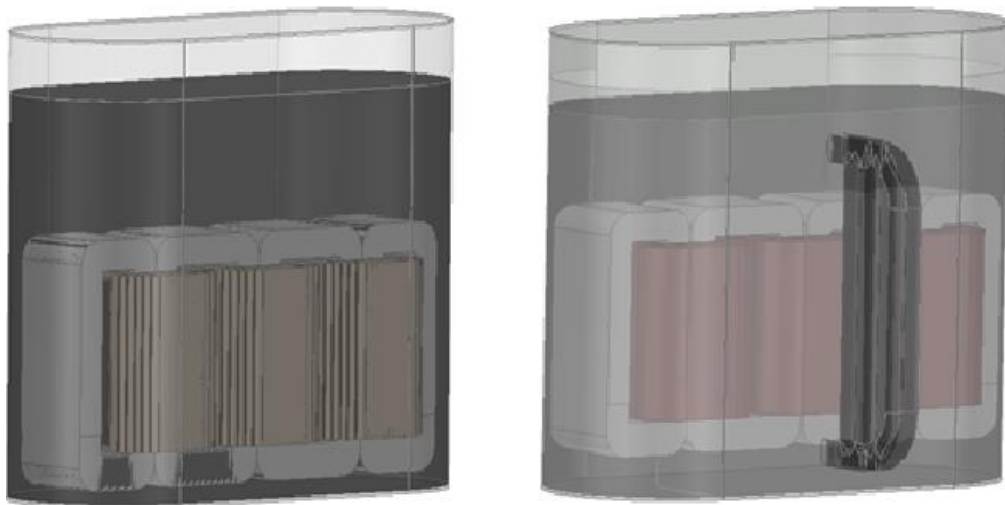
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção, são apresentadas as etapas de desenvolvimento e os resultados obtidos em ensaios térmico e magnéticos em laboratório e também as análises de elementos finitos de dois modelos de transformadores, sendo eles com suas dimensões idênticas diferindo apenas e uma geometria possuir radiador e outra não possui.

Os transformadores foram recebidos juntamente com seus respectivos projetos, os quais foram estudados, desenhados no programa computacional ANSYS Maxwell e ANSYS CFX. No ANSYS Maxwell foi reproduzida a geometria com suas ferramentas CAD e também feitas as simulações eletromagnéticas. A mesma geometria foi importada no ANSYS CFX, onde foram feitas as simulações térmicas. Como explicado anteriormente o Método de elementos finito consiste na discretização numérica de um meio contínuo em pequenos elementos que podem ser resolvidos por equações diferenciais parciais, logo é importante ter em mente que para tais cálculos em um software necessitaram de uma grande capacidade de processamento. Assim foi utilizado computadores denominados “Workstations” disponibilizados pelo Instituto de Redes Inteligentes (INRI).

No que se refere aos ensaios laboratoriais, os transformadores foram ensaiados de acordo com a norma (NBR 5356-1:2007), (NBR 5356-2, 2007), (NBR 5356-3:2007), ambas revisões de 2010 no período de 10 a 14 de julho de 2018. Além disso, o INRI MT possui um sistema completo de equipamentos que tornam esses ensaios possíveis.

Figura 9 – Modelos de transformadores.



Fonte: Autor.

4.1 ANÁLISE DE ENSAIOS TÉRMICOS EM TRANSFORMADORES ELÉTRICOS

Os transformadores foram submetidos a 3 ensaios, todos de acordo com as normativas. Isso é possível, pois o INRI MT possui um sistema completo de equipamentos, capazes de realizar com eficácia os ensaios requeridos, alguns equipamentos utilizados são:

Tabela 4 – Equipamentos utilizados nos ensaios.

| Tipo de Ensaio | Equipamento Utilizado |
|-----------------------------------|--|
| Ensaio de perdas em vazio | Medidor digital de resistência ôhmica MONITEK 9930 |
| Ensaio de perdas em carga | Fonte emuladora de rede CA e analisador digital trifásico de grandezas elétricas MONITEK 9451 |
| Ensaio de elevação de temperatura | Sistema automatizado de sensores de temperatura no óleo e no ambiente, monitorados via <i>software</i> |

A Tabela 5, mostra as informações pertinentes referentes aos ensaios laboratoriais.

Tabela 5 – Tabela informativa de ensaios.

| | |
|---------------------------|---|
| Local | Laboratório de Média Tensão do Instituto de Redes Inteligentes (INRIMT) Universidade Federal de Santa Maria – UFSM |
| Normas Empregadas | ABNT NBR 5356-1:2007; ABNT NBR 5356-2; ABNT NBR 5356-3:2007 |
| Transformadores ensaiados | Com aletas Sem aletas |
| Temperatura | Temperatura ambiente |
| Ensaio | Ensaio de perdas em vazio |
| | Ensaio de perdas em carga |
| | Ensaio de elevação de temperatura |

Os relatórios técnicos de ensaio com os resultados dos ensaios realizados podem ser visualizados no ANEXO A.

4.2 ANÁLISE ELETROMAGNÉTICA EM ELEMENTOS FINITOS PARA TRANSFORMADORES ELÉTRICOS

Para esta análise, utiliza-se a metodologia de projeto apresentada no capítulo anterior com o *software* ANSYS ® em sua plataforma ANSYS *Maxwell*. Assim, os parâmetros de entrada do projeto são descritos na Tabela 6.

Tabela 6 – Parâmetros de entrada para o projeto de transformadores.

| Parâmetros | Valores |
|-------------------|------------------|
| Potencia | 75 kVA |
| Tensão AT | 13,8 kV |
| Tensão BT | 380 V |
| Corrente AT | 3,13 A |
| Corrente BT | 113,95 A |
| Nº de Espiras AT | 2479 |
| Nº de Espiras BT | 75 |
| Resistencia AT | 3,33 Ω |
| Resistencia BT | 4398,02 Ω |

Fonte: Autor.

Estes parâmetros são válidos para ambos os modelos de transformadores. Seguindo os requisitos do software, deve-se informar quais os materiais utilizados em cada componente do desenho, descritos na Tabela 7.

Tabela 7 – Materiais utilizados para simulação.

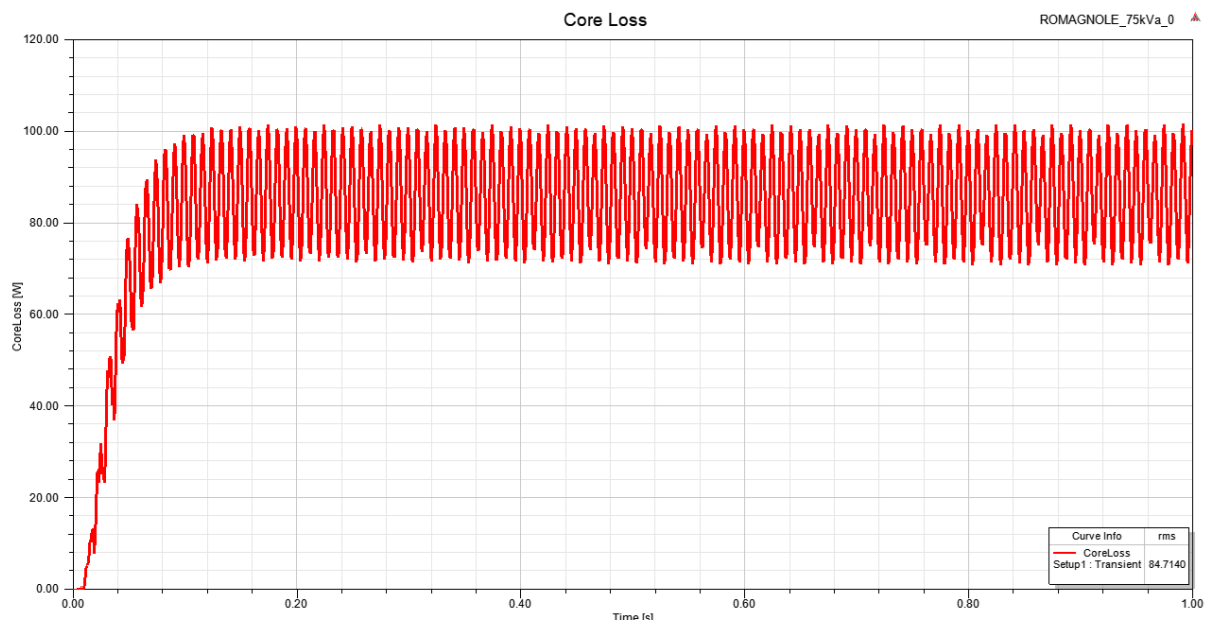
| Domínio | Material |
|----------------|-----------------|
| Ar | Ar gás ideal |
| Carcaça | Aço |
| Óleo isolante | Óleo vegetal |
| Núcleo | Aço |

| | |
|--------------|----------|
| Enrolamentos | Alumínio |
|--------------|----------|

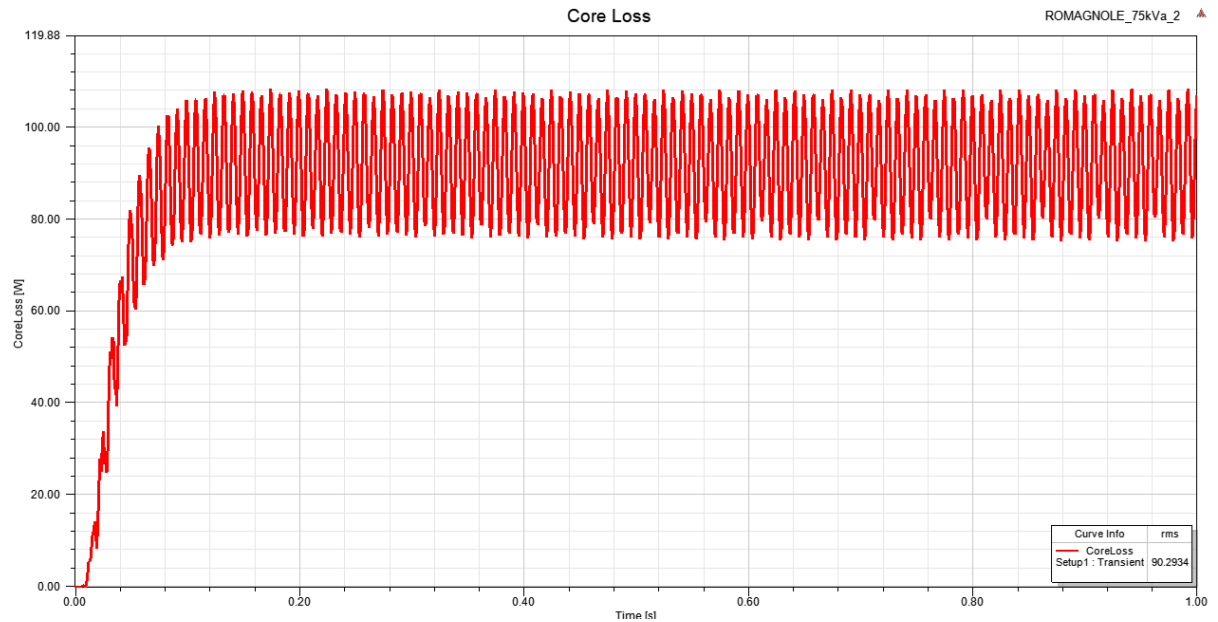
Fonte: Autor.

As configurações da simulação foram estabelecidas, visando reduzir erros, assim foi escolhido o modo transiente de simulação. Esse modo de simulação difere-se, pois leva em conta o tempo real como fator de convergência; isso é de suma importância, uma vez que possibilita aplicar os critérios de regime impostos pela (NBR 5356-2, 2007), ou seja, é possível realizar o estudo da simulação a partir de fatores aplicados a equipamentos reais. Resultados referentes as perdas magnéticas de ambos os modelos, são mostrados na Figura 10.

Figura 10 – Modelo com radiador (a), Modelo sem radiador (b).



(a)



(b)

Fonte: Autor.

Pode-se analisar pelos gráficos que a simulação em determinado tempo convergiu e assim podemos averiguar as perdas magnéticas de cada modelo. descritos na Tabela 8.

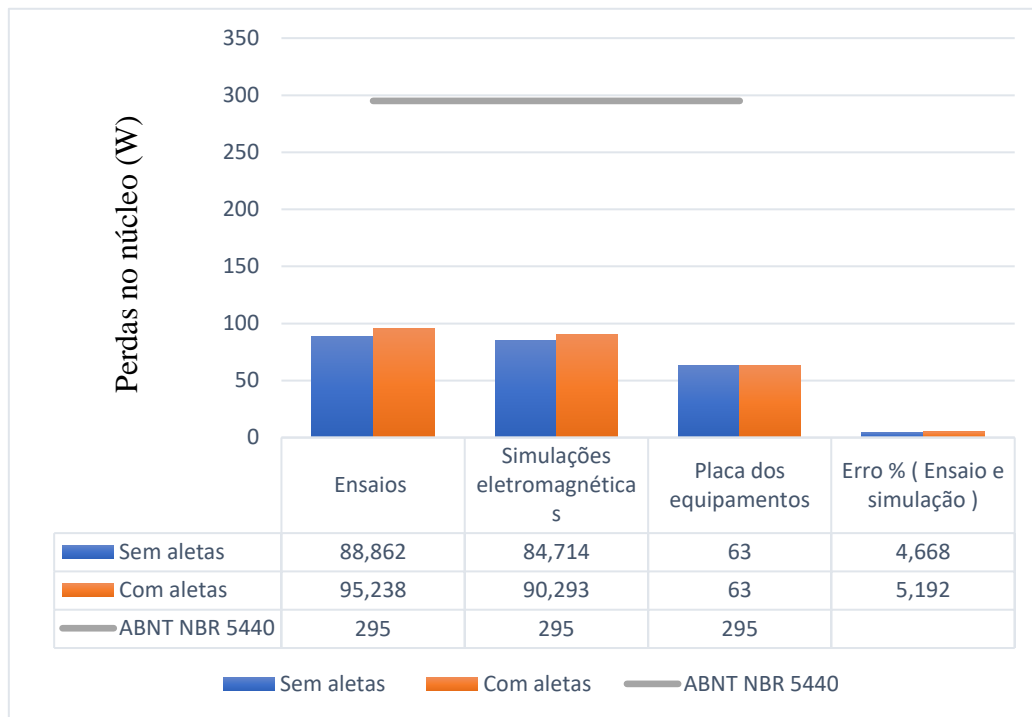
Tabela 8 – Resultados de perdas magnéticas.

| | Sem radiador | Com radiador |
|-----------------|--------------|--------------|
| Perdas em Watts | 84,714W | 90.293W |

Tanto os resultados das simulações quanto os obtidos em ensaio são mostrados na Figura 11 Por meio de recurso gráfico, podemos compara os valores de perdas no núcleo em Watts e apresenta os valores de erro calculado.

Conforme define a norma ABNT NBR 5440, para um transformador de 75 kVA o valor máximo para perdas em vazio é de 295 W com uma tolerância de até 10%. Assim, na Figura 11, uma linha de referência mostra o critério para as perdas eletromagnéticas, exigido pela normativa.

Figura 11 – Gráfico comparativo de perdas eletromagnéticas.



Fonte: Autor.

Considerando o objetivo dos ensaios laboratoriais de perdas e simulações eletromagnéticas, isto é, averiguar as perdas eletromagnéticas no núcleo em dois modelos de transformadores fornecidos, é possível após a obtenção e estudo dos resultados, afirmar que as simulações eletromagnéticas aproximam-se de forma satisfatória dos ensaios em laboratório, como é visto nos valores de erro calculado; ademais, ambos, estudos, computacionais e laboratoriais, evidenciam que os equipamentos atendem os critérios impostos pela normativa ABNT 5440.

4.3 ANÁLISE TÉRMICA EM ELEMENTOS FINITOS PARA TRANSFORMADORES

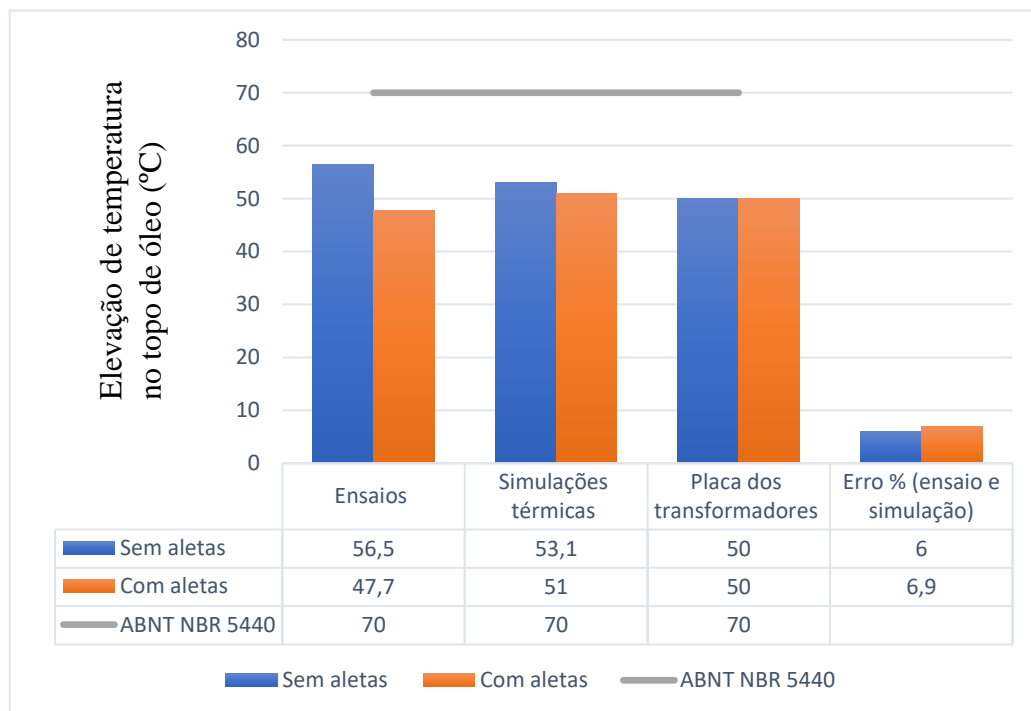
Esta análise tem como objetivo, observar o sistema térmico do transformador sob dois diferentes modelos geométricos, um com radiador aletado e o outro sem radiador, ambos com as mesmas dimensões e volumes de óleo. Dessa forma, pretende-se apresentar uma estimativa aproximada da variação da temperatura, em função da diferença geométrica entre os modelos.

Para a simulação utilizou-se o programa ANSYS CFX, e de forma sistemática os dados técnicos e informações pertinentes foram atribuídos ao processo. Posteriormente os resultados foram coletados, agrupados e organizados, tornando possível confrontar as diferenças e semelhanças entre os equipamentos.

Os resultados referentes a elevação de temperatura, são mostrados na Figura 12, que por meio de recurso gráfico, compara os valores de elevação e apresenta os valores de erro calculado.

Ainda, a norma ABNT NBR 5440, define que para um transformador de 75 kVA o valor máximo de elevação de temperatura em relação ao ambiente medido no topo de óleo é 70 °C. Assim, na Figura 12, uma linha de referência mostra o critério para a elevação de temperatura, exigido pela normativa.

Figura 12 – Gráficos com linha de interpolação dos pontos da temperatura.

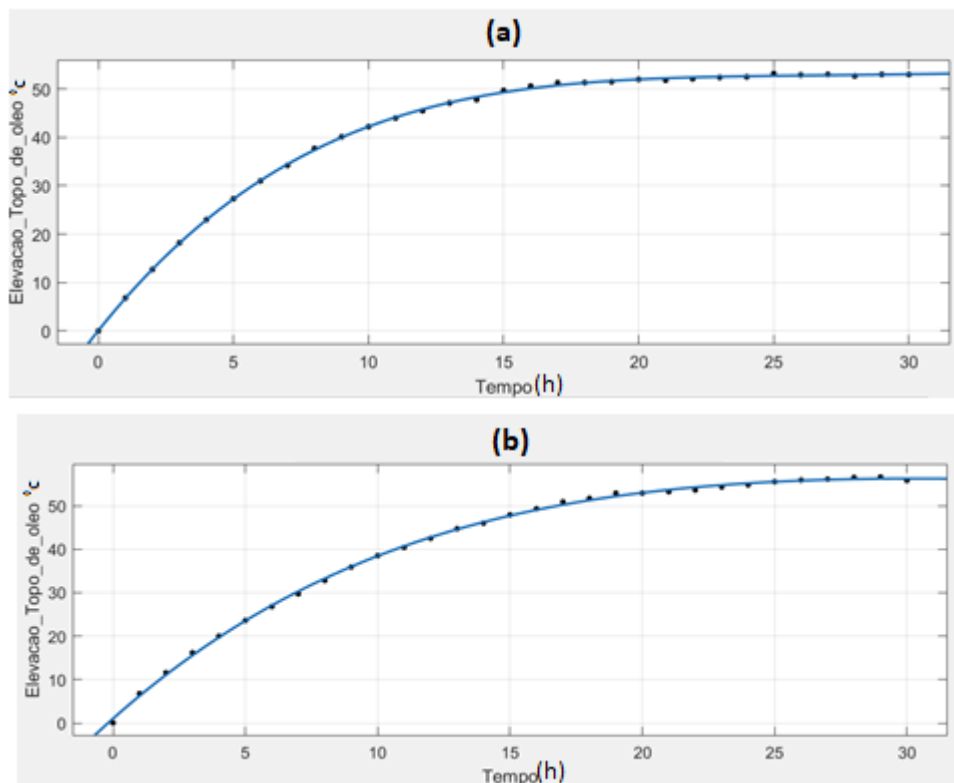


Fonte: Autor.

Em continuidade, a normativa (NBR 5356-2,2007) estipula o critério para o reconhecimento e determinação da convergência térmica, isto é, esse estado, também abordado como regime permanente, é compreendido como a taxa de variação da elevação de temperatura do topo de óleo inferior a 1 °C durante um período de três horas. Nesse sentido, os ensaios obedecem a esse critério e a Figura 13 mostra o período de simulação para os diferentes

transformadores, onde é possível observar que as simulações térmicas também seguem as solicitações da normativa.

Figura 13 – Gráficos com linha de interpolação dos pontos da temperatura (°C) em função do tempo (h) das simulações térmicas: (a) transformador com aletas (b) transformador sem aletas.



Fonte: Autor.

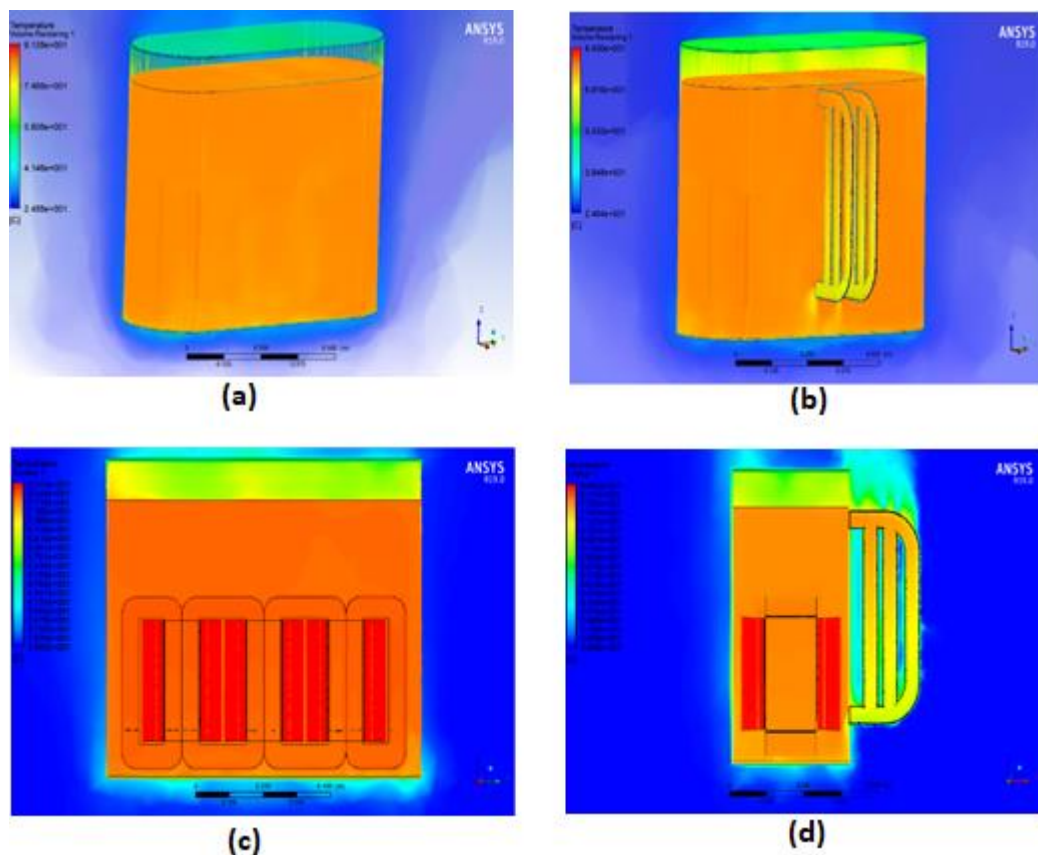
A partir destes gráficos podemos analisar primeiro a diferença que existe entre os dois transformadores, sem aletas e com aletas, aonde podemos afirmar que a temperatura topo de óleo é superior na configuração sem aletas em relação à configuração com aletas, mostrando que há uma influência das aletas no desempenho térmico dos transformadores. Além disso, a Figura 13 garante que ambos os modelos de transformadores atenderam os limites de elevação de temperatura, impostos pela normativa.

Em um segundo momento podemos observar que a dinâmica térmica do transformador, através da Figura 13, onde uma linha representa a interpolação dos pontos da elevação de temperatura (°C) em função do tempo (h), ou seja, a linha é o processo de regime térmico no transformador; assim, é possível visualizar a variação de temperatura nas últimas três horas em ambos os modelos, esses conferem e são compatíveis com a condição de regime térmico

proposta pela norma (NBR 5356-2,2007). Além disso foi possível validar o tempo de dinâmica térmica também utilizando a simulação térmica.

Os resultados das simulações térmicas, foram processados computacionalmente e projetados de forma visual, de acordo com a Figura 14.

Figura 14 – Renderização das simulações térmicas: (a) perspectiva tridimensional da configuração sem aletas, (b) perspectiva tridimensional da configuração com aletas, (c) vista frontal com transparência do tanque, na configuração sem aletas, (d) vista lateral com transparência do tanque, na configuração com aletas.



Fonte: Autor

Com as imagens 3D das simulações térmicas torna-se possível observar a distribuição da temperatura em diversos pontos do transformador, ou seja, o fluxo de óleo dentro dos transformadores é resultante do aquecimento, por consequência, é visível a atuação do sistema de arrefecimento presente no modelo com aletas. Além disso, embora sem aletas, a outra configuração de transformador também se mostrou satisfatória, atendendo a normativa.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

No presente trabalho, foi proposta uma metodologia para obtenção de dados de projeto tais como perdas magnéticas e elevação de temperatura de transformadores.

Foram abordados aspectos teóricos e práticos dos conceitos envolvidos no trabalho, assim como a abordagem da análise de elementos finitos dos modelos projetados.

Dois modelos de transformadores de distribuição foram analisados quanto as suas características elétricas e térmicas, um com aletas e outro sem. Simulações computacionais foram realizadas para obter as perdas eletromagnéticas no núcleo e a temperatura de topo de óleo. Os resultados das simulações foram validados com valores obtidos por ensaios laboratoriais dos protótipos, mostrando a eficiência da ferramenta de simulação para o projeto e análise de transformadores.

A partir do processo analítico, prático e comparativo, foi possível concluir que os ensaios e simulações térmicas, mostraram que ambos transformadores satisfazem as normas (NBR 5356-2, 2007) e (NBR 5440, 2007). Os resultados dos ensaios e simulações eletromagnéticas se diferem dos dados de placa dos transformadores, porém, todos satisfazem a normas (NBR 5440, 2007) e (NBR 5356-2, 2007). As simulações térmicas previram a temperatura e tempo aproximado dos ensaios. As simulações eletromagnéticas previram as perdas eletromagnéticas no núcleo, aproximando-se dos ensaios.

O modelo com aletas apresentou uma temperatura de topo de óleo inferior ao modelo sem aletas. Contudo, mesmo sem aletas o protótipo mostrou-se dentro das normas, sendo, portanto, uma opção construtivamente menos custosa. Percebe-se, portanto, que o emprego de simulações na etapa de projeto de transformadores pode ser muito útil, apresentando resultados confiáveis que permitem otimizar projetos e reduzir custos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT NBR 5356-1. **ABNT NBR 5356-1: 2007 Transformadores de Potência - Parte 1: Generalidades**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, p. 103. 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 5356-3. **ABNT NBR 5356-3: 2007 Transformadores de Potência**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, p. 50. 2007.

ALVES, L. M. **Método dos Elementos Finitos**. Universidade Federal do Paraná. Curitiba , p. 438. 2007.

ANSYS. **User's Guide - Maxwell 3D**. Canonsburg, p. 1006. 2010.

ATS N. **Trafo Transformador**. 2020. Disponível em: < <https://nucleoats.ind.br/trafo-transformador/>>. Acesso em: 14 Junho 2020.

CHAPMAN, S. J. **Fundamentos de máquinas elétricas**. 5. ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

DE SOUZA, R. M. **O Método dos Elementos Finitos aplicado ao problema de condução de calor**. Apostila, Universidade Federal do Pará, Belém, 2003.

DOS SANTOS, L. **Cálculo das Perdas Técnicas dos Transformadores de Distribuição, Operando em Ambiente Não-Senoidal**. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira , 2006.

FEIL, D. L. P. **Desenvolvimento de Transformador de Distribuição de Elevada Eficiência e Reduzida Relação Peso/Potência Empregando Núcleo Amorfo e Óleo Vegetal Isolante**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2015.

FITZGERALD, A. E.; Kingsley Jr, C.; Kusko, A. - **Máquinas Elétricas- Mc Graw Hill do Brasil**, 7. ed. Porto Alegre, 2014.

Martignoni, A. “**Transformadores**”, 4ª edição, Editora Globo, 1979

Gonzales, D. **Influência de Correntes Harmônicas na Perda de Vida Útil de Transformadores de Distribuição**. Dissertação de Mestrado, FEIS- UNESP, Maio 2002.

NUNES, A. S., (2018). **Modelagem de dispositivos eletromagnéticos usando uma abordagem híbrida entre o Método da Rede de Relutância (RNM) e o Método dos Elementos Finitos de Faceta (FFEM)**. Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Brasil.

HARLOW, J. H. **Electric Power Transformer Engineering**. Florida: CRC Press , 2004.

HASEGAWA, R.; PRUESS, D. C. **Impact of Amorphous Metal Based Transformers on Efficiency and Quality of Electric Power Distribution**. Power Engineering Society Summer Meeting. p. 1820-1823. 2001.

IARONKA, O. **Desenvolvimento de um Sistema de Refrigeração de Elevada Eficiência com o Método de Elementos Finitos para Transformadores de Distribuição**. 2014. p. 96. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2014.

IEC 60076-2. **IEC 60076-2: 1993: Power Transformers Part 2: Temperature Rise**. IEC International Electrotechnical Commission. 1993.

JORDÃO, R. G. **Transformadores**. 1ª ed. São Paulo: Edgard Blücher LTDA, 2002.

KULKARNI, S. V.; KHAPARDE, S. A. **Transformer Engineering Design and Practise**. New York: Marcel Dekker, 2004.

LAQEE, **Princípio do Funcionamento do Transformador**. 2015. Disponível em: <<https://www.feis.unesp.br/#!/departamentos/engenharia-eletrica/pesquisas-e-projetos/lqee1668/boletins-tecnicos/>>. Acesso em: 14 Junho 2020.

LOTTI, R. S. et al. **Aplicabilidade Científica do Método dos Elementos Finitos**. Maringá. p. 35-43. 2006.

MAURÍCIO, A. F. D. S. **Construção e Caracterização de um Transformador de 562,5 VA com Núcleo de Ferro Amorfo**. 2014. p.95. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores) - Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2014.

MADENCI, E., & GUVEN, I., (2015). **The Finite Element Method and Applications in Engineering Using ANSYS®**. Springer International Publishing, Boston, pp. 26.

MCLYMAN, C. W. T. **Transformer and Inductor Design Handbook**. 3ª ed. New York: Marcel Dekker, 2004.

MEDEIROS, L. H. **DESENVOLVIMENTO DE UM PROGRAMA COMPUTACIONAL PARA ANÁLISE DIELÉTRICA DE TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA IMERSOS EM ÓLEO ISOLANTE**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2017.

MONIZ, O. V. **Perda de Vida Útil Técnica e Perda de Vida Útil Econômica dos Transformadores de Distribuição**. 2007. p. 177. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2007.

MORAIS, D. R. **Ferramenta Inteligente para a Detecção de Falhas Incipientes em Transformadores Baseada na Análise de Gases Dissolvidos no Óleo Isolante**. 2004. p. 112. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

MOAVENI, S. **Finite Element Analysis Theory and Application with ANSYS, 3/e**. Pearson Education India, 2008. ISBN 8131760642.

NOGUEIRA, D. D. S.; ALVES, D. P. **Transformadores de Potência - Teoria e Aplicação Tópicos Essenciais**. 2009. p. 212. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

NUNES, A. A. **Uma Contribuição para Projeto de Transformadores Monofásicos de Média Tensão**. 2011. p. 118. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2011.

PORTELLA, M. D. G. **Avaliação da Presença de Indicadores de Oxidação do Papel Isolante Termoestabilizado em Equipamentos de Subestação**. 2010. p. 123. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

PRONTO, A. M. G. **Análise de Perdas em Sistemas de Energia que Empregam Materiais Supercondutores de Alta Temperatura**. 2010. p. 159. Dissertação (Doutorado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores) - Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2010.

RIES, W. **Transformadores - Fundamentos para Projeto e Cálculo**. 1ª ed. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2007.

ROMAGNOLE PRODUTOS ELÉTRICOS S.A. Romagnole. **Romagnole**, 2014. Disponível em: <<http://www.romagnole.com.br/catalogo.php?categoria=transformadores>>. Acesso em: 14 Junho 2020.

SALUSTIANO, R. **Análise Técnica de Transformadores para Redes de Média Tensão**. 2012. p. 118. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2012.

SÁNCHEZ, C. A. A. **Estudo de Impacto Usando Elementos Finitos e Análise Não Linear**. 2001. p. 143. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001.

SILVA, P. R. OTIMIZAÇÃO DE PROJETO DE TRANSFORMADORES DE DISTRIBUIÇÃO QUE EMPREGAM NÚCLEO AMORFO E ÓLEO VEGETAL ISOLANTE. 2015. (Dissertação de Mestrado). UFSM

SOUZA, R. M. D. O Método dos Elementos Finitos Aplicado ao Problema de Condução de Calor. Universidade Federal do Pará. Belém, p. 40. 2003.

APÊNDICE – RELATÓRIO DOS ENSAIOS DE TRANSFORMADOR

RELATÓRIO DOS ENSAIOS DE TRANSFORMADOR

ENSAIO DE ROTINA DO TRANSFORMADOR COM AS CARACTERÍSTICAS ABAIXO:

| | | | | | | | |
|-----------------|------------------------|--|--|----------------------|---------------|--------------------|-----------|
| CLIENTE : | Romagnole | | | FREQUÊNCIA [Hz]: | 60 | CORRENTE A.T. [A]: | 3,14 |
| NÚMERO : | 1177894 | | | TENSÕES A.T. [kV]: | 13,80 a 11,40 | CORRENTE B.T. [A]: | 113,95 |
| POTÊNCIA [kVA]: | 75,0 | | | TENSÕES B.T. [V]: | 380/220 | DATA FABRICAÇÃO : | MAIO/29 |
| FASES : | 3 | | | DERIVAÇÕES : | 5 | ESTADO : | NOVO |
| LIGAÇÃO: | Triângulo/Estrela Dyn1 | | | A.T. LIGADA EM [kV]: | 13,80 | MASSA [Kg]: | 536 |
| TIPO : | AEREO CONVENCIONAL | | | B.T. LIGADA EM [V]: | 380 | FABRICANTE : | Romagnole |
| MODELO : | | | | | | | |

ENSAIO DE RESISTÊNCIA ÔHMICA DOS ENROLAMENTOS

| | |
|----------------------------|---------------------|
| H1H2: 28,08 [OHMS] | X1X2: 20,92 [mOHMS] |
| H1H3: 27,88 [OHMS] | X1X3: 21,01 [mOHMS] |
| H2H3: 28,28 [OHMS] | X2X3: 20,87 [mOHMS] |
| Enrol. TS: Alumínio | Enrol. TI: Alumínio |
| TEMPERATURA AMBIENTE [°C]: | 16,0 |

DESLOCAMENTO ANGULAR

30 Graus

RESISTÊNCIA DE ISOLAMENTO

| | |
|---------------------------|------|
| LEITURA AT/BT [MOHMS]: | 1000 |
| LEITURA AT/MASSA [MOHMS]: | 1000 |
| LEITURA BT/MASSA [MOHMS]: | 1000 |
| TENSÃO DO MEGÔMETRO [V]: | 1000 |

TENSÃO APLICADA

| | |
|----------------------|-------|
| AT/BT À MASSA [kV]: | 34,00 |
| BT/AT À MASSA [kV]: | 10,00 |
| FREQUÊNCIA [Hz]: | 60 |
| TEMPO DO ENSAIO [S]: | 60 |

TENSÃO INDUZIDA

| | |
|----------------------|--------|
| TENSÃO INDUZIDA [V]: | 760 |
| FREQUÊNCIA [Hz]: | 120 |
| TEMPO DO ENSAIO [S]: | 60 |
| MÉTODO DO ENSAIO : | NORMAL |

ENSAIO DE RELAÇÃO DE TRANSFORMAÇÃO

| | | | | | |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|
| TAP [V]: | 13800 | 13200 | 12600 | 12000 | 11400 |
| FASE 1 : | 62,94 | 60,17 | 57,47 | 54,74 | 51,98 |
| FASE 2 : | 62,92 | 60,15 | 57,44 | 54,72 | 51,97 |
| FASE 3 : | 62,92 | 60,16 | 57,43 | 54,72 | 51,96 |
| ERRO[%]: | 0,07 | -0,02 | 0,06 | 0,08 | 0,05 |

ENSAIO EM VAZIO

| | |
|----------------------------|------|
| TENSÃO DO ENSAIO [V]: | 380 |
| CORRENTE DE EXCITAÇÃO [A]: | 0,34 |
| CORRENTE DE EXCITAÇÃO [%]: | 0,30 |
| PERDAS EM VAZIO [W]: | 95,2 |

ENSAIO EM CURTO CIRCUITO

| | |
|---------------------------------|--------|
| CORRENTE DE CURTO CIRCUITO [A]: | 3,14 |
| TENSÃO DE CURTO CIRCUITO [V]: | 462,06 |
| POTÊNCIA DE CURTO CIRCUITO [W]: | 859 |
| TEMPERATURA AMBIENTE [°C]: | 16,3 |

VALORES CORRIGIDOS A 75 [°C]

| | | |
|-----------------------------------|------|---------------|
| PERDAS NOS ENROLAMENTOS [W]: | 1052 | Eficiência: D |
| PERDAS TOTAIS [W]: | 1147 | |
| RENDIMENTO A PLENA CARGA [%]: | 98,5 | |
| IMPEDÂNCIA DE CURTO CIRCUITO [%]: | 3,44 | |

ENSAIO DE PINTURA (*)

| | |
|----------------------|-------------------|
| Espessura da Camada: | () |
| ESPECIFICAÇÃO: | PINTURA DE FUNDO: |
| MÍNIMO : | PINTURA FINAL : |
| MÉDIO : | |
| MÁXIMO : | Unidade: |
| Aderência | () |
| GRAU: | |

ENSAIOS DO ÓLEO ISOLANTE

| | | |
|-------------------------|-----------|-----------------------------|
| TIPO DO ÓLEO : | K | Vol.: 600 [Litros] |
| RIGIDEZ DIELETRICA (*): | 10000,00 | () |
| TENSÃO INTERFACIAL: | 10000,00 | () |
| TEOR DE ÁGUA : | 10000,00 | () |
| DENSIDADE : | 10000,000 | () |
| ÍND. NEUTRALIZAÇÃO: | <10000,00 | () |
| F.P. A 100 [°C]: | 0,90 | () |
| COR : | | Teor de PCB: não Detectável |

ESTANQUEIDADE E RESISTÊNCIA À PRESSÃO

| | |
|-------------------|----------------|
| PRESSÃO [Kg/cm2]: | TEMPO [Horas]: |
|-------------------|----------------|

OBSERVAÇÕES

O transformador referido acima está "APROVADO" pela Garantia da Qualidade. Normas: NBR5356-1 NBR5440/2014-D

26/08/2019

DATA

RESPONSÁVEL PELO ENSAIO

RELATÓRIO DOS ENSAIOS DE TRANSFORMADOR

ENSAIO DE ROTINA DO TRANSFORMADOR COM AS CARACTERÍSTICAS ABAIXO:

| | | | | | |
|-----------------|-------------------------------|----------------------|----------------------|--------------------|------------------|
| CLIENTE : | Romagnole | FREQUÊNCIA [Hz]: | 60 | CORRENTE A.T. [A]: | 3,14 |
| NÚMERO : | 1177895 | TENSÕES A.T. [kV]: | 13,80 a 11,40 | CORRENTE B.T. [A]: | 113,95 |
| POTÊNCIA [kVA]: | 75,0 | TENSÕES B.T. [V]: | 380/220 | DATA FABRICAÇÃO : | Mai/29 |
| FASES : | 3 | DERIVAÇÕES : | 5 | ESTADO : | NOVO |
| LIGAÇÃO: | Triângulo/Estrela Dyn1 | A.T. LIGADA EM [kV]: | 13,80 | MASSA [Kg]: | 542 |
| TIPO : | AEREO CONVENCIONAL | B.T. LIGADA EM [V]: | 380 | FABRICANTE : | Romagnole |
| MODELO : | | | | | |

ENSAIO DE RESISTÊNCIA ÔHMICA DOS ENROLAMENTOS

| | |
|----------------------------|---------------------|
| H1H2: 27,10 [OHMS] | X1X2: 20,66 [mOHMS] |
| H1H3: 27,00 [OHMS] | X1X3: 20,62 [mOHMS] |
| H2H3: 27,23 [OHMS] | X2X3: 20,74 [mOHMS] |
| Enrol. TS: Alumínio | Enrol. TI: Alumínio |
| TEMPERATURA AMBIENTE [°C]: | 17,0 |

DESLOCAMENTO ANGULAR

30 Graus

RESISTÊNCIA DE ISOLAMENTO

| | |
|---------------------------|-------------|
| LEITURA AT/BT [MOHMS]: | 1000 |
| LEITURA AT/MASSA [MOHMS]: | 1000 |
| LEITURA BT/MASSA [MOHMS]: | 1000 |
| TENSÃO DO MEGÔMETRO [V]: | 1000 |

TENSÃO APLICADA

| | |
|----------------------|--------------|
| AT/BT À MASSA [kV]: | 34,00 |
| BT/AT À MASSA [kV]: | 10,00 |
| FREQUÊNCIA [Hz]: | 60 |
| TEMPO DO ENSAIO [S]: | 60 |

TENSÃO INDUZIDA

| | |
|----------------------|---------------|
| TENSÃO INDUZIDA [V]: | 760 |
| FREQUÊNCIA [Hz]: | 120 |
| TEMPO DO ENSAIO [S]: | 60 |
| MÉTODO DO ENSAIO : | NORMAL |

ENSAIO DE RELAÇÃO DE TRANSFORMAÇÃO

| | | | | | |
|----------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| TAP [V]: | 13800 | 13200 | 12600 | 12000 | 11400 |
| FASE 1 : | 62,95 | 60,21 | 57,48 | 54,76 | 52,02 |
| FASE 2 : | 62,95 | 60,17 | 57,48 | 54,74 | 52,00 |
| FASE 3 : | 62,93 | 60,18 | 57,48 | 54,71 | 51,98 |
| ERRO[%]: | 0,08 | 0,07 | 0,08 | 0,12 | 0,11 |

ENSAIO EM VAZIO

| | |
|----------------------------|-------------|
| TENSÃO DO ENSAIO [V]: | 380 |
| CORRENTE DE EXCITAÇÃO [A]: | 0,29 |
| CORRENTE DE EXCITAÇÃO [%]: | 0,25 |
| PERDAS EM VAZIO [W]: | 88,8 |

ENSAIO EM CURTO CIRCUITO

| | |
|---------------------------------|---------------|
| CORRENTE DE CURTO CIRCUITO [A]: | 3,14 |
| TENSÃO DE CURTO CIRCUITO [V]: | 469,90 |
| POTÊNCIA DE CURTO CIRCUITO [W]: | 869 |
| TEMPERATURA AMBIENTE [°C]: | 17,8 |

VALORES CORRIGIDOS A 75 [°C]

| | | |
|-----------------------------------|-------------|---------------|
| PERDAS NOS ENROLAMENTOS [W]: | 1046 | |
| PERDAS TOTAIS [W]: | 1135 | |
| RENDIMENTO A PLENA CARGA [%]: | 98,5 | Eficiência: D |
| IMPEDÂNCIA DE CURTO CIRCUITO [%]: | 3,49 | |

ENSAIO DE PINTURA (*)

| | |
|----------------------|-------------------|
| Espessura da Camada: | () |
| ESPECIFICAÇÃO: | PINTURA DE FUNDO: |
| MÍNIMO : | PINTURA FINAL : |
| MÉDIO : | |
| MÁXIMO : | <i>Unidade:</i> |
| Aderência | () |
| GRAU: | |

ENSAIOS DO ÓLEO ISOLANTE

| | | |
|-------------------------|---------------------|------------------------------------|
| TIPO DO ÓLEO : | OVI | Vol.: 600 [Litros] |
| RIGIDEZ DIELÉTRICA (*): | 10000,00 | () |
| TENSÃO INTERFACIAL: | 10000,00 | () |
| TEOR DE ÁGUA : | 10000,00 | () |
| DENSIDADE : | 10000,000 | () |
| ÍND. NEUTRALIZAÇÃO: | <10000,00 | () |
| F.P. A 100 [°C]: | 0,90 | () |
| COR : | | Teor de PCB: não Detectável |

ESTANQUEIDADE E RESISTÊNCIA À PRESSÃO

| | |
|-------------------|----------------|
| PRESSÃO [Kg/cm2]: | TEMPO [Horas]: |
|-------------------|----------------|

OBSERVAÇÕES

Verificar especificações do óleo

O transformador referido acima está "APROVADO" pela Garantia da Qualidade. Normas: NBR5356-1 NBR5440/2014-D

26/08/2019

DATA

RESPONSÁVEL PELO ENSAIO

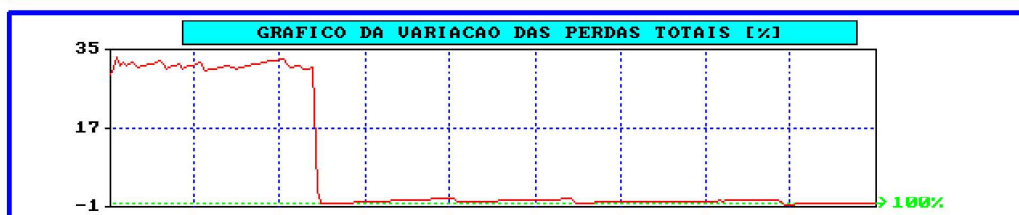
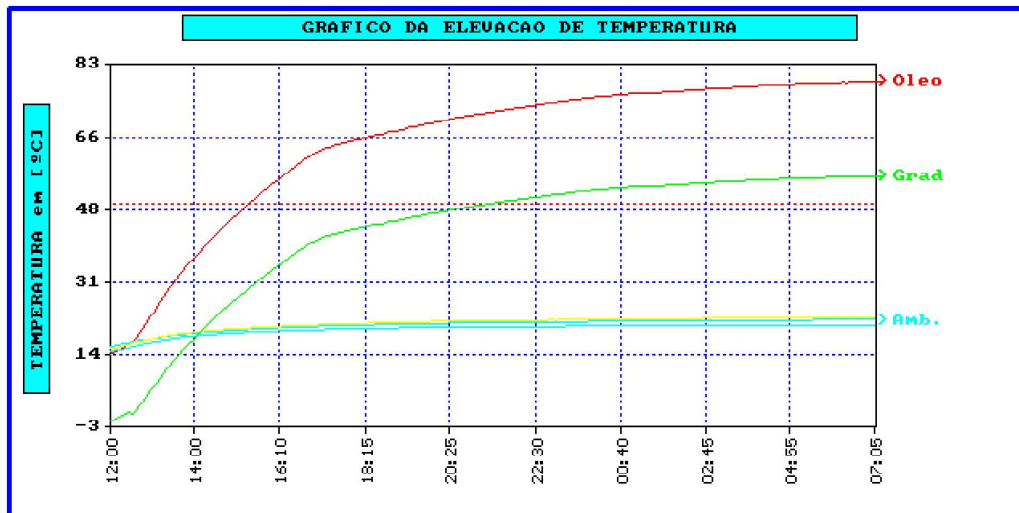
Número do Ensaio : 1177894
 Data : MAIO/2019
 Ligação/Classe : TRIF. - 15 [KV]
 Potência : 75 [KVA]
 Tensão AT : 11400 [V]
 Tensão BT : 380 [V]
 Perdas Totais : 1264 [W]
 I Nominal AT : 3.80 [A]

TEMPERATURAS DO ENSAIO

Topo do óleo [°C] : 78.69 [°C]
 Ambiente 1 [°C] : 22.50 [°C]
 Ambiente 2 [°C] : 21.20 [°C]
 Ambiente 3 [°C] : 22.98 [°C]
 Média Ambiente [°C] : 22.23 [°C]
 Gradiente óleo [°C] : 56.47 [°C]

Número de radiadores: 2
 Número de travessas : 2
 Largura maior :
 Largura Menor :
 Tipo tubo :
 Tipo de pintura :
 ENSAIO :

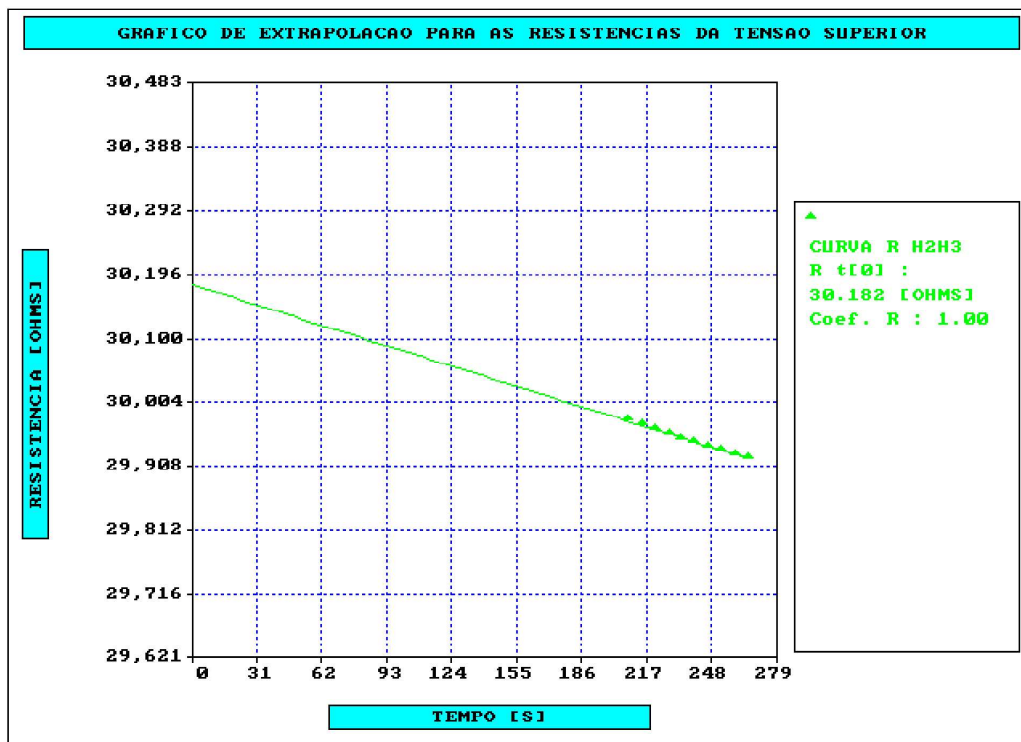
Altura do tubo :
 Altura do tanque :
 Altura do nível óleo:
 Altura fundo falso :
 Volume de óleo :
 Revisão do projeto :
 Versão eleva.exe: 3.52j



| | | | | | | |
|-----------------------|--------|--|-----------------------|--------|-----------------------|--------|
| <i>Rh1h2 [Ohms] :</i> | 22.983 | <i>Resistências dos enrolamentos a 16.0 [°C]</i> | <i>Rh1h3 [Ohms] :</i> | 22.725 | <i>Rh2h3 [Ohms] :</i> | 23.054 |
|-----------------------|--------|--|-----------------------|--------|-----------------------|--------|

Ensaio de Aquecimento dos Enrolamentos:

| | |
|-----------------------|--------|
| <i>H2H3</i> | |
| <i>R(t=0) [Ohms]:</i> | 30.182 |
| <i>T. Óleo [°C]:</i> | 78.8 |
| <i>T. Amb. [°C]:</i> | 22.2 |
| <i>T. Enr. [°C]:</i> | 90.5 |
| <i>Enr/Óleo [°C]:</i> | 11.7 |
| <i>Enr/Amb. [°C]:</i> | 68.2 |

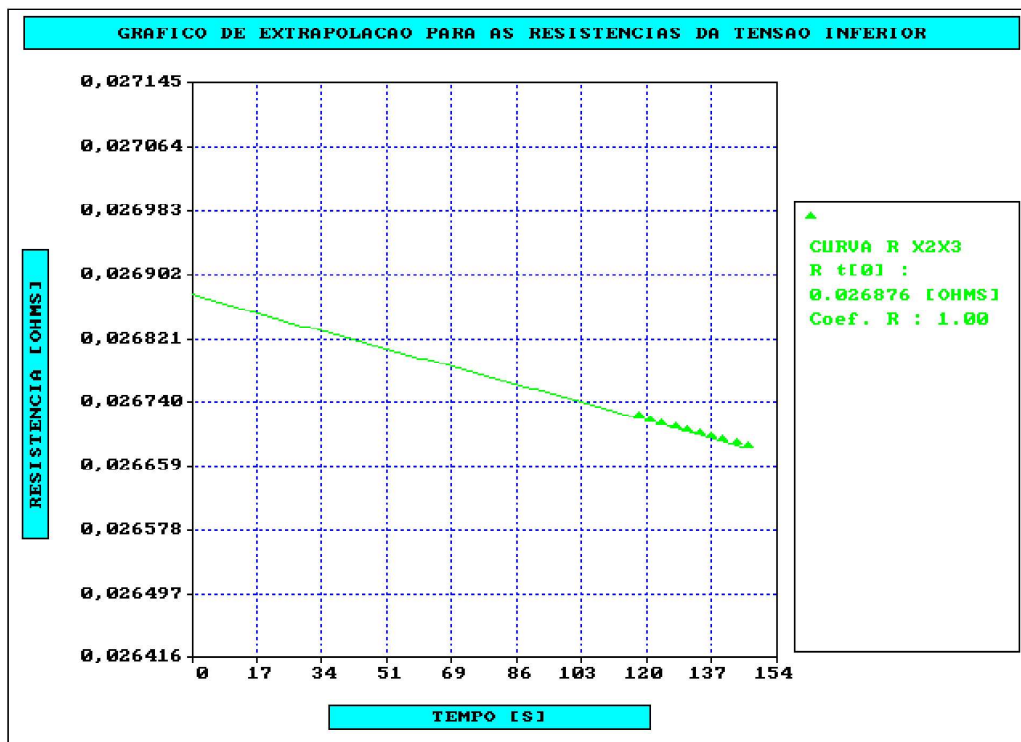


Resistências dos enrolamentos a 16.0 [°C]

Rx2x3 [Ohms] : 0.020875

Ensaio de Aquecimento dos Enrolamentos:

X2X3
 R(t=0) [Ohms]: 0.026876
 T. Óleo [°C]: 78.8
 T. Amb. [°C]: 22.2
 T. Enr. [°C]: 85.3
 Enr/Óleo [°C]: 6.5
 Enr/Amb. [°C]: 63.0



Tempos e valores de resistências medidos

X2X3

| | |
|----------|------------------|
| t[s]:118 | r[ohms]:0.026722 |
| t[s]:121 | r[ohms]:0.026717 |
| t[s]:124 | r[ohms]:0.026713 |
| t[s]:128 | r[ohms]:0.026707 |
| t[s]:131 | r[ohms]:0.026703 |
| t[s]:134 | r[ohms]:0.026699 |
| t[s]:137 | r[ohms]:0.026696 |
| t[s]:140 | r[ohms]:0.026692 |
| t[s]:144 | r[ohms]:0.026687 |
| t[s]:147 | r[ohms]:0.026683 |

Tempos e valores de resistências medidos

H2H3

| | |
|----------|----------------|
| t[s]:208 | r[ohms]:29.978 |
| t[s]:215 | r[ohms]:29.970 |
| t[s]:221 | r[ohms]:29.964 |
| t[s]:228 | r[ohms]:29.956 |
| t[s]:234 | r[ohms]:29.950 |
| t[s]:240 | r[ohms]:29.945 |
| t[s]:247 | r[ohms]:29.938 |
| t[s]:253 | r[ohms]:29.932 |
| t[s]:260 | r[ohms]:29.926 |
| t[s]:266 | r[ohms]:29.921 |

-- Tabela de dados do ensaio de elevação de temperatura. --

| <i>Hora</i> | <i>Volts</i> | <i>Amp.</i> | <i>Watts</i> | <i>[%]</i> | <i>Ta1 °C</i> | <i>Ta2 °C</i> | <i>Ta3 °C</i> | <i>TaM °C</i> | <i>T óleo °C</i> | <i>E óleo °C</i> | <i>Desvio 3H °C</i> |
|-------------|--------------|-------------|--------------|------------|---------------|---------------|---------------|---------------|------------------|------------------|---------------------|
| 12:35 | 501 | 4,79 | 1674 | 132 | 17,2 | 16,1 | 17,0 | 16,8 | 17,16 | 0,39 | |
| 13:05 | 497 | 4,74 | 1669 | 132 | 18,0 | 17,2 | 18,0 | 17,7 | 24,33 | 6,59 | |
| 13:35 | 494 | 4,69 | 1660 | 131 | 18,7 | 18,0 | 18,9 | 18,5 | 31,12 | 12,62 | |
| 14:05 | 492 | 4,66 | 1664 | 132 | 19,2 | 18,5 | 19,5 | 19,1 | 36,90 | 17,82 | |
| 14:35 | 489 | 4,62 | 1654 | 131 | 19,6 | 18,9 | 19,9 | 19,5 | 42,07 | 22,58 | |
| 15:05 | 487 | 4,59 | 1657 | 131 | 20,0 | 19,3 | 20,3 | 19,8 | 46,64 | 26,80 | 28,0 |
| 15:35 | 487 | 4,58 | 1665 | 132 | 20,3 | 19,5 | 20,6 | 20,1 | 50,83 | 30,71 | 30,3 |
| 16:05 | 487 | 4,57 | 1676 | 133 | 20,5 | 19,8 | 20,9 | 20,4 | 54,74 | 34,38 | 27,8 |
| 16:35 | 483 | 4,53 | 1660 | 131 | 20,7 | 19,9 | 21,1 | 20,6 | 58,41 | 37,85 | 25,2 |
| 17:05 | 481 | 4,50 | 1656 | 131 | 20,9 | 20,1 | 21,3 | 20,7 | 61,49 | 40,75 | 22,9 |
| 17:35 | 421 | 3,94 | 1266 | 100 | 21,0 | 20,2 | 21,4 | 20,9 | 63,59 | 42,69 | 20,1 |
| 18:05 | 421 | 3,94 | 1268 | 100 | 21,2 | 20,3 | 21,6 | 21,0 | 64,79 | 43,75 | 16,9 |
| 18:35 | 421 | 3,94 | 1271 | 101 | 21,3 | 20,4 | 21,7 | 21,1 | 65,98 | 44,84 | 14,1 |
| 19:05 | 421 | 3,94 | 1274 | 101 | 21,4 | 20,5 | 21,8 | 21,2 | 66,98 | 45,74 | 11,4 |
| 19:35 | 421 | 3,93 | 1276 | 101 | 21,5 | 20,6 | 21,9 | 21,4 | 68,09 | 46,72 | 8,9 |
| 20:05 | 421 | 3,93 | 1279 | 101 | 21,6 | 20,7 | 22,1 | 21,5 | 69,05 | 47,57 | 6,8 |
| 20:35 | 421 | 3,93 | 1281 | 101 | 21,7 | 20,8 | 22,2 | 21,6 | 70,02 | 48,47 | 5,8 |
| 21:05 | 419 | 3,91 | 1271 | 101 | 21,8 | 20,8 | 22,2 | 21,6 | 70,85 | 49,24 | 5,5 |
| 21:35 | 419 | 3,91 | 1273 | 101 | 21,8 | 20,8 | 22,3 | 21,7 | 71,67 | 50,02 | 5,2 |
| 22:05 | 419 | 3,90 | 1274 | 101 | 21,9 | 20,9 | 22,4 | 21,7 | 72,43 | 50,72 | 5,0 |
| 22:35 | 419 | 3,90 | 1276 | 101 | 21,9 | 20,9 | 22,4 | 21,7 | 73,17 | 51,42 | 4,7 |
| 23:05 | 419 | 3,90 | 1277 | 101 | 22,0 | 20,9 | 22,5 | 21,8 | 73,83 | 52,05 | 4,5 |
| 23:35 | 418 | 3,89 | 1272 | 101 | 22,0 | 21,0 | 22,5 | 21,8 | 74,49 | 52,65 | 4,2 |
| 00:05 | 418 | 3,88 | 1269 | 100 | 22,1 | 21,0 | 22,5 | 21,9 | 75,06 | 53,20 | 4,0 |
| 00:35 | 418 | 3,88 | 1270 | 100 | 22,1 | 21,0 | 22,6 | 21,9 | 75,56 | 53,63 | 3,6 |
| 01:05 | 418 | 3,88 | 1270 | 100 | 22,2 | 21,1 | 22,7 | 22,0 | 75,96 | 53,98 | 3,3 |
| 01:35 | 418 | 3,88 | 1271 | 101 | 22,2 | 21,1 | 22,7 | 22,0 | 76,09 | 54,08 | 2,7 |
| 02:05 | 418 | 3,88 | 1272 | 101 | 22,2 | 21,1 | 22,7 | 22,0 | 76,45 | 54,44 | 2,4 |
| 02:35 | 418 | 3,88 | 1272 | 101 | 22,3 | 21,2 | 22,8 | 22,1 | 76,82 | 54,74 | 2,1 |
| 03:05 | 418 | 3,88 | 1273 | 101 | 22,4 | 21,2 | 22,8 | 22,1 | 77,14 | 55,01 | 1,8 |
| 03:35 | 418 | 3,88 | 1274 | 101 | 22,4 | 21,2 | 22,9 | 22,1 | 77,40 | 55,25 | 1,6 |
| 04:05 | 418 | 3,88 | 1274 | 101 | 22,4 | 21,2 | 22,9 | 22,2 | 77,66 | 55,50 | 1,5 |
| 04:35 | 418 | 3,88 | 1275 | 101 | 22,4 | 21,2 | 22,9 | 22,2 | 77,95 | 55,78 | 1,7 |
| 05:05 | 416 | 3,86 | 1264 | 100 | 22,4 | 21,2 | 22,9 | 22,2 | 78,13 | 55,95 | 1,5 |
| 05:35 | 416 | 3,86 | 1265 | 100 | 22,5 | 21,2 | 22,9 | 22,2 | 78,29 | 56,10 | 1,4 |
| 06:05 | 416 | 3,86 | 1265 | 100 | 22,5 | 21,2 | 23,0 | 22,2 | 78,49 | 56,25 | 1,2 |
| 06:35 | 416 | 3,86 | 1265 | 100 | 22,5 | 21,3 | 23,0 | 22,3 | 78,59 | 56,34 | 1,1 |
| 07:05 | 416 | 3,86 | 1265 | 100 | 22,5 | 21,2 | 23,0 | 22,2 | 78,69 | 56,47 | 1,0 |

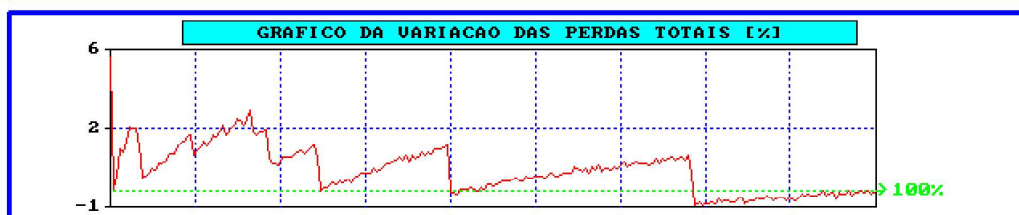
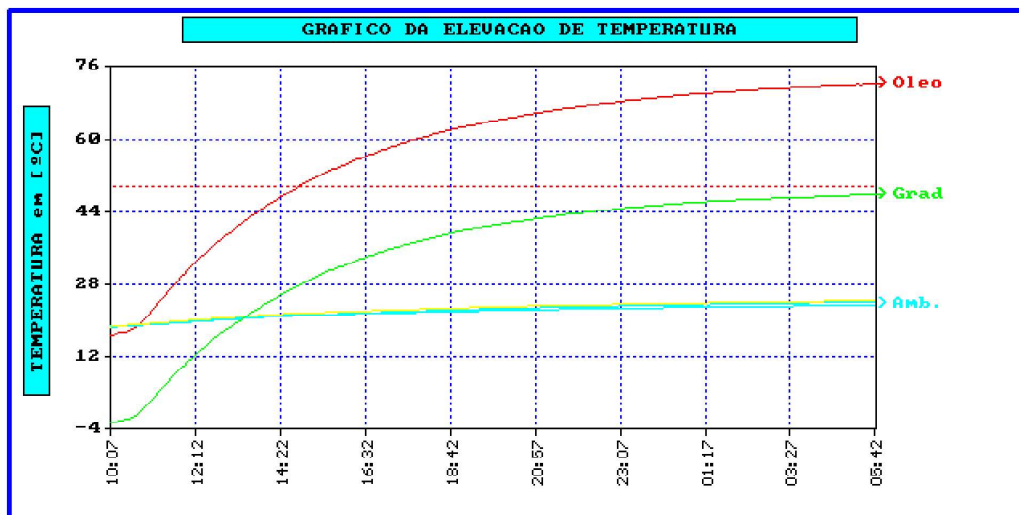
Número do Ensaio : 1177895
 Data : Maio/2019
 Ligação/Classe : TRIF. - 15 [KV]
 Potência : 75 [KVA]
 Tensão AT : 13800 [V]
 Tensão BT : 380 [V]
 Perdas Totais : 1135 [W]
 I Nominal AT : 3.14 [A]

TEMPERATURAS DO ENSAIO

Topo do óleo [°C] : 72.50 [°C]
 Ambiente 1 [°C] : 24.52 [°C]
 Ambiente 2 [°C] : 23.77 [°C]
 Ambiente 3 [°C] : 24.81 [°C]
 Média Ambiente [°C] : 24.37 [°C]
 Gradiente óleo [°C] : 48.13 [°C]

Número de radiadores: 2
 Número de travessas : 2
 Largura maior :
 Largura Menor :
 Tipo tubo :
 Tipo de pintura :
 ENSAIO :

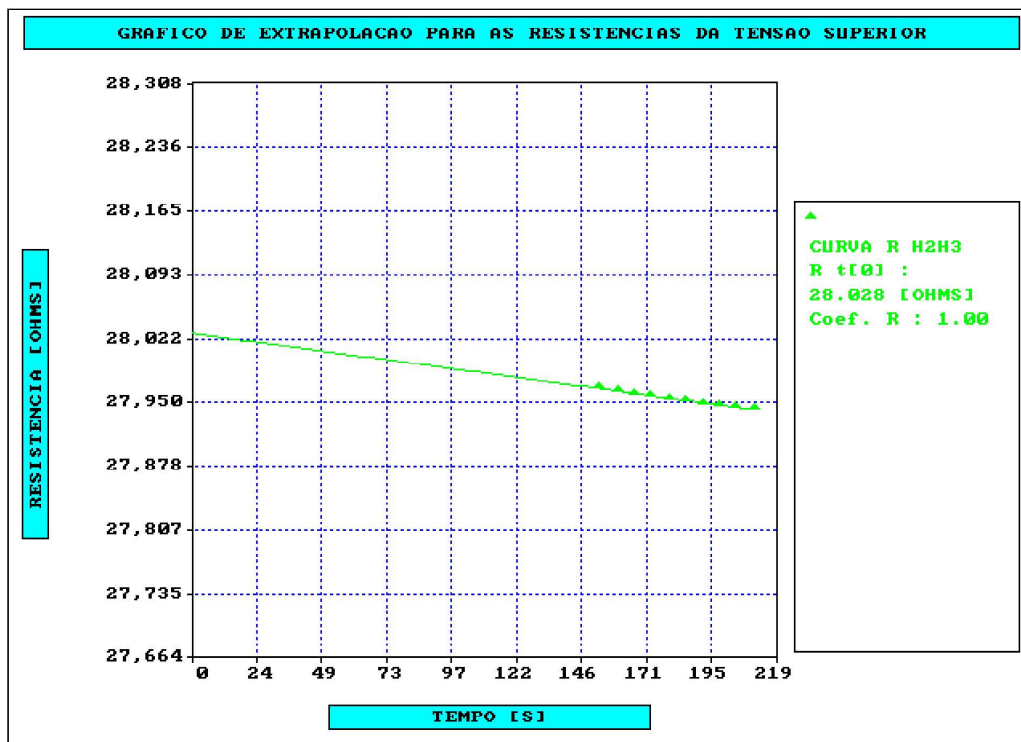
Altura do tubo :
 Altura do tanque :
 Altura do nível óleo:
 Altura fundo falso :
 Volume de óleo :
 Revisão do projeto :
 Versão eleva.exe: 3.52j



| | | | | | | |
|-----------------------|--------|--|-----------------------|--------|-----------------------|--------|
| <i>Rh1h2 [Ohms] :</i> | 27.098 | <i>Resistências dos enrolamentos a 17.0 [°C]</i> | <i>Rh1h3 [Ohms] :</i> | 27.003 | <i>Rh2h3 [Ohms] :</i> | 27.233 |
|-----------------------|--------|--|-----------------------|--------|-----------------------|--------|

Ensaio de Aquecimento dos Enrolamentos:

| | |
|-----------------------|--------|
| <i>H2H3</i> | |
| <i>R(t=0) [Ohms]:</i> | 28.028 |
| <i>T. Óleo [°C]:</i> | 67.7 |
| <i>T. Amb. [°C]:</i> | 24.3 |
| <i>T. Enr. [°C]:</i> | 24.1 |
| <i>Enr/Óleo [°C]:</i> | -43.6 |
| <i>Enr/Amb. [°C]:</i> | 4.5 |

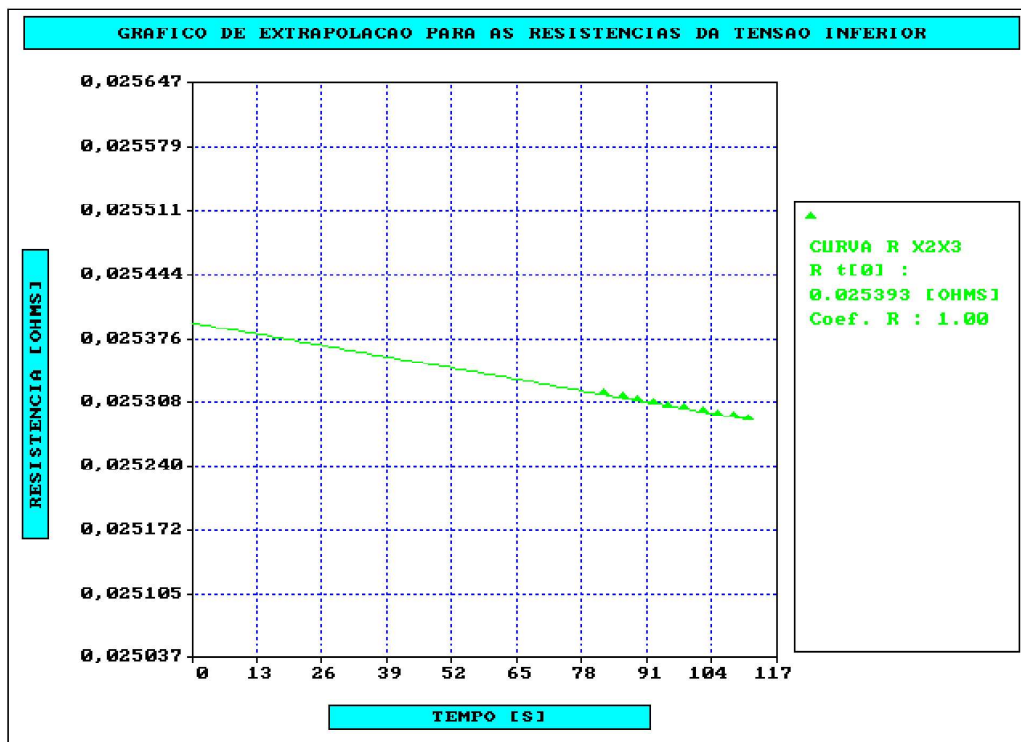


Resistências dos enrolamentos a 17.0 [°C]

Rx2x3 [Ohms] : 0.020740

Ensaio de Aquecimento dos Enrolamentos:

X2X3
 R(t=0) [Ohms]: 0.025393
 T. Óleo [°C]: 67.7
 T. Amb. [°C]: 24.3
 T. Enr. [°C]: 71.3
 Enr/Óleo [°C]: 3.6
 Enr/Amb. [°C]: 51.7



Tempos e valores de resistências medidos

X2X3

| | |
|----------|------------------|
| t[s]: 82 | r[ohms]:0.025317 |
| t[s]: 86 | r[ohms]:0.025313 |
| t[s]: 89 | r[ohms]:0.025310 |
| t[s]: 92 | r[ohms]:0.025307 |
| t[s]: 95 | r[ohms]:0.025304 |
| t[s]: 98 | r[ohms]:0.025301 |
| t[s]:102 | r[ohms]:0.025298 |
| t[s]:105 | r[ohms]:0.025295 |
| t[s]:108 | r[ohms]:0.025293 |
| t[s]:111 | r[ohms]:0.025290 |

Tempos e valores de resistências medidos

H2H3

| | |
|----------|----------------|
| t[s]:153 | r[ohms]:27.966 |
| t[s]:160 | r[ohms]:27.963 |
| t[s]:166 | r[ohms]:27.960 |
| t[s]:172 | r[ohms]:27.958 |
| t[s]:179 | r[ohms]:27.955 |
| t[s]:185 | r[ohms]:27.952 |
| t[s]:192 | r[ohms]:27.950 |
| t[s]:198 | r[ohms]:27.947 |
| t[s]:204 | r[ohms]:27.945 |
| t[s]:211 | r[ohms]:27.943 |

-- Tabela de dados do ensaio de elevação de temperatura. --

| Hora | Volts | Amp. | Watts | [%] | Ta1 °C | Ta2 °C | Ta3 °C | TaM °C | T óleo °C | E óleo °C | Desvio 3H °C |
|-------|-------|------|-------|-----|--------|--------|--------|--------|-----------|-----------|--------------|
| 10:42 | 424 | 4,04 | 1164 | 102 | 19,3 | 19,4 | 19,5 | 19,4 | 18,47 | | |
| 11:12 | 418 | 3,98 | 1146 | 101 | 19,5 | 19,6 | 19,8 | 19,6 | 22,63 | 3,00 | |
| 11:42 | 418 | 3,97 | 1152 | 101 | 19,8 | 19,9 | 20,2 | 19,9 | 27,71 | 7,77 | |
| 12:12 | 418 | 3,97 | 1161 | 102 | 20,1 | 20,2 | 20,5 | 20,3 | 32,27 | 11,99 | |
| 12:42 | 416 | 3,94 | 1158 | 102 | 20,4 | 20,5 | 20,8 | 20,6 | 36,28 | 15,69 | |
| 13:12 | 416 | 3,94 | 1164 | 102 | 20,7 | 20,8 | 21,1 | 20,9 | 39,88 | 18,99 | 21,0 |
| 13:42 | 417 | 3,93 | 1172 | 103 | 21,0 | 21,1 | 21,5 | 21,2 | 43,15 | 21,96 | 22,9 |
| 14:12 | 411 | 3,88 | 1150 | 101 | 21,3 | 21,4 | 21,7 | 21,5 | 46,11 | 24,65 | 21,7 |
| 14:42 | 411 | 3,87 | 1151 | 101 | 21,5 | 21,6 | 22,0 | 21,7 | 48,68 | 26,97 | 19,2 |
| 15:12 | 411 | 3,87 | 1154 | 102 | 21,7 | 21,7 | 22,1 | 21,8 | 51,01 | 29,16 | 17,2 |
| 15:42 | 407 | 3,83 | 1137 | 100 | 21,8 | 21,8 | 22,3 | 22,0 | 53,09 | 31,13 | 15,4 |
| 16:12 | 407 | 3,83 | 1141 | 100 | 22,0 | 21,9 | 22,4 | 22,1 | 55,02 | 32,92 | 13,9 |
| 16:42 | 407 | 3,82 | 1143 | 101 | 22,1 | 22,0 | 22,6 | 22,2 | 56,67 | 34,44 | 12,5 |
| 17:12 | 408 | 3,82 | 1147 | 101 | 22,3 | 22,1 | 22,7 | 22,4 | 58,26 | 35,88 | 11,2 |
| 17:42 | 407 | 3,82 | 1152 | 101 | 22,4 | 22,2 | 22,9 | 22,5 | 59,62 | 37,12 | 10,1 |
| 18:12 | 408 | 3,81 | 1152 | 101 | 22,6 | 22,3 | 23,0 | 22,6 | 60,93 | 38,30 | 9,1 |
| 18:42 | 407 | 3,81 | 1155 | 102 | 22,7 | 22,4 | 23,1 | 22,7 | 62,10 | 39,36 | 8,2 |
| 19:12 | 404 | 3,78 | 1136 | 100 | 22,8 | 22,5 | 23,3 | 22,9 | 63,17 | 40,30 | 7,4 |
| 19:42 | 404 | 3,77 | 1137 | 100 | 23,0 | 22,6 | 23,4 | 23,0 | 64,04 | 41,03 | 6,6 |
| 20:12 | 404 | 3,77 | 1140 | 100 | 23,1 | 22,8 | 23,6 | 23,2 | 64,90 | 41,74 | 5,9 |
| 20:42 | 404 | 3,77 | 1140 | 100 | 23,2 | 22,8 | 23,7 | 23,2 | 65,66 | 42,41 | 5,3 |
| 21:12 | 404 | 3,77 | 1142 | 101 | 23,3 | 22,9 | 23,8 | 23,3 | 66,40 | 43,06 | 4,8 |
| 21:42 | 404 | 3,77 | 1143 | 101 | 23,4 | 23,0 | 23,8 | 23,4 | 67,05 | 43,64 | 4,3 |
| 22:12 | 404 | 3,77 | 1145 | 101 | 23,5 | 23,1 | 23,9 | 23,5 | 67,64 | 44,13 | 3,8 |
| 22:42 | 404 | 3,77 | 1144 | 101 | 23,6 | 23,1 | 24,0 | 23,6 | 68,30 | 44,72 | 3,7 |
| 23:12 | 404 | 3,76 | 1147 | 101 | 23,7 | 23,2 | 24,1 | 23,6 | 68,78 | 45,13 | 3,4 |
| 23:42 | 404 | 3,76 | 1148 | 101 | 23,8 | 23,3 | 24,1 | 23,7 | 69,27 | 45,55 | 3,1 |
| 00:12 | 404 | 3,76 | 1147 | 101 | 23,9 | 23,3 | 24,2 | 23,8 | 69,66 | 45,87 | 2,8 |
| 00:42 | 404 | 3,76 | 1150 | 101 | 23,9 | 23,4 | 24,3 | 23,9 | 70,10 | 46,23 | 2,6 |
| 01:12 | 400 | 3,73 | 1130 | 100 | 24,0 | 23,5 | 24,4 | 23,9 | 70,48 | 46,54 | 2,4 |
| 01:42 | 401 | 3,73 | 1132 | 100 | 24,1 | 23,5 | 24,4 | 24,0 | 70,79 | 46,79 | 2,1 |
| 02:12 | 400 | 3,73 | 1132 | 100 | 24,2 | 23,5 | 24,5 | 24,1 | 71,09 | 47,04 | 1,9 |
| 02:42 | 401 | 3,73 | 1133 | 100 | 24,2 | 23,6 | 24,5 | 24,1 | 71,34 | 47,24 | 1,7 |
| 03:12 | 401 | 3,72 | 1132 | 100 | 24,3 | 23,6 | 24,6 | 24,2 | 71,65 | 47,48 | 1,6 |
| 03:42 | 400 | 3,72 | 1131 | 100 | 24,3 | 23,7 | 24,7 | 24,2 | 71,81 | 47,58 | 1,4 |
| 04:12 | 401 | 3,72 | 1133 | 100 | 24,4 | 23,7 | 24,7 | 24,3 | 72,06 | 47,77 | 1,2 |
| 04:42 | 400 | 3,72 | 1132 | 100 | 24,4 | 23,7 | 24,7 | 24,3 | 72,19 | 47,90 | 1,1 |
| 05:12 | 401 | 3,72 | 1135 | 100 | 24,5 | 23,8 | 24,8 | 24,3 | 72,43 | 48,09 | 1,1 |
| 05:42 | 401 | 3,72 | 1135 | 100 | 24,5 | 23,8 | 24,8 | | | | |