

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

Afonso Torres de Oliveira

**ANÁLISE TÉRMICA DE RADIADORES DE TRANSFORMADORES
ELÉTRICOS UTILIZANDO O MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS**

Santa Maria, RS
2019

Afonso Torres de Oliveira

**ANÁLISE TÉRMICA DE RADIADORES DE TRANSFORMADORES ELÉTRICOS
UTILIZANDO O MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS**

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

2019

© 2019

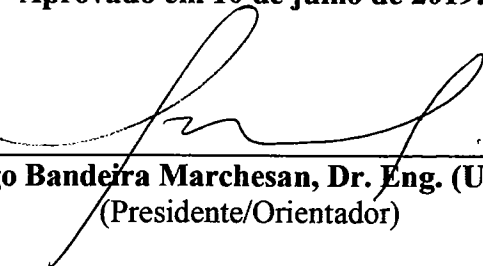
Todos os direitos autorais reservados a Afonso Torres de Oliveira. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita com autorização por escrito do autor. Endereço: Avenida Roraima nº 1000, CEU II, apto 3032, Bairro Camobi, Santa Maria, RS. CEP: 97105-220. Fone (+55) 55 98110-6408; E-mail: afonso97.oliveira@gmail.com.

Afonso Torres de Oliveira

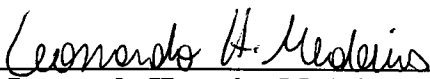
**ANÁLISE TÉRMICA DE RADIADORES DE TRANSFORMADORES ELÉTRICOS
UTILIZANDO O MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS**

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 10 de julho de 2019:



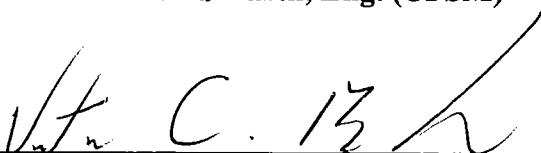
Tiago Bandeira Marchesan, Dr. Eng. (UFSM)
(Presidente/Orientador)



Leonardo Hautrive Medeiros, Eng. (UFSM)



Norton Daniel Barth, Eng. (UFSM)



Vitor Cristiano Bender, Dr. Eng. (UFSM)

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais Noé Vargas de Oliveira e Dirlane T. Torres de Oliveira, que sempre me incentivaram a estudar, me apoiaram nos momentos mais difíceis e que sempre batalharam para dar aos dois filhos a oportunidade de entrar em uma universidade pública.

À minha irmã Caroline Torres de Oliveira, que por já ter passado por essa etapa, pôde dar conselhos valiosos, além de muito apoio em todas as minhas decisões, mesmo antes de ingressar na engenharia.

Ao meu avô Salvador Torres, pela amizade e por toda sabedoria repassada durante todo este tempo.

Ao meu professor orientador Tiago Marchesan e ao professor Vitor Bender, por confiarem no meu potencial, desde o momento que ingressei no grupo e por proporcionarem, através dos desafios passados, um grande aprendizado, tanto profissional como pessoal.

Aos colegas de Laboratório por todo o aprendizado passado e pela parceria, em especial ao Leonardo Medeiros, Alexander Dutra, Antônio Kaminski, Micael Oliveira, Gabriel Nogueira, Guilherme Maschio e Nórton Barth.

Aos meus colegas, Giancarlo Daros, Guilherme Maschio, Pedro Vianna, João Pedro Cipriani, Alex Muller, Raul Pivetta, Gabriel Cadore, Konrad Kork, Fernanda Bencke, Vinícius Negri, Igor Barboza, Julio Cezar Lirio e Lucas Werner por todo o suporte e parceria, que proporcionaram durante toda esta caminhada.

Aos amigos que a convivência na casa do estudante me proporcionou Lucas Werner, Alisson Kolling, Rubens Guilherme Santos, Alcides Gonçalves, Nicael Duarte, Anderson Bonotto, Rodrigo de Andrade, Paulo Stoll e Victor Silveira, pela parceria.

RESUMO

ANÁLISE TÉRMICA DE RADIADORES DE TRANSFORMADORES ELÉTRICOS UTILIZANDO O MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

AUTOR: AFONSO TORRES DE OLIVEIRA
ORIENTADOR: TIAGO BANDEIRA MARCHESAN

Como qualquer outro equipamento elétrico, os transformadores não são ideais e apresentam perdas. Parte da energia processada é perdida na forma de calor pela parte ativa do equipamento, as perdas Joule, e seu rendimento se torna inferior à 100%. Como a operação dos transformadores em temperaturas superiores às de projeto causa problemas, a exemplo da redução da sua vida útil, este calor interno deve ser dissipado para o ambiente externo. Neste sentido, este trabalho faz uma análise paramétrica dos radiadores através de simulações térmicas utilizando o método de elementos finitos, visando identificar mudanças na geometria desse equipamento que tornem a refrigeração do transformador mais eficiente. Dessa forma é apresentada uma revisão sobre transformadores elétricos e um estudo específico sobre o comportamento térmico do transformador. As simulações são desenvolvidas no *software* de elementos finitos ANSYS CFX® e se baseiam em um modelo simplificado de transformador, que considera a parte ativa da máquina como um bloco que dissipa, em forma de calor, as perdas Joules existentes na parte ativa. A análise dos resultados é feita através da comparação da temperatura média do óleo e da temperatura de topo de óleo, obtidas nas simulações, em cada uma das geometrias. Para garantir a validade das comparações feitas, todos os casos apresentam os mesmos parâmetros de simulação e as malhas de elementos finitos são geradas de forma semelhante.

Palavras-chave: Comportamento Térmico. Método de Elementos Finitos. Sistema de Refrigeração. Transformadores de Potência. Vida Útil.

ABSTRACT

THERMAL ANALYSIS OF RADIATORS USED IN POWER TRANSFORMERS USING THE FINITE ELEMENTS METHOD

AUTHOR: AFONSO TORRES DE OLIVEIRA
ADVISOR: TIAGO BANDEIRA MARCHESAN

As any other electric equipment, transformers have efficiency lower than 100%. The “lost” energy is dissipated as heat in the active part of the machine and later this heat must be transferred to the outside environment, in order to refrigerate the machine. Transformer operation with higher temperature than it was designed to operate will reduce the lifetime of the machine. In this sense, this work brings a parametric analysis of radiators with thermal simulations using the finite elements method, aiming to identify changes in the geometry of the transformer that improve the cooling system of the equipment. This work also presents a revision about electric transformers and a specific study about its thermal behavior. Simulations were developed in the ANSYS CFX® software and they were based on a simplified model of transformer, that consider the active part of the machine as a block dissipating as heat the lost energy in Joules. The results were made by comparing the values of average temperature and top oil temperature obtained in each simulation. To ensure the comparisons’ validity, all cases have the same simulation parameters and the finite elements meshes were generated in a similar form.

Keywords: Cooling System. Finite Elements Method. Lifetime. Power Transformers. Thermal Behavior.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Exemplo de transformador de potência.....	14
Figura 2 – Exemplo de transformador de distribuição trifásico.	14
Figura 3 – Circuito eletromagnético de um transformador monofásico.....	15
Figura 4 – Transformador trifásico de núcleo envolvido.	18
Figura 5 – Transformador trifásico de núcleo envolvente.....	18
Figura 6 – Núcleo empilhado.	19
Figura 7 – Núcleo enrolado.	19
Figura 8 – Ciclo de histerese de um metal amorfo e do aço silício.	20
Figura 9 – Sistema de refrigeração ONAN.....	23
Figura 10 – Sistema de refrigeração ONAF.	23
Figura 11 – Sistema de refrigeração OFAF.....	24
Figura 12 – Sistema de refrigeração ODAF.	24
Figura 13 – Ciclo de histerese de um material magnético.....	28
Figura 14 – Perdas parasitas em função do número de condutores em paralelo.	32
Figura 15 – Processo de resfriamento de um transformador a óleo.....	37
Figura 16 – Modelo simplificado de um transformador de potência.....	38
Figura 17 – Interface da ferramenta.....	42
Figura 18 – Modelo de geometria.....	43
Figura 19 – Exemplo de malha gerada no <i>software</i>	44
Figura 20 – Ilustração do funcionamento da ferramenta “ <i>inflation</i> ”.....	46
Figura 21 – Configurações utilizadas nas simulações.	47
Figura 22 – Configurações de processamento computacional.	48
Figura 23 – Geometria do caso base.....	50
Figura 24 – Gráfico de temperatura do óleo.....	51
Figura 25 – Gráfico de temperatura do ar nas proximidades das aletas.	52
Figura 26 – Configuração base e as variações que serão aplicadas.....	53
Figura 27 – Gráficos de temperatura: (a) Caso base (b) Radiador com 1 aleta.....	54
Figura 28 – Gráficos de temperatura: (a) Caso base (b) Radiador com 2 aletas.	55
Figura 29 – Gráficos de temperatura: (a) Caso base (b) Radiador com 4 aletas.	56
Figura 30 – Gráficos de temperatura: (a) Caso base (b) Radiador com 5 aletas.	57
Figura 31 – Gráfico da temperatura média do óleo em relação ao número de aletas...57	
Figura 32 – Configuração base e as variações que serão aplicadas.....	58

Figura 33 – Gráficos de temperatura: (a) Caso base (b) 5 cm entre aletas.....	59
Figura 34 – Gráficos de temperatura: (a) Caso base (b) 15 cm entre aletas.....	60
Figura 35 – Temperatura média do óleo em relação à distância entre aletas.	61
Figura 36 – Configuração base e as variações que serão aplicadas.....	62
Figura 37 – Gráficos de temperatura: (a) Caso base (b) ΔH de 40 cm.....	63
Figura 38 – Gráficos de temperatura: (a) Caso base (b) ΔH de 60 cm.....	64
Figura 39 – Gráficos de temperatura: (a) Caso base (b) ΔH de 80 cm.....	65
Figura 40 – Variação da pressão interna da máquina (ΔP) em relação ao ΔH	66
Figura 41 – Variação da velocidade e da temperatura média em relação ao ΔH	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação quanto ao tipo de sistema de refrigeração.	22
Tabela 2 – Limites de elevação de temperatura em transformadores.....	25
Tabela 3 – Parâmetros caso base.	51
Tabela 4 – Parâmetros da configuração com 1 aleta.	53
Tabela 5 – Parâmetros da configuração com 2 aletas.....	54
Tabela 6 – Parâmetros da configuração com 4 aletas.....	55
Tabela 7 – Parâmetros da configuração com 5 aletas.....	56
Tabela 8 – Parâmetros da configuração com 5 cm de distância entre aletas.	58
Tabela 9 – Parâmetros da configuração com 15 cm de distância entre aletas.	59
Tabela 10 – Parâmetros da configuração com ΔH de 40 cm.....	62
Tabela 11 – Parâmetros da configuração com ΔH de 60 cm.....	64
Tabela 12 – Parâmetros da configuração com ΔH de 80 cm.....	65

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS	11
1.2	OBJETIVOS	11
1.3	MOTIVAÇÃO	11
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO	11
2	TRANSFORMADORES ELÉTRICOS	13
2.1	INTRODUÇÃO	13
2.2	PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO	15
2.3	ELEMENTOS CONSTRUTIVOS	16
2.3.1	Enrolamentos	16
2.3.2	Núcleo	17
2.3.3	Sistema de isolamento	20
2.3.4	Sistema de refrigeração	21
3	PERDAS E COMPORTAMENTO TÉRMICO	26
3.1	PERDAS EM TRANSFORMADORES	26
3.1.1	Perdas no núcleo: Histerese	27
3.1.2	Perdas no núcleo: Correntes de Foucault (Parasitas)	29
3.1.3	Perdas no núcleo: Excedentes	30
3.1.4	Perdas nos enrolamentos: Ôhmicas	30
3.1.5	Perdas nos enrolamentos: Correntes de Foucault (Parasitas)	31
3.2	INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NA VIDA ÚTIL DO TRANSFORMADOR ...	32
3.3	EFEITO DA TEMPERATURA AMBIENTE NO TRANSFORMADOR	34
3.4	MEIOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR	34
3.4.1	Condução	35
3.4.2	Radiação	35
3.4.3	Convecção	35
3.5	COMPORTAMENTO TÉRMICO	36
3.6	ASPECTOS TÉRMICOS DO TRANSFORMADOR	36
4	ANÁLISE COM O MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS	40
4.1	INTRODUÇÃO	40
4.2	MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS (MEF)	40
4.3	FERRAMENTA UTILIZADA	41
4.3.1	Geometria (Geometry)	42
4.3.2	Malha (Mesh)	43
4.3.3	Configurações (Setup)	45
4.3.4	Solução (Solution)	48
4.3.5	Resultados (Results)	48
5	SIMULAÇÕES	50
5.1	CASO BASE	50
5.2	VARIAÇÃO DO NÚMERO DE ALETAS	52
5.2.1	Radiador com 1 aleta	53
5.2.2	Radiador com 2 aletas	54
5.2.3	Radiador com 4 aletas	55
5.2.4	Radiador com 5 aletas	56
5.2.5	Análise dos resultados	57
5.3	VARIAÇÃO DA DISTÂNCIA ENTRE ALETAS	58
5.3.1	Distância (D) de 5 cm entre aletas	58
5.3.2	Distância (D) de 15 cm entre aletas	59

5.3.3	Análise dos resultados.....	60
5.4	VARIAÇÃO DO ΔH	61
5.4.1	ΔH de 40 cm	62
5.4.2	ΔH de 60 cm	63
5.4.3	ΔH de 80 cm	65
5.4.4	Análise dos resultados.....	66
6	CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS	68
7	REFERÊNCIAS	70

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Transformadores são elementos de extrema importância no sistema elétrico de potência e, além disso, são equipamentos de elevado custo, por isso é necessário um cuidado especial, juntamente com o monitoramento constante de suas condições. Devido à importância de tal equipamento, estudos são feitos a fim de elevar a eficiência e a vida útil do mesmo. Dentro destes inclui-se estudos sobre o sistema de refrigeração do transformador, objeto de estudo deste trabalho.

1.2 OBJETIVOS

O presente trabalho tem por objetivo simular e comparar a eficiência de diversas configurações de radiadores em transformadores elétricos de potência imersos em óleo isolante. Para um mesmo valor de potência dissipada pela parte ativa da máquina, deseja-se estudar o comportamento do sistema de refrigeração variando os seguintes parâmetros: número de aletas, distância entre aletas, distância entre o centro dos radiadores para o centro da parte ativa, e espessura das aletas.

1.3 MOTIVAÇÃO

A sobrecarga é um problema recorrente em transformadores e ocorre por diversos motivos como curtos-circuitos, situações emergenciais e até mesmo em situações planejadas, lembrando que, os transformadores são projetados para suportar certos limites de sobrecarga. A principal consequência dessa sobrecarga é o aquecimento da máquina, que causa, entre outros problemas, a degradação ou até mesmo a ruptura do isolamento sólido dos condutores, que conseqüentemente diminui a vida útil do dispositivo. Para garantir que o transformador funcione de forma adequada, prolongando sua vida útil, é necessário um bom projeto do sistema de refrigeração, utilizando configurações de radiadores eficientes.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho é dividido em seis capítulos, sendo o primeiro a Introdução, que traz uma breve descrição do contexto geral, dos objetivos e da motivação do trabalho.

O Capítulo 2, Transformadores Elétricos, apresenta uma revisão bibliográfica sobre este equipamento, explicando o princípio de funcionamento e detalhando os seus elementos construtivos.

O Capítulo 3, Perdas e Comportamento Térmico, apresenta uma revisão bibliográfica a respeito das perdas de energia que geram calor no ambiente interno do transformador e um estudo do comportamento térmico da máquina.

O Capítulo 4, Análise com o Método de Elementos Finitos, apresenta um breve resumo do surgimento deste método, a forma de aplicação do mesmo na solução do problema proposto e a metodologia usada nas simulações.

O Capítulo 5, Simulações e Resultados, apresenta todas as configurações de radiadores simuladas, juntamente com os seus respectivos resultados.

O Capítulo 6, Conclusões e Trabalhos Futuros, apresenta as conclusões tiradas através dos resultados obtidos, além de apresentar sugestões de trabalhos que podem ser realizados futuramente, visando complementar e dar continuidade no estudo proposto.

2 TRANSFORMADORES ELÉTRICOS

2.1 INTRODUÇÃO

Transformadores são equipamentos estáticos capazes de alterar valores de tensão e corrente alternadas, por meio de indução eletromagnética, mantendo a mesma potência (idealmente) sem alterar a frequência fundamental do sinal em questão (IEC 60076-1, 2000).

São utilizados em larga escala, interligando todo o sistema, desde a geração até a distribuição da energia para o consumidor e tem por objetivo elevar ou rebaixar os níveis de tensão de acordo com sua posição no sistema (VIENA, 2010).

Os transformadores são fundamentais na transmissão de energia elétrica em longas distâncias, pois permitem que o nível de tensão seja elevado, minimizando as perdas Joule no sistema elétrico de potência como um todo (FEIL, 2015).

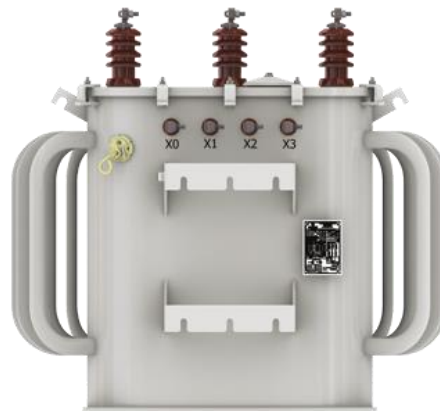
No sistema elétrico de potência, esses equipamentos dividem-se em transformadores de potência e transformadores de distribuição. O primeiro grupo é composto por máquinas responsáveis por elevar a tensão produzida na unidade geradora para níveis de transmissão (geralmente valores acima de 69kV) e posteriormente, quando próximo aos centros de consumo, rebaixar esta mesma tensão para níveis de distribuição primária (geralmente valores entre 13.8kV e 34.5kV), uma ilustração deste tipo de máquina é apresentada na Figura 1. O segundo grupo é responsável por rebaixar a tensão recebida do sistema de transmissão para níveis de consumo (380/220 V ou 220/127 V no Brasil), tais equipamentos podem ser trifásicos, bifásicos ou monofásicos, um exemplo deste tipo de equipamento é mostrado na Figura 2 (MEDEIROS, 2017).

Figura 1 – Exemplo de transformador de potência.



Fonte: WEG S.A., 2019.

Figura 2 – Exemplo de transformador de distribuição trifásico.



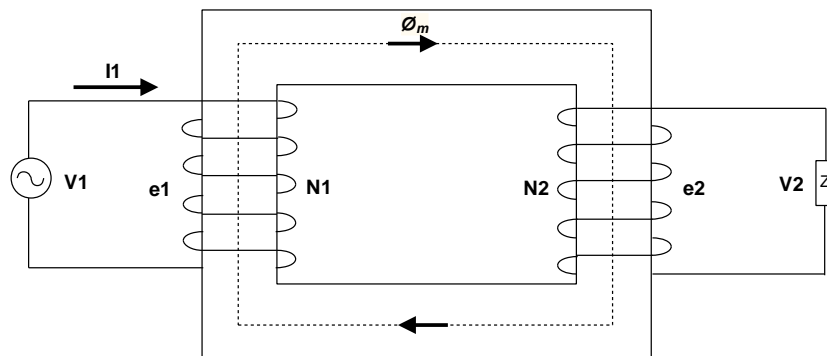
Fonte: ROMAGNOLE PRODUTOS ELÉTRICOS S.A., 2019.

A necessidade de alta confiabilidade que o sistema exige dos transformadores, devido ao alto custo e a dificuldade de se realizar a troca dos mesmos (principalmente quando se trata de transformadores de potência), motivam várias pesquisas que buscam melhorar os sistemas acoplados a estes equipamentos, dentre eles destaca-se o sistema de refrigeração (FEIL, 2015) (IARONKA, 2014).

2.2 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

O transformador funciona baseado no acoplamento eletromagnético entre duas bobinas. É constituído basicamente por uma bobina primária que recebe a energia elétrica de alguma fonte, com determinados níveis de tensão e corrente e uma bobina secundária pela qual a energia recebida é transferida para a carga, com. O circuito magnético responsável pelo acoplamento entre as bobinas pode ser o próprio ar, ou algum material ferromagnético (a fim de aumentar este acoplamento) (RIES, 2007). A Figura 3 apresenta o circuito eletromagnético de um transformador monofásico genérico.

Figura 3 – Circuito eletromagnético de um transformador monofásico.



Fonte: (FEIL, 2015).

Ao aplicar uma tensão alternada U_1 nas extremidades do enrolamento primário do transformador, circula por ele uma corrente alternada I_1 , o que acarreta na magnetização do núcleo de forma alternada, tornando-o uma “fonte” de fluxo mútuo ϕ_m . A variação deste fluxo no enrolamento primário implica no surgimento de uma força eletromotriz e_1 , também alternada, neste enrolamento (FEIL, 2015) (KULKARNI; KHAPARDE, 2004) (MEDEIROS, 2017) (NUNES, 2011).

A variação do fluxo magnético mútuo ϕ_m no enrolamento secundário produz uma força eletromotriz e_2 , também alternada, no mesmo. Esta força eletromotriz (se houver carga conectada) origina a circulação de uma determinada corrente I_2 neste enrolamento. A corrente I_2 provoca o surgimento de um fluxo magnético alternado que se opõe ao fluxo ϕ_m , reduzindo-o, esta redução é equilibrada por um fluxo de compensação originado pela passagem deste mesmo fluxo pelo enrolamento primário. Sendo assim, as correntes que circulam pelos enrolamentos são proporcionais ao número de espiras em cada bobina (FEIL, 2015) (KULKARNI; KHAPARDE, 2004) (MEDEIROS, 2017) (MONIZ, 2007) (NUNES, 2011).

Sendo assim, levando em consideração um transformador ideal sem perdas, sem fluxo de dispersão e sem resistência nos enrolamentos, a relação entre as tensões aplicadas, correntes e número de espiras em ambos os enrolamentos é dada pela Equação (1) (FEIL, 2015) (KULKARNI; KHAPARDE, 2004) (MEDEIROS, 2017).

$$\frac{e_1}{e_2} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1} \quad (1)$$

Onde:

U_1 = tensão eficaz aplicada aos terminais do enrolamento primário (V);

U_2 = tensão eficaz aplicada aos terminais do enrolamento secundário (V);

e_1 = valor eficaz da tensão induzida no enrolamento primário (V);

e_2 = valor eficaz da tensão induzida no enrolamento secundário (V);

N_1 = número de espiras do enrolamento primário;

N_2 = número de espiras do enrolamento secundário.

I_1 = valor eficaz da intensidade de corrente no enrolamento primário (A);

I_2 = valor eficaz da intensidade de corrente no enrolamento secundário (A).

2.3 ELEMENTOS CONSTRUTIVOS

Os principais elementos utilizados na construção de transformadores são os enrolamentos, o núcleo, o sistema de isolamento e o sistema de refrigeração, e mesmo que cada fabricante possua um método de construção diferente esses elementos sempre estarão presentes, o que permite que se tenha certo padrão construtivo (NOGUEIRA; ALVES, 2009).

Cada um dos elementos citados possui uma função essencial no funcionamento das máquinas em questão. Os enrolamentos são responsáveis por produzir o fluxo magnético através das correntes circulantes. O núcleo tem a função de realizar o acoplamento magnético entre os enrolamentos, fornecendo um caminho de alta permeabilidade magnética. O sistema de isolamento é responsável por evitar a ocorrência de curtos-circuitos no ambiente interno da máquina. O sistema de refrigeração tem a função de manter a temperatura interna do equipamento dentro de limites aceitáveis, definidos por norma (ABNT NBR 5440, 2014) (FEIL, 2015) (IARONKA, 2014) (MEDEIROS, 2017).

2.3.1 Enrolamentos

Os enrolamentos são também chamados de bobinas, têm a função de proporcionar a passagem de corrente elétrica constituindo, juntamente com o núcleo, a parte ativa do

transformador. O bom funcionamento da máquina está ligado diretamente aos enrolamentos, portanto estes devem ser projetados de forma a suportar os esforços mecânicos (provocados principalmente por curtos-circuitos) e a carga térmica a que são expostos (IARONKA, 2014) (RIES, 2007) (ROSENTINO, 2010) (SALUSTIANO, 2012).

As bobinas são fundamentalmente condutores isolados que enrolados ao núcleo formam o circuito eletromagnético do transformador. Os materiais mais utilizados como condutores são o cobre e o alumínio, devido à elevada capacidade de condução de corrente aliada ao baixo custo de ambos, se comparados à materiais com condutividade superior (HARLOW, 2004) (NUNES, 2011) (NOGUEIRA; ALVES, 2009).

Existem, basicamente, quatro tipos de bobinas: helicoidal, em disco, em camadas e tipo “panqueca”. Diversos fatores são levados em consideração para a escolha do tipo de enrolamento a ser utilizado, entre eles: a rigidez mecânica, a tensão distribuída pelo enrolamento, as perdas e a disposição geométrica (FEIL, 2015) (HARLOW, 2004).

2.3.2 Núcleo

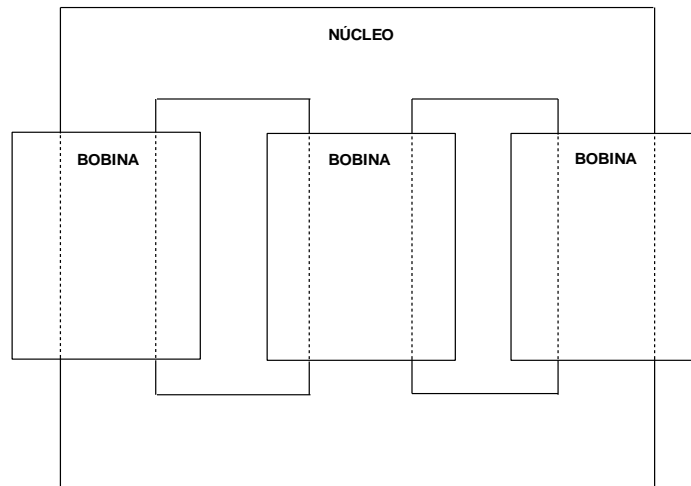
A principal função do núcleo é proporcionar um caminho com alta permeabilidade magnética ao fluxo gerado pelas correntes que passam nos enrolamentos, para produzir este caminho utiliza-se materiais ferromagnéticos (ligas de ferro). Como consequência obtém-se um bom acoplamento magnético entre as bobinas, ou seja, grande parte do fluxo produzido por uma das bobinas (podendo chegar a valores próximos de 100%) passa para outra (FEIL, 2015) (IARONKA, 2014) (MEDEIROS, 2017) (SALUSTIANO, 2012).

Além de alta permeabilidade magnética, outra característica desejada é que o núcleo possua altos valores de resistividade elétrica, com o intuito de reduzir correntes parasitas (correntes que circulam pelo núcleo magnético da máquina) e consequentemente reduzir as perdas do sistema. Existem duas formas que são muito utilizadas para aumentar a resistividade das ligas de ferro, uma delas é a adição de pequenas quantidades de silício e a outra, ao invés de construir o núcleo de forma maciça, usar chapas finas empilhadas umas sobre as outras, ambas são usadas de forma conjunta (IARONKA, 2014) (JORDÃO, 2002) (SALUSTIANO, 2012).

Construtivamente os núcleos podem ser classificados em dois tipos: núcleo envolvido e núcleo envolvente (HARLOW, 2004). Em um transformador com núcleo envolvido existe apenas um caminho para o fluxo magnético, onde o núcleo é envolvido pelas bobinas, como mostra a Figura 4. Em um transformador de núcleo envolvente existe mais de um caminho para

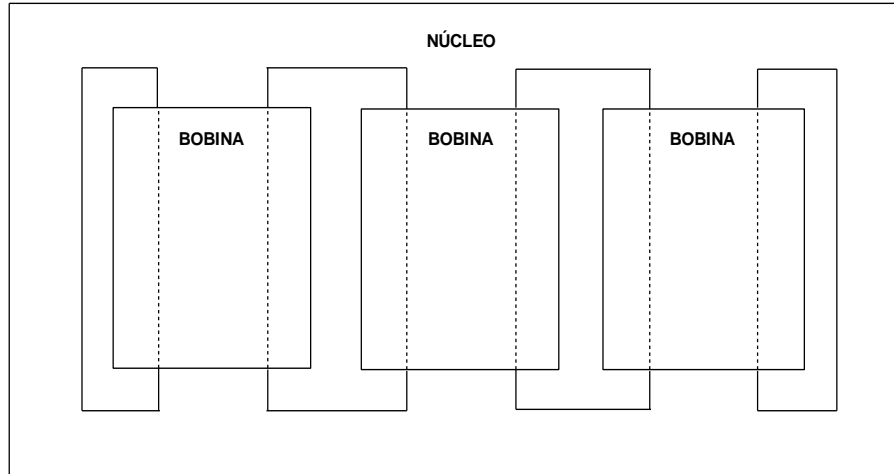
a circulação do fluxo magnético, onde o núcleo envolve as bobinas como mostra a Figura 5 (HARLOW, 2004) (MCLYMAN, 2004) (SALUSTIANO, 2012).

Figura 4 – Transformador trifásico de núcleo envolvido.



Fonte: (FEIL, 2015).

Figura 5 – Transformador trifásico de núcleo envolvente.



Fonte: (FEIL, 2015).

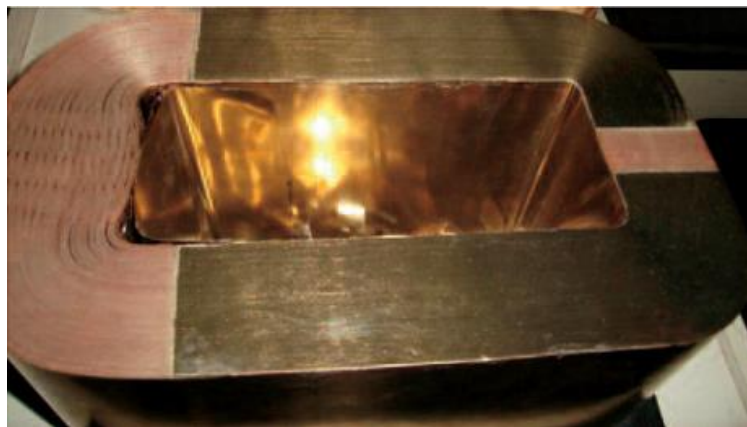
Outra forma de classificação do núcleo de transformadores é quanto à forma de laminação, que pode ser do tipo enrolado ou empilhado. O núcleo empilhado é construído de forma que uma lâmina é disposta sobre a outra, formando uma pilha de lâminas de diferentes formatos e tamanhos, como mostra a Figura 6. O núcleo enrolado consiste em utilizar longas tiras de um determinado material magnético enroladas em torno de um eixo que é chamado de mandril, como mostra a Figura 7 (MCLYMAN, 2004) (SALUSTIANO, 2012).

Figura 6 – Núcleo empilhado.



Fonte: (SALUSTIANO, 2012).

Figura 7 – Núcleo enrolado.



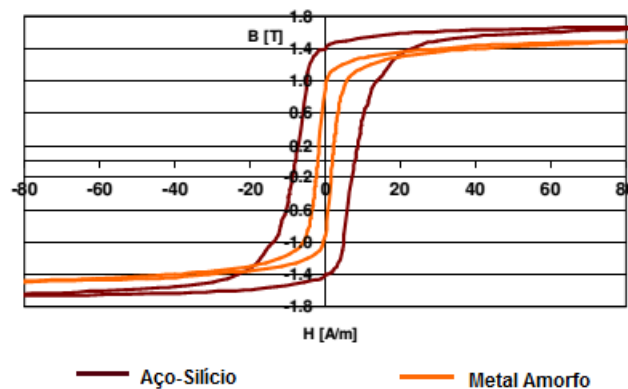
Fonte: (NUNES, 2011).

Os materiais magnéticos mais utilizados na construção de máquinas elétricas são os chamados aços elétricos. Dentre estes materiais existem três tipos, são eles: aços de baixo carbono, aços de grão não orientado (GNO) e aços de grão orientado (GO), sendo que os dois últimos são os mais utilizados na construção de transformadores e, devido à adição de silício (os teores deste material estão geralmente, limitados a valores entre 2,2% e 3,2%), são mais conhecidos como aços silícios (FEIL, 2015) (IARONKA, 2014) (MEDEIROS, 2017) (PRONTO, 2010).

O metal amorfo é outro material utilizado na construção de núcleos em transformadores e, apesar de ser um metal, possui características semelhantes ao vidro (SILVA et al., 2001). O uso deste material reduz significativamente as perdas à vazio do equipamento, porém o seu alto custo em relação à outros materiais (aços silícios) torna-se muitas vezes um impedimento à sua utilização (SALUSTIANO, 2012).

As espessuras das lâminas de metal amorfo podem ser cerca de dez vezes menores que as espessuras das chapas de aço silício, ocasionando a redução das perdas por correntes de Foucault, porém eleva-se a complexidade e conseqüentemente, o custo de fabricação (MAURÍCIO, 2014) (PRONTO, 2010). Outra vantagem deste material é o estreito ciclo de histerese em comparação com o aço silício, o que significa menos perdas no núcleo, como apresentado na Figura 8.

Figura 8 – Ciclo de histerese de um metal amorfo e do aço silício.



Fonte: (FEIL, 2015).

As desvantagens do metal amorfo são, além do seu alto custo, a necessidade de utilização de um volume maior, em relação ao aço silício, para proporcionar a passagem da mesma quantidade de fluxo magnético (FEIL, 2015) (MAURÍCIO, 2014) (SALUSTIANO, 2012) (SILVA et al., 2001).

2.3.3 Sistema de isolamento

A isolamento elétrica em um transformador tem como principal função minimizar o fluxo de corrente entre os condutores submetidos a diferenças de potencial elétrico, além disso, atua na transferência de calor do sistema e deve ser projetado de forma a suportar os esforços eletromecânicos e a manter suas propriedades químicas até determinada temperatura, garantindo sua função como material isolante (FEIL, 2015) (MORAIS, 2004).

O sistema de isolamento é formado basicamente por um fluido isolante (geralmente óleo mineral) e uma isolamento sólida (geralmente papel *Kraft*). O projeto deste sistema requer muita atenção, pois a vida útil da máquina está diretamente ligada à isolamento (IARONKA, 2014) (PORTELLA, 2010). O fluido isolante tem a função de isolar os enrolamentos e auxiliar na transferência de calor da parte ativa para o tanque do transformador, já o papel isolante é responsável por isolar os condutores (NOGUEIRA; ALVES, 2009).

O papel isolante está diretamente ligado com a vida útil do transformador, pois diferentemente do óleo isolante, não pode ser regenerado ou substituído durante o período de operação da máquina, já que é colocado entre as bobinas no decorrer do processo de fabricação da parte ativa (FEIL, 2015) (IARONKA, 2014) (MEDEIROS, 2017) (PORTELLA, 2010).

Quanto à isolamento o transformador pode ser de dois tipos: seco ou imerso em líquido isolante. Transformadores a seco são geralmente utilizados para níveis de tensões de até 34,5 kV, onde os principais materiais utilizados na isolamento são as resinas naturais e sintéticas, fibra de vidro, mica, porcelana, resinas epoxílicas, ar e alguns gases isolantes. Os transformadores imersos em líquido isolante são utilizados em qualquer nível de tensão e os principais materiais usados como isolantes são o papel *Kraft*, papel crepado, madeira tratada, óleo mineral, óleo vegetal e alguns óleos sintéticos (FEIL, 2015) (MEDEIROS, 2017) (RIES, 2007).

Como já mencionado anteriormente, a vida útil do transformador está diretamente ligada à isolamento, isso ocorre devido aos processos desgastantes (aquecimento, esforços eletromecânicos e eletroquímicos) que a mesma sofre durante o período de funcionamento da máquina. Sendo assim, faz-se necessário que um constante monitoramento acompanhado de manutenções preditivas e preventivas, visando evitar defeitos na máquina, aumentando a confiabilidade e durabilidade do sistema como um todo (FEIL, 2015) (IARONKA, 2014) (MEDEIROS, 2017) (PORTELLA, 2010).

2.3.4 Sistema de refrigeração

A necessidade da utilização deste sistema surge da não idealidade da máquina, ou seja, da existência de perdas, fazendo com que uma parte da potência de entrada não seja fornecida à carga e sim dissipada em forma de calor, causando o aumento da temperatura interna do equipamento, o que pode danificá-lo. As perdas podem ser divididas, basicamente, em perdas no núcleo, que são fixas, e perdas nos enrolamentos, que variam com a carga do equipamento (KULKARNI; KHAPARDE, 2004) (MCLYMAN, 2004).

Desta forma, visando evitar a deterioração da isolamento e a consequente redução da vida útil do transformador, utiliza-se dispositivos que facilitam a troca de calor com o ambiente (geralmente radiadores), além de alguns acessórios que podem ser utilizados dependendo da necessidade (bombas, ventiladores e etc.), formando assim, juntamente com o óleo isolante que circula entre os enrolamentos (devido ao efeito termossifão), o sistema de refrigeração da máquina (IARONKA, 2014) (MCLYMAN, 2004) (RIES, 2007) (ROSENTINO, 2010).

Os transformadores imersos em óleo isolante podem ser classificados quanto ao sistema de refrigeração utilizado (WINDERS, 2002). Essa classificação é definida pela norma (IEC 60076-2, 1993) e é apresentada na Tabela 1.

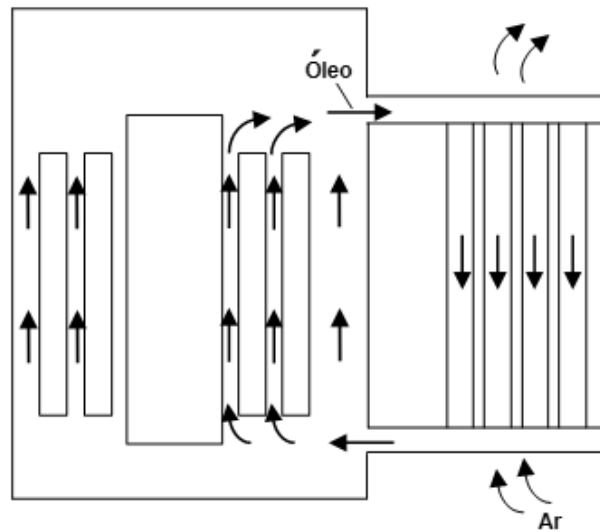
Tabela 1 – Classificação quanto ao tipo de sistema de refrigeração.

Nomenclatura IEC	Descrição
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: (WINDERS, 2002).

No sistema ONAN, tanto o óleo como o ar, circulam de forma natural, ou seja, a convecção ocorre naturalmente, conforme apresentado na Figura 9 (RIES, 2007) (WINDERS, 2002). Esta é a configuração do sistema de refrigeração que será abordada neste trabalho, por ser a mais simples de todas e por estar presente em grande parte dos transformadores, mesmo que algumas vezes, seja utilizada apenas em um primeiro estágio de refrigeração.

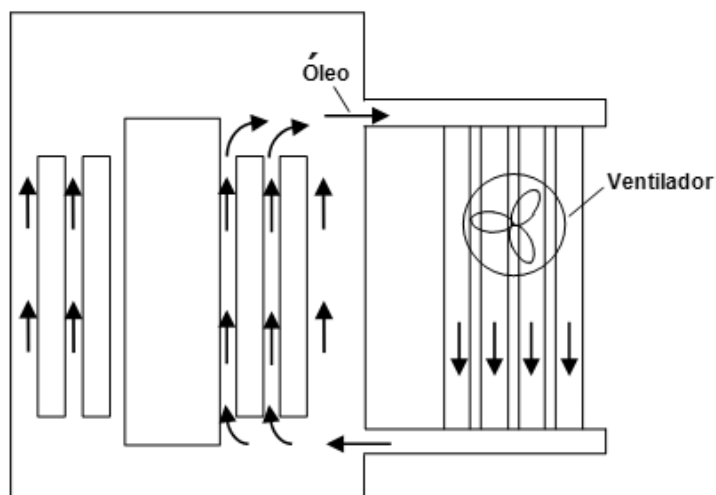
Figura 9 – Sistema de refrigeração ONAN.



Fonte: Adaptado de (KULKARNI; KHAPARDE, 2004).

Em sistemas do tipo ONAF, o óleo circula de forma natural no interior da máquina (pelo efeito termossifão), porém, visando obter uma maior troca de calor do radiador para o ambiente externo, adicionam-se ventiladores, forçando uma maior circulação de ar entre as aletas (RIES, 2007). A Figura 10 apresenta a configuração típica deste sistema.

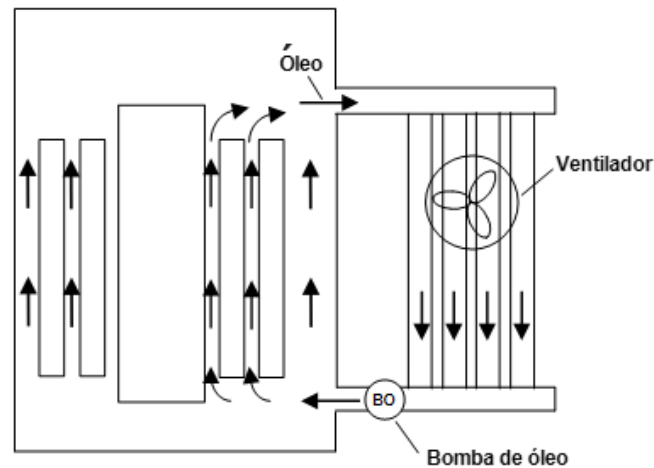
Figura 10 – Sistema de refrigeração ONAF.



Fonte: Adaptado de (KULKARNI; KHAPARDE, 2004).

No sistema OFAF, além da utilização de ventiladores, para aumentar a circulação de ar no lado externo do radiador, utiliza-se também bombas para controlar a vazão de óleo pelos radiadores, como é apresentado na Figura 11 (RIES, 2007).

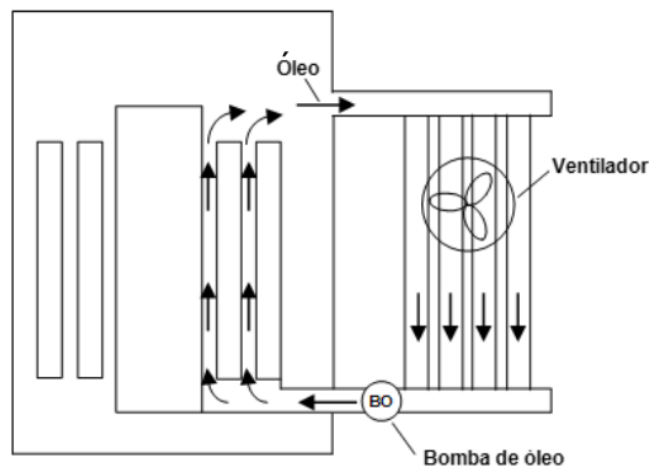
Figura 11 – Sistema de refrigeração OFAF.



Fonte: Adaptado de (KULKARNI; KHAPARDE, 2004).

O sistema do tipo ODAF é muito semelhante ao OFAF, pois se utiliza de ventiladores e bombas para controlar os fluxos de ar e óleo, respectivamente, porém, ao invés de apenas controlar a vazão de óleo pelo radiador, também direciona este fluxo, para que passe por dutos de refrigeração alocados entre os enrolamentos, melhorando a eficiência do sistema (KULKARNI; KHAPARDE, 2004). A Figura 12 apresenta a configuração do sistema ODAF.

Figura 12 – Sistema de refrigeração ODAF.



Fonte: Adaptado de (KULKARNI; KHAPARDE, 2004).

Os sistemas de refrigeração do tipo ODWF e OFWF são similares aos sistemas ODAF e OFAF, respectivamente, a única diferença é que a água é utilizada como fluido refrigerante ao invés do ar.

O sistema de refrigeração como um todo, tem como propósito reduzir a temperatura interna dos transformadores para valores definidos segundo a norma (ABNT NBR 5440, 2014), a fim de melhorar o funcionamento e aumentar o tempo de vida útil da máquina. A Tabela 2 apresenta os limites de elevação de temperatura segundo a norma (lembrando que os valores apresentados representam a elevação de temperatura em relação à temperatura ambiente).

Tabela 2 – Limites de elevação de temperatura em transformadores.

Temperatura	Limites de elevação de temperatura (°C)		
	Alternativa 1	Alternativa 2*	Alternativa 3**
Média dos Enrolamentos	55	65	75
Ponto mais quente dos enrolamentos	65	80	90
Óleo isolante (topo do óleo)	50	60	70
Temperatura referência das perdas totais e impedância	75	85	95

* Para transformadores imersos em óleo mineral isolante, a isolação dos enrolamentos (condutores e isolamento entre camadas) deve ser em papel termoestabilizado compatível com o óleo isolante. ** Para transformadores imersos em óleo vegetal isolante, a isolação dos enrolamentos pode ser em papel Kraft regular, papel termoestabilizado ou papel aramida compatível com o óleo isolante. Esta alternativa não se aplica para transformadores imersos em óleo mineral isolante.

Fonte: (ABNT NBR 5440, 2014).

3 PERDAS E COMPORTAMENTO TÉRMICO

Como qualquer equipamento elétrico, o transformador possui perdas associadas ao processo de transformação de energia que executa, sendo assim, tem eficiência inferior a 100% em todos os casos. A energia “perdida” durante o processo é dissipada em forma de calor nos enrolamentos, núcleo e estruturas adjacentes (SALUSTIANO, 2012). A presença, em grande número, de transformadores tanto no sistema de distribuição como na transmissão de energia, impulsiona diversas pesquisas na área, com o intuito de aumentar cada vez mais a eficiência deste tipo de equipamento, reduzindo suas perdas e também aprimorando o seu sistema de refrigeração, que é o responsável por facilitar a transferência do calor da parte ativa para o ambiente externo.

3.1 PERDAS EM TRANSFORMADORES

As perdas em transformadores ocorrem predominantemente na parte ativa (enrolamentos e núcleo) e dependem de diversos fatores, entre eles, das características construtivas, do modo de operação e da manutenção aplicada à máquina. Resumem-se basicamente em duas parcelas: perdas a vazio e perdas em carga, que ocorrem na forma de liberação de calor (IARONKA, 2014).

As perdas a vazio são analisadas quando o transformador está operando sem carga, ou seja, quando não há corrente elétrica circulando pelo enrolamento secundário do equipamento. Estas perdas são geradas pela corrente de magnetização que é responsável por magnetizar o núcleo e podem ser divididas em perdas por corrente de Foucault, perdas por histerese e perdas excedentes (FEIL, 2015) (IARONKA, 2014) (NUNES, 2011). As perdas por histerese resultam da inversão dos domínios magnéticos do material do núcleo a cada ciclo de operação. As correntes de Foucault decorrem das correntes parasitas induzidas pelos campos magnéticos que o núcleo está sujeito. As perdas excedentes representam as demais perdas ocorridas no núcleo (FEIL, 2015) (IARONKA, 2014).

As perdas sob carga se concentram basicamente nos enrolamentos do transformador e são divididas em perdas ôhmicas e perdas parasitas. As perdas ôhmicas são geradas pela circulação de corrente pelos enrolamentos, já que estes apresentam resistência elétrica e, por consequência, a potência dissipada em calor será proporcional ao quadrado da corrente. As perdas adicionais resultam do fluxo disperso que circula pela máquina, podendo ocorrer nos enrolamentos, no núcleo e até mesmo em partes metálicas presentes no interior do equipamento

que não deveriam ser energizadas (FEIL, 2015) (IARONKA, 2014) (MONIZ, 2007) (NUNES, 2011).

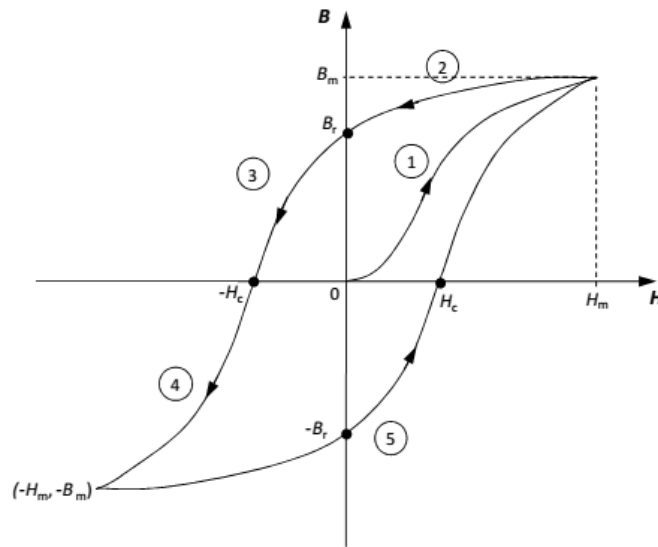
3.1.1 Perdas no núcleo: Histerese

A passagem de corrente pelos enrolamentos da máquina gera um campo magnético alternado, com intensidade proporcional a esta corrente. Sendo assim, uma variação na corrente causa a variação do campo magnético, alterando o módulo do fluxo magnético ou indução magnética (FEIL, 2015).

As variações citadas ocorrem de acordo com a curva de saturação do material ferromagnético utilizado. A cada inversão no sentido de variação do campo magnético tem-se um momento em que a intensidade deste campo se anula. Em um metal que está sujeito a um campo magnético alternado, seus átomos tendem a se alinhar com este campo, formando pequenos ímãs, chamados de dipolos magnéticos. Quando o campo magnético se anula, os átomos retornam à sua orientação original (orientação no instante anterior à aplicação do campo magnético). Este movimento dos átomos causa atrito molecular, resultando na geração e liberação de calor, assim denominando as perdas por histerese (FEIL, 2015).

A perda por histerese ocorre a cada inversão no sentido de orientação dos dipolos magnéticos (IARONKA, 2014) (SALUSTIANO, 2012). Dessa forma a histerese pode ser representada por uma curva de indução magnética versus a intensidade do campo magnético (curva $B \times H$), e a área corresponderá à energia que é dissipada (em forma de calor) pelo núcleo durante um ciclo de alimentação (FEIL, 2015) (PICANÇO, 2006). A Figura 13 apresenta uma curva genérica do ciclo de histerese de um material magnético.

Figura 13 – Ciclo de histerese de um material magnético.



Fonte: (PRONTO, 2010).

Observa-se através da Figura 13 que ao magnetizar um material ferromagnético com uma intensidade de campo elétrico H crescente até um valor máximo H_m , obtém-se uma curva semelhante à representada pelo caminho (1) (RIES, 2007). Após atingir a saturação máxima B_m , ao se reduzir gradativamente a intensidade de campo H a indução não apresenta o mesmo comportamento demonstrado no caminho (1), ou seja, apresenta valores maiores de indução para os mesmos valores de H , conforme a curva representada pelo caminho (2), também pode-se observar que quando a intensidade de campo H retorna para zero o material apresenta uma certa magnetização (B_r), chamada de magnetização remanescente (FEIL, 2015) (IARONKA, 2014) (PRONTO, 2010) (RIES, 2007). Em seguida, invertendo o sentido do campo magnético aplicado, a indução se reduz gradualmente até se anular quando o campo atinge o valor $-H_c$, apresentando o comportamento representado pelo caminho (3), o valor do campo onde a indução se anula é chamado de campo coercivo ou coercitividade (FEIL, 2015) (IARONKA, 2014) (PRONTO, 2010). Aumentando o campo no sentido oposto a magnetização do material também inverte de sentido, conforme o caminho (4) até atingir a saturação no ponto $(-H_m, -B_m)$. Para finalizar, se o campo for reduzido a zero e aplicado novamente no sentido inicial a resposta do material segue o caminho (5), completando uma curva fechada (FEIL, 2015) (IARONKA, 2014) (PRONTO, 2010).

As perdas por histerese a cada ciclo e por unidade de volume do material ferromagnético podem ser determinadas pela Equação (2).

$$P_h = \frac{f}{\gamma} \int_{-B_m}^{B_m} H dB \quad (2)$$

Onde:

P_h = perdas por histerese por kg do material (W/kg);

f = frequência da rede de alimentação (Hz);

γ = peso específico do material (kg/m³);

H = intensidade de campo magnético (Ae/m).

As perdas por histerese dependem diretamente da indução magnética que o material ferromagnético está sujeito, ou seja, aumentando a indução aumenta-se também as perdas associadas à histerese. Porém, quando a indução magnética tende a saturação as perdas por histerese tendem a saturar também, visto que, a área sob à curva pouco cresce após determinado valor de saturação (FEIL, 2015) (RIES, 2007) (SALUSTIANO, 2012).

3.1.2 Perdas no núcleo: Correntes de Foucault (Parasitas)

As perdas por corrente de Foucault, ou perdas por correntes parasitas, como também são chamadas resultam da variação temporal do campo de indução magnética no material, campo este que segundo a lei geral de indução dá origem à força eletromotriz induzida. Devido ao fato de que o material que compõe o núcleo da máquina (geralmente aço silício) possui uma determinada condutividade elétrica, mesmo que esse valor seja baixo em comparação ao cobre presente nos enrolamentos, o fluxo magnético induzido na máquina gera diferenças de potencial neste material ocasionando o surgimento de correntes que circulam pelo núcleo do equipamento, que são chamadas de correntes de Foucault ou correntes parasitas (IARONKA, 2014) (SALUSTIANO, 2012). Tais perdas podem ser calculadas pela Equação (3), segundo (RIES, 2007).

$$P_f = k_f \cdot f^2 \cdot t^2 \cdot \frac{B_{ef}^2}{\rho} \quad (3)$$

Onde:

P_f = perdas por corrente de Foucault (W/kg);

k_f = coeficiente de perdas por Foucault, que depende das dimensões do núcleo;

f = frequência da rede de alimentação (Hz);

t = espessura das chapas (m);

B_{ef} = valor eficaz da indução, ou seja, valor máximo dividido por $\sqrt{2}$ (T);

ρ = resistividade do material ($\Omega.m$).

Analisando a Equação (3) percebe-se que as perdas por correntes de Foucault são diretamente proporcionais à frequência da rede, ao módulo da indução magnética e à espessura das chapas utilizadas na construção do núcleo, fato que justifica o uso da laminação em núcleos de transformadores. Outro fato importante é que estas perdas são inversamente proporcionais à resistividade do material, justificando muitas vezes a utilização de materiais que embora representem um maior custo inicial trazem benefícios a longo prazo, como por exemplo o metal amorfo (IARONKA, 2014).

3.1.3 Perdas no núcleo: Excedentes

Com o dispositivo em operação é possível medir as perdas totais no núcleo do transformador, em regime dinâmico também é possível mensurar os valores das perdas por histerese no núcleo e calcular as perdas por correntes de Foucault. Porém, a soma das perdas por histerese e por Foucault é menor que o valor total medido com o equipamento em funcionamento, essa diferença é chamada de perda excedente ou anômala. Essas perdas podem estar presentes em qualquer parte do transformador e geralmente são consequências de atrito mecânico, vibrações, ventilação, ruídos acústicos, entre outros. Dependem também de coeficientes que são de difícil mensuração prática, tais como tamanho de grão, condutividade elétrica, campo coercitivo, coeficientes empíricos, dentre outros (FEIL, 2015) (IARONKA, 2014).

3.1.4 Perdas nos enrolamentos: Ôhmicas

Ocorrem nos enrolamentos do transformador, são também chamadas de perdas por efeito Joule, e representam a maior parte das perdas quando a máquina opera com carga. Ocorrem devido à resistência ôhmica dos condutores e estão relacionadas à corrente elétrica que circula pelos enrolamentos e ao material que compõe os condutores (FEIL, 2015) (IARONKA, 2014). Segundo (RIES, 2007), as perdas ôhmicas podem ser calculadas através da Equação (4).

$$w_0 = \frac{\rho}{\gamma} \cdot J^2 \cdot P_C \quad (4)$$

Onde:

ρ = resistividade do material ($\Omega.m$);

γ = peso específico do material (kg/m³);

J = densidade de corrente (A/m);

P_C = peso do condutor (kgf);

Os materiais condutores mais utilizados na construção de enrolamentos de transformadores são o cobre e o alumínio, por apresentarem propriedades elétricas como baixa resistividade, além de serem economicamente vantajosos em relação a outros materiais.

3.1.5 Perdas nos enrolamentos: *Correntes de Foucault (Parasitas)*

A corrente de carga gera um fluxo magnético na bobina secundária da máquina. Este fluxo magnético induz correntes nos condutores, que são chamadas de correntes de Foucault ou parasitas. Estas correntes se somam a corrente de carga causando perdas nos condutores (MONIZ, 2007)(NUNES, 2011). Segundo (SALUSTIANO, 2012) podem ser calculadas de forma aproximada através da Equação (5).

$$P_{f_cond} = \frac{\pi^2}{6 \cdot \rho_{cond} \cdot \gamma_{cond}} \cdot B^2 \cdot f^2 \cdot t_{cond}^2 \quad (5)$$

Onde:

P_{f_cond} = perdas por corrente de Foucault nos condutores (W/kg);

f = frequência da rede de alimentação (Hz);

t_{cond} = espessura do condutor (m);

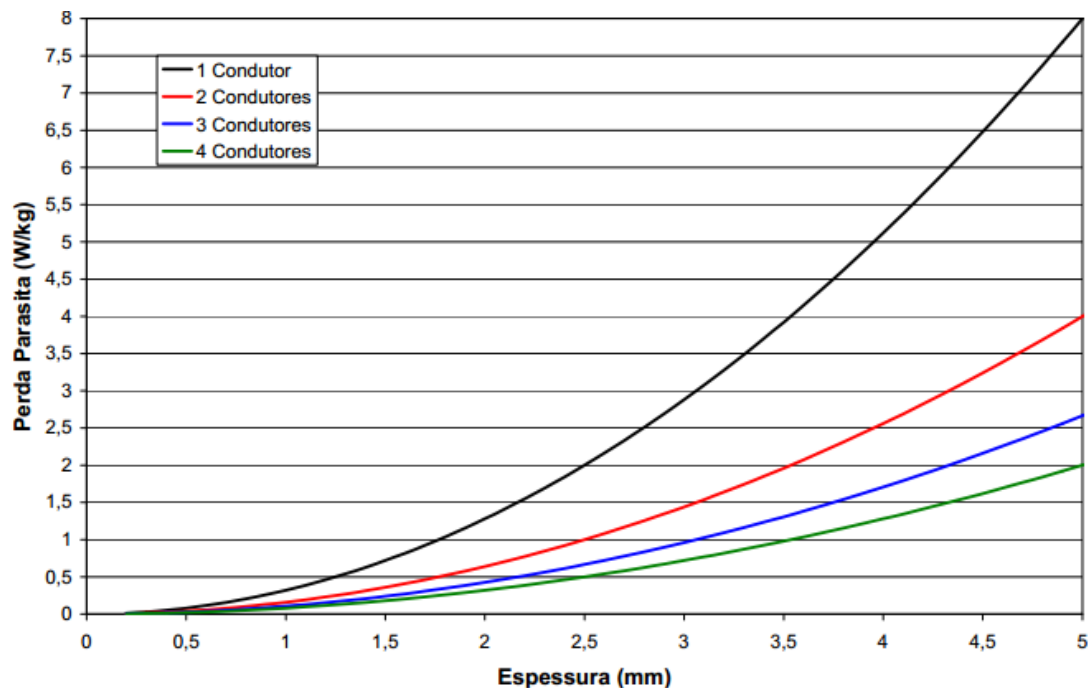
B = indução magnética (T);

ρ_{cond} = resistividade do condutor ($\Omega \cdot m$);

γ_{cond} = peso específico do material (kg/m³);

Mesmo que as perdas parasitas não representem um valor significativo das perdas totais é possível notar através da Equação (5) que tais perdas são proporcionais ao quadrado da espessura do condutor. Sendo assim, um aumento na espessura do mesmo pode influenciar de forma significativa nas perdas totais da máquina. Quando for necessária a utilização de condutores com uma seção de valor significativo, aconselha-se usar vários condutores de menor espessura em paralelo (FEIL, 2015) (SALUSTIANO, 2012). A Figura 14 mostra como a utilização de condutores em paralelo pode influenciar nas perdas parasitas.

Figura 14 – Perdas parasitas em função do número de condutores em paralelo.



Fonte: (SALUSTIANO, 2012).

3.2 INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NA VIDA ÚTIL DO TRANSFORMADOR

A temperatura de operação do transformador está entre os fatores que definem a vida útil da máquina. As perdas que ocorrem na parte ativa liberam uma determinada quantidade de calor no interior do equipamento, causando o aquecimento dos enrolamentos, do núcleo e do fluido isolante. Sendo assim, este calor deve ser transferido para o ambiente externo através do sistema de refrigeração visando manter a temperatura de operação em níveis adequados (FEIL, 2015) (IARONKA, 2014).

O principal componente afetado pelo aquecimento da máquina é o isolamento sólido dos condutores, normalmente a base de celulose. A integridade deste componente é fundamental para o bom funcionamento do transformador, evitando curtos-circuitos entre as espiras (MILASH, 1984). O isolamento também sofre com dois fenômenos químicos: a hidrólise e a oxidação. Estes fenômenos provocam a perda de rigidez dielétrica e resistência mecânica, porém são fatores que podem ser controlados através da utilização de técnicas de manutenção e preservação do óleo isolante (BARBOSA, 2005) (FEIL, 2015) (IARONKA, 2014).

Segundo (IEEE C57.91-1995, 2012), o fim da vida útil de um transformador é determinado quando os níveis de resistência mecânica do isolamento atingem valores inferiores

a 20% do valor inicial, uma vez que, através de testes, foi determinado que o equipamento funciona de maneira satisfatória com esses valores de isolamento.

Uma das principais questões que geram preocupação a respeito do controle térmico de transformadores é o fato de a distribuição de temperatura não ser uniforme, por isso deve-se considerar o ponto mais quente do sistema, *hot spot*, normalmente entre os enrolamentos. Outra questão importante é que não há como definir um valor limite para a temperatura de operação, sendo o transformador capaz de operar com temperaturas elevadas, por pequenos períodos. Esta capacidade é utilizada em diversos casos como curtos-circuitos, emergências e em casos específicos e planejados, sempre com as devidas precauções para evitar danos irreversíveis (IARONKA, 2014).

As principais consequências causadas pela sobrecarga e decorrente aquecimento dos transformadores, segundo a norma (ABNT NBR 5440, 2014) podem ser:

- Surgimento de gases provenientes do aquecimento do material de isolamento dos condutores. Gases que podem alterar as propriedades do fluido isolante;
- Aquecimento das estruturas metálicas do dispositivo, que também provoca a liberação de gases provenientes do material isolante;
- Redução da resistência mecânica do isolamento dos condutores e da estrutura do transformador;
- Expansão térmica de condutores, materiais isolantes ou partes estruturais, podendo resultar na deformação permanente;
- Vazamento nas buchas, perda de óleo e danos na isolação, devido ao aumento da pressão interna causado pela elevação da temperatura.
- Deterioração das características físicas e dielétricas do fluido isolante utilizado;
- Componentes periféricos como transformadores de corrente e de potencial também são afetados pela sobrecarga.

São inúmeros os fatores que influenciam no cálculo de perda da vida útil de um transformador, segundo a norma (ABNT NBR 5416, 1997), são eles:

- Elevação de temperatura (em relação a temperatura ambiente) no ponto de maior temperatura do equipamento, geralmente nos enrolamentos;
- Elevação de temperatura no topo de óleo em relação a temperatura ambiente;
- Constante de tempo térmica do transformador;
- Constante de tempo térmica do ponto mais quente;
- Relação entre as perdas nos enrolamentos e no núcleo;

- Coeficiente utilizado no cálculo de elevação da temperatura no topo de óleo, que está diretamente relacionado com o sistema de refrigeração adotado;
- Coeficiente utilizado no cálculo de elevação da temperatura no ponto mais quente, que também está diretamente relacionado com o sistema de refrigeração adotado.

Segundo a norma (ABNT NBR 5356-1, 2007), os transformadores são classificados de acordo com suas características térmicas de operação, nos seguintes grupos:

- Classe 55 °C: são os transformadores cuja elevação de temperatura média dos enrolamentos, acima da ambiente, não excede 55 °C e cuja elevação de temperatura do ponto mais quente do enrolamento, acima da ambiente, não excede 65 °C;
- Classe 65 °C: são os transformadores cuja elevação de temperatura média dos enrolamentos, acima da ambiente, não excede 65 °C e cuja elevação de temperatura do ponto mais quente do enrolamento, acima da ambiente, não excede 80 °C.

3.3 EFEITO DA TEMPERATURA AMBIENTE NO TRANSFORMADOR

As condições do local de instalação de um equipamento elétrico influenciam no funcionamento do mesmo. No caso dos transformadores, o principal fator que influencia a operação do equipamento é a temperatura ambiente, sendo que esta, somada ao valor de elevação máxima permitida de temperatura no dispositivo, determina o limite térmico do transformador (FEIL, 2015) (IARONKA, 2014).

Segundo as normas (IEEE C57.91-1995, 2012) e (IEEE C57.92-1981, 1996), o cálculo do carregamento máximo da máquina deve ser feito com a utilização da temperatura ambiente real no período em que é necessário calcular a capacidade do transformador, porém é possível realizar estes cálculos com a utilização da temperatura média histórica do local em questão.

Sendo assim, pode-se concluir que a temperatura ambiente é um fator relevante e precisa ser levado em consideração no cálculo de carregamento máximo admissível em transformadores (BARBOSA, 2005)(FEIL, 2015).

3.4 MEIOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR

A transferência de calor é um fenômeno que ocorre quando um meio com temperatura mais elevada transfere calor para outro meio com temperatura inferior. No transformador as

perdas na parte ativa geram uma quantidade de calor que precisa ser dissipada para o ambiente externo. Essa transferência pode ocorrer de três formas: por condução, por convecção e por radiação (IARONKA, 2014).

3.4.1 Condução

A transferência de calor por condução ocorre entre duas regiões em um mesmo meio, ou entre dois meios em contato devido a uma diferença de temperatura entre eles. Também pode ser descrito como a transferência de energia térmica entre átomos ou moléculas vizinhas pela ação de um gradiente térmico. O calor transferido depende da diferença de temperatura entre os dois meios em contato, da área de contato e das características dos materiais envolvidos, sendo a condutividade térmica do material a principal delas (IARONKA, 2014).

3.4.2 Radiação

A transferência de calor por radiação ocorre através de ondas eletromagnéticas chamadas de infravermelho, que transferem fótons de uma superfície para outra. A capacidade que estas ondas têm de se deslocar no vácuo elimina a necessidade de contato entre os meios para que ocorra transferência de calor. Todas as superfícies emitem radiação térmica, sendo que a intensidade é proporcional a temperatura do meio, ou seja, quanto maior a temperatura maior será a radiação térmica (IARONKA, 2014).

3.4.3 Convecção

A transferência de calor por convecção envolve movimento de fluídos seja líquido ou gasoso. Na convecção natural um fluído circundante recebe calor de uma fonte por condução tornando-se menos denso e conseqüentemente subindo, enquanto que o fluído com menor temperatura toma o seu lugar, fato este que forma uma espécie de corrente de circulação de ar. Essa corrente de ar é conhecida como empuxo e ocorre devido a um gradiente de massa específica no fluído e a uma força de corpo que é proporcional à massa específica. Uma técnica utilizada em sistemas de refrigeração é a convecção forçada, que consiste em forçar a circulação do fluído, fato que aumenta a troca térmica entre a superfície e o fluído, ocasionando um acréscimo na energia dissipada (IARONKA, 2014).

3.5 COMPORTAMENTO TÉRMICO

Todo modelo térmico presente na literatura é desenvolvido com base nas estruturas convencionais de fontes de calor e parâmetros térmicos representando o armazenamento e a transmissão de calor. Segundo (IARONKA, 2014) os elementos que descrevem este modelo são a condutância térmica, capacitância térmica e fontes de calor.

- Condutância térmica: parâmetro que define a quantidade de calor transferido por metro quadrado entre duas superfícies com temperaturas distintas. Depende das características físicas do material e das dimensões do mesmo.
- Capacitância térmica: parâmetro que define a capacidade que determinado corpo físico tem de armazenar calor, define o tempo necessário para que a temperatura interna do corpo sofra alterações.
- Fontes de calor: representa as perdas internas da máquina, sendo cada tipo de perda uma fonte de calor independente.

Como um dos principais objetos de estudo deste trabalho é o comportamento térmico do transformador (temperatura de topo de óleo, ponto mais quente, etc.), surgem dois métodos que possibilitam a análise em questão. Estes métodos são a medição direta da temperatura através de sensores e a medição indireta através da utilização de *softwares* de simulação que empregam métodos matemáticos para a resolução de problemas, como o método de elementos finitos.

O método de medição direta consiste em um grupo de sensores alocados de forma estratégica em diversos pontos do transformador, que é difícil de ser implantado, pois os sensores devem ser colocados durante a fase de construção da máquina (SEN; PANSUWAN, 2001).

O método de medição indireta utiliza *softwares* de simulação, predominantemente usando o método de elementos finitos, que permite conhecer todo o comportamento térmico aproximado do transformador. Pode ser utilizado para corrigir erros de projeto, assim como para otimizar os sistemas de refrigeração existentes (IARONKA, 2014).

3.6 ASPECTOS TÉRMICOS DO TRANSFORMADOR

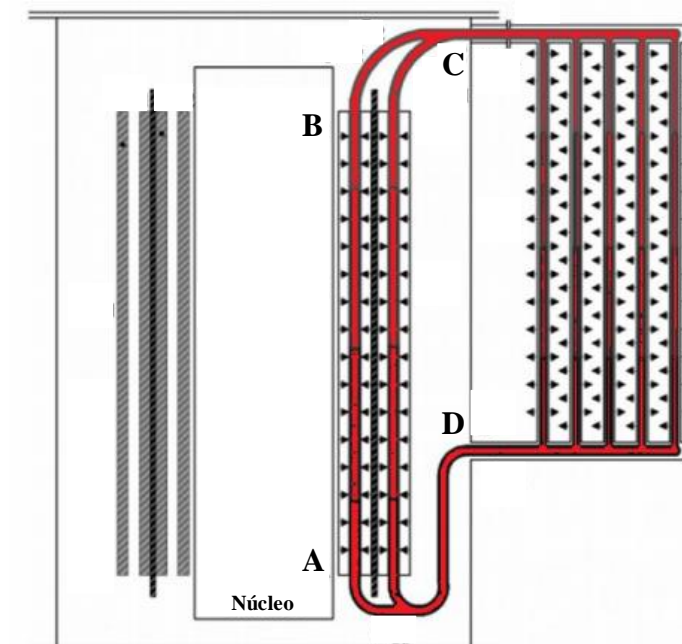
Existem dois dispositivos, que são utilizados como “facilitadores” na transferência de calor da parte interna do transformador para o ambiente externo, são eles: trocadores de calor e

radiadores (não são usados de forma conjunta) (FEIL, 2015) (TAMURA, 2009). No presente trabalho o estudo é feito tendo como base sistemas que utilizam radiadores.

O processo de resfriamento em transformadores ocorre seguindo o ciclo térmico apresentado na Figura 15. Ocorre basicamente em duas etapas: na primeira delas acontece a dissipação de calor entre os pontos A e B, que representa a transferência do calor gerado na parte ativa da máquina para o óleo isolante, o aquecimento do óleo nesta região faz com que sua densidade diminua, ou seja, o óleo aquecido tende a se deslocar para a parte superior do tanque (FEIL, 2015) (IARONKA, 2014).

Na segunda etapa, que ocorre entre os pontos C e D acontece a dissipação do calor contido no óleo isolante para o ambiente externo através do sistema de radiadores, a medida em que o óleo é resfriado, sua densidade diminui, ou seja, o óleo tende a descer através das aletas. (FEIL, 2015) (IARONKA, 2014).

Figura 15 – Processo de resfriamento de um transformador a óleo.

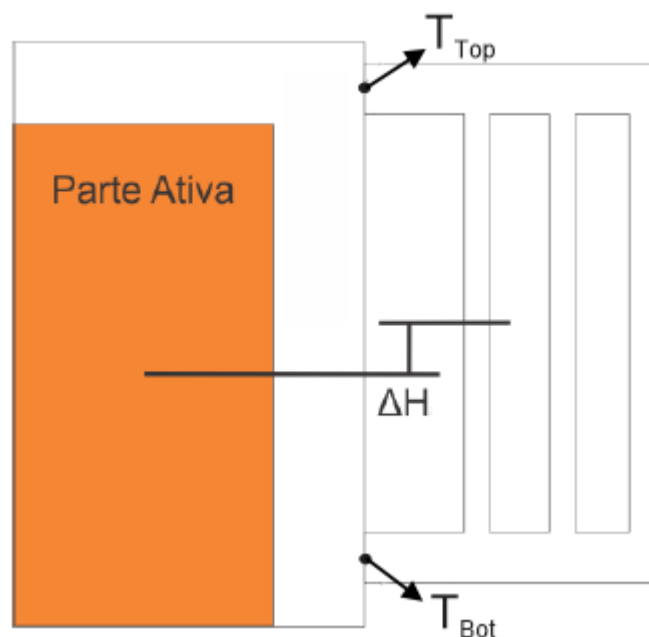


Fonte: (FEIL, 2015).

Sendo assim, o ciclo térmico do equipamento está completo (este ciclo se repete continuamente enquanto a máquina estiver em funcionamento) e a temperatura interna tende a convergir para um determinado valor, que deve estar em concordância com os valores da norma vigente.

O fenômeno descrito acima e apresentado na Figura 15, acontece de forma natural (a circulação do óleo também pode ser feita de forma forçada com a utilização de bombas hidráulicas) e é chamado de efeito termossifão, dois fatores são necessários para a ocorrência deste fenômeno, são eles: a diferença entre a temperatura de base (T_{Bot}) e a temperatura de topo (T_{Top}) do radiador ser diferente de zero e a existência de uma diferença de altura (ΔH) entre o centro da fonte de calor (parte ativa) e o centro do radiador. Tais parâmetros são exemplificados na Figura 16 (BARTH et al., 2018).

Figura 16 – Modelo simplificado de um transformador de potência.



Fonte: Adaptado de (BARTH et al., 2018).

Essas diferenças de altura e temperatura geram uma diferença de pressão (Δp) interna no fluido, fazendo com que o mesmo circule através dos radiadores, essa diferença de pressão pode ser descrita pela Equação (6) (BARTH et al., 2018).

$$\Delta p = \rho_{\acute{o}leo} \cdot g \cdot \beta_{\acute{o}leo} \cdot (T_{Top} - T_{Bot}) \cdot \Delta H \quad (6)$$

Onde:

Δp = pressão interna no fluido;

$\rho_{\acute{o}leo}$ = densidade do óleo;

g = gravidade;

$\beta_{\acute{o}leo}$ = expansividade térmica do óleo;

T_{Top} = temperatura no topo do radiador;

T_{Bot} = temperatura na base do radiador;

ΔH = diferença entre a altura entre os centros da parte ativa e do radiador.

Quanto maior for a pressão interna sobre o fluido maior será o volume de óleo circulando pelo radiador dentro de um determinado período de tempo. Dessa forma, considerando os parâmetros intrínsecos ao ambiente (gravidade, temperatura externa, etc.) e as propriedades do óleo isolante como inalteráveis pelo usuário, a eficiência do radiador depende então do ΔH , T_{Top} , T_{Bot} , da área externa total e do formato do radiador (BARTH et al., 2018). Neste sentido, o presente trabalho traz uma análise da eficiência de diversas configurações de radiadores variando os parâmetros citados acima e visando definir quais das configurações têm o melhor desempenho térmico.

4 ANÁLISE COM O MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

4.1 INTRODUÇÃO

A demanda cada vez maior da indústria por produtos mais eficientes e de alta qualidade, juntamente com o alto custo atrelado ao desenvolvimento, desde o projeto até a etapa de testes destes novos produtos, sendo que correm o risco de não atender as especificações desejadas (sendo assim descartados), leva ao uso de métodos computacionais de simulação. As simulações computacionais permitem analisar o funcionamento do objeto em estudo, através de uma solução analítica do problema baseada nas equações físicas que regem o comportamento do mesmo, sem necessitar a construção de um protótipo. Um dos métodos mais utilizados atualmente é o Método de Elementos Finitos (MEF), utilizado neste trabalho por meio do *software* ANSYS®.

4.2 MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS (MEF)

Os primeiros registros da utilização do MEF datam dos anos 40, durante a segunda guerra mundial, porém, pela falta de recursos computacionais disponíveis neste período, esta ferramenta não tinha muita utilidade. O uso do MEF cresceu juntamente com a evolução computacional e continua crescendo atualmente (HUTTON, 2004). É uma ferramenta versátil e pode ser usada em diversas áreas da engenharia, como mecânica dos fluidos, eletromagnetismo, transferência de calor e análise de tensões e deformações (IARONKA, 2014).

O MEF consiste em um método numérico aproximado para a análise de fenômenos físicos, que ocorrem em meios contínuos e que são descritos por equações diferenciais parciais, com determinadas condições de contorno e condições iniciais. São utilizados de forma combinada, diferentes métodos numéricos para aproximar a solução de valor de fronteira, que é descrito por equações diferenciais ordinárias ou por equações diferenciais parciais, através da subdivisão da geometria do problema em questão em elementos menores, chamados de elementos finitos, onde a aproximação da solução exata pode ser obtida pela interpolação de uma solução aproximada (HUTTON, 2004).

A análise utilizando o MEF segue um padrão, que é definido de acordo com três etapas que serão descritas a seguir.

Pré-processamento: consiste na análise do problema em questão, resultando na definição da geometria que descreve de forma adequada o mesmo. Além disso, devem ser definidas as

propriedades físicas dos materiais, densidade das malhas e condições de contorno. A malha de elementos finitos é criada e pode ser visualizada nesta etapa. O número de elementos que compõe a malha define a precisão dos resultados que serão obtidos, quanto maior este número for melhor será o resultado, porém, exigirá a utilização de mais recursos computacionais. Portanto uma análise cuidadosa deve ser feita para garantir que a malha tenha o tamanho necessário para atender a precisão requerida, utilizando o mínimo dos recursos computacionais disponíveis. Isto faz desta etapa a mais importante de todo o processo (HUTTON, 2004) (IARONKA, 2014).

Processamento: consiste na interpretação das informações que foram definidas na etapa anterior e na aplicação das equações diferenciais pertinentes à resolução do problema, através da montagem do sistema de equações que descreve o comportamento do objeto em estudo (HUTTON, 2004) (IARONKA, 2014).

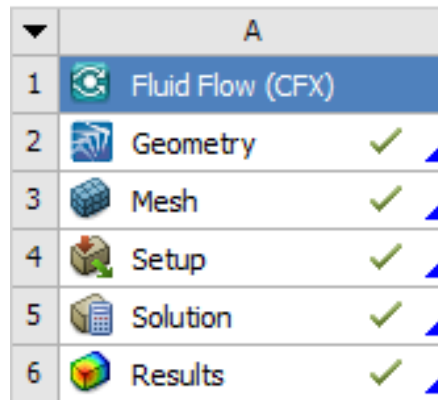
Pós-processamento: consiste em analisar os resultados obtidos, que são disponibilizados, em forma de gráficos de contorno e densidade, pela ferramenta utilizada. O usuário também pode analisar os resultados de forma pontual, plotando gráficos e fazendo diversos tipos de cálculos, para obter os resultados de seu interesse (HUTTON, 2004) (IARONKA, 2014).

4.3 FERRAMENTA UTILIZADA

A ferramenta utilizada para realizar as simulações é da plataforma ANSYS[®], que possui diversos *softwares* especializados na simulação de problemas presentes em várias áreas da engenharia. Para solucionar o problema proposto no presente trabalho é necessário a utilização de *softwares* especializados em *Computational Fluids Dynamics* (CFD). A plataforma oferece duas opções o FLUENT[®] e o CFX[®], sendo que o último deles foi utilizado, devido ao conhecimento prévio adquirido em trabalhos anteriores.

A ferramenta escolhida possui uma interface simples e fácil de ser compreendida e utilizada, como é apresentado na Figura 17. Para realizar a simulação é necessário adicionar a geometria de acordo com o problema a ser solucionado, gerar a malha de acordo com a precisão requerida, definir as condições de contorno presentes no problema, definir as equações que descrevem o comportamento do sistema e também definir os recursos computacionais que serão utilizados.

Figura 17 – Interface da ferramenta.



Fonte: Autor.

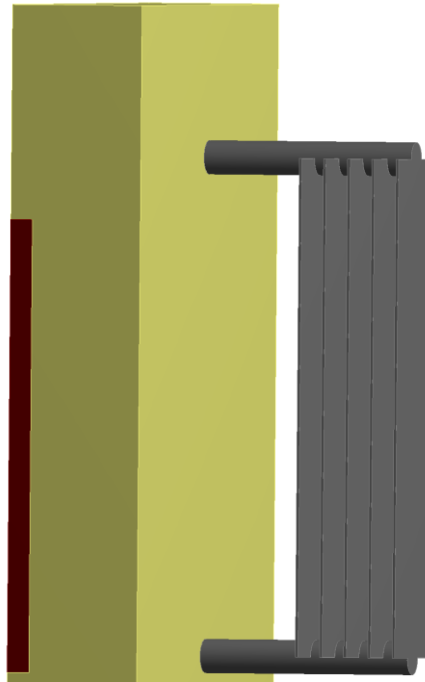
No primeiro momento é necessário avaliar o problema de forma minuciosa, definindo uma geometria que represente de forma aproximada a realidade. A partir deste momento utiliza-se o *software*, a seguir serão apresentados, detalhadamente, todos os parâmetros que devem ser definidos para que uma simulação possa ser realizada e como a análise dos resultados deve ser feita, visando a confiabilidade na solução do problema.

4.3.1 Geometria (*Geometry*)

Para realizar as simulações, em primeiro lugar, deve-se adicionar a geometria de interesse ao ambiente de simulação, isso pode ser feito utilizando o *software* de desenho disponível dentro da própria ferramenta (*SpaceClaim*[®]), ou ainda é possível importar desenhos feitos em outros *softwares* (Ex.: *Maxwell*[®]). Para o segundo caso é importante verificar se o desenho foi importado de forma correta, pois qualquer erro na geometria invalidará a simulação.

A análise será realizada tendo como base geometrias semelhantes à mostrada abaixo na Figura 18, desenhadas com o auxílio do *software Maxwell*[®]. Os radiadores que serão estudados são utilizados normalmente em transformadores de potência, pois são mais eficientes em comparação a outros tipos de radiadores e estão presentes por exemplo em subestações elevadoras de tensão.

Figura 18 – Modelo de geometria.



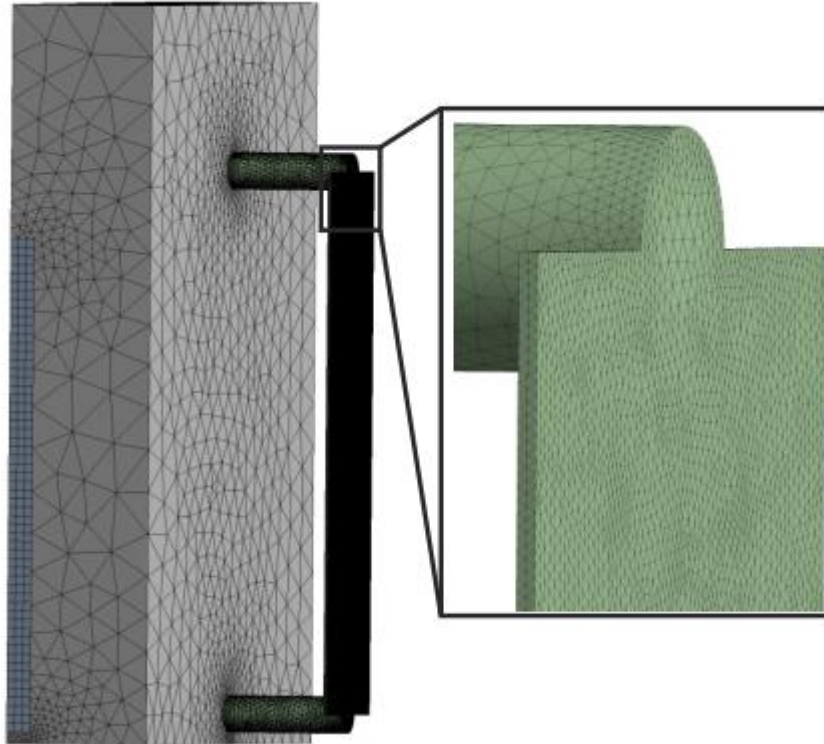
Fonte: Autor.

Como pode ser observado na Figura 18, algumas simplificações foram realizadas, com o objetivo de otimizar a simulação. A parte ativa do transformador (núcleo e enrolamentos) é representada por um bloco (em vermelho) que dissipa calor (gerado pelas perdas) para o ambiente interno da máquina e a dissipação de calor do corpo do transformador para o ambiente externo é desconsiderada, tendo em vista que o propósito do trabalho é comparar a eficiência deste tipo de radiador em várias configurações e que a variável mencionada é praticamente constante e não influencia de forma significativa na análise.

Outra simplificação realizada, que não é visível na Figura 18, é a utilização de uma caixa de ar de aproximadamente 600 m³ para reproduzir a troca de calor existente entre o radiador e o ambiente externo.

4.3.2 Malha (*Mesh*)

O segundo passo para realizar a simulação é gerar a malha, isto é dividir os componentes da geometria em pequenas partes, para que o método de elementos finitos possa ser utilizado, a Figura 19 mostra um exemplo de malha gerada pelo *software*.

Figura 19 – Exemplo de malha gerada no *software*.

Fonte: Autor.

A malha interfere diretamente no resultado final da simulação, ou seja, uma malha ruim, que contenha elementos com tamanhos desproporcionais, levará a resultados que não representam a realidade. Os principais problemas relacionados a qualidade da malha ocorrem geralmente próximo às interfaces entre componentes da geometria.

A desproporcionalidade entre o tamanho dos elementos, gera a necessidade de refinamento da malha, o programa apresenta várias opções neste sentido, permitindo que o usuário gere a malha levando em conta alguns parâmetros como proximidade entre componentes, curvatura, tamanho mínimo e máximo dos elementos, formato dos elementos, entre outros.

Outro ponto importante a ser observado é a necessidade de recursos computacionais significativos para realizar este tipo de simulação, pois o *software* calcula e armazena na memória todas as condições de contorno para cada elemento da malha, ou seja, além de capacidade de processamento de dados, é necessário que a máquina tenha também uma capacidade de armazenamento considerável, visto que muitas das simulações realizadas têm malhas que apresentam valores superiores a 10 milhões de elementos.

O tempo computacional gasto na simulação depende de variáveis como o número de elementos da malha, a máquina utilizada e o sistema simulado. Dentre os fatores citados acima, a malha é a mais suscetível a alterações e em teoria quanto maior for o número de elementos melhor será o resultado, porém na prática é preciso considerar algumas limitações como o tempo de simulação, ou seja, refina-la demais sem necessidade pode causar um problema considerável, já que simulações como estas podem demorar dias e até mesmo semanas para serem finalizadas.

A malha das geometrias a serem simuladas foram geradas utilizando proximidade e curvatura como padrão, ou seja, os elementos criados são menores nas proximidades de interfaces e na curvatura dos sólidos. Para refinar a malha foram utilizadas duas ferramentas, “*sizing*” e “*inflation*”. A ferramenta “*sizing*” permite que a malha seja gerada de forma individual no sólido selecionado, o “*inflation*” permite a criação de camadas com tamanho fixo em interfaces selecionadas, a importância desta ferramenta será melhor explicada posteriormente.

4.3.3 Configurações (*Setup*)

Após importar a geometria e gerar a malha, é necessário configurar o sistema, separando os componentes em diferentes domínios, declarando as interfaces existentes, as condições de contorno presentes, o critério de convergência e algumas outras configurações que serão mencionadas posteriormente.

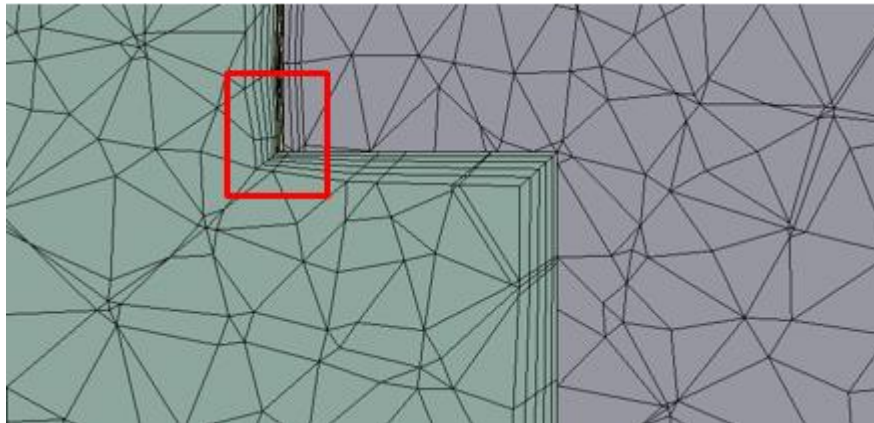
A geometria importada representa apenas um conjunto de sólidos de um material padrão para o *software*, por isso a necessidade de dividir estes sólidos em diferentes domínios, de acordo com o sistema simulado (Ex.: óleo, parte ativa, ar e radiador), podendo selecionar um material e estado físico diferente para cada domínio. O programa possui um banco de dados com várias substâncias que podem ser utilizadas, ou ainda em caso de inexistência do material desejado, o *software* permite ao usuário inserir as propriedades físicas do mesmo.

O próximo passo é definir as interfaces existentes entre os componentes do sistema (onde acontece troca de calor) e os pontos onde devido às simplificações não há troca de calor, além disso, ainda é preciso definir as condições de contorno, que para os casos em estudo são a taxa de transferência de calor do radiador, a potência dissipada pela parte ativa e a temperatura do ambiente externo a ser considerada.

Para permitir que um componente dissipe determinada potência é necessário criar um subdomínio e selecionar em quais faces do objeto o calor será dissipado (a dissipação ocorrerá de forma homogênea).

Em caso de o sistema conter fluidos, é preciso definir o tipo de escoamento, que é feito tendo como base as propriedades físicas do material. O sistema em questão utiliza óleo mineral como isolante, que é um fluido viscoso, por isso utiliza-se a configuração “*No Slip Wall*”, esta configuração mantém em zero a velocidade do fluido nos elementos que compõem as interfaces com a parede do radiador. Neste ponto, entra a importância da utilização da ferramenta “*inflation*”, que como apresentado na Figura 20 cria elementos próximos às interfaces, sendo que o tamanho destes é definido pelo usuário.

Figura 20 – Ilustração do funcionamento da ferramenta “*inflation*”.



Fonte: Autor.

Como a simulação ocorre utilizando o método iterativo, é preciso definir o número mínimo e máximo de iterações que serão realizadas pelo programa, outro fator importante que pode alterar o resultado final da simulação é a escala tempo (*Timescale*) utilizada entre as iterações. O *software* disponibiliza duas opções para configurar a escala de tempo, “*Auto Timescale*”, onde o tempo decorrido entre uma iteração e outra é calculado pelo próprio programa, levando em conta fatores como geometria, condições de contorno e a física do sistema. A segunda opção é “*Physical Time Scale*”, onde o próprio usuário determina o tempo a ser usado. Quanto maior for o “*Timescale*” menor será tempo computacional necessário para que a simulação atinja a convergência, porém é necessário avaliar a física do sistema para garantir que o tempo entre as iterações não seja grande o suficiente para afetar de forma significativa os resultados da simulação. A Figura 21 apresenta as configurações utilizadas neste trabalho.

Figura 21 – Configurações utilizadas nas simulações.

The image shows a software configuration window with three tabs: 'Basic Settings', 'Equation Class Settings', and 'Advanced Options'. The 'Basic Settings' tab is active. It contains several sections:

- Advection Scheme:** A dropdown menu set to 'High Resolution'.
- Convergence Control:** Two input fields: 'Min. Iterations' with the value '1' and 'Max. Iterations' with the value '1000'. Each field has a small blue square icon to its right.
- Fluid Timescale Control:** A section with a collapse icon. It contains a dropdown menu for 'Timescale Control' set to 'Physical Timescale' and an input field for 'Physical Timescale' with the value '180 [s]'.
- Solid Timescale Control:** A section with a collapse icon. It contains a dropdown menu for 'Solid Timescale' set to 'Physical Timescale' and an input field for 'Solid Timescale' with the value '180 [s]'.
- Convergence Criteria:** A section with a dropdown menu for 'Residual Type' set to 'RMS' and an input field for 'Residual Target' with the value '1,E-4'. Below this are three unchecked checkboxes: 'Conservation Target', 'Elapsed Wall Clock Time Control', and 'Interrupt Control', each with a plus sign icon to its right.

Fonte: Autor.

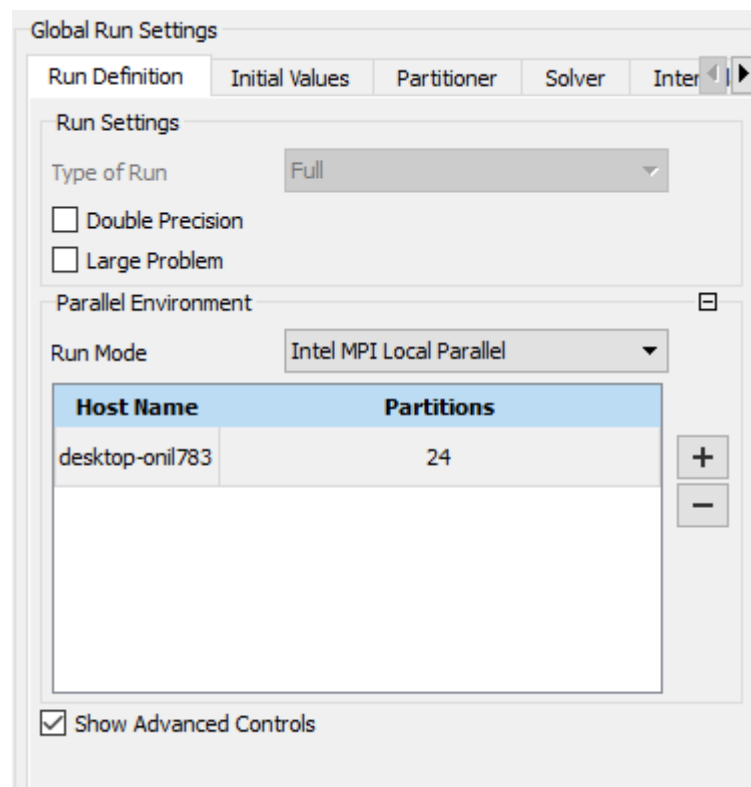
Por fim, define-se o critério de convergência da simulação, ou seja, o erro máximo admitido, normalmente o valor escolhido é menor do que o esperado para a simulação, isso é feito visando obter o menor erro possível. Na maioria das vezes o sistema não convergirá de forma direta, devido a precisão exigida.

Para obter resultados aceitáveis, utiliza-se o seguinte método: faz-se a simulação com determinado número de iterações, analisa-se os resultados, simula-se novamente desta vez com o dobro de iterações, analisa-se os resultados comparando-os aos valores encontrados anteriormente, se forem suficientemente próximos, então a simulação convergiu, senão simula-se novamente com mais iterações e repete-se o mesmo processo, até que os resultados da simulação atual sejam próximos aos da anterior.

4.3.4 Solução (*Solution*)

Neste passo define-se o recurso computacional a ser utilizado (dentro da capacidade disponível), a forma que a simulação deve ser realizada pela máquina, dentre outras configurações. A Figura 22 mostra o painel de configurações com as informações de processamento computacional.

Figura 22 – Configurações de processamento computacional.



Fonte: Autor.

Exibe gráficos de erro em tempo real para diversas variáveis da simulação, além de apresentar em detalhes cada iteração realizada, informações sobre a escala tempo utilizada (*timescale*) a hora de início e fim da simulação e o tempo total decorrido.

4.3.5 Resultados (*Results*)

O *software* calcula diversas variáveis do sistema como, velocidade dos fluidos, temperatura e pressão, todos esses cálculos são realizados para cada um dos elementos dispostos na malha, possibilitando que o usuário tenha acesso a uma grande quantidade de dados, cabendo

a este analisá-los de forma correta. Além de realizar todos os cálculos, o programa possui várias ferramentas internas que permitem o usuário filtrar os dados de forma eficiente.

Pontos importantes que devem ser observados com mais cuidado, são a temperatura de topo de óleo e o “*hotspot*” do transformador, pois possuem valores máximos definidos por norma (ABNT NBR 5440, 2014), tais dados podem ser obtidos de forma simples, sendo necessária apenas a criação de um plano e a seleção de duas funções.

Os gráficos de distribuição de temperatura e velocidade são de extrema importância para a análise do sistema, pois através destes fica caracterizado o efeito termossifão, princípio básico dos sistemas de refrigeração de transformadores do tipo ONAN. Outro ponto que deve ser observado é a temperatura média do óleo, que neste trabalho servirá como parâmetro para a definição da configuração de radiador mais eficiente, quanto menor for a temperatura média do óleo, maior será a eficiência do radiador, tendo em vista que a potência dissipada pela parte ativa do transformador será a mesma em todos os casos.

5 SIMULAÇÕES

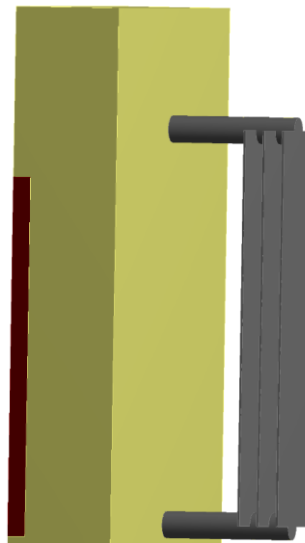
As simulações para as análises serão realizadas utilizando uma configuração de radiador como caso base. A partir deste modelo serão simuladas algumas variações para diferentes configurações. Os parâmetros a serem variados são o número de aletas, distância entre aletas, ΔH (diferença de altura entre o centro do núcleo e o centro do radiador) e o comprimento das aletas. Os resultados do caso base serão usados como referência para a avaliação das configurações simuladas e verificar qual a mais eficiente, que dissipa a maior quantidade de calor para o ambiente externo.

Os parâmetros utilizados para comparação da eficiência de cada radiador são as temperaturas média e de topo de óleo. A temperatura de topo de óleo corresponde à temperatura média na entrada do radiador. As malhas de todas as simulações realizadas possuem aproximadamente três milhões de elementos cada e demandaram um tempo de simulação de aproximadamente onze horas cada.

5.1 CASO BASE

A configuração de radiador usada como base neste trabalho é uma geometria genérica, representa de forma simplificada um transformador de potência com 3 kW de perdas em sua parte ativa e é apresentada na Figura 23. O valor de perdas foi adotado considerando as dimensões utilizadas e a temperatura ambiente considerada é 25°C.

Figura 23 – Geometria do caso base.



Fonte: Autor.

A Tabela 3 apresenta os parâmetros utilizados na construção da configuração base para este trabalho, divididos em duas categorias: parâmetros fixos, que são os mesmos para todas as configurações simuladas; e parâmetros variáveis, que estão sujeitos a alterações dependendo da configuração adotada.

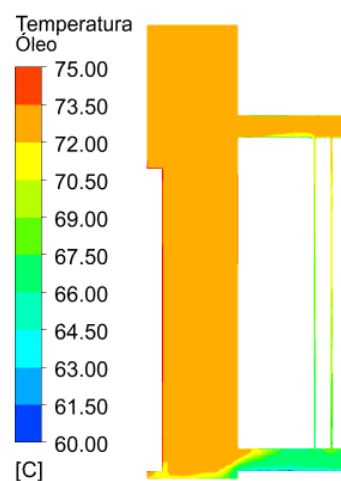
Tabela 3 – Parâmetros caso base.

Parâmetros (fixos)	Caso base	Parâmetros (variáveis)	Caso base
Perdas na parte ativa	3 kW	Número de aletas	3
Temperatura ambiente	25 °C	Área de dissipação	7,687 m ²
Espessura da carcaça	1 mm	Distância entre aletas (D)	10 cm
Diâmetro do cano	15 cm	Comprimento das aletas (L)	2,2 m
Largura das aletas	50 cm	ΔH	20 cm

Fonte: Autor.

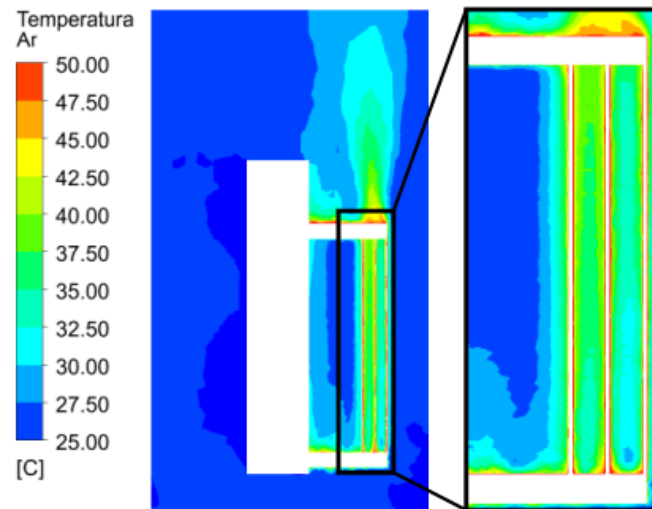
A temperatura no interior do transformador para o caso base é apresentada na Figura 24, através de um plano transversal traçado no centro da geometria, que demonstra a presença do efeito termossifão, já que o fluido entra no radiador com determinada temperatura e retorna mais frio ao tanque. A temperatura média do óleo é de 68,61 °C, a temperatura de topo de óleo é de 71,57 °C e a velocidade média do fluido dentro do radiador é de 0,01134 m/s. A Figura 25 apresenta o gráfico da temperatura do ar, ilustrando o fenômeno da convecção.

Figura 24 – Gráfico de temperatura do óleo.



Fonte: Autor.

Figura 25 – Gráfico de temperatura do ar nas proximidades das aletas.



Fonte: Autor.

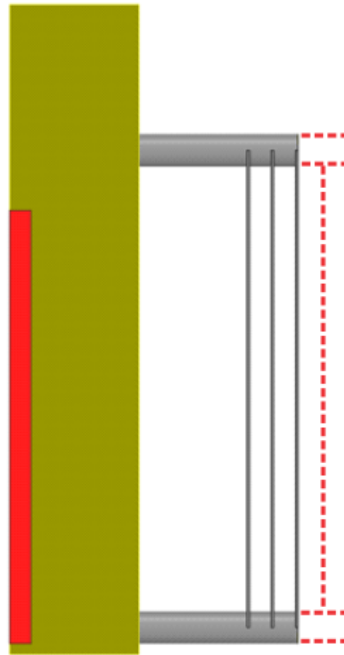
A pressão interna (Δp) é calculada usando a Equação (6) e apresentada na Equação (7). As propriedades do óleo utilizado na simulação são: expansividade térmica de $795 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$ e densidade de 869 kg/m^3 . As temperaturas de entrada e saída do radiador obtidas na simulação, T_{Top} e T_{Bot} , respectivamente, são $T_{\text{Top}} = 72,56 \text{ }^\circ\text{C}$ e $T_{\text{Bot}} = 69,39 \text{ }^\circ\text{C}$. O valor da gravidade considerado foi $9,81 \text{ m/s}$.

$$\Delta p = 869 \cdot 9,81 \cdot 795 \cdot 10^{-6} \cdot (72,56 - 69,39) \cdot 0,2 = 4,928 \text{ Pa} \quad (7)$$

5.2 VARIAÇÃO DO NÚMERO DE ALETAS

A variação do número de aletas do radiador é simulada com o intuito de visualizar como o sistema responde à adição ou subtração de aletas, ou seja, quais são as temperaturas média e de topo de óleo correspondentes para cada configuração simulada. A Figura 26 apresenta como as variações devem ocorrer.

Figura 26 – Configuração base e as variações que serão aplicadas.



Fonte: Autor.

5.2.1 Radiador com 1 aleta

Neste sentido, a configuração com apenas 1 aleta foi desenhada e simulada com os parâmetros apresentados na Tabela 4, a área de dissipação de calor também sofre alteração.

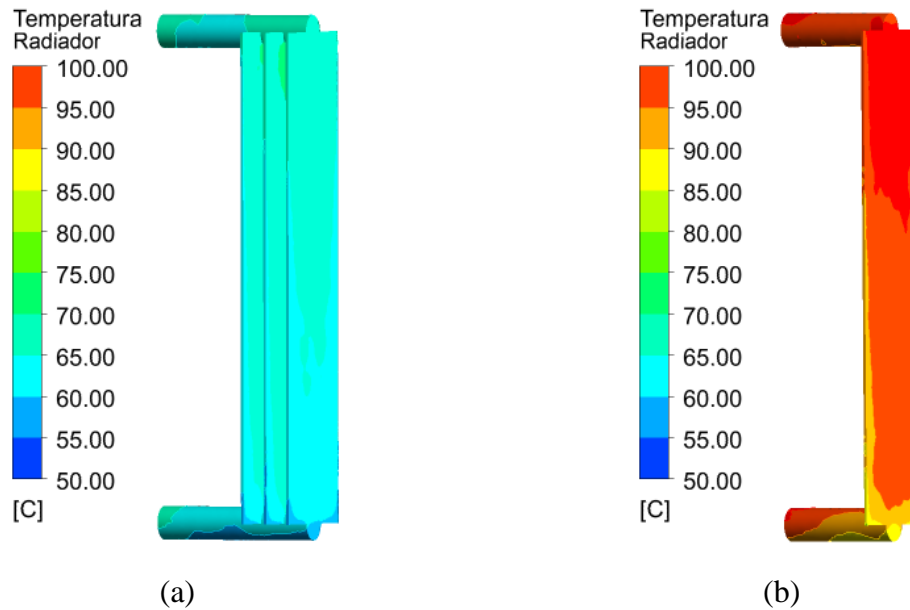
Tabela 4 – Parâmetros da configuração com 1 aleta.

Parâmetros	Caso base	Radiador com 1 aleta
Número de aletas	3	1
Área de dissipação	7,687 m ²	2,837 m ²
Distância entre aletas (D)	10 cm	10 cm
ΔH	20 cm	20 cm

Fonte: Autor.

A temperatura na parte externa do radiador em comparação ao caso base é apresentada através de um gráfico de superfície na Figura 27. A temperatura média do óleo é de 105,21 °C e a temperatura de topo de óleo é de 110,44 °C.

Figura 27 – Gráficos de temperatura: (a) Caso base (b) Radiador com 1 aleta.



Fonte: Autor.

5.2.2 Radiador com 2 aletas

A configuração com 2 aletas foi desenhada e simulada com os parâmetros apresentados na Tabela 5, a área de dissipação de calor também sofre alteração.

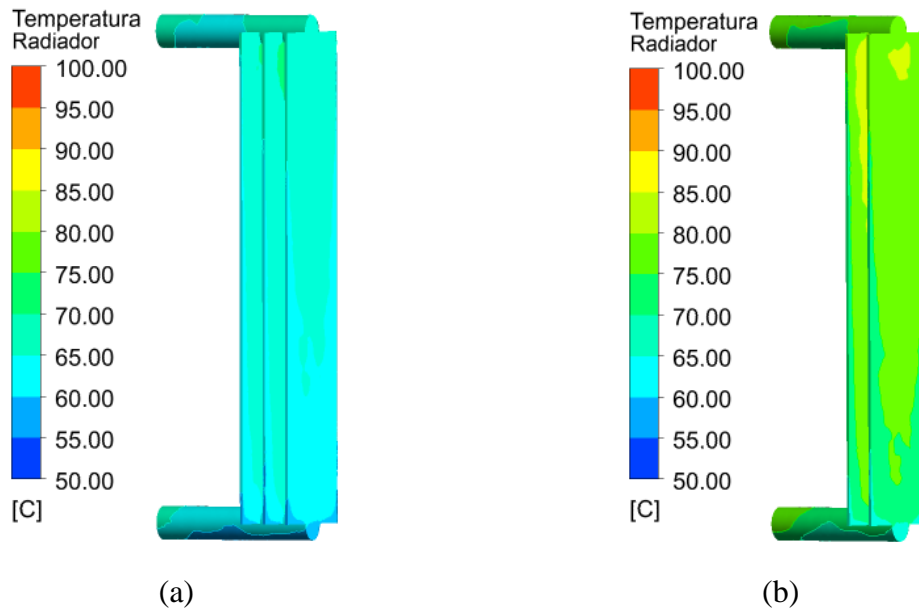
Tabela 5 – Parâmetros da configuração com 2 aletas.

Parâmetros	Caso base	Radiador com 2 aletas
Número de aletas	3	2
Área de dissipação	7,687 m ²	5,262 m ²
Distância entre aletas (D)	10 cm	10 cm
ΔH	20 cm	20 cm

Fonte: Autor.

A temperatura na parte externa do radiador em comparação ao caso base é apresentada através de um gráfico de superfície na Figura 28. A temperatura média do óleo é de 80,08 °C e a temperatura de topo de óleo é de 83,70 °C.

Figura 28 – Gráficos de temperatura: (a) Caso base (b) Radiador com 2 aletas.



Fonte: Autor.

5.2.3 Radiador com 4 aletas

A configuração com 4 aletas foi desenhada e simulada com os parâmetros apresentados na Tabela 6, a área de dissipação de calor também sofre alteração.

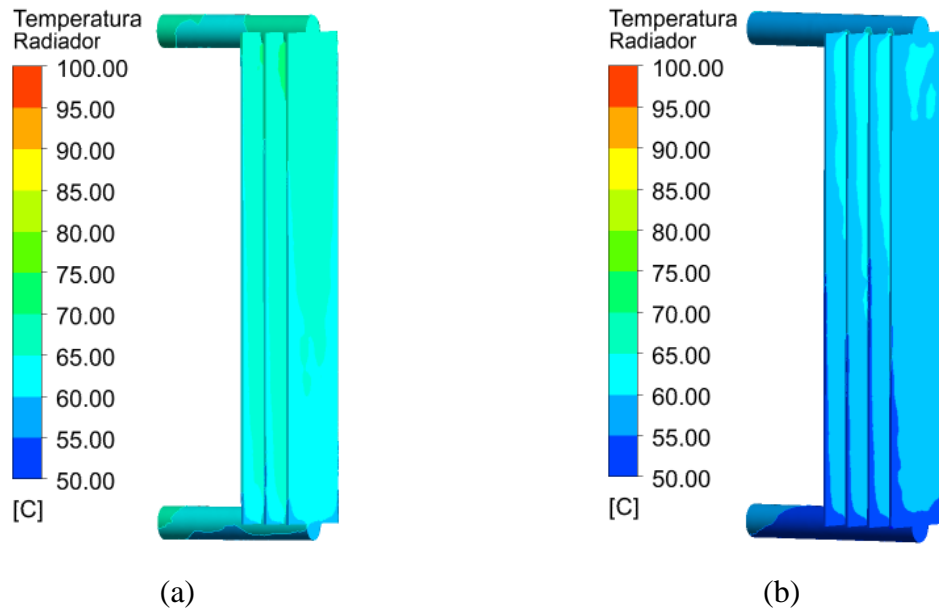
Tabela 6 – Parâmetros da configuração com 4 aletas.

Parâmetros	Caso base	Radiador com 4 aletas
Número de aletas	3	4
Área de dissipação	7,687 m ²	10,112 m ²
Distância entre aletas (D)	10 cm	10 cm
ΔH	20 cm	20 cm

Fonte: Autor.

A temperatura na parte externa do radiador em comparação ao caso base é apresentada através de um gráfico de superfície na Figura 29. A temperatura média do óleo é de 59,89 °C e a temperatura de topo de óleo é de 62,31 °C.

Figura 29 – Gráficos de temperatura: (a) Caso base (b) Radiador com 4 aletas.



Fonte: Autor.

5.2.4 Radiador com 5 aletas

A configuração com 5 aletas foi desenhada e simulada com os parâmetros apresentados na Tabela 7, a área de dissipação de calor também sofre alteração.

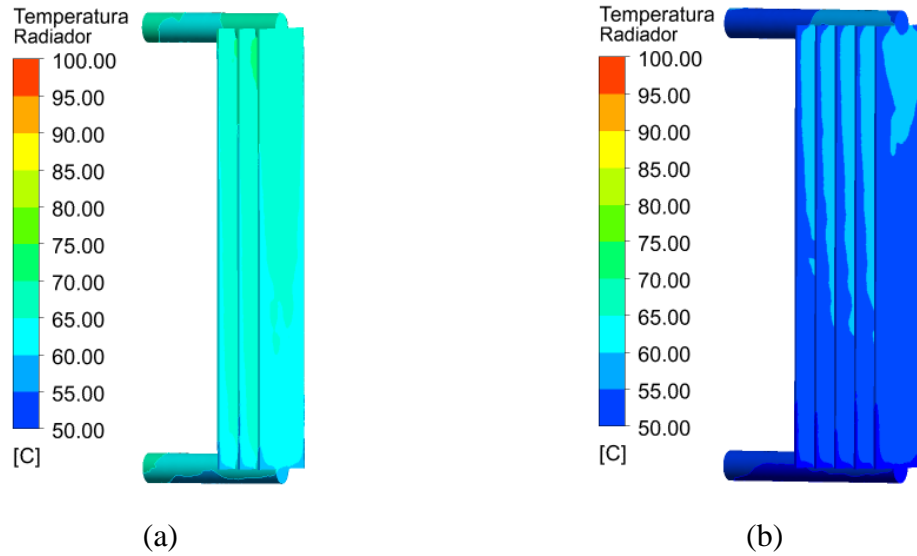
Tabela 7 – Parâmetros da configuração com 5 aletas.

Parâmetros	Caso base	Radiador com 5 aletas
Número de aletas	3	5
Área de dissipação	7,687 m ²	12,538 m ²
Distância entre aletas (D)	10 cm	10 cm
ΔH	20 cm	20 cm

Fonte: Autor.

A temperatura na parte externa do radiador em comparação ao caso base é apresentada através de um gráfico de superfície na Figura 30. A temperatura média do óleo é de 55,34 °C e a temperatura de topo de óleo é de 57,46 °C.

Figura 30 – Gráficos de temperatura: (a) Caso base (b) Radiador com 5 aletas.

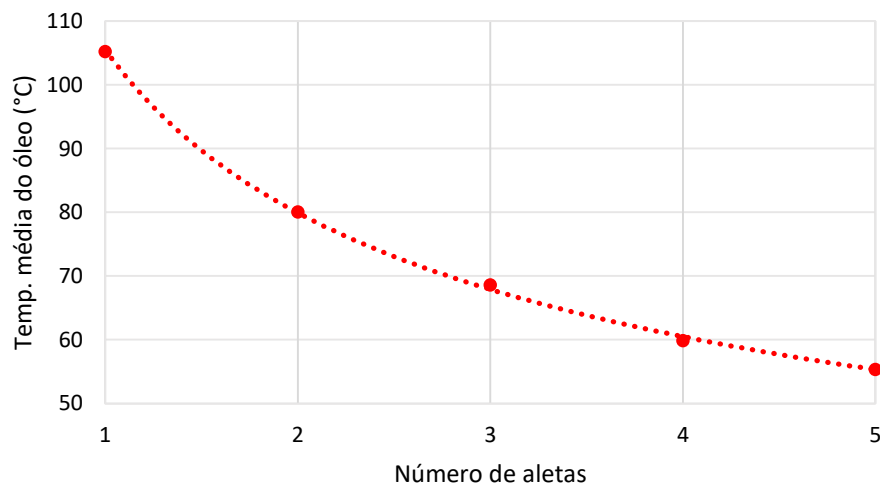


Fonte: Autor.

5.2.5 Análise dos resultados

Analisando os resultados encontrados, traçou-se um gráfico da temperatura média do óleo em relação ao número de aletas, que possui o comportamento de uma exponencial decrescente, apresentado na Figura 31. Cada vez que se adiciona uma aleta, aumenta-se em uma determinada porcentagem a área de dissipação de calor do radiador, que leva a uma exponencial decrescente da temperatura média do óleo.

Figura 31 – Gráfico da temperatura média do óleo em relação ao número de aletas.

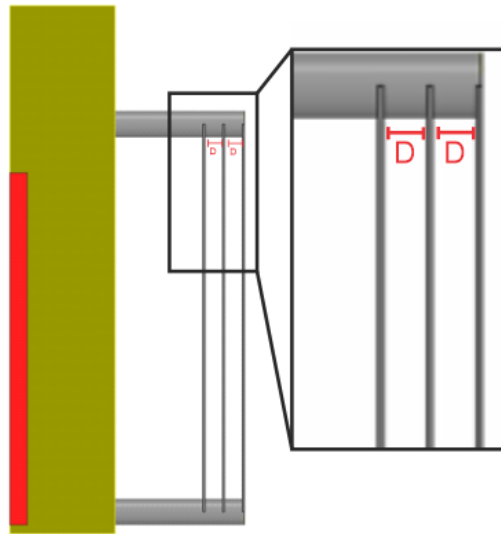


Fonte: Autor.

5.3 VARIAÇÃO DA DISTÂNCIA ENTRE ALETAS

A variação da distância entre as aletas do radiador é simulada com o intuito de visualizar como a dissipação de calor em uma aleta afeta as demais, analisando o gráfico de temperatura do ar nas proximidades das aletas, além de obter os valores das temperaturas média e de topo de óleo correspondentes para cada configuração simulada. A Figura 32 apresenta como as variações devem ocorrer.

Figura 32 – Configuração base e as variações que serão aplicadas.



Fonte: Autor.

5.3.1 Distância (D) de 5 cm entre aletas

A configuração com 5 cm de distância entre aletas foi desenhada e simulada com os parâmetros apresentados na Tabela 8, a área de dissipação de calor sofre uma pequena alteração.

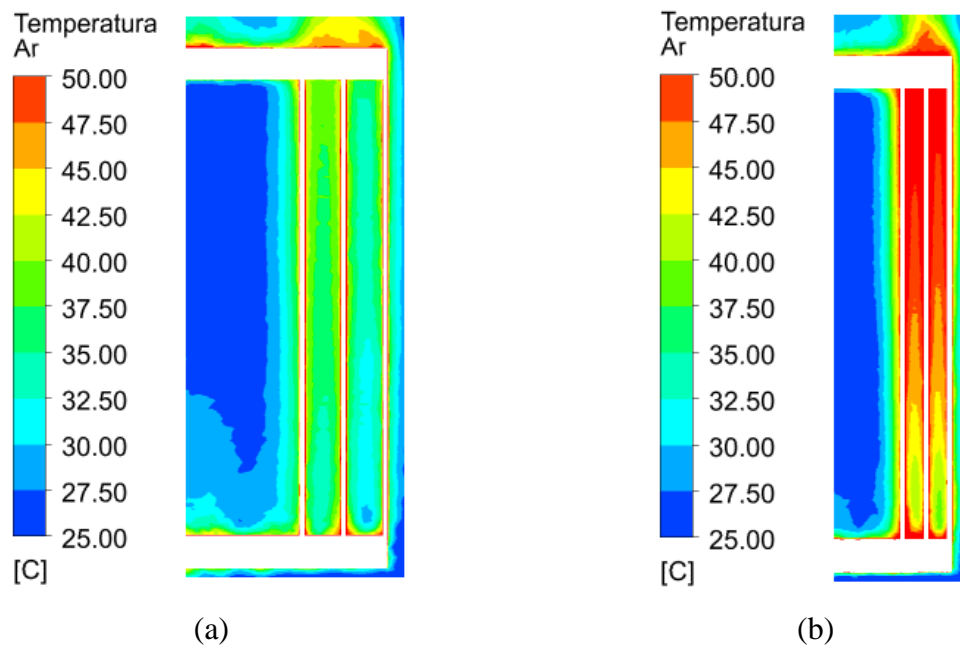
Tabela 8 – Parâmetros da configuração com 5 cm de distância entre aletas.

Parâmetros	Caso base	5 cm entre aletas
Número de aletas	3	3
Área de dissipação	7,687 m ²	7,593 m ²
Distância entre aletas (D)	10 cm	5 cm
ΔH	20 cm	20 cm

Fonte: Autor.

A temperatura do ar nas proximidades das aletas em comparação ao caso base é apresentada através de um plano transversal na Figura 33. A temperatura média do óleo é de 69,88 °C e a temperatura de topo de óleo é de 72,85 °C.

Figura 33 – Gráficos de temperatura: (a) Caso base (b) 5 cm entre aletas.



Fonte: Autor.

5.3.2 Distância (D) de 15 cm entre aletas

A configuração com 15 cm de distância entre aletas foi desenhada e simulada com os parâmetros apresentados na Tabela 9, a área de dissipação de calor sofre uma pequena alteração.

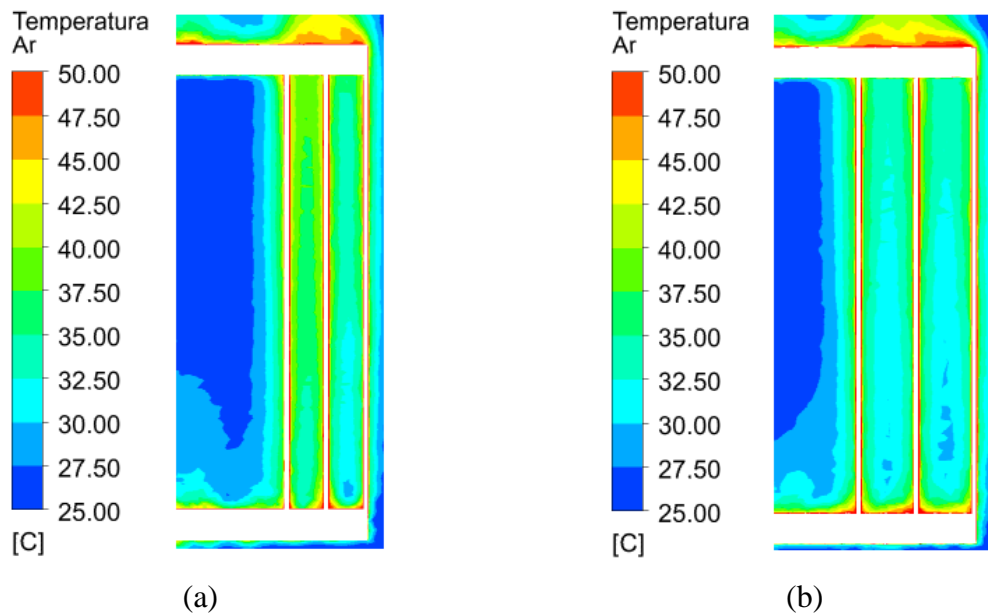
Tabela 9 – Parâmetros da configuração com 15 cm de distância entre aletas.

Parâmetros	Caso base	15 cm entre aletas
Número de aletas	3	3
Área de dissipação	7,687 m ²	7,781 m ²
Distância entre aletas (D)	10 cm	15 cm
ΔH	20 cm	20 cm

Fonte: Autor.

A temperatura do ar nas proximidades das aletas em comparação ao caso base é apresentada através de um plano transversal na Figura 34. A temperatura média do óleo é de 67,53 °C e a temperatura de topo de óleo é de 70,48 °C.

Figura 34 – Gráficos de temperatura: (a) Caso base (b) 15 cm entre aletas.

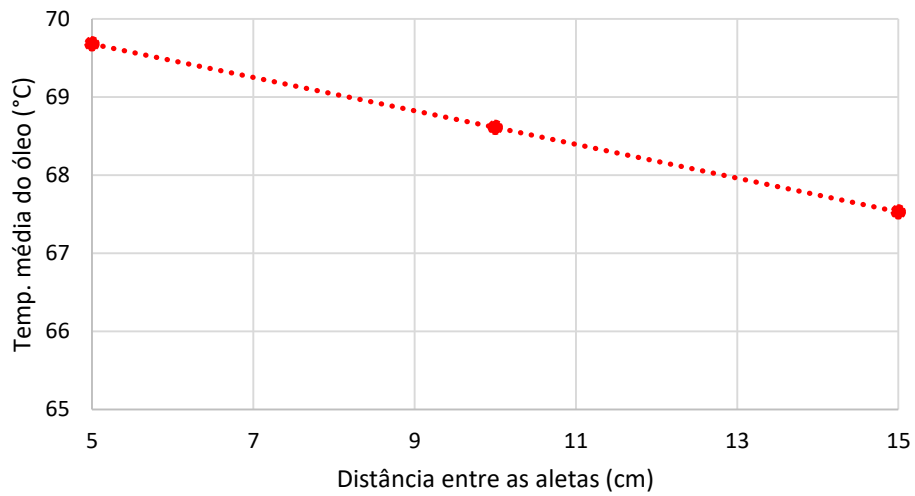


Fonte: Autor.

5.3.3 Análise dos resultados

Analisando os resultados através da curva traçada relacionando a temperatura média do óleo com a distância entre as aletas, apresentado na Figura 35. Pode-se atribuir tal comportamento à diferença na temperatura do ar nas proximidades das aletas como pode ser observado na Figura 33 e na Figura 34, visto que a transferência de calor entre dois corpos é diretamente proporcional à diferença de temperatura entre ambos.

Figura 35 – Temperatura média do óleo em relação à distância entre aletas.

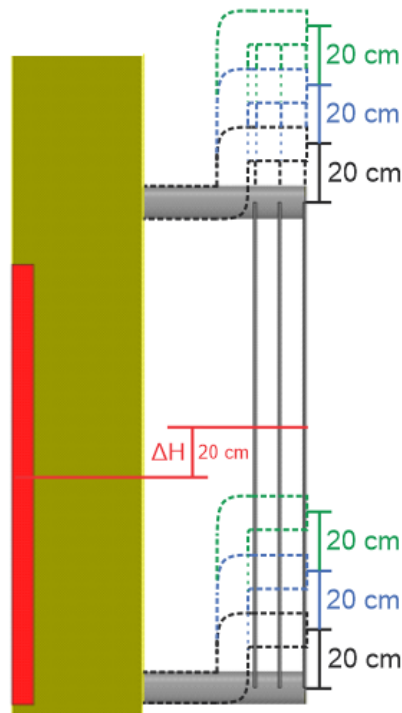


Fonte: Autor

5.4 VARIAÇÃO DO ΔH

A variação do ΔH é realizada com o intuito de analisar o impacto que a mesma tem sobre o sistema, conforme previsto pela Equação (6). Visando manter os pontos de conexão do radiador ao tanque de óleo no mesmo local, deslocou-se, com o auxílio de curvas, para cima as aletas do radiador, como é apresentado na Figura 36.

Figura 36 – Configuração base e as variações que serão aplicadas.



Fonte: Autor.

5.4.1 ΔH de 40 cm

A configuração com ΔH de 40 cm foi desenhada e simulada com os parâmetros apresentados na Tabela 10, com a adição de curvas, para manter os pontos de conexão nos mesmos locais e ao mesmo tempo aumentar a diferença de altura entre o centro do radiador e o centro da parte ativa.

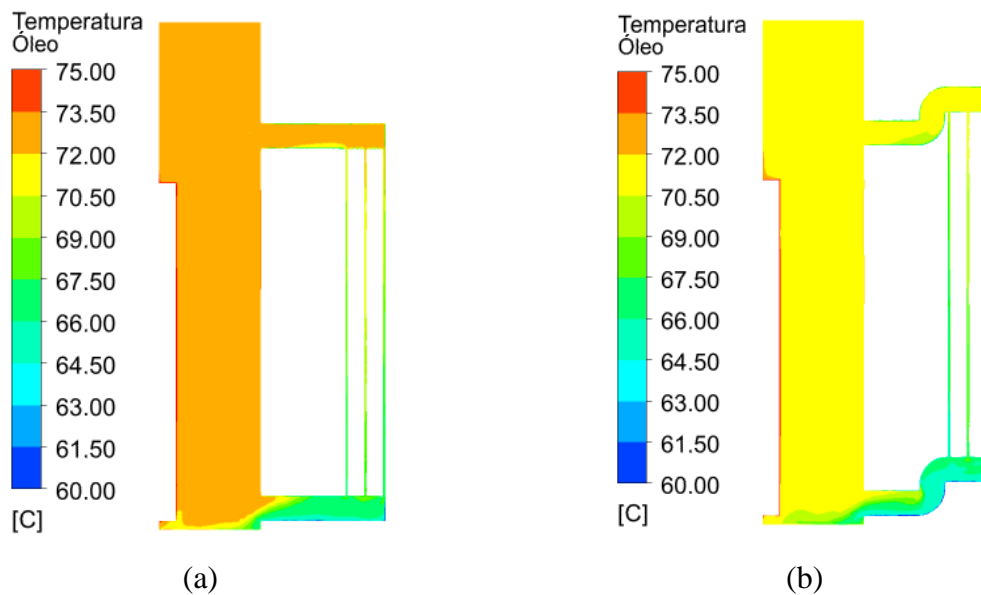
Tabela 10 – Parâmetros da configuração com ΔH de 40 cm.

Parâmetros	Caso base	ΔH 40 cm
Número de aletas	3	3
Área de dissipação	7,687 m ²	7,806 m ²
Distância entre aletas (D)	10 cm	10 cm
ΔH	20 cm	40 cm

Fonte: Autor.

A temperatura no interior do transformador em comparação ao caso base é apresentada através de um plano transversal na Figura 37. A temperatura média do óleo é de 67,35 °C, temperatura de topo de óleo é de 69,99 °C e a velocidade média do fluido dentro do radiador é de 0,01219 m/s.

Figura 37 – Gráficos de temperatura: (a) Caso base (b) ΔH de 40 cm.



Fonte: Autor.

A pressão interna (ΔP) é calculada usando a Equação (6) e apresentada na Equação (8). As propriedades do óleo utilizado na simulação são: expansividade térmica de $795 \cdot 10^{-6}$ 1/K e densidade de 869 kg/m³. As temperaturas de entrada e saída do radiador (obtidas na simulação) são: $T_{\text{Top}} = 71,38$ °C e $T_{\text{Bot}} = 68,61$ °C. O valor da gravidade considerado foi 9,81 m/s.

$$\Delta P = 869 \cdot 9,81 \cdot 795 \cdot 10^{-6} \cdot (71,38 - 68,61) \cdot 0,4 = 7,503 \text{ Pa} \quad (8)$$

5.4.2 ΔH de 60 cm

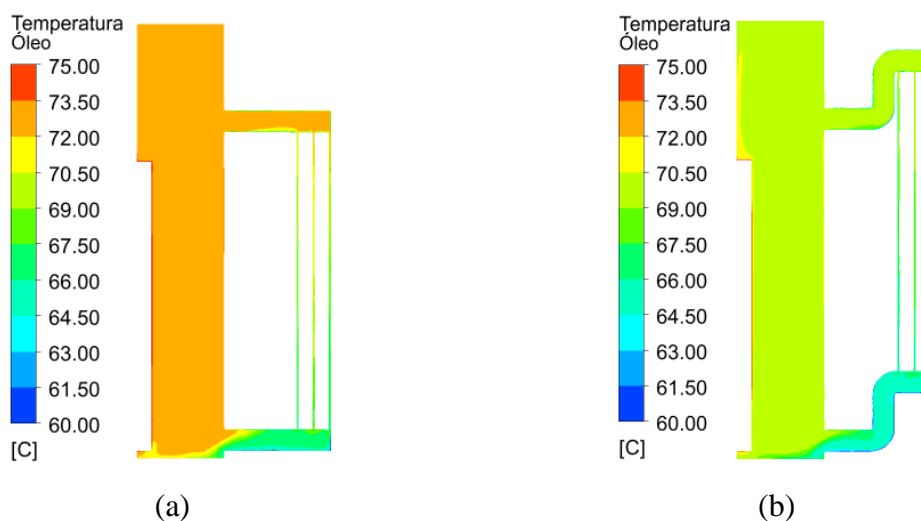
A configuração com ΔH de 40 cm foi desenhada e simulada com os parâmetros apresentados na Tabela 11, com a adição de curvas, para manter os pontos de conexão nos mesmos locais e ao mesmo tempo aumentar a diferença de altura entre o centro do radiador e o centro da parte ativa.

Tabela 11 – Parâmetros da configuração com ΔH de 60 cm.

Parâmetros	Caso base	ΔH 60 cm
Número de aletas	3	3
Área de dissipação	7,687 m ²	7,994 m ²
Distância entre aletas (D)	10 cm	10 cm
ΔH	20 cm	60 cm

Fonte: Autor.

A temperatura no interior do transformador em comparação ao caso base é apresentada através de um plano transversal na Figura 38. A temperatura média do óleo é de 66,54 °C, temperatura de topo de óleo é de 68,80 °C e a velocidade média do fluido dentro do radiador é de 0,01263 m/s.

Figura 38 – Gráficos de temperatura: (a) Caso base (b) ΔH de 60 cm.

Fonte: Autor.

A pressão interna (ΔP) é calculada usando a Equação (6) e apresentada na Equação (9). As propriedades do óleo utilizado na simulação, são as mesmas do caso base. As temperaturas de entrada e saída do radiador (obtidas na simulação) são: $T_{\text{Top}} = 70,45$ °C e $T_{\text{Bot}} = 67,52$ °C. O valor da gravidade considerado foi 9,81 m/s.

$$\Delta P = 869 \cdot 9,81 \cdot 795 \cdot 10^{-6} \cdot (70,45 - 67,52) \cdot 0,6 = 11,939 \text{ Pa} \quad (9)$$

5.4.3 ΔH de 80 cm

A configuração com ΔH de 40 cm foi desenhada e simulada com os parâmetros apresentados na Tabela 12, com a adição de curvas, para manter os pontos de conexão nos mesmos locais e ao mesmo tempo aumentar a diferença de altura entre o centro do radiador e o centro da parte ativa.

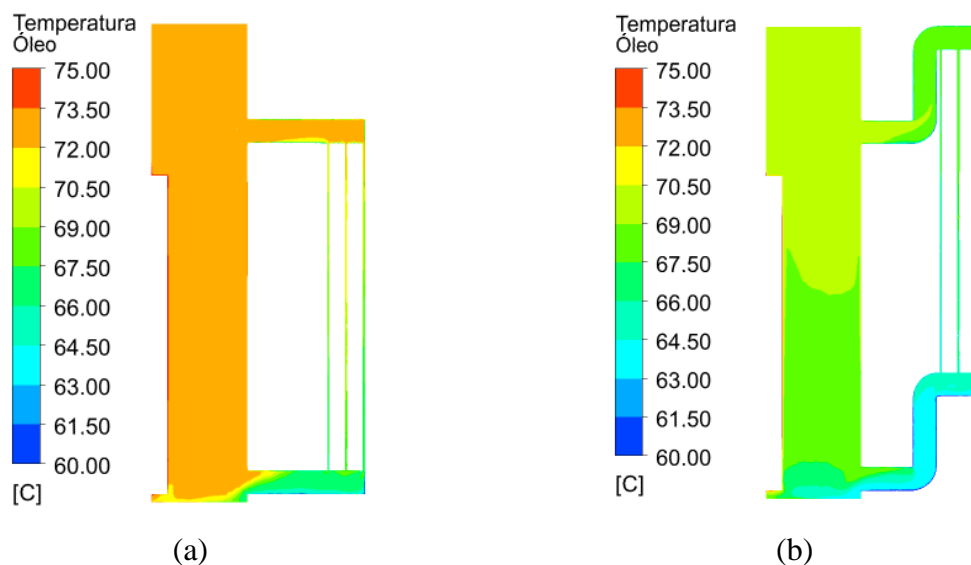
Tabela 12 – Parâmetros da configuração com ΔH de 80 cm.

Parâmetros	Caso base	ΔH 80 cm
Número de aletas	3	3
Área de dissipação	7,687 m ²	8,182 m ²
Distância entre aletas (D)	10 cm	10 cm
ΔH	20 cm	80 cm

Fonte: Autor.

A temperatura no interior do transformador em comparação ao caso base é apresentada através de um plano transversal na Figura 39. A temperatura média do óleo é de 65,57 °C, temperatura de topo de óleo é de 67,49 °C e a velocidade média do fluido dentro do radiador é de 0,01332 m/s.

Figura 39 – Gráficos de temperatura: (a) Caso base (b) ΔH de 80 cm.



Fonte: Autor.

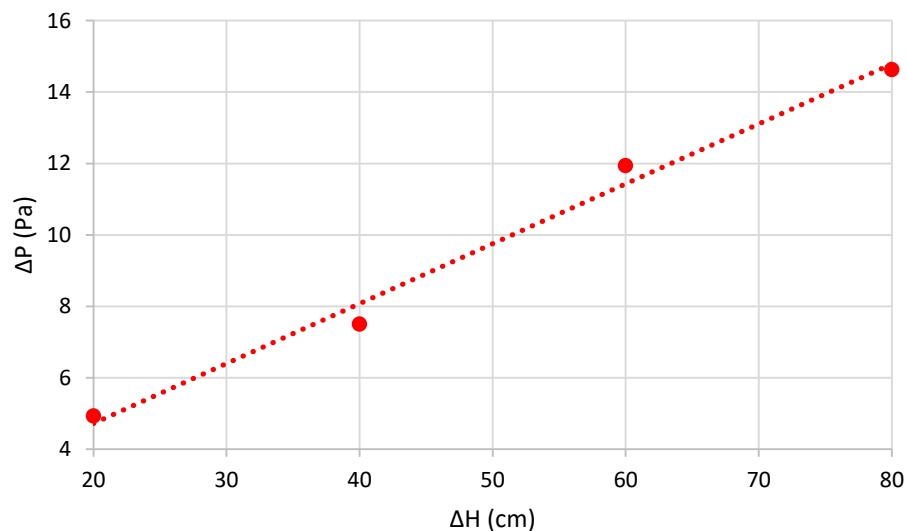
A pressão interna (ΔP) é calculada usando a Equação (6) e apresentada na Equação (10). As propriedades do óleo utilizado na simulação, são as mesmas do caso base. As temperaturas de entrada e saída do radiador (obtidas na simulação) são: $T_{\text{Top}} = 69,11 \text{ }^\circ\text{C}$ e $T_{\text{Bot}} = 66,41 \text{ }^\circ\text{C}$. O valor da gravidade considerado foi $9,81 \text{ m/s}$.

$$\Delta P = 869 \cdot 9,81 \cdot 795 \cdot 10^{-6} \cdot (69,11 - 66,41) \cdot 0,8 = 14,634 \text{ Pa} \quad (10)$$

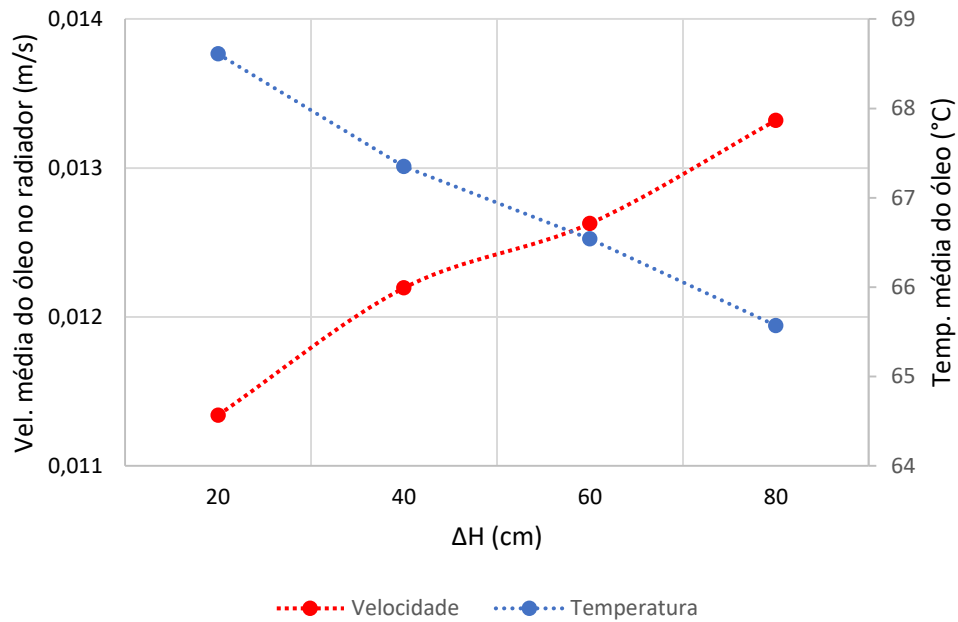
5.4.4 Análise dos resultados

Analisando os resultados encontrados, que são apresentados na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** e na Figura 40, observa-se que o aumento do ΔH causa o aumento da pressão interna da máquina e a diminuição da temperatura média do óleo. Isso ocorre, pois, o aumento da pressão leva ao aumento da vazão de óleo pelo radiador, que conseqüentemente, faz com que o óleo troque uma quantidade maior de calor com o ambiente externo, diminuindo a temperatura média do óleo.

Figura 40 – Variação da pressão interna da máquina (ΔP) em relação ao ΔH .



Fonte: Autor.

Figura 41 – Variação da velocidade e da temperatura média em relação ao ΔH 

Fonte: Autor.

Analisando, através do gráfico apresentado na Figura 41, a velocidade média do óleo no interior do radiador, observa-se um comportamento semelhante ao apresentado pela variação de pressão no interior da máquina.

6 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

A análise térmica dos radiadores é realizada com base em três aspectos construtivos do equipamento, distância entre as aletas, número de aletas e o ΔH , visando compreender o comportamento do sistema perante tais variações.

Através da variação do número de aletas, percebe-se que, quanto mais aletas, menor serão as temperaturas média e de topo de óleo. Isso ocorre devido ao aumento das áreas de contato entre óleo e radiador e entre radiador e ar. A temperatura média do óleo apresenta um comportamento exponencial com a variação do número de aletas, como mostrado na Figura 31, isso deve-se ao fato de que a vazão de óleo pelo radiador é limitada pelo cano de entrada do radiador e a pressão interna do radiador sofre uma pequena variação devido a diferença da temperatura de entrada e saída do radiador. Outro fato que pôde ser observado é que o acréscimo de aletas, a partir de determinado ponto, causará variações muito pequenas na temperatura do transformador.

A variação da distância entre as aletas mostra a importância de um ambiente bem ventilado e a influência da temperatura ambiente no funcionamento do sistema de refrigeração de transformadores. Quanto menor for a distância entre aletas, menor será o espaço disponível para a circulação de ar, ou seja, a temperatura do ar no entorno das aletas será maior, como mostrado na Figura 33, e, conseqüentemente, a transferência de calor entre o óleo (quente) e o ambiente (frio) será menor.

A aumento do ΔH , como foi apresentado neste trabalho, causa um aumento na pressão interna da máquina de acordo com a Equação (6) e com a Figura 40. Isso se reflete na velocidade média do óleo no radiador, que varia da mesma forma como mostrado pela **Erro! Fonte de referência não encontrada..** A elevação da velocidade do óleo, causa conseqüentemente o aumento da vazão de óleo pelo radiador, que aumenta a transferência de calor para o ambiente, diminuindo a temperatura média do óleo, como mostra a **Erro! Fonte de referência não encontrada..** Este é um método utilizado pela indústria para melhorar o sistema de refrigeração.

Analisando todas as conclusões obtidas até o momento observa-se que, respeitando os limites físicos do equipamento e os limites do espaço físico disponível, para obter maior eficiência o sistema de refrigeração de um transformador do tipo ONAN, deve-se ter um espaçamento considerável entre as aletas, o maior ΔH possível e o número de aletas varia de acordo com as perdas na parte ativa da máquina.

O presente trabalho faz uma análise sobre o sistema de refrigeração ONAN, o mais simples dentre os sistemas utilizados em transformadores, como possíveis trabalhos futuros

estão as análises de outros sistemas refrigeração como: ONAF, OFAF, ODAF, OFWF e ODWF, além disso, outro estudo interessante é sobre sistemas de refrigeração com diferentes estágios de operação.

7 REFERÊNCIAS

ABNT NBR 5356-1. **ABNT NBR 5356-1: Transformadores de Potência Parte 1: Generalidades**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. 2007.

ABNT NBR 5416. **ABNT NBR 5416: Aplicação de Cargas em Transformadores de Potência - Procedimento**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. 1997. p. 91.

ABNT NBR 5440. **ABNT NBR 5440: 2014 Transformadores para Redes Aéreas de Distribuição - Requisitos**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. 2014.

BARBOSA, S. R. **Estudos dos Efeitos da Sobretensão em Transformadores de Potência Aliada a Carregamentos Acima da Potência Nominal**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2005.

BARTH, N. D. et al. **Metodologia de Projeto de Radiadores para Transformadores de Potência Baseado na Análise Térmica, Hidráulica e Escalar**. 2018. IX WORKSPOT-International workshop on power transformers, equipment, substations and materials, Foz do Iguaçu, 2018.

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.

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

HUTTON, D. V. **Fundamentals of Finite Elements Analysis**. Pullman: The McGraw-Hill Companies, 2004.

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

IEC 60076-1. **IEC 60076-1: 2000: Power Transformers Part 1: General**. IEC International Electrotechnical Commission. 2000.

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

IEEE C57.91-1995. **IEEE Guide for Loading Mineral-Oil-Immersed Transformers**. Institute of Electrical and Electronics Engineers. 2012. p. 113.

IEEE C57.92-1981. **Loading Mineral-Oil-Immersed Power Transformers Up to and Including 100 MVA with 55 deg C or 65 deg C Winding Rise.** Institute of Electrical and Electronics Engineers. 1996.

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

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

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

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.

MILASH, M. **Manutenção de transformadores em líquido isolante.** São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 1984.

MONIZ, O. V. **Perda de Vida Útil Técnica e Perda de Vida Útil Econômica dos Transformadores de Distribuição.** 2007. 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. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

NOGUEIRA, D. da S.; ALVES, D. P. **Transformadores de Potência - Teoria e Aplicação Tópicos Essenciais.** 2009. 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. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2011.

PICANÇO, A. F. **Avaliação Econômica de Transformadores de Distribuição com Base no Carregamento e Eficiência Energética.** 2006. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2006.

PORTELLA, M. D. G. **Avaliação da Presença de Indicadores de Oxidação do Papel Isolante Termoestabilizado em Equipamentos de Subestação.** 2010. 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. 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.

ROSENTINO, A. J. P. **Estimativa dos Esforços Eletromecânicos em Transformadores Submetidos a um Curto-Circuito Trifásico.** 2010. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2010.

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

SEN, P. K.; PANSUWAN, S. Overloading and Loss-of-Life Assessment Guidelines of Oil-Cooled Transformers. **Rural Electric Power Conference**, [s. l.], 2001.

SILVA, S. R. et al. **Caracterização de Transformadores com Núcleo de Metal Amorfo para Aplicação em Redes Monofásicas de Distribuição de Energia Elétrica.** Brasília: 1º Congresso de Inovação Tecnológica em Engenharia Elétrica - CITENEL., 2001.

TAMURA, L. S. **Determinação de Parâmetros do circuito Equivalente Térmico de Transformadores de Potência por Meio de Técnicas de Otimização.** 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

VIENA, L. B. **Modelagem de Transformadores no Programa ATP para o Estudo do Fenômeno da Ferrorresonância.** 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2010.

WINDERS, J. J. J. **Power Transformers Principles and Applications.** New York: Marcel Dekker, 2002.