

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
ENGENHARIA ELÉTRICA

LUCAS DE OLIVEIRA ANTUNES

**TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM TRANSFORMADORES E SUAS PERDAS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CORNÉLIO PROCÓPIO  
2020

**LUCAS DE OLIVEIRA ANTUNES**

**TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM TRANSFORMADORES E SUAS PERDAS**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação de Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Me Marco Antonio Ferreira Finocchio.

Coorientador: Prof. Dr. Edson Luiz Bassetto.



**Universidade Tecnológica Federal do Paraná**  
**Campus Cornélio Procópio**  
**Departamento Acadêmico de Elétrica**  
**Curso de Engenharia Elétrica**



## **FOLHA DE APROVAÇÃO**

**Lucas de Oliveira Antunes**

### **TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM TRANSFORMADORES E SUAS PERDAS**

Trabalho de conclusão de curso apresentado às 17:30hs do dia 15/10/2020 como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Eletricista no programa de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O candidato foi arguido pela Banca Avaliadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Avaliadora considerou o trabalho aprovado.

---

Prof(a). Me(a). Marco Antonio Ferreira Finocchio - Presidente (Orientador)

---

Prof(a). Dr(a). Edson Luis Bassetto - (Coorientador)

---

Prof(a). Esp. José Roberto Shimazaki - (Membro)

---

Prof(a). Esp. Carlos Alberto Paschoalino - (Membro)

---

Engenheiro(a) Jeferson Gonçalves Ferreira - (Membro)

A folha de aprovação assinada encontra-se na coordenação do curso.

## DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho de conclusão de curso aos meus queridos pais, Raul Antunes e Rosalva de Oliveira Antunes, pelo amor, carinho e força que sempre me dispuseram.

## **AGRADECIMENTOS**

A realização de um trabalho como o que agora se apresenta exige do seu autor um esforço e uma dedicação que são bem conhecidos por todos aqueles que, de alguma forma já se viram envolvidos em situações semelhantes. No entanto, para que esse trabalho progrida da melhor forma e atinja o seu êxito, é igualmente importante e realmente valiosa a colaboração oferecida por terceiros.

Entretanto agradeço primeiramente ao meu Deus por ter me dado forças até este presente momento, por me ajudar a compreender os tempos difíceis que veio com muita luta e dor. E sempre conseguindo almejar as vitórias ao te servir.

Prosseguindo, agradeço aos meus pais Raul e Rosalva, que lutaram e batalharam junto comigo para que pudesse obter essa conquista, que não foi nada fácil para nós durante todos esses anos da graduação.

Ao meu irmão e amigos, que também me apoiaram nesta jornada, onde na maioria das vezes estive ausente de suas presenças.

Em particular, agradeço aos meus amigos, Willian Renan Piva, pela inspiração e referência que é para mim. Ao Luccas Henrique Cayres Piola, por sempre tirar um momento do seu dia para me ouvir desabafas sobre as minhas dificuldades. Ao Luan David de Sene Pedroso e o Gabriel Bovi Lorand, por me suportar e nos divertimos muito juntos. Assim finalizo agradecendo ao Vitor e Vinicius Moura, e seus pais por me acolherem em momentos de necessidade.

Aos meus professores, orientador Marco Antonio Ferreira Finocchio, que sempre me compreendeu e acreditou no meu potencial, na maioria das vezes me mostrando o caminho certo e, tornando-se modelo de referência em minha vida. E ao meu coorientador Edson Luiz Bassetto, pelas trocas de informações e me direcionar ao conhecimento.

Finalizo agradecendo a todos da UTFPR-CP, entre colaboradores e professores, por me proporcionar um ensino de qualidade, conforto e seriedade.

## RESUMO

ANTUNES, Lucas O. **TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM TRANSFORMADORES E SUAS PERDAS**. 2020. 58 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica), Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procopio, 2019.

O presente trabalho tem como objetivo estudar a transferência de calor no tanque dos transformadores de distribuição a óleo. Inicialmente é definido em que parte da carcaça será aplicado a modelagem do fluxo de calor, onde não se apresenta aletas dos radiadores, contendo as características dimensionais do tanque e as composições do material empregado na estrutura. Em seguida é realizado o cálculo da taxa de geração de calor. Todos esses cálculos do fluxo de transferência de calor serão realizados através de simulação pelos seguintes softwares: SolidWorks onde será desenvolvido um modelo 3D do transformador e pelo MatLab, onde será modelado uma curva do fluxo de calor.

**Palavras-chaves:** Transformadores, transferência de calor, modelagens 3D, fluxo térmico, cálculo analítico.

## ABSTRACT

ANTUNES, Lucas O. **HEAT TRANSFER IN TRANSFORMERS AND ITS LOSSES.** 2020. 58 f. Final Paper (Graduation in Electrical Engineering), Federal Technological University of Paraná. Cornelius Procopius, 2019.

The present work aims to study the heat transfer in the housing of oil distribution transformers. Initially it is defined in which part of the carcass the heat flow modeling will be applied, where there are no fins of the radiators, containing the dimensional characteristics of the tank and the compositions of the material used in the structure. The heat generation rate is then calculated. All of these heat transfer flow calculations will be performed through simulation by the following software: SolidWorks where a 3D model of the transformer will be developed and by MatLab, where a heat flow curve will be modeled.

**Keywords:** Electric distribution transformers, heat transfer, 3D modeling, thermal flow, analytical calculation.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Ciclos de cargas típico de um transformador de distribuição COPEL. ....	14
Figura 2: Linha de fluxo do óleo para refrigeração do transformador. ....	15
Figura 3: Modos de transferência de calor: Condução, Convecção e Radiação. ....	19
Figura 4: Transferência de Calor Através de uma Parede Plana. ....	23
Figura 5: Condições de contorno da equação da difusão de calor na superfície. ....	25
Figura 6: Princípio de funcionamento do transformador. ....	27
Figura 7: Diagrama de fluxo de energia de um transformador. ....	27
Figura 8: Vista Explodida de um Transformador de Distribuição Trifásico. ....	39
Figura 9: Vista Superior do Tanque. ....	40
Figura 10: Vista Traseira do Tanque. ....	40
Figura 11: Vista Lateral do Tanque. ....	41
Figura 12: Modelo Térmico para um Trecho do Tanque. ....	42
Figura 13: Projeto 3D do Transformador de Distribuição Trifásico. ....	43
Figura 14: Placa Plana da Parte Traseira do Transformador. ....	44
Figura 15: Aplicação de Malha na Placa Plana. ....	45
Figura 16: Condição de Contorno do Fluxo de Calor. ....	46
Figura 17: Condição de Contorno do Fluxo de Calor mais a Malha Computacional. ....	46
Figura 18: Placa para Definição do Problema. ....	47
Figura 19: Vista das Temperaturas na Face das Placas. ....	50
Figura 20: Linhas de Fluxo Coloridas por Temperatura. ....	51
Figura 21: Superfície de Temperatura com Coeficiente em 5. ....	53
Figura 22: Superfície de Temperatura com Coeficiente em 15. ....	53
Figura 23: Superfície de Temperatura com Coeficiente em 50. ....	54
Figura 24: Superfície de Temperatura com Coeficiente em 50. ....	54

## LISTA DE SIGLAS

$^{\circ}C$	Temperatura em Célsius	
$^{\circ}K$	Temperatura em Kelvin	
$s$	Unidade de tempo medido em segundos	
$q_{cond}$	Calor transferido,	$[W]$
$k$	Condutividade térmica,	$[W/m.K]$
$A$	Área da superfície,	$[m^2]$
$\Delta T$	Diferença da temperatura,	$[^{\circ}K]$ ou $[^{\circ}C]$
$L$	Comprimento,	$[m]$
$q''_{conv}$	Fluxo de calor por convecção,	$[W/m^2]$
$q_{conv}$	Taxa de calor por convecção,	$[W]$ ou $[J/s]$
$h$	Coefficiente de transferência de calor por convecção,	$[W/m^2 K]$
$T_S$	Temperatura da superfície,	$[^{\circ}K]$ ou $[^{\circ}C]$
$T_{\infty}$ e $T_{viz}$	Temperatura da vizinhança,	$[^{\circ}K]$ ou $[^{\circ}C]$
$q''_{rad}$	Fluxo de calor por radiação,	$[W/m^2]$
$q_{rad}$	Taxa de calor por radiação,	$[W]$ ou $[J/s]$
$\varepsilon$	Emissividade ( $0 < \varepsilon < 1$ )	
$\sigma$	Constante de <i>Stefan-Boltmann</i> . $\sigma = 5,67 \times 10^{-8}$	$[W/(m^2.K^4)]$
$R_{tot}$	Resistência térmica total	$[\Omega]$
$P_{enr}$	Perdas no enrolamento,	$[W]$
$R$	Resistência dos enrolamentos,	$[\Omega]$
$I$	Corrente nos enrolamentos,	$[A]$
$N_i$	Número de espiras do enrolamento $i$ ,	$[e]$
$J$	Densidade da corrente,	$[A/m^2]$
$A_i$	Seção do condutor dos enrolamentos referente à fase $i$ ,	$[m^2]$
$K_u$	Fator de utilização;	
$\rho$	Resistividade do condutor do enrolamento,	$[\Omega.m]$
$V_e$	Volume do enrolamento,	$[m^3]$
$P_{Tcp}$	Perda total por efeito de corrente parasitas,	$[W]$
$P_{Cpe}$	Perda por corrente parasita nos enrolamentos,	$[W]$
$P_{Cpo}$	Perda por corrente parasita em outras partes estruturais,	$[W]$

$P_{TL}$	Perda total em carga no transformador,	[W]
$I^2R$	Perda por efeito Joule,	[W]
$P_{Tmc}$	Perda total medida em carga,	[W]
$P_{H1}$	Perdas por histerese para frequência fundamental,	[W]
$\lambda$	Constante do material no núcleo;	
$f$	Frequência de alimentação da rede,	[Hz]
$V_1$	Tensão eficaz da fundamental,	[V]
$S$	Área da seção transversal do núcleo,	[m <sup>2</sup> ]
$\omega$	Velocidade angular,	[rad/s]
$R'_W$	Perdas ôhmica de temperatura de referência $\theta'$ ,	[W]
$R_W$	Perdas ôhmica de temperatura inicial $\theta$ ,	[W]
$W'_C$	Potência dissipada em forma de calor através do material isolante,	[W/6,45cm <sup>2</sup> ]
$A_d$	Espessura do material isolante,	[mm]
$\Delta\theta$	Diferença de temperatura entre duas superfícies em contato,	[°C]
$R_t$	Resistividade térmica do material isolante,	[m.°C/W]
$\Delta\theta_N$	é a elevação de temperatura da extremidade a qualquer ponto da lâmina,	[°C]
$S_E$	Fator de espaço (unidade para superfície sólida);	
$W_{Ln}$	Espessura das lâminas do núcleo,	[mm]
$X_d$	Distância da extremidade a qualquer ponto da lâmina,	[mm]
$\Delta\theta_H$	Elevação de temperatura dos enrolamentos sobre o óleo,	[°C]
$d_c$	Diâmetro do condutor,	[mm]
$\rho_0$	Densidade do óleo,	[kg/m <sup>3</sup> ]
$g$	Aceleração da gravidade,	[m/s <sup>2</sup> ]
$\beta_0$	Coefficiente de expansão térmica do óleo,	[1/°C]
$C_\rho$	Calor específico do óleo	[W/(kg.°C)]
$v_0$	Viscosidade do óleo,	[kg/(h.m)]

## **LISTA DE ABREVIATURAS**

ABNT – Associação Brasileira Normas Técnicas

NBR – Norma Brasileira Regulamentadora

UTFPR – Universidade Tecnológica Federal do Paraná

TC – Transformador de Corrente

TP – Transformador de Potencia

TRAFO - Transformador

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO .....	13
1.1 Contexto sobre Transformadores .....	13
1.2 Contexto sobre MatLab e SolidWorks .....	15
1.3 Justificativa .....	16
1.4 Objetivos .....	16
1.4.1 Objetivos Geral .....	16
1.4.2 Objetivo Específico .....	16
2 ESTRUTURA DE PESQUISA E FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	18
2.1 Transferência de Calor e Termodinâmica .....	18
2.1.1 Temperatura .....	18
2.1.2 Transferência de Calor .....	18
2.1.2.1 Condução .....	19
2.1.2.2 Convecção .....	20
2.1.2.3 Radiação .....	21
2.1.2.4 Convecção Natural .....	22
2.1.3 Resistência Térmica .....	22
2.1.4 Condições de Contato .....	24
2.2 Transformadores Elétricos .....	25
2.2.1 Tipos e Utilização do Transformador Elétrico .....	25
2.2.2 Princípio de Funcionamento dos Transformadores .....	26
2.2.2.1 Perdas nos Transformadores .....	27
2.2.2.1.1 Perdas nos Enrolamentos .....	28
2.2.2.1.2 Perdas por Efeitos Foucault (corrente parasita) .....	29
2.2.2.1.2.1 Perdas por Efeito de Corrente Parasita em outras Partes Estruturais ....	29
2.2.2.1.3 Perdas no Núcleo ou no Ferro .....	31
2.3 Dissipação de Calor nos Transformadores .....	32
2.3.1 Efeito da Temperatura Ambiente no Carregamento dos Transformadores .....	33
2.3.2 Efeito da Dissipação de Calor no Carregamento dos Transformadores .....	34
2.3.3 Transferência de Calor por Condução na Isolação Interna do Transformador	34
2.3.4 Transferência de Calor por Condução no Ferro do Transformador (Núcleo) .....	35
2.3.5 Transferência de Calor por Convecção no Topo do Óleo .....	36

3 METODOLOGIA .....	38
3.1 Características dos Materiais Utilizados .....	38
3.2 Análise do Circuito Térmico .....	41
3.3 Análise da Série de Fourier .....	42
3.4 Procedimentos Simulados .....	43
3.4.1 Modelagem do Transformador de Distribuição .....	43
3.4.1.1 Geração de Malha - Malha Computacional .....	44
3.4.1.2 Aplicação do Fluxo de Calor .....	45
3.4.2 Implementação do Código .....	47
4 ANÁLISE DOS RESULTADOS .....	49
4.1 Resultado da Modelagem 3D .....	49
4.2 Resultado da Implementação .....	52
4.3 Considerações Finais .....	55
5 CONCLUSÃO .....	56
6 REFERÊNCIAS .....	57

## 1. INTRODUÇÃO

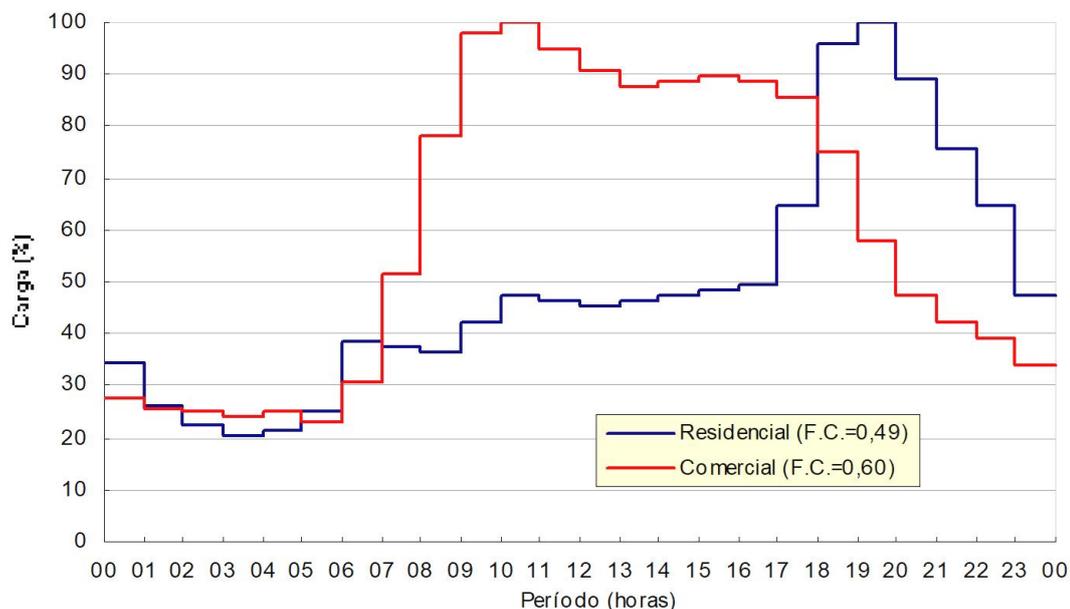
### 1.1. Contexto sobre Transformadores

Os transformadores representam a maior parte do investimento de capital em transmissão de energia das subestações de distribuição, além disso, há paralisação dos transformadores pode causar perdas milionárias às concessionárias de energia ou empresas que instalem esses equipamentos. Para garantir o funcionamento normal do transformador e não reduzir a vida útil do transformador, a manutenção preventiva contínua deve ser realizada no equipamento para investigar possíveis falhas futuras, a fim de sempre melhorar sua vida útil e eficiência (CAVALLI, 2013).

A vida técnica de um transformador depende de sua eficiência, da carga aplicada e da temperatura do ambiente de operação. Sua vida útil econômica depende de sua vida útil de serviço técnico, da energia fornecida e do preço de compra. A temperatura do ponto mais quente do enrolamento é o fator mais importante relacionado à perda de vida útil do equipamento. Portanto, quanto maior o calor transferido do transformador para o meio ambiente, maior será a capacidade física do transformador de suportar uma certa sobrecarga e menor será sua taxa de envelhecimento. Portanto, o processo usado para a dissipação de calor do transformador é um fator importante na definição da distribuição do calor do transformador. A vida útil estimada de serviço técnico de um transformador operando sob carga nominal é de 20 anos, mas quando a carga no transformador é menor que a carga nominal, sua vida útil de serviço técnico excede 20 anos, e sob sobrecarga, sua vida útil de serviço técnico é inferior a 20 anos (MEDEIROS, 2016).

No que se diz respeito ao funcionamento de um transformador de distribuição, as cargas tendem a se repetir diariamente, obtendo um determinado diagrama de cargas variáveis, mas que apresentam uma determinada periodicidade, conforme ilustrado na Figura 1 a seguir (MEDEIROS, 2016).

**Figura 1:** Ciclos de cargas típico de um transformador de distribuição COPEL.

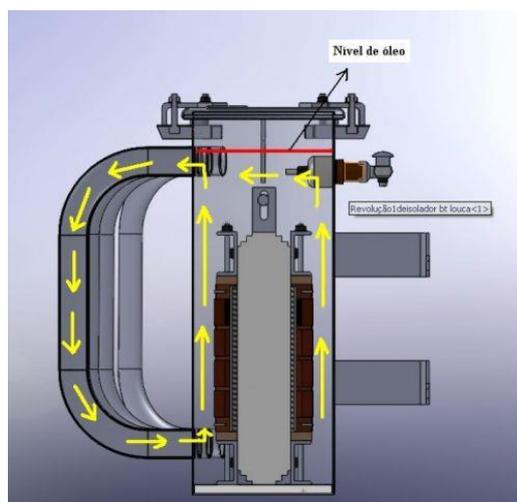


**Fonte:** (MEDEIROS, 2016).

A perda no transformador está relacionada às suas características estruturais. A perda de energia do transformador é basicamente dividida em perda de ferro e perda de cobre. A perda de ferro é causada pela histerese e pela corrente parasita que circula no núcleo magnético, e essas correntes não mudam com a carga. A perda de histerese inclui a energia consumida para magnetizar e desmagnetizar o núcleo. A perda de corrente parasita é a corrente induzida no núcleo do transformador pela alternância do fluxo magnético que passa pelo núcleo do transformador. Finalmente, a perda de cobre é a perda resistiva que ocorre nos enrolamentos primário e secundário do núcleo do transformador (MEDEIROS, 2016).

Todo esse calor gerado é refrigerado pelo óleo mineral/vegetal o qual todo o núcleo do transformador é submerso, sendo assim este óleo aliado ao aquecimento, acaba gerando um fluxo de convecção dentro do transformador, onde o óleo acaba esquentando, ficando menos denso e sobe. Após passar pelos radiadores ele resfria, aumentando a sua densidade, e assim se mantém a refrigeração do transformador. Sabe-se também que quanto maior for a viscosidade do óleo menos será a quantidade de calor dissipada do enrolamento. Esse ciclo de refrigeração interna do transformador, pode ser visto e analisado na Figura 2 a diante. (MEDEIROS, 2016).

**Figura 2:** Linha de fluxo do óleo para refrigeração do transformador.



Fonte: (SIGMA, s/data).

## 1.2. Contexto sobre MatLab e SolidWorks

MatLab é uma aplicação informática criada pela empresa Norte-Americana *The Mathworks, Inc.* Este programa, apesar de denominar-se MatLab, o que pode deixar a ideia ao utilizador que se trata de um programa apenas para as ciências das Matemáticas, vai muito além desse ramo. Trata-se de fato de uma aplicação extremamente útil em qualquer área onde tenhamos de trabalhar com problemas.

A grande vantagem do MatLab é sem dúvidas a sua facilidade de operações, as suas quase ilimitadas funções e aplicações e a possibilidade de operar com os mais variados tipos de linguagem.

Este sistema permite a resolução de muitos problemas numéricos em apenas uma fração do tempo que gastará para escrever um programa semelhante em outras linguagens. Além disso, as soluções dos problemas são expressas no MatLab quase exatamente como elas são escritas matematicamente.

O SolidWorks baseia-se em computação paramétrica, criando formas tridimensionais a partir de operações geométricas elementares. No ambiente do programa, a criação de um sólido ou superfície tipicamente começa com a definição de um sketch 2D que depois transformado através de uma operação num modelo tridimensional. O SolidWorks dispõe de um amplo leque de funcionalidade, inclusive funções específicas para chapa metálicas, construção soldadas, moldes, trações, análise térmicas entre outros.

### **1.3. Justificativa**

De acordo com as estimativas atuais, no Brasil, cerca de 15% da eletricidade é perdida desde a geração de energia, e o sistema de distribuição assumiu 70% dessas perdas. O principal equipamento desse departamento é o transformador de distribuição, que é responsável por adaptar o nível de tensão da rede primária à demanda de consumo e é amplamente utilizado em todo o sistema (MEDEIROS, 2016).

O principal incentivo para a realização deste trabalho se deve a dificuldade de analisar onde se localiza as principais perdas nos transformadores de distribuição. Com o aumento da demanda energética, deve-se aplicar novos conceitos para analisar os tipos de perdas decorrentes nesses equipamentos, para facilitar e agilizar os cálculos e aplicações de projetos.

### **1.4. Objetivos**

#### **1.4.1. Objetivos Geral**

Analisar a transferência de calor em um transformador de distribuição e suas perdas por aquecimento, na parte traseira do tanque (não aletada) do equipamento. Utilizando os softwares SolidWorks para projetar o transformador em 3D e aplicar fluxo térmico na estrutura e o MatLab para fazer a modelagem gráfica térmica utilizando série de Fourier.

#### **1.4.2. Objetivo Específico**

- Realizar uma abordagem teórica sobre transferência de calor (termodinâmica);
- Efetuar uma abordagem teórica sobre transformadores;
- Estabelecer os equacionamentos das perdas nos transformadores por termodinâmica;
- Elaborar o projeto 3D da estrutura do transformador;
- Fragmentar e especificar a peça do transformador a ser estudada;
- Estruturar o estudo da Série de Fourier;

- Fazer análise do carregamento térmico na estrutura do projeto;
- Comparar os resultados obtidos entre os dois softwares.

## **2. ESTRUTURA DE PESQUISA E FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

### **2.1 Transferência de Calor e Termodinâmica**

O condicionamento do ambiente e, portanto, o resfriamento dos objetos nele contidos e do próprio ambiente, requer a remoção do calor e dos objetos nele contidos. O calor é uma forma de energia e não pode ser destruído. Quando um objeto esfria, transfere calor de um corpo mais quente para outro que se encontra mais frio (RABER, 2012).

De um modo mais simplório, transferência de calor pode ser compreendida como “energia térmica em trânsito devido a uma diferença de temperaturas no espaço” (INCROPERA, 2008).

Para trabalhar nesta área, é necessário ter bons conhecimentos de transferência de calor e termodinâmica, por isso é necessário rever os principais conceitos.

#### **2.1.1. Temperatura**

A temperatura é uma propriedade termodinâmica. Ele representa o estado de alta temperatura de uma substância, que gera calor enquanto a temperatura de outra diminui. As escalas principais para medir a temperatura são os graus Celsius e Kelvin (PRASS, 2013).

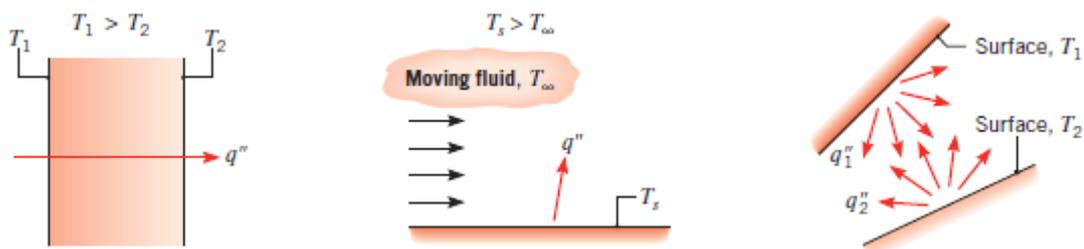
A escala Celsius tem como referência o ponto de solidificação e de ebulição da água no nível do mar, sendo 0 [°C] e 100 [°C] respectivamente, a 1 atmosfera de pressão. A escala Kelvin, também conhecida como temperatura absoluta têm como referência o zero absoluto. Este valor convertido para Celsius é de  $-273,15$  [°C] (RABER, 2012).

#### **2.1.2. Transferência de Calor**

A transferência de calor é um fenômeno que ocorre quando uma substância, como uma alta temperatura, transfere calor para uma substância com uma temperatura mais baixa. O calor pode ocorrer por condução, radiação ou convecção,

esses três processos dependem da temperatura e dos objetos envolvidos (RABER, 2012).

**Figura 3:** Modos de transferência de calor: Condução, Convecção e Radiação.



(a) Condução através de um sólido ou fluido estacionário.

(b) Convecção de uma superfície para um fluido em movimento.

(c) Troca líquida de calor por radiação entre duas superfícies.

Fonte: (INCROPERA, 2008)

### 2.1.2.1. Condução

Neste caso, o calor se difundirá através do "condutor", ou seja, mesmo que não esteja em contato direto com a fonte de calor, se houver condução de calor em outro corpo ou em outra parte do mesmo corpo, um corpo ainda pode modificar sua energia térmica (INCROPERA, 2008).

O calor é transferido de uma molécula para outra na em um sólido. O calor transferido é proporcional à área da superfície e inversamente proporcional ao comprimento. Com forme mostrado na Equação (1).

A condutividade térmica é a principal característica que afeta a condução de calor. Está diretamente relacionado à estrutura molecular dos sólidos, quanto mais compacta a estrutura, mais forte é a condutividade térmica (RABER, 2012).

$$q_{cond} = -kA \frac{\Delta T}{L} \quad (1)$$

Onde:

$q_{cond}$  é o calor transferido, [W];  
 $k$  é a condutividade térmica, [W/m.K];  
 $A$  é a área da superfície, [m<sup>2</sup>];

$\Delta T$  é a diferença da temperatura, [°K] ou [°C];  
 $L$  é o comprimento, [m].

### 2.1.2.2. Convecção

A transferência de calor por convecção depende do fluido em contato com superfícies sólidas e líquidas ou gasosas. O fluido está em movimento e envolve os efeitos combinados do movimento do fluido. O coeficiente de transferência de calor convectivo depende da velocidade do fluido e das características geométricas da superfície (RABER, 2012).

Para quantificar o fluxo de calor transferido, use a Equação (2).

$$q''_{conv} = h(T_s - T_\infty) \quad (2)$$

Outra forma de aplicar o fluxo de calor é aumentar a área de superfície usada de acordo com a Equação (3) e obter a taxa de transferência de calor por convecção.

$$q_{conv} = hA(T_s - T_\infty) \quad (3)$$

Onde:

$q''_{conv}$  é o fluxo de calor por convecção, [W/m<sup>2</sup>];  
 $q_{conv}$  é a taxa de calor por convecção, [W] ou [J/s];  
 $h$  é o coeficiente de transferência de calor por convecção, [W/m<sup>2</sup> K];  
 $A$  é a área da superfície, [m<sup>2</sup>];  
 $T_s$  é a temperatura da superfície, [°K] ou [°C];  
 $T_\infty$  é a temperatura da vizinhança, [°K] ou [°C].

### 2.1.2.3. Radiação

É a propagação de energia térmica que não necessita de um meio material para acontecer, pois o calor se propaga através de ondas eletromagnéticas (INCROPERA, 2008).

O resultado do movimento dos fótons de uma superfície para outra é a transferência de calor por meio da radiação. Quando esses fótons atingem a superfície, eles podem ser absorvidos, refletidos ou transmitidos (INCROPERA, 2008).

A energia irradiada pela superfície é definida como a potência de emissão da superfície, que é proporcional à quarta potência absoluta da temperatura. A radiação irradiada por uma superfície é definida em termos do seu poder emissivo, sendo influenciada principalmente pelo posicionamento geométrico das superfícies e as características ópticas como emissividade, transmissividade e refletividade (RABER, 2012).

A Equação (4) fornece a forma de cálculo da transferência de calor entre uma pequena superfície e uma grande vizinhança por meio da radiação.

$$q''_{rad} = \varepsilon\sigma(T_S^4 - T_{viz}^4) \quad (4)$$

Em muitas aplicações, é conveniente expressar a troca líquida de calor da radiação na forma da Equação (5).

$$q''_{rad} = h_r(T_s - T_{viz}) \quad (5)$$

Portanto, o coeficiente de transferência de calor causado pela radiação  $h_r$  é expresso pela Equação (6).

$$h_r = \varepsilon\sigma(T_s + T_{viz})(T_s^4 + T_{viz}^4) \quad (6)$$

A taxa total de transferência de calor entre a superfície e a vizinhança é representada pela Equação (7).

$$q_{rad} = hA(T_s - T_\infty) + \varepsilon A\sigma(T_s^4 - T_{viz}^4) \quad (7)$$

Onde:

$q''_{rad}$	é o fluxo de calor por radiação,	$[W/m^2]$ ;
$q_{rad}$	é a taxa de calor por radiação,	$[W]$ ou $[J/s]$ ;
$h$	é o coeficiente de transferência de calor por convecção,	$[W/m^2 K]$ ;
$A$	é a área da superfície,	$[m^2]$ ;
$T_s$	é a temperatura da superfície,	$[^\circ K]$ ou $[^\circ C]$ ;
$T_\infty$ e $T_{viz}$	é a temperatura da vizinhança,	$[^\circ K]$ ou $[^\circ C]$ ;
$\varepsilon$	é a emissividade ( $0 < \varepsilon < 1$ )	
$\sigma$	é a constante de Stefan-Boltzmann.	$[W/(m^2 \cdot K^4)]$ .

$\sigma = 5,67 \times 10^{-8}$

#### 2.1.2.4. Convecção Natural

Na convecção natural, o movimento do fluido é devido às forças de empuxo no seu interior, enquanto na convecção forçada o movimento é externamente. O empuxo é devido à presença combinada de um gradiente de massa específica no fluido e de uma força de corpo que é proporcional à massa específica. Na prática, a força de corpo é geralmente gravitacional devido à presença de um gradiente de temperatura (RABER, 2012).

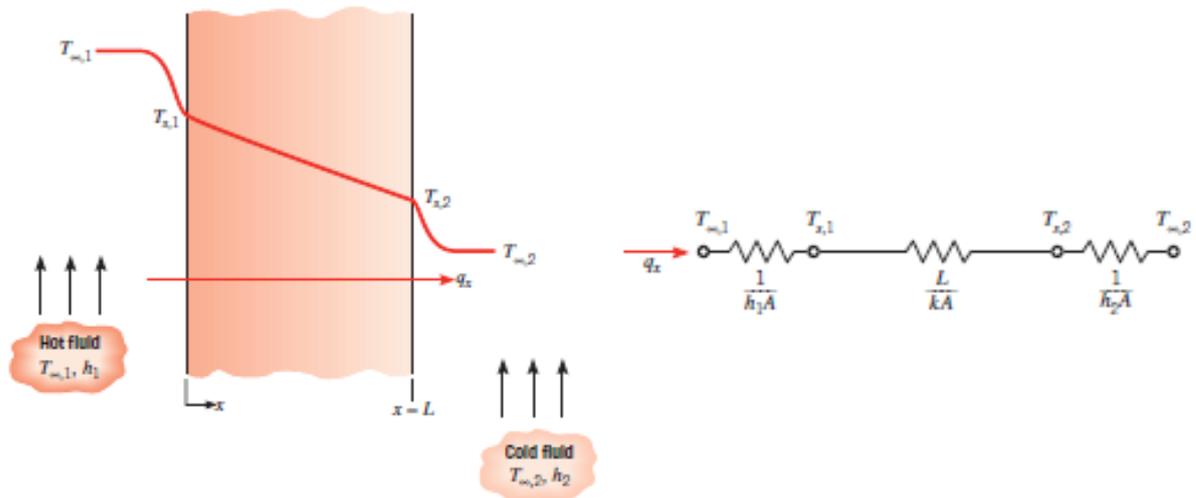
#### 2.1.3. Resistência Térmica

A resistência térmica de um objeto é a sua resistência à transferência de calor por condução, convecção e radiação. A equação de cálculo da condutividade é linear em termos de condutividade, área e diferença de temperatura, mas a temperatura irradiada não é linear. Portanto, considerando que a mudança absoluta de temperatura não é significativa, a equação de transferência de calor pode ser linearizada por radiação (PRASS, 2013).

Da mesma forma que a resistência elétrica está associada à condução elétrica, a resistência térmica pode estar associada à condução térmica. Definindo

resistência como a razão entre um potencial motriz e a correspondente taxa de transferência (PRASS, 2013).

**Figura 4:** Transferência de Calor Através de uma Parede Plana.



(a) Distribuição de Temperatura

(b) Circuito Térmico Equivalente

Fonte: (INCROPERA, 2008).

A representação do circuito fornece uma ferramenta útil para conceituar e quantificar problemas de transferência de calor. A Equação (8) mostra o circuito térmico equivalente de uma parede plana com condições de convecção em ambas as superfícies.

$$q_x = \frac{T_{\infty,1} - T_{S,1}}{\frac{1}{h_1 A}} = \frac{T_{S,1} - T_{S,2}}{\frac{L}{k A}} = \frac{T_{\infty,1} - T_{S,1}}{\frac{1}{h_1 A}} \quad (8)$$

Em termos da diferença de temperatura global,  $T_{\infty,1} - T_{\infty,2}$ , e da resistência térmica total,  $R_{tot}$ , a taxa de transferência de calor também pode ser expressa de acordo a Equação (9).

$$q_x = \frac{T_{\infty,1} - T_{\infty,2}}{R_{tot}} \quad (9)$$

Uma vez que a resistência condutiva e a resistência de convecção são conectadas em série e podem ser adicionadas, devemos:

$$R_{tot} = \frac{1}{h_1 A} + \frac{L}{kA} + \frac{1}{h_2 A} \quad (10)$$

Onde:

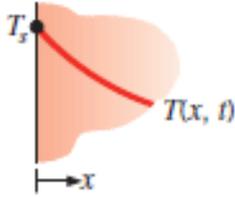
$R_{tot}$	Resistência térmica total	$[\Omega]$ ;
$q_x$	é a taxa de calor por radiação,	$[W]$ ou $[J/s]$ ;
$h$	É o coeficiente de transferência de calor por convecção,	$[W/m^2 K]$ ;
$k$	é a condutividade térmica,	$[W/m.K]$ ;
$A$	é a área da superfície,	$[m^2]$ ;
$T_S$	é a temperatura da superfície,	$[^\circ K]$ ou $[^\circ C]$ ;
$T_\infty$	é a temperatura da vizinhança,	$[^\circ K]$ ou $[^\circ C]$ .

#### 2.1.4. Condições de Contato

A determinação de distribuição da temperatura em um meio depende das condições físicas existentes nas fronteiras do meio, da variação da situação no tempo e das condições existentes no meio em algum instante inicial. Como a equação do calor é de segunda ordem em relação às coordenadas espaciais, duas condições de contorno devem ser fornecidas para cada coordenada espacial necessária para descrever o sistema. Como a equação é de primeira ordem, em relação ao tempo, apenas a condição inicial deve ser observada. A Figura 5 apresenta os três tipos de condições de contorno normalmente encontrados. Estas condições são especificadas na superfície  $x = 0$ , para um sistema unidimensional (INCROPERA, 2008).

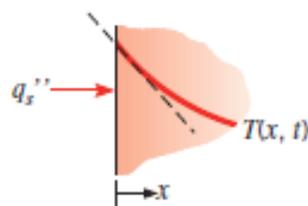
**Figura 5:** Condições de contorno da equação da difusão de calor na superfície.

(i) Temperatura da Superfície Constante.



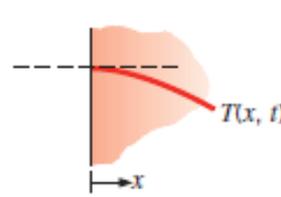
$$T(0, t) = T_s \quad (11)$$

(ii) Temperatura da Superfície Constante.



(a) Fluxo Térmico Diferente de Zero.

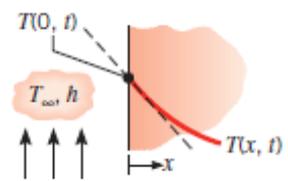
$$-k \frac{dT}{dx} \Big|_{x=0} = q'' \quad (12)$$



(b) Superfície Isolada Termicamente

$$\frac{dT}{dx} \Big|_{x=0} = 0 \quad (13)$$

(iii) Condição de Convecção Superfície



$$-k \frac{dT}{dx} \Big|_{x=0} \quad (14)$$

$$= h[T_s - T(0, T)]$$

Fonte: (INCROPERA, 2008).

## 2.2 Transformadores Elétricos

Os transformadores são máquinas elétricas destinado a transmitir energia elétrica de um circuito para outro, para converter tensão, corrente e modificar os valores de impedância elétricas do circuito. Eles não são eletricamente acoplados, mas fortemente acoplados magneticamente. É um dispositivo de corrente alternada baseado em princípios eletromagnéticos, Lei de Faraday e Lei de Lenz. Independentemente do tipo, todos os transformadores têm o mesmo princípio de funcionamento (MONIZ, 2007).

Os transformadores são os equipamentos mais importante dentro de um contexto de um sistema elétrico, usados para transmitir energia elétrica em alta tensão. Portanto, é utilizado em usinas de geração para elevar a tensão em nível de transmissão, e utilizado em subestações de cidades ou subestações de grandes consumidores para reduzir a tensão ao nível de distribuição (MONIZ, 2007).

### 2.2.1. Tipos e Utilizações do Transformador Elétrico

Apesar de terem funções parecidas, há vários tipos de transformadores elétricos que são utilizados nos dias de hoje, sendo que eles são classificados levando

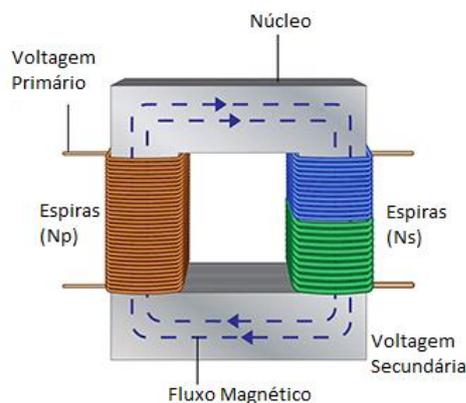
em conta uma série de parâmetros, tais como finalidade, tipo, material do núcleo, quanto ao número de fases, ao tipo de isolamento utilizada, local de uso, etc.

### **2.2.2. Princípio de Funcionamento dos Transformadores**

O princípio básico de funcionamento de um transformador se baseia nos fenômenos de indutância mutua entre dois circuitos eletricamente isolados e magneticamente acoplados. Quando um circuito é submetido a um campo variável, aparece nele uma corrente elétrica cuja intensidade é proporcional às variações do fluxo magnético. Para que a ligação magnética entre os dois circuitos seja a melhor possível, é necessário que os enrolamentos estejam envolvidos sobre um núcleo magnético de pequena relutância (resistência à passagem de fluxo magnético). Para evitar perdas no ferro, fatia-se o núcleo em finas lâminas de espessuras entre 0,1 e 0,5 [mm]. As lâminas que compõe o núcleo são isoladas uma das outras (FINOCCHIO, 2010).

Conforme mostrado na Figura 6, o transformador mais simples consiste em dois enrolamentos (primário e secundário), que geralmente contêm os braços de uma estrutura metálica (núcleo de ferro). Quando uma corrente alternada é aplicada ao lado primário, um campo magnético proporcional à intensidade da corrente e ao número de voltas do enrolamento (o número de voltas do fio ao redor do braço de metal) é gerado. O fluxo magnético que passa pelo metal quase não tem resistência, então a maior parte dele está concentrado no núcleo e atinge o enrolamento secundário com perda mínima. Em seguida, ocorre a indução eletromagnética: neste caso, é gerada uma corrente, que muda de acordo com a relação entre a corrente primária e o número de voltas dos dois enrolamentos.(SIGMA, s/data).

**Figura 6:** Princípio de funcionamento do transformador.



**Fonte:** (DANIELLI, s/data).

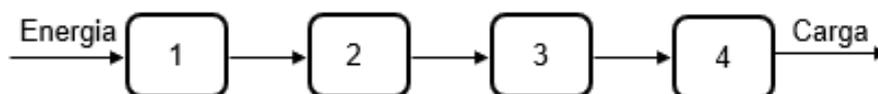
### 2.2.2.1. Perdas nos Transformadores

O transformador possui três componentes indispensáveis à sua operação: enrolamento primário, enrolamento secundário e núcleo, como visto na Figura 6.

Em condições normais de operação, os transformadores apresentam perdas de energia elétrica nesses componentes, que são representados através de elementos de circuitos elétricos (resistência e indutância) formando seu circuito equivalente (MARTIGNONI, 1979).

Seja o seguinte diagrama em blocos representando o fluxo de energia num transformador.

**Figura 7:** Diagrama de fluxo de energia de um transformador.



**Fonte:** (GOEDEL, 2013) Adaptado.

- **Bloco 1:** Representa as perdas no cobre e a dispersão no fluxo do enrolamento.
- **Bloco 2:** Modela as perdas ao núcleo de ferro e a energia armazenada pela unidade transformadora na forma de campo magnético.
- **Bloco 3:** Este bloco representa o trafo ideal, transferindo energia do primário para o secundário.
- **Bloco 4:** Simula as perdas no cobre e as dispersões do fluxo do enrolamento secundário.

### 2.2.2.1.1. Perdas nos Enrolamentos

A perda no enrolamento é a perda causada pelo aquecimento da resistência causado por fios de cobre ou alumínio nos enrolamentos primário e secundário do transformador. São perdas na forma de calor e não podem ser evitadas. Onde uma corrente alternada ao percorrer o condutor dos enrolamentos produz uma perda adicional à perda por efeito de Joule. A perda total nos enrolamentos é igual à soma das perdas por efeito Joule com as perdas por correntes parasitas nos enrolamentos (MONIZ, 2007).

De acordo com a Equação (17), essa perda é proporcional ao quadrado da corrente que flui pelo enrolamento e proporcional à resistência.

$$P_{enr} = \sum R \cdot I^2 \quad (15)$$

então,

$$P_{enr} = \rho \sum_{i=1}^n \frac{N_i \cdot L \cdot (J \cdot A_i)^2}{A_i} \quad (16)$$

portanto,

$$P_{enr} = \rho \cdot V_e \cdot K_u \cdot J^2 \quad (17)$$

Onde:

$P_{enr}$	é a perdas no enrolamento,	[W];
$R$	é a resistência dos enrolamentos,	[Ω];
$I$	é a corrente nos enrolamentos,	[A];
$N_i$	é o número de espiras do enrolamento $i$ ,	[e];
$J$	é a densidade da corrente,	[A/m <sup>2</sup> ];
$A_i$	é a seção do condutor dos enrolamentos referente à fase $i$ ,	[m <sup>2</sup> ];
$K_u$	é o fator de utilização;	

$\rho$	É a resistividade do condutor do enrolamento,	$[\Omega \cdot m]$ ;
$V_e$	É o volume do enrolamento,	$[m^3]$ ;
$L$	É o comprimento de espiras do enrolamento,	$[m]$ .

#### 2.2.2.1.2. Perdas por Efeitos Foucault (corrente parasita)

Quando corrente alternada passa pelos enrolamentos do transformador, cada condutor do enrolamento é cortado pelo campo eletromagnético alternado e a intensidade do campo eletromagnético alternado é proporcional à magnitude da corrente. Portanto, cada condutor metálico relacionado ao fluxo magnético está sujeito à tensão induzida, que é responsável pela corrente parasita, e, portanto, devido à perda causada pela ação da corrente no enrolamento do transformador, a temperatura no enrolamento aumenta (MONIZ, 2007).

O fluxo disperso no enrolamento flui axialmente através da bobina e então radialmente através do enrolamento. Esses fluxos magnéticos irão gerar correntes parasitas mais fortes no início e no final desses enrolamentos, gerando assim mais calor nesta área. Portanto, pode-se constatar que a região do interior do enrolamento de baixa tensão possui densidade de fluxo radial mais elevada devido a maior permeabilidade do núcleo que constitui o trajeto de retorno destes fluxos magnéticos (MONIZ, 2007).

Para concentrar o fluxo na área entre o enrolamento de alta tensão e o enrolamento de baixa tensão, é necessário aproximar esses enrolamentos para aumentar o acoplamento entre os dois e reduzir a reatância dispersiva. Nesse caso, o número de linhas aerodinâmicas no espaço pode ser reduzido. Comparado com o enrolamento de alta tensão, o enrolamento interno de baixa tensão do transformador é o enrolamento com maior perda devido às correntes parasitas, porque o fluxo magnético espalhado busca um caminho com um valor de resistência magnética inferior do núcleo. (MONIZ, 2007).

##### 2.2.2.1.2.1. Perdas por Efeito de Corrente Parasita em outras Partes Estruturais

A perda em outras partes estruturais do transformador também é proporcional ao quadrado da carga, mas não proporcional ao quadrado da frequência. Portanto, o

aumento da temperatura devido a essas partes do transformador é menor do que o aumento da temperatura devido às correntes parasitas nos enrolamentos. A perda total dissipada no transformador devido ao efeito da corrente parasita pode ser determinada pela Equação (18) (MONIZ, 2007).

$$P_{T_{cp}} = P_{C_{pe}} + P_{C_{po}} \quad (18)$$

Onde:

- $P_{T_{cp}}$  é a perda total por efeito de corrente parasitas, [W];  
 $P_{C_{pe}}$  é a perda por corrente parasita nos enrolamentos, [W];  
 $P_{C_{po}}$  é a perda por corrente parasita em outras partes estruturais, [W].

A perda total nos transformadores pode ser determinada através da Equação (19) (MONIZ, 2007).

$$P_{TL} = I^2R + P_{C_{pe}} + P_{C_{po}} \quad (19)$$

Onde:

- $P_{TL}$  é a perda total em carga no transformador, [W];  
 $I^2R$  é a perda por efeito Joule, [W].

No ensaio, os valores das perdas adicionais dos enrolamentos do transformador e demais partes é obtido pela diferença entre a perda total medida na carga e a perda por efeito Joule através da Equação (20) (MONIZ, 2007).

$$P_{C_{pe}} + P_{C_{po}} = P_{T_{mc}} - I^2R \quad (20)$$

Onde:

- $P_{T_{mc}}$  é a perda total medida em carga, [W].

### 2.2.2.1.3. Perdas no Núcleo ou no Ferro

No processo de magnetização do núcleo magnético, a energia é dissipada devido ao ciclo de histerese, que é denominado perda de histerese. A perda de histerese é a perda relacionada ao loop de histerese, que é descrita pelo material magnético usado para construir o núcleo. O fluxo magnético induz no núcleo uma tensão, que no caso de um trajeto fechado, produz a corrente de Foucault (correntes parasitas) no núcleo do transformador (MONIZ, 2007).

A perda total no núcleo do transformador é causada pela circulação da corrente de excitação no enrolamento primário, a qual se divide em três componentes:

- Uma componente principal em fase com uma tensão induzida que corresponde a potência ativa no núcleo;
- A componente fundamental defasada de 90° da tensão induzida denominada de corrente de magnetização;
- Uma família de harmônicas de ordem ímpares com predominâncias dos harmônicos de ordem de três ciclos (MONIZ, 2007).

As harmônicas geradas pelos usuários aumentarão as perdas do transformador. Como as harmônicas geradas são de ordem ímpar (3, 5, 7, 9, 11, ...), o transformador aquece gradativamente, atenuando sua capacidade de transformação e encurtando sua vida útil. (MONIZ, 2007).

As expressões que fornecem essas perdas com base na tensão da fonte de alimentação do transformador são descritas abaixo pela Equação (21) podendo quantificar a perda associada a este fenômeno:

$$P_{H1} = \lambda \cdot f^2 \cdot \left( \frac{\sqrt{2}}{N \cdot S \cdot \omega} \cdot V_1 \right)^2 \quad (21)$$

Onde:

$P_{H1}$  é a perdas por histerese para frequência fundamental, [W];

$\lambda$  é a constante do material no núcleo;

$f$	é a frequência de alimentação da rede,	[Hz];
$V_1$	é a tensão eficaz da fundamental,	[V];
$S$	é a área da seção transversal do núcleo,	[m <sup>2</sup> ];
$N$	é o número de espiras do enrolamento	[e];
$\omega$	é a velocidade angular,	[rad/s].

### 2.3 Dissipação de Calor nos Transformadores

O transformador de distribuição pode suportar uma carga superior ao seu valor nominal durante um período de tempo, desde que seja compensado por uma carga inferior ao valor nominal durante o período remanescente. O nível de sobrecarga para a condição de carregamento do transformador igual ou superior a 150% da sua carga nominal implica em queda de tensão e geração de calor excessivo no circuito interno do equipamento. Na demanda máxima, dependendo das condições do fator de potência da rede secundária, a queda de tensão pode atingir o valor de 5%. A partir de uma temperatura de 130 [°C], a concentração de oxigênio no óleo isolante começa a diminuir e ocorre uma reação de oxidação no sistema óleo-papel isolante, ou seja, após essa temperatura, forma-se gás no óleo isolante. Mais rápido. Isso pode danificar o equipamento ou fazer com que ele envelheça precocemente (MEDEIROS, 2016).

De acordo com a (NBR, 5440) a temperatura no topo do óleo varia de acordo com o tipo do óleo isolante. Por exemplo para transformadores imerso em óleo mineral isolante, a isolação dos enrolamentos (condutores e isolamento entre camadas) deve ser em papel termo estabilizado compatível com o óleo, podendo trabalhar com limites de temperatura no topo do óleo de 50 [°C] ou 60 [°C], com temperatura média nos enrolamentos de 55[°C] e 65[°C]. 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, podendo operar nos limites de 70 [°C] no topo do óleo, além de 75 [°C] como média e até 95[°C] no *hotspot* (ponto mais quente) dos enrolamentos.

A relação entre as perdas ôhmicas e o valor da temperatura nos enrolamentos do transformador pode ser demonstrada através da Equação (24) de acordo com a (NBR, 5356).

$$R'_w = R_w \cdot \left( \frac{k + \theta'}{k + \theta} \right) \quad (22)$$

Onde:

$R'_w$  é a perdas ôhmica de temperatura de referência  $\theta'$ , [W];  
 $R_w$  é a perdas ôhmica de temperatura inicial  $\theta$ , [W];  
 $k$  é uma constante igual a 234,5 para cobre e 225,0 para alumínio.

Reescrevendo a Equação (22) obtêm-se a Equação (25)

$$\theta' = \frac{R'_w \cdot (k + \theta)'}{R_w} \quad (23)$$

Na Equação (23) pode-se observar que o valor da temperatura de referência aumenta com o aumento da perda ôhmica relativa à temperatura de referência e diminui com a perda ôhmica a temperatura inicial.

### 2.3.1. Efeito da Temperatura Ambiente no Carregamento dos Transformadores

A temperatura ambiente é um fator importante para a determinação da capacidade de carregamento de um transformador, devido à sua parcela na contribuição da elevação da temperatura para qualquer carga. Ao aumentar o valor da temperatura ambiente de 30 [°C] para 40 [°C] aumentará a temperatura na parte superior do óleo e no ponto mais quente do enrolamento, aumentando assim a possibilidade de danos térmicos ao transformador. Para um transformador imerso em óleo e arrefecido a ar, operando em plena carga, a temperatura ambiente pode atingir valor máximo de 40 [°C] e a elevação de temperatura do topo do óleo, sobre o ambiente, é limitada a 55 [°C]. No entanto, uma vez que o transformador não opera continuamente sob carga total e a temperatura ambiente média nem sempre atinge o valor máximo aceitável, a expectativa de vida do transformador pode exceder a expectativa de vida estimada. Na prática, raras vezes a temperatura ambiente máxima aceitável coincide com operação do transformador em plena carga. Mas quando isto acontece durante um longo período, o transformador pode correr o risco de sofrer uma

redução adicional de vida útil. Por essa razão, a temperatura ambiente média diária não deve ultrapassar 30 [°C] e a máxima não deve exceder 40 [°C.] (MONIZ, 2007).

Geralmente, quando a temperatura ambiente ultrapassar 40 [°C], o tempo de trabalho do transformador deve ser encurtado para evitar falha do equipamento ou envelhecimento prematuro. Isso mostra que quando a temperatura ambiente aumenta, a temperatura dentro do transformador também aumenta e, portanto, a capacidade do transformador de suportar sobrecargas diminuirá (MONIZ, 2007).

### 2.3.2. Efeito da Dissipação de Calor no Carregamento dos Transformadores

Ao operar sob carga, o calor dentro do transformador limitará a capacidade de carga do equipamento. Portanto, existem vários processos que podem ser usados para dissipar uma determinada quantidade desse calor para o meio ambiente. Porém, quanto mais calor é dissipado para o ambiente, maior a capacidade do transformador de suportar a carga, e reduzir o risco de danos à máquina (MONIZ, 2007).

A dissipação de calor faz-se pelos processos de condução, de radiação e de convecção.

### 2.3.3. Transferência de Calor por Condução na Isolação Interna do Transformador

De acordo com a Equação (24), a transferência de calor por condução através do material isolante é proporcional à diferença de temperatura entre o isolamento e a parte de contato do transformador, e inversamente proporcional à resistência térmica do material.

$$W'_c = \frac{A_d \cdot \Delta\theta}{L_i \cdot R_t} \quad (24)$$

Onde:

$W'_c$  é a potência dissipada em forma de calor através do material isolante, [W/6,45cm<sup>2</sup>];

$A_d$  é a espessura do material isolante, [mm];

$\Delta\theta$  é a diferença de temperatura entre duas superfícies em contato, [°C];

$R_t$  é a resistividade térmica do material isolante, [m. °C/W].

A Equação (25) mostra que se a resistência térmica do material isolante usado para o isolamento dentro do transformador for alta, a transferência de calor do material será reduzida, o que pode prejudicar a capacidade de carga do transformador. Foi obtida a fórmula (25) da Equação (24) reescritas, que podem analisar diretamente a diferença de temperatura entre duas superfícies de contato com base na potência dissipada e resistividade do material (PRASS, 2013).

$$\Delta\theta = \frac{W'_R \cdot R_t \cdot L_i}{A} \quad (25)$$

A Equação (26) mostra que o alto valor da resistividade do material isolante não promove a dissipação de calor através dele e dele para o ambiente. Pelas Equações (25) e (26), pode-se observar que materiais isolantes com alta resistência térmica dificulta a transferência de calor durante o processo, reduzindo assim a capacidade de carga do equipamento. Por exemplo, se dois transformadores com a mesma capacidade são feitos de materiais isolantes diferentes, o material isolante com menor resistência térmica será menos danificado (MONIZ, 2007).

#### 2.3.4. Transferência de Calor por Condução no Ferro do Transformador (Núcleo)

No caso de geração uniforme de calor no núcleo, a mudança de temperatura ao longo das lâminas do núcleo é representada pela Equação (26) (MONIZ, 2007).

$$\Delta\theta_N = W_{Ln} \cdot R_t \cdot S_E \left( \frac{W_{Ln} \cdot X_d}{2} - \frac{X_d^2}{2} \right) \quad (26)$$

Onde:

$\Delta\theta_N$  é a elevação de temperatura da extremidade a qualquer ponto da lâmina, [°C];

$S_E$	é a o fator de espaço (unidade para superfície sólida);	
$W_{Ln}$	é a espessura das lâminas do núcleo,	[mm];
$X_d$	é a distância da extremidade a qualquer ponto da lâmina,	[mm].

A Equação (26) mostra que quanto maior for a resistividade térmica do material do núcleo, menos de calor é dissipado no topo do óleo por meio de condução de calor e sua capacidade de carga é reduzida em comparação com outros equipamento de mesma capacidade. E usar o núcleo feito com material da melhor qualidade, ou seja, baixa resistência térmica. Nesse caso, a resistência térmica do núcleo do transformador é menor sendo assim é menos provável que opere em condições de sobrecarga, pois a eficiência da transferência de calor através do processo de condução é maior (PRASS, 2013).

### 2.3.5. Transferência de Calor por Convecção no Topo do Óleo

A Equação (27) mostra que o aumento na temperatura do enrolamento sobre o topo do óleo é diretamente proporcional à viscosidade do óleo, à condutividade térmica do óleo e ao diâmetro do enrolamento, é inversamente proporcional à densidade do óleo. Portanto, quanto maior a viscosidade do óleo, menor será a quantidade de calor dissipado calor dissipado nos enrolamentos, de modo que a temperatura no topo do óleo é menor do que a do óleo de menos viscosidade, aumentando a diferença de temperatura entre o ponto mais quente do enrolamento e esse topo do óleo. Ao contrário, quando a densidade do óleo é alta, a transferência do calor é elevada, a temperatura do topo do óleo aumenta e a diferença de temperatura entre o ponto mais quente e o topo do óleo diminui (PRASS, 2013).

$$\Delta\theta_H = \left( \frac{h_c \cdot d_c \cdot v_0 \cdot k_0}{\rho_0^2 \cdot g \cdot \beta_0 \cdot C_p \cdot d_c^3} \right) \quad (27)$$

Onde:

$\Delta\theta_H$	é a elevação de temperatura dos enrolamentos sobre o óleo,	[°C];
$k_0$	é a condutividade térmica do fluido,	[W/m.°C];

$h_c$	é a coeficiente da superfície de transferência de calor,	$[W/m^2 \cdot ^\circ C]$ ;
$d_c$	é o diâmetro do condutor,	$[mm]$ ;
$\rho_0$	é a densidade do óleo,	$[kg/m^3]$ ;
$g$	é a aceleração da gravidade,	$[m/s^2]$ ;
$\beta_0$	é o coeficiente de expansão térmica do óleo,	$[1/^\circ C]$ ;
$C_p$	é o calor específico do óleo	$[W/(kg \cdot ^\circ C)]$ ;
$\nu_0$	é a viscosidade do óleo,	$[kg/(h \cdot m)]$ ;
$h$	é o tempo,	$[hora]$ .

### 3. METODOLOGIA

A metodologia utilizada para a produção deste trabalho apresentado, consiste em efetuar uma modelagem 3D com manuseio do software SolidWorks, buscando resultado de cargas térmicas em simulação. Após a confecção do equipamento é retirado um fragmento da máquina pra estudo, para poder realizar a simulação de cargas térmicas. A parcela analisada é o segmento da traseira do transformador, onde a estrutura não contém nenhum tipo de sistema de refrigeração, sendo um dos pontos mais quentes do equipamento.

Ao finalizar os devidos estudos na modelagem 3D, é efetuado um segundo estudo utilizando software MatLab, onde nessa plataforma será desenvolvida um algoritmo envolvendo Série de Fourier, que será capaz de gerar um gráfico de fluxo térmico em uma placa plana.

Estruturando a linha de pesquisa, é realizado uma busca das características físicas dos materiais utilizado na montagem do tanque de um transformador, contendo também as dimensões exata na confecção deste equipamento. Onde esses dados serão inseridos no SolidWorks, para obter resultados mais condizente com a realidade. Em seguida é feito a análise do circuito térmico, onde esse sistema é a representação da resistividade de cada material utilizado na fabricação do transformador. Porém neste trabalho é utilizado apenas os dados de resistividade do material usado no tanque da máquina.

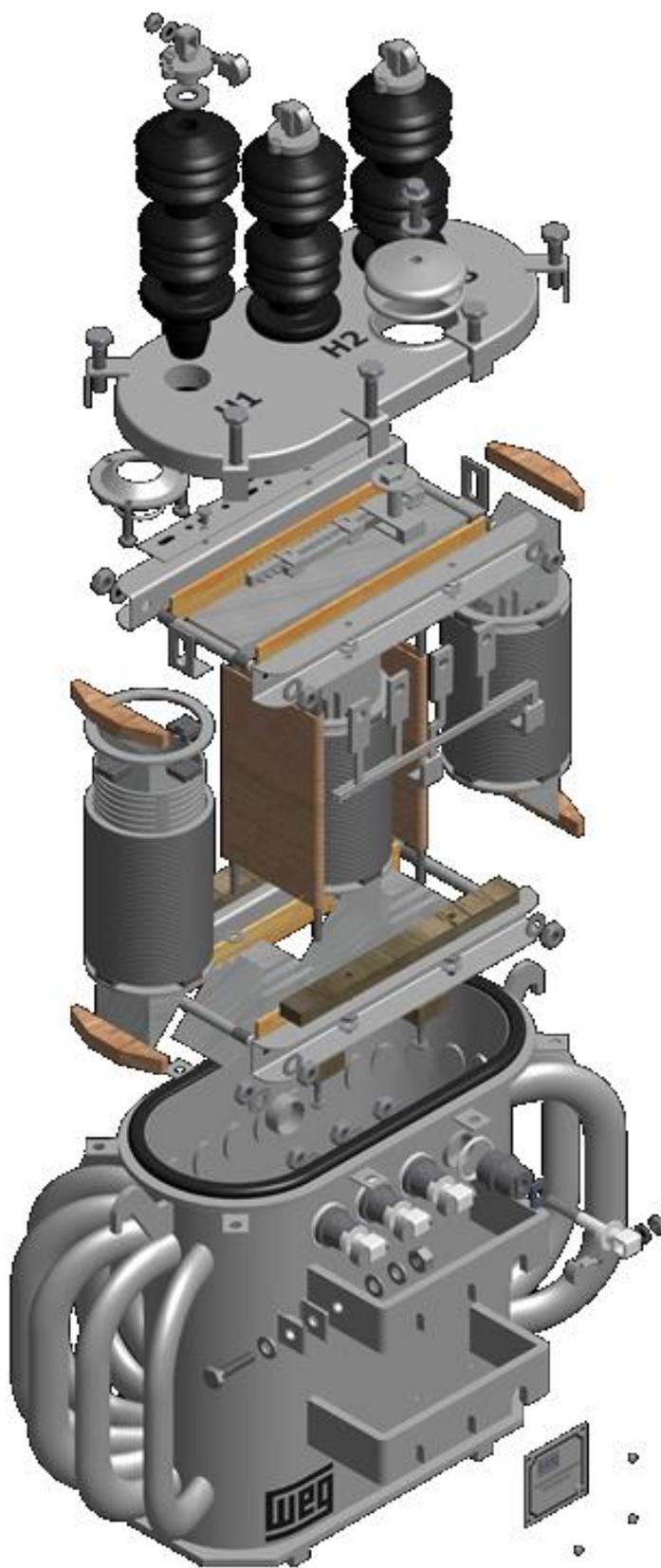
Para efetuar a implementação do código no MatLab, é necessário realizar uma breve abordagem da Série de Fourier, comentando e definindo as equações, sobre as suas particularidades de aplicação envolvendo um problema unidimensional e de secção contínua.

#### 3.1 Características dos Materiais Utilizados

Como referência, foi escolhido para realização deste trabalho, um modelo de transformador trifásico de distribuição a óleo da marca WEG. Onde o equipamento é composto por um núcleo, enrolamentos primários, enrolamentos secundários, óleo isolante e reservatório (tanque).

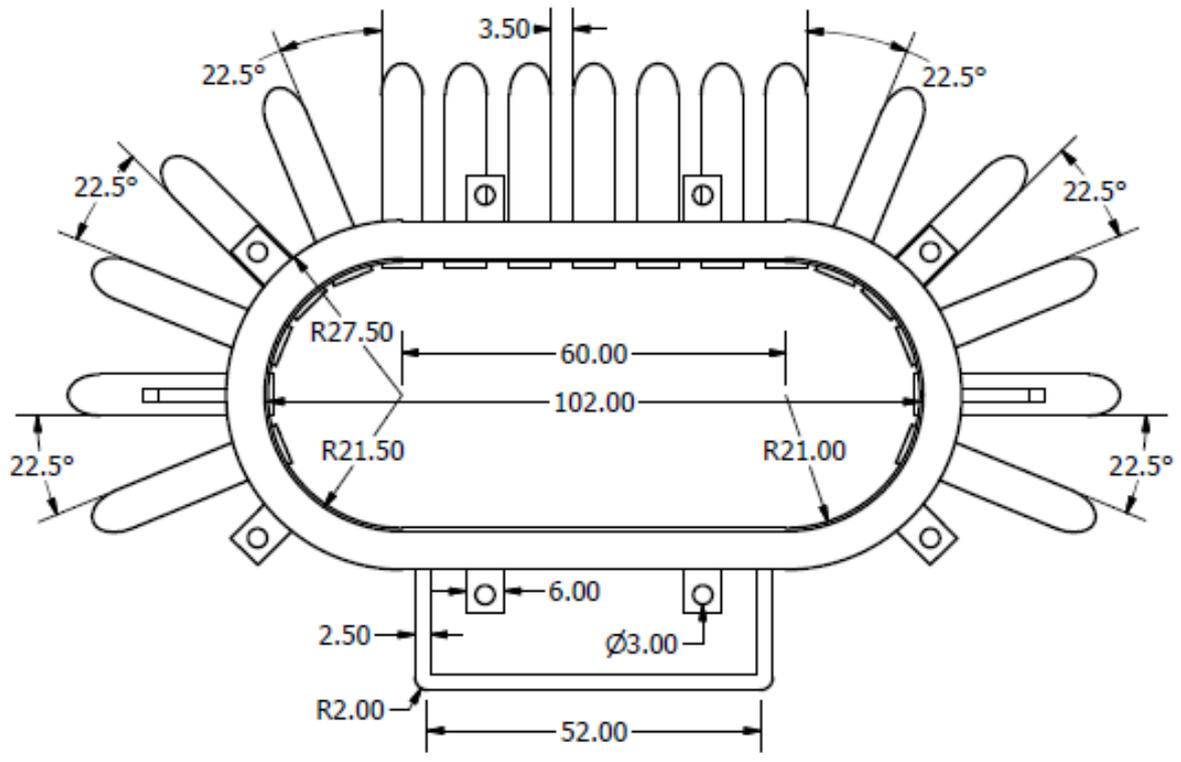
Nas figuras a baixo, podemos visualizar o projeto de sua forma construtiva.

**Figura 8:** Vista Explodida de um Transformador de Distribuição Trifásico.



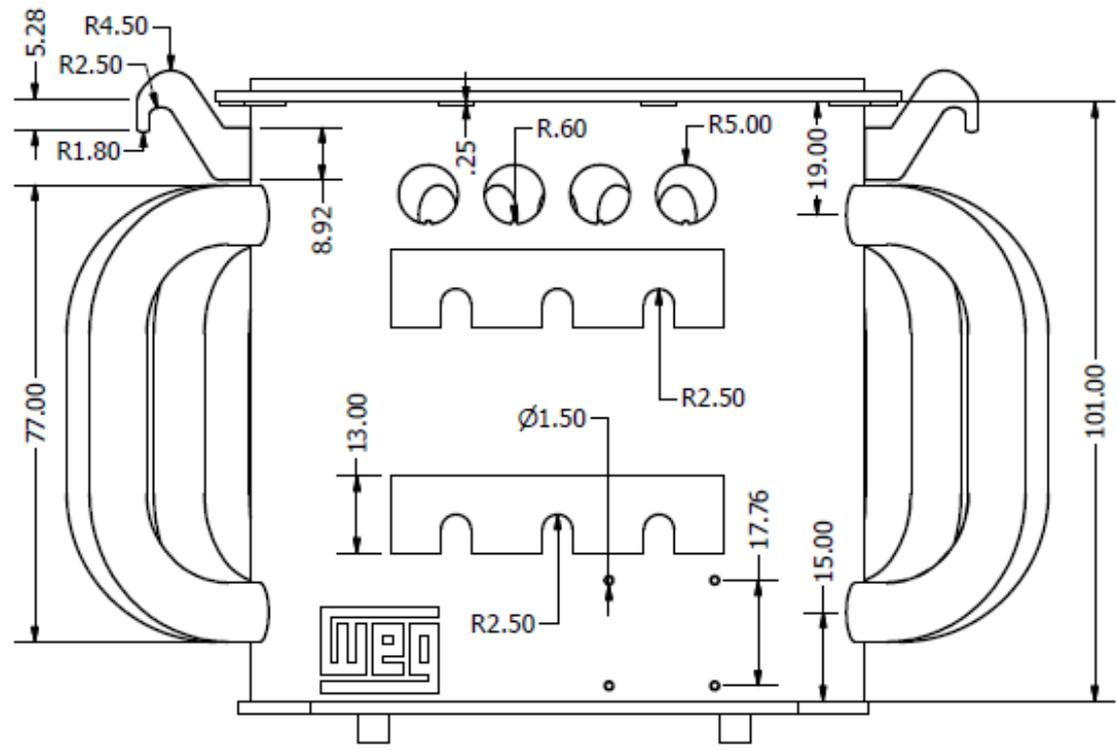
Fonte: (WEG, s/data).

**Figura 9:** Vista Superior do Tanque.

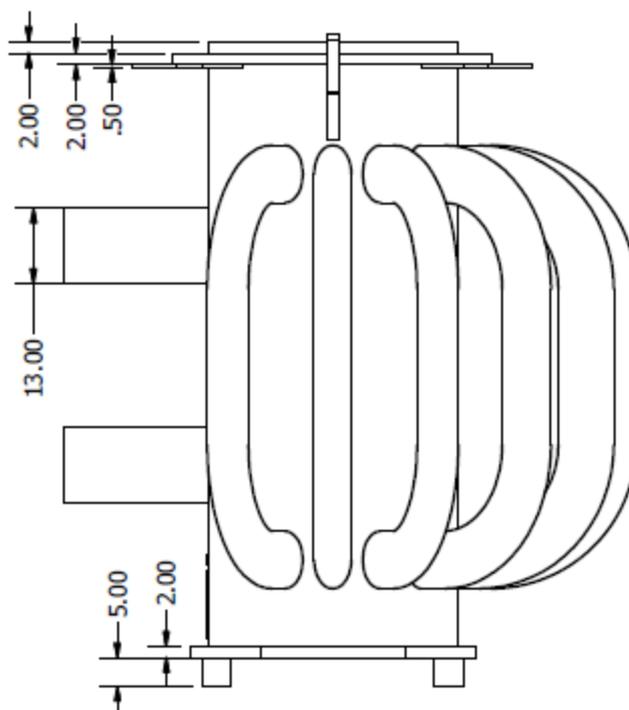


Fonte: (WEG, s/data).

**Figura 10:** Vista Traseira do Tanque.



Fonte: (WEG, s/data).

**Figura 11:** Vista Lateral do Tanque.

Fonte: (WEG, s/data).

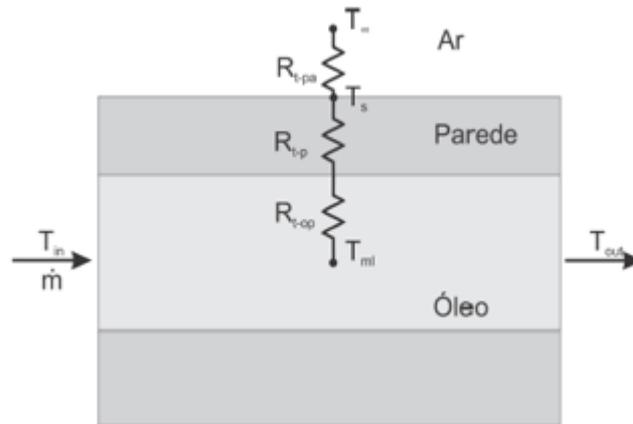
O tanque do transformador é constituído por chapas metálicas de aço carbono 1050 com espessura de 2 [mm]. Sua forma construtiva permite alocar em seu interior todos os componentes pertinentes para seu funcionamento.

### 3.2 Análise do Circuito Térmico

O processo de convecção é basicamente o responsável pela transferência de calor do núcleo para o óleo como do reservatório para o meio ambiente. No entanto, a transferência de calor do óleo para o tanque e do tanque até o meio ambiente é feita por condução, por isso é considerada o circuito térmico (PRASS, 2013).

A parte do tanque do transformador elétrico apresenta em sua maioria o fenômeno de condução, convecção e radiação, conforme circuito elétrico da Figura 12.

**Figura 12:** Modelo Térmico para um Trecho do Tanque.



Fonte: (NORTEN, 2012).

### 3.3 Análise da Série de Fourier

O fenômeno de condução de calor em uma placa plana retangular, cuja a função é periódica e ortogonal, pode ser representada por uma Série de Fourier, conforme a Equação (26) denotada a baixo.

$$f(x) \sim \frac{A_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ A_n \cos\left(\frac{n\pi}{\ell}x\right) + B_n \sin\left(\frac{n\pi}{\ell}x\right) \right\} \quad (28)$$

Para poder fazer a análise do fluxo térmico, é empregada algumas propriedades em cima dos coeficientes de Fourier. Em particular, neste trabalho, a transferência de calor, é considerada uma função contínua e ímpar, tornando a Série de Fourier uma Série de Seno.

A representação da Série dos Senos, é determinada na Equação (27).

$$f(x) \sim \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ B_n \sin\left(\frac{n\pi}{\ell}x\right) \right\} \quad (29)$$

onde,

$$B_n = \int_0^{\ell} f(x) \sin\left(\frac{n\pi}{\ell}x\right) dx \quad (30)$$

Ao se desenvolver o cálculo do coeficiente de Fourier, por ser uma função ímpar, pode-se chegar em uma outra expressão matemática, onde foi empregado neste trabalho. Não se tem o intuito de demonstrar matematicamente essa nova função, mas com os estudos realizados, pode-se utilizar a Equação (29) indicada a seguir.

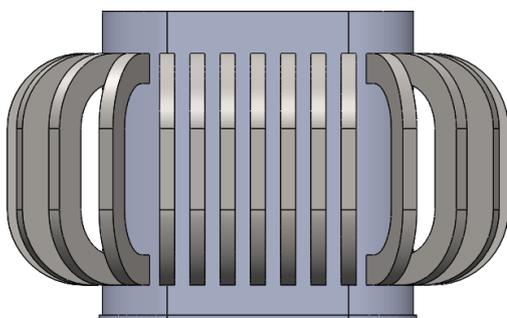
$$f(x) = \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \left( \frac{4(-1)^{n+1}}{n\pi} \right) \text{sen} \left( \frac{n\pi}{2} x \right) \right\} \quad (31)$$

### 3.4 Procedimentos Simulados

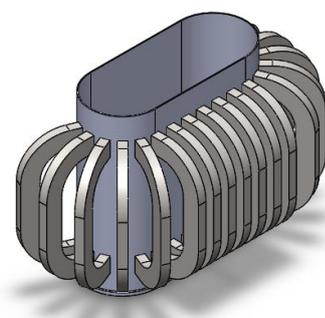
#### 3.4.1 Modelagem do Transformador de Distribuição

Os efeitos gerados pela transferência de calor no tanque do transformador, foram simulados com auxílio do software SolidWorks, onde se fez necessário a elaboração de um projeto onde se reproduz um transformador conforme as dimensões das Figuras 9, 10 e 11 citado acima. Este projeto pode ser visualizado na Figura 13.

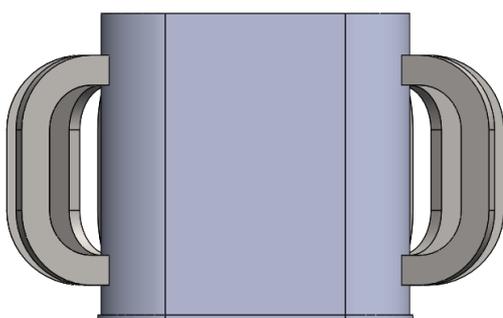
**Figura 13:** Projeto 3D do Transformador de Distribuição Trifásico.



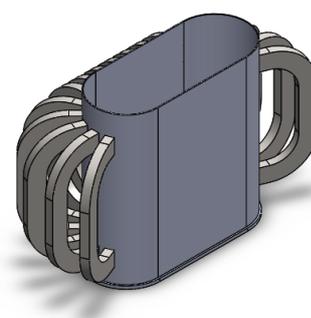
(a) Vista Frontal do Tanque.



(b) Vista Isométrica Frontal do Tanque.



(c) Vista Traseira do Tanque.



(d) Vista Isométrica Traseira do Tanque.

Fonte: Autoria Própria.

O projeto do tanque do transformador foi simplificado apenas a uma placa plana, afim de facilitar as simulações, tornando o problema de natureza unidimensional. A placa é localizada na parte traseira do equipamento, onde não se consta nenhuma sinuosidade ou as aletas.

Essa simplificação, se deve apenas para poder aplicar a análise computacional da Série de Fourier em uma placa plana, tendo a função seccionalmente contínua e periódica.

Essa placa plana contém os mesmos atributos do projeto do transformador de distribuição. Podendo ser vista na Figura 14.

**Figura 14:** Placa Plana da Parte Traseira do Transformador.



**Fonte:** Autoria Própria.

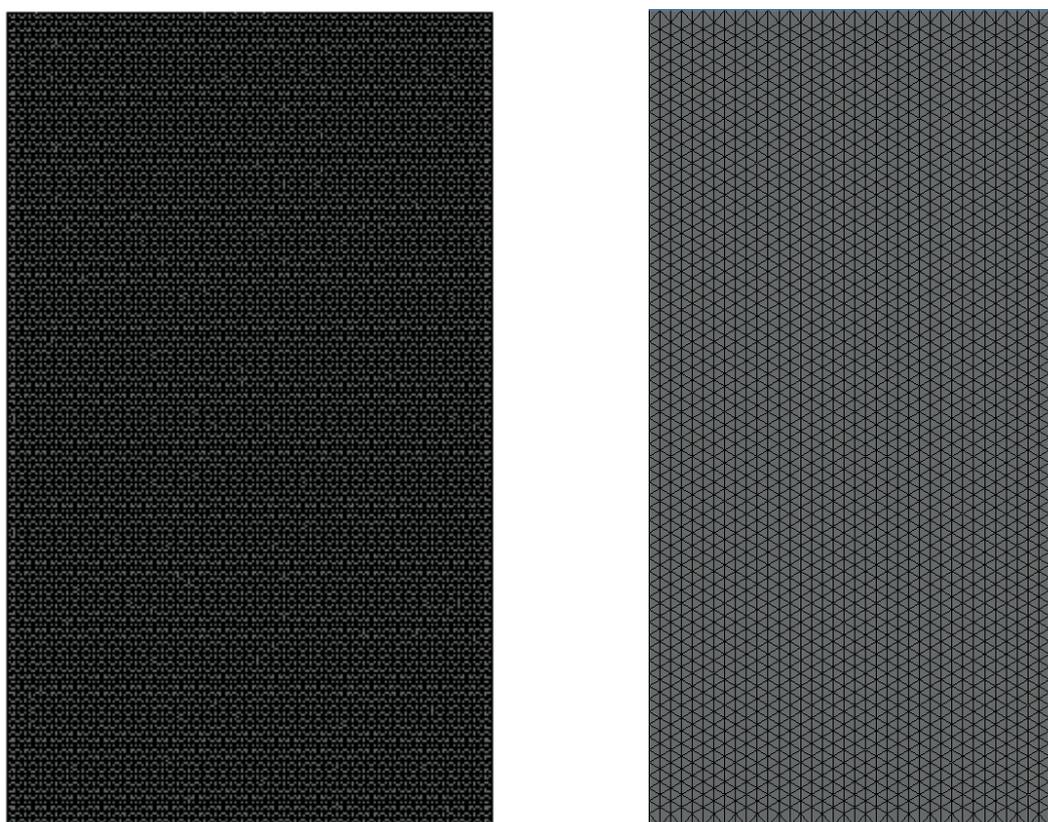
### **3.4.1.1 Geração de Malha – Malha Computacional**

A malha é aplicada na peça, para obter resultado conforme a geometria do elemento a ser analisado. Como não se tem uma fórmula para cada geometria existente, a malha é usada para resolver esse problema. Onde ela envolve a peça a ser simulada, dividindo-a em pequenos pedaços, de formas e localizações conhecidas. Para se calcular o resultado, é utilizado pontos de nós para cada forma conhecida, formado por essa malha. Isso implica que quanto mais fino for a malha, resultados

mais preciso será exibido, mas isso impacta diretamente no uso computacional, exigindo mais processamento.

Foi aplicado uma malha computacional em cima da placa plana, conforme a Figura 15 ilustra. O item (a) mostra a placa em seu tamanho normal, para haver uma melhor visualização de como é a malha em si, faz-se uma aproximação na placa para poder visualizar esse detalhe, conforme o item (b).

**Figura 15:** Aplicação de Malha na Placa Plana.



(a) Vista externa

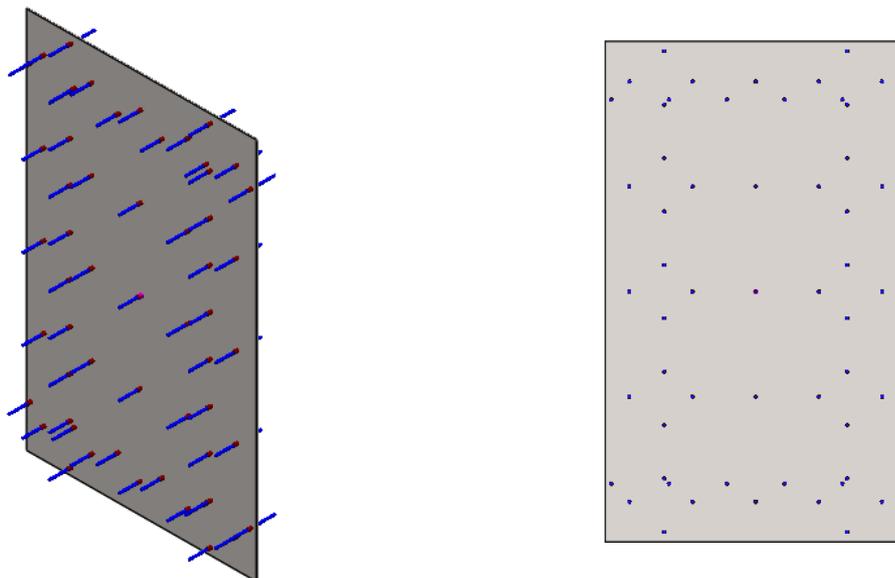
(b) Detalhe da Malha

Fonte: Autoria Própria.

### 3.4.1.2 Aplicação do Fluxo de Calor

Nesta parte do trabalho, foi configurado a entrada e saída do fluxo de calor apresentado pela diferença de temperatura interna do tanque (geração de calor) quanto na face externa ao tanque (exposta ao meio ambiente), conforme a Figura 16. As configurações de densidade, calor específico, permeabilidade, coeficiente convectivo, foram inseridos de acordo com as equações calculadas nos capítulos anteriores.

**Figura 16:** Condição de Contorno do Fluxo de Calor.



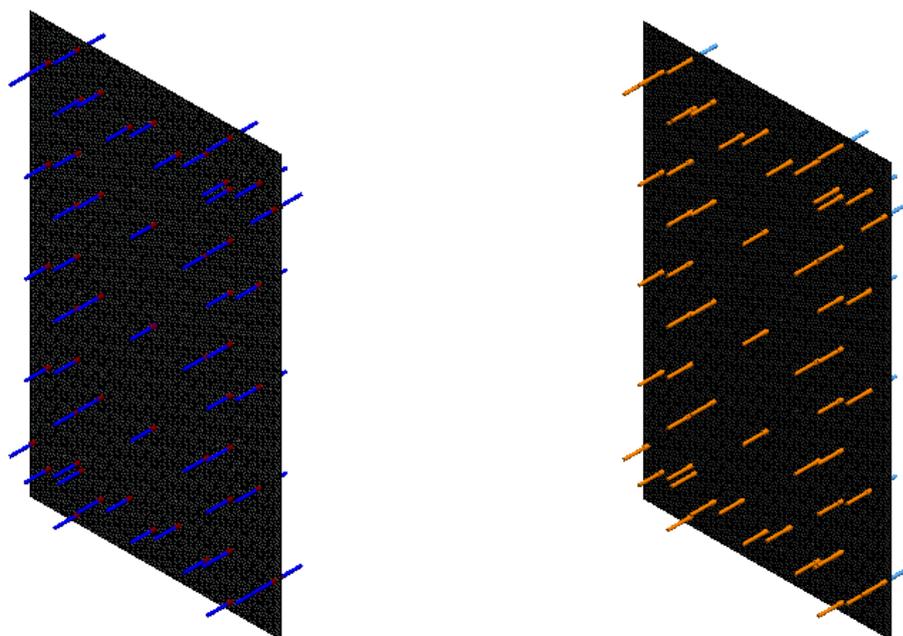
(a) Vista perpendicular dos pontos do fluxo.

(b) Vista frontal dos pontos do fluxo.

Fonte: Autoria Própria.

Na sequência com a Figura 17 foram configurados à condição de contorno do fluxo de calor junto com a malha computacional na placa.

**Figura 17:** Condição de Contorno do Fluxo de Calor mais a Malha Computacional.



(a) Vista perpendicular dos pontos do fluxo de calor na parte interna do tanque.

(b) Vista perpendicular dos pontos do fluxo de calor na parte externa do tanque

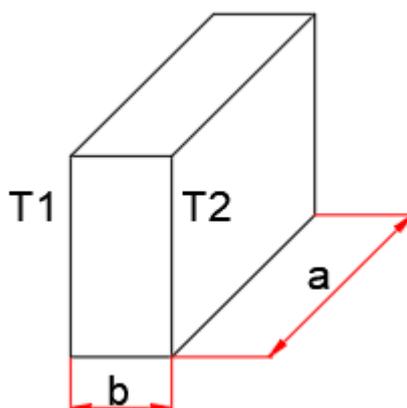
Fonte: Autoria Própria.

### 3.4.2 Implementação do Código

Considerando a placa plana representada na Figura 18., de espessura  $b$  e largura  $a$ , na qual as faces são mantidas às temperaturas  $T_1$  e  $T_2$ . Construída por um material cujas propriedades ( $k$  - condutividade térmica e  $h$  - coeficiente de transferência de calor por condução sejam constante). Uma conjectura é que não se produz nem absorve calor no seu interior. Por determinação há distribuição de temperatura dentro da placa.

Esse problema é de natureza unidimensional porque a temperatura num ponto interior da placa só depende da distância desse ponto às superfícies laterais da mesma. Por isso, na sua resolução, considera um eixo  $x$  de origem na face, como se ilustra na Figura 18.

**Figura 18:** Placa para Definição do Problema.



**Fonte:** Autoria Própria.

Ao implementar a programação, levou em conta as variáveis das dimensões da placa, a temperatura interna e externa, o enésimo termo da Série de Fourier e as linhas de grid, que são para representar a evolução da temperatura na superfície.

O primeiro laço de contador a ser formado no código, é da linha de grid para a espessura de tamanho  $nb$ . O segundo laço é de mesma propriedade, só que para a espessura de tamanho  $na$ . Em seguida é implementado o laço da Série de Fourier, onde o contador tem início ao primeiro termo, até o enésimo termo, informado na variável declarada.

A variação de temperatura é propagada sobre a Série de Fourier de função ímpar, junto com o produto da condição de contorno de transferência de calor.

Para finalizar, o resultado obtido nesses contadores, é plotado em um gráfico de superfície, delimitando as temperaturas atingidas por tonalidades diferentes.

O código descrito acima, pode ser analisado a seguir.

```
a; b; na; nb; k; T0;

clear T
x=linspace(0,a,na);
y=linspace(0,b,nb);

[X,Y]=meshgrid(x,y);
for i=1:nb
    for j=1:na
        T(i,j)=0;
        for n=1:k
            ns=2*n-1;
            T(i,j)=T(i,j)+sin(ns*pi*X(i,j)/a).*sinh(ns*pi*Y(i,j)/a)/(sinh(ns*pi*b/a)*ns);
        end
        T(i,j)=T(i,j)*4*T0/pi;
    end
end
mesh(X,Y,T)
xlabel('t[mm]'); ylabel('y[cm]'); zlabel('T[^oC]')
```

## 4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

### 4.1. Resultado da Modelagem 3D

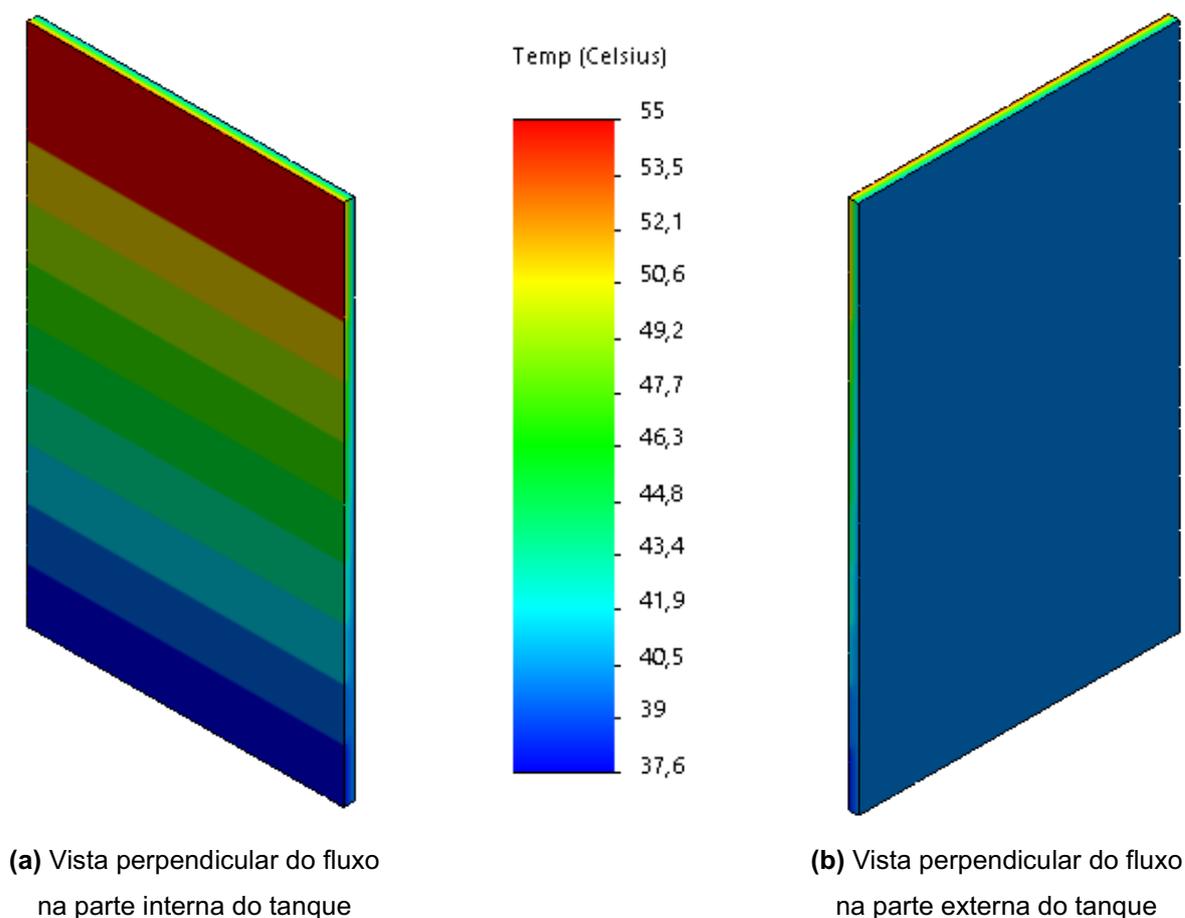
As temperaturas identificadas na simulação são representadas pelas linhas de fluxo coloridas tornando-a distintas entre si. A Figura 19 apresentam as temperaturas considerando a entrada e a saída do calor na placa e pode-se observar que a temperatura variou de  $37,6[^\circ C]$  a  $55,0[^\circ C]$ .

O valor de temperatura interna adotada, é a resultante da linha de fluxo do óleo, onde o óleo se apresenta aquecido na parte superior da placa, com estado físico menos denso. A temperatura adotada neste ponto foi de  $55,0[^\circ C]$  conforme a norma NBR 5440 cita que este é o nível crítico da temperatura que se pode atingir no topo do óleo.

Após o óleo ser resfriado pelos radiadores, apresentando uma característica física menos densa, ele retorna para o tanque pela parte inferior. Segundo (PRASS, 2013) o retorno do óleo contempla a temperatura de  $37,6[^\circ C]$ , deixando a máquina refrigerada e protegida contra danos por aquecimento.

Para a temperatura ambiente foi considerado um valor a cima da média. A escolha dessa temperatura elevada, se deve há dias extraordinário, com possibilidade de eventos baixíssimos, porém já presenciado em algumas localidades. A temperatura adotada foi de  $40,0 [^\circ C]$ .

**Figura 19:** Vista das Temperaturas na Face das Placas.

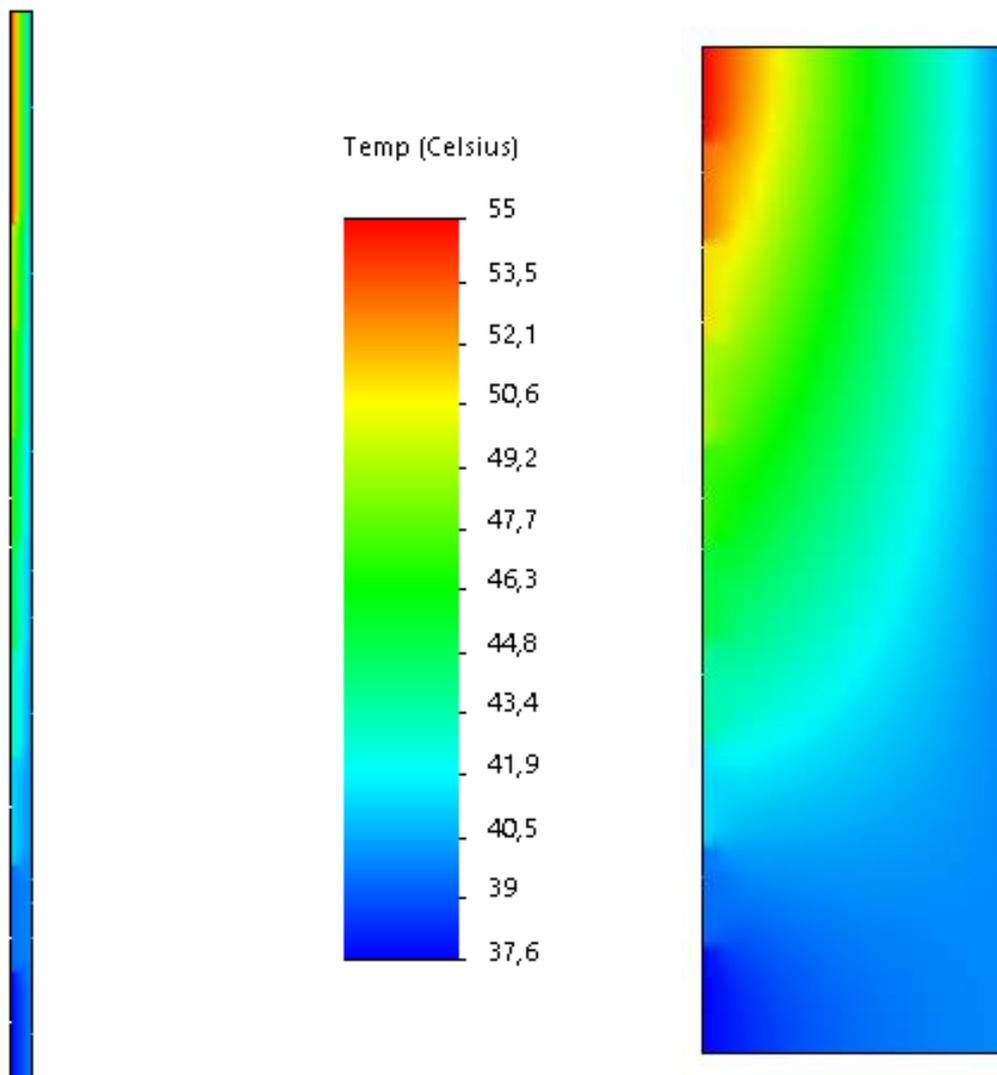


**Fonte:** Autoria Própria.

No resultado ilustrado na figura a seguir, nota-se que a parte em que a placa se encontra mais quente, obtém a cor em vermelho. No entanto, a tonalidade de azul é utilizado para representação de áreas mais fria do tanque.

Nesta simulação, foi considerado que os segmentos superior e inferior da placa, apresentam regiões termicamente isoladas, não afetando os resultados.

A Figura 20 representa um corte da placa com vista lateral, para visualizar as regiões de cada nível da temperatura. A imagem do lado esquerdo retrata a placa em seus dimensionamentos originais, já a figura ao lado direito, equivale a mesma placa, porém com dimensões de largura alterada, para poder visualizar melhor os aspectos da temperatura.

**Figura 20:** Linhas de Fluxo Coloridas por Temperatura.

**Fonte:** Autoria Própria.

Nota-se que os perfis de temperaturas apresentadas, tem intensidades de trocas térmicas em determinadas regiões da placa. Como o setor inferior da placa recebe um óleo já refrigerado, é esperado que apresente uma temperatura mais amena do que a parte superior. Ao decorrer do processo de aquecimento, percebe-se que a temperatura vai se elevando até atingir o ponto crítico. A temperatura ambiente elevada, faz com que a análise apresente esse aspecto, não tendo uma contribuição significativa para o resfriamento do óleo. Se fosse adotado outro valor de temperatura externa, com o padrão de  $25,0[^\circ C]$  a aparência da linha de fluxo seria completamente outra, por exercer um auxílio na refrigeração, contendo uma temperatura menor que a temperatura do óleo resfriado.

## 4.2. Resultado da Implementação

Na compilação do algoritmo, as seguintes variáveis:  $a$ ,  $b$ ,  $T_1$  e  $T_2$  serão caracterizadas utilizando os mesmos valores da simulação citada anteriormente.

Sendo estes valores os seguintes:

$$a = 60,0 [cm];$$

$$b = 2,0 [mm];$$

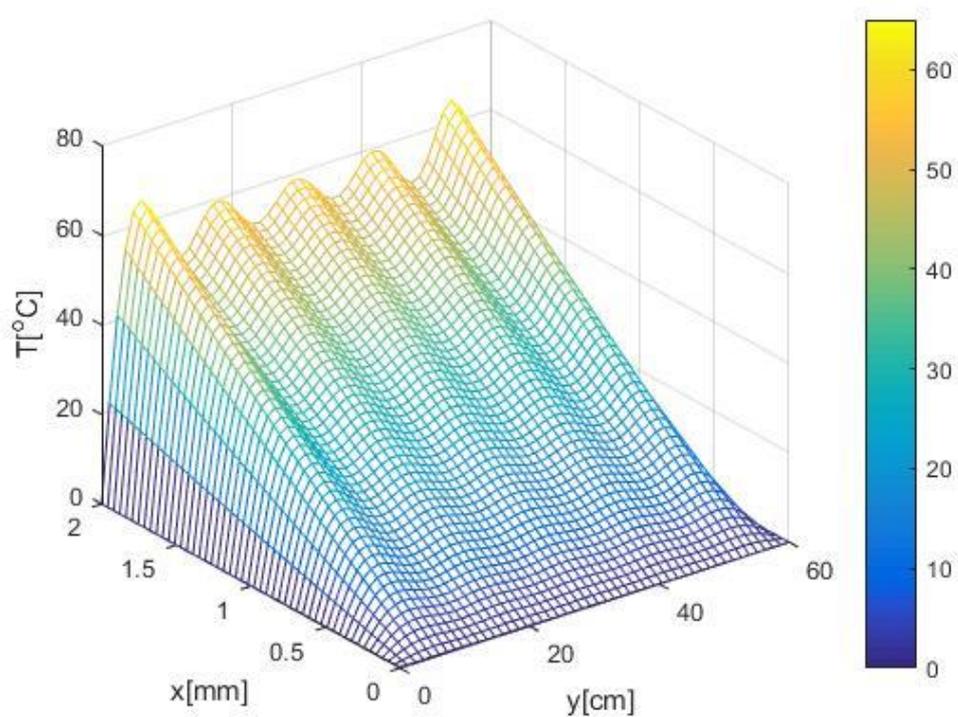
$$T_1 = 55 [^{\circ}C];$$

$$T_2 = 0 [^{\circ}C].$$

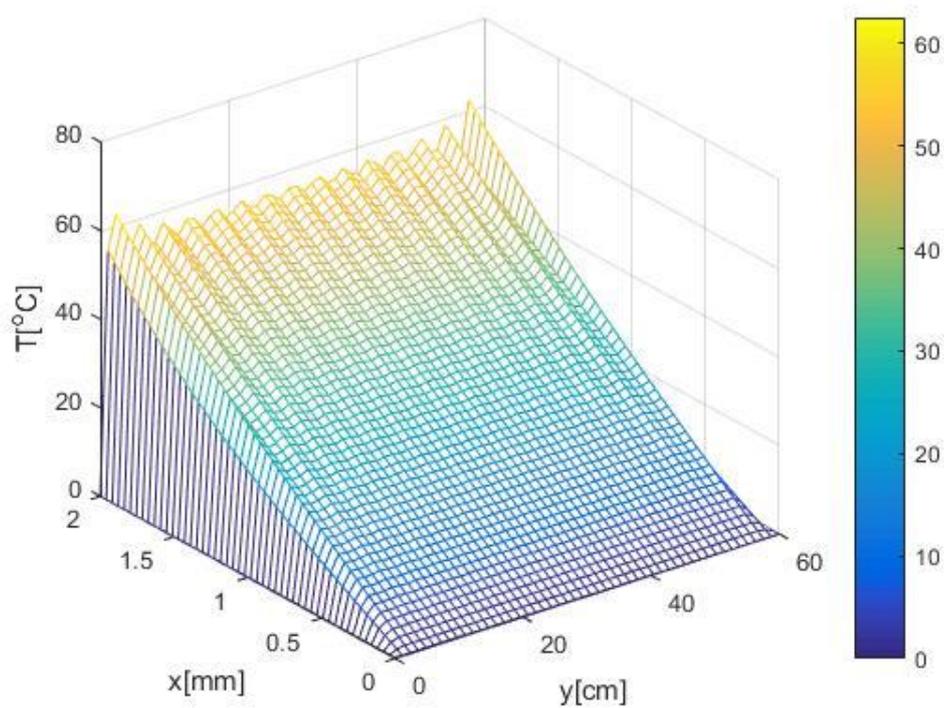
Ao desenvolver o algoritmo, se deparou com uma dificuldade de programação, ao implementar a Série de Fourier, onde a temperatura  $T_2$  não poderia ser inserido o valor mencionado de  $40 [^{\circ}C]$ . Para resolver esse contratempo, foi admitido o valor da temperatura externa (ambiente) como  $0 [^{\circ}C]$ . Ao admitir esse valor, não impacta de forma nenhuma na resolução do problema, pelo contrário, assim se pode perceber melhor o curso do fluxo térmico.

Nas imagens abaixo pode-se notar os resultados obtidos com a compilação do código. Onde a Figura 21 mostra o fluxo térmico sobre uma placa com coordenadas  $x$  e  $y$  com o valor do coeficiente da Série de Fourier em 5. Nas demais figuras, nota-se uma mudança na forma de onda gerada pela série. Essa mudança é proveniente ao valor atribuído ao coeficiente do  $n$ ésimo termo da Série. Ou seja, quanto maior for o valor do coeficiente, menor será a oscilação do gráfico em torno de um valor final para a temperatura da placa. Em outras palavras, quanto mais alto estiver o coeficiente, mais linear estará o resultado da temperatura sobre ponto a ponto.

Já na Figura 22 constata-se que com o aumento do coeficiente da Série, a superfície tende a se linearizar.

**Figura 21:** Superfície de Temperatura com Coeficiente em 5.

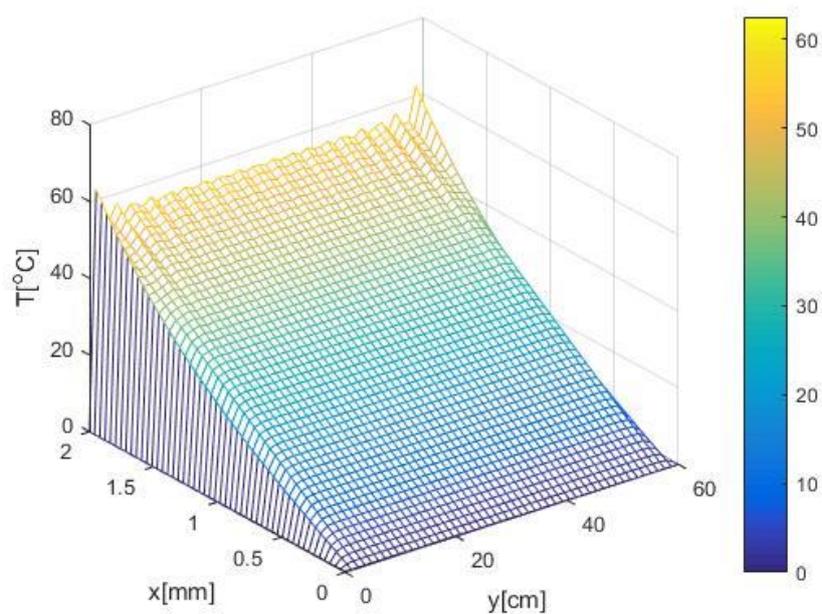
Fonte: Autoria Própria.

**Figura 22:** Superfície de Temperatura com Coeficiente em 15.

Fonte: Autoria Própria.

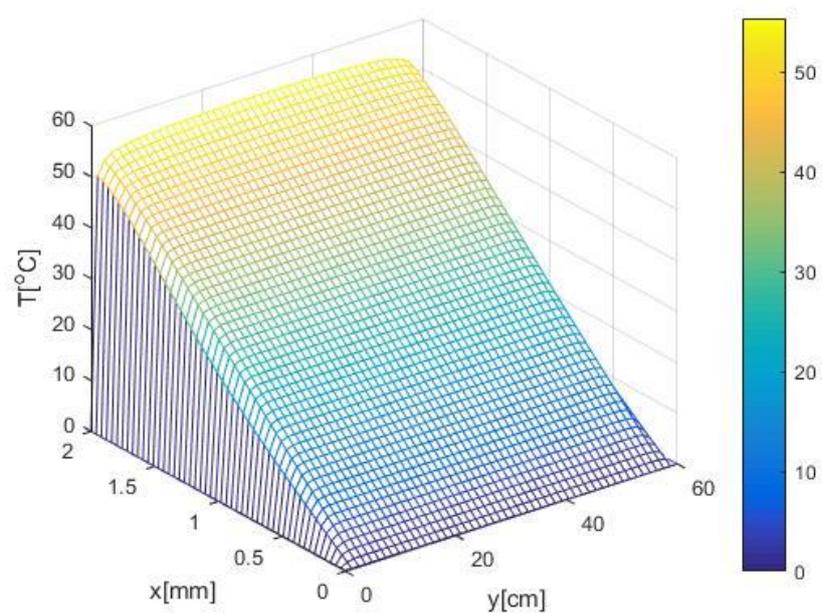
A Figura 23 e Figura 24 tem um grau ainda maior do coeficiente que as imagens anteriores, isso implica que a superfície de temperatura irá exibir uma linearização ainda maior.

**Figura 23:** Superfície de Temperatura com Coeficiente em 50.



**Fonte:** Autoria Própria.

**Figura 24:** Superfície de Temperatura com Coeficiente em 50.



**Fonte:** Autoria Própria

### 4.3. Considerações Finais

Nesta seção serão abordadas algumas informações de suma importância para entendimento completo dos resultados obtidos do projeto em questão.

A temperatura interna adotada nas simulações é o valor máximo admitido em norma pela NBR que é de 55 [°C], porém esse nível de temperatura em dias normais é improvável que seja atingido. Isso também é válido para a temperatura usada na parte externa da placa, onde o valor utilizado foi de 40 [°C], um valor bem extraordinário para temperatura ambiente, onde normalmente se dota o valor de temperatura de 25 [°C].

Um fator que influenciaria diretamente nos resultados encontrados na análise do fluxo térmico na placa, seria o fator do vento, que neste trabalho não foi considerado esse quesito nas simulações.

O valor de temperatura admitido para o óleo no momento que ele retorna dos radiadores, é um valor que é utilizado em outro trabalho, onde ele considera o valor de temperatura ambiente de 25 [°C].

A estrutura utilizada na análise, não contempla todas as geometrias e características físicas de um transformador de distribuição. Esse ponto pode ter uma real importância nos resultados do fluxo térmico.

Foi desconsiderado as perdas elétricas, que influenciam diretamente no aquecimento

## 5. CONCLUSÃO

O seguinte trabalho realizou um estudo do dimensional de uma placa plana de um transformador de distribuição a óleo, durante o processo de transformação de energia a fim de analisar o fluxo térmico. Para tanto foram utilizadas duas ferramentas distintas, sendo estas: SolidWorks e o MatLab.

No que tange a análise da transferência de calor que ocorre na seção analisada do transformador, as perdas elétricas intrínsecas de tal circuito foram desconsideradas. Tal análise realizada com enfoque na placa plana e as substâncias que a circundam (óleo do lado interno e ar a 40 [°C] do lado externo) demonstrou a grande influência da temperatura ambiente no que se refere ao resfriamento da máquina. Como pode ser visto na Figura 20 a qual representa o carregamento térmico da placa, onde temperaturas mais altas podem ser notadas a partir do centro da placa. Mostrando assim, na situação analisada neste projeto, a dificuldade do óleo em agir como um bom refrigerante.

Com relação aos softwares utilizados pode-se notar que ambos apresentaram conclusões próximas, porém com características distintas relacionadas as suas análises visuais. Sendo uma delas apresentada como linhas de fluxos de temperatura e a outra como formas de onda geradas pela Série de Fourier, as quais apresentaram maior linearização com o aumento do coeficiente da Série.

## 6. REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5356: **Transformadores de Potência**. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5440: **Transformadores para redes aéreas de distribuição**. Rio de Janeiro, 2014.

ALL Biz. **Transformadores de Força**. Brasil s/data. Disponível em: <https://all.biz/br-pt/transformadores-de-forca-da-blutrafos-contam-com-a-g63797>. Acesso em 12 out. 2019.

DANIELLI, WAGNER. **Como Funciona os Transformadores**. Brasil s/data. Disponível em: <https://www.wagnerdanielli.com.br/como-funciona-os-transformadores-tudo-aquilo-que-voce-gostaria-de-saber/>. Acesso em 23 out. 2019.

ETNA. **Transformadores Elétricos**. Brasil s/data. Disponível em: <https://etnatransformadores.com.br/transformador-eletrico/>. Acesso em 02 out. 2019.

FINOCCHIO, Marco Antonio Ferreira. **DETERMINAÇÃO DA TEMPERATURA DE ENROLAMENTOS DE TRANSFORMADORES A SECO E DE SUAS PERDAS TOTAIS BASEADO EM REDES NEURAIS ARTIFICIAIS**. Dissertação de mestrado em Engenharia Elétrica. Universidade Estadual de Londrina – UEL. Londrina 2010.

GOEDTEL, Alessandro. **ESTIMATIVA DE CONJUGADO EM EIXOS DE MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS ATRAVÉS DE REDES NEURAIS ARTIFICIAIS**. Dissertação de mestrado em Engenharia Elétrica. Universidade de São Paulo – USP. São Paulo 2007.

INCROPERA, FRANK P. **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**. 6 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

MARTIGNONI. **Transformadores**. 4 ed. São Paulo: Globo, 1979.

Medeiros, Leonardo Hautrive; Feil, Dion Lenon Prediger; Marchesan, Tiago Bandeira. **Desenvolvimento de Transformadores de Distribuição de Elevada Eficiência Empregando Núcleo Amorfo e Óleo Vegetal Isolante**. Revista Brasileira de Iniciação Científica. Itapetininga, v. 3, n. 6, 2016.

MONIZ, OCTÁVIO VIEIRA. **Perda de Vida Útil Técnica e Perda de Vida Útil Econômica dos Transformadores de Distribuição**. Dissertação de Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI. Itajubá, 2007.

MUNDO DA ELÉTRICA. **Tipos de Transformadores**. Brasil s/data. Disponível em: <https://www.mundodaeletrica.com.br/tipos-de-transformadores/>. Acesso em 12 out. 2019.

PORTAL ELÉTRICA. **Transformado de Distribuição**. Brasil s/data. Disponível em: <http://www.portaleletricista.com.br/wp-content/uploads/2016/11/Transformadores-de-Distribui%C3%A7%C3%A3o.jpg>. Acesso em 12 out. 2019.

PRASS, MARLON. **Estufos das Trocas Térmicas nas Aletas de um Transformador a Óleo**. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Mecânica. *Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul – UNIJUÍ*. Panambi, 2013.

RABER, LUCIANO. **Estudos de Climatização de um Escritório**. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Mecânica. *Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul – UNIJUÍ*. Panambi, 2012.

RAVAGLIO, M. A. **Avaliação da Vida Útil dos Transformadores da COPEL Distribuição**. XVI seminário nacional de distribuição de energia elétrica SENDI 2004.

SIGMA. **Transformadores**. Brasil s/data. Disponível em: <http://www.sigmatransformadores.com.br/inicio>. Acesso em: 12 out. 2019.

SÓ FÍSICA. **Trasmissão de Calor**. Brasil s/data. Disponível em: <https://www.sofisica.com.br/conteudos/Termologia/Calorimetria/transm2.php>. Acesso em 12 set. 2019.

VIA CARREIRA. **Regras da ABNT para TCC 2019: as principais normas (ATUALIZADAS)**. Brasil 2019. Disponível em: <https://viacarreira.com/regras-da-abnt-para-tcc-conheca-principais-normas/#desenvolvimento>. Acesso em: 15 ago. 2019.

WEG. **Transformadores de Distribuição a Óleo**. Brasil 2020. Disponível em: [https://www.weg.net/catalog/weg/BR/pt/Gera%C3%A7%C3%A3o%2C-ransmiss%C3%A3o-e-Distribui%C3%A7%C3%A3o/Transformadores-e-Reatores-a-%C3%93leo/Transformadores-de-Distribui%C3%A7%C3%A3o-a-%C3%93leo/c/GTD\\_TO\\_TOD](https://www.weg.net/catalog/weg/BR/pt/Gera%C3%A7%C3%A3o%2C-ransmiss%C3%A3o-e-Distribui%C3%A7%C3%A3o/Transformadores-e-Reatores-a-%C3%93leo/Transformadores-de-Distribui%C3%A7%C3%A3o-a-%C3%93leo/c/GTD_TO_TOD). Acesso em 02 Fev 2020.