

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

Tales Fraga Rodrigues

**AVALIAÇÃO DA PERFORMANCE TÉRMICA E DO POSICIONAMENTO  
DE SENSORES DE FIBRA ÓTICA EM TRANSFORMADORES DE  
POTÊNCIA POR MEIO DE SIMULAÇÕES CFD**

Santa Maria, RS  
2023

Tales Fraga Rodrigues

**AVALIAÇÃO DA PERFORMANCE TÉRMICA E DO POSICIONAMENTO DE SENSORES  
DE FIBRA ÓTICA EM TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA POR MEIO DE  
SIMULAÇÕES CFD**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Mecânica, Área de Concentração em Área de concentração do CNPq, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Bacharel em Engenharia Mecânica**. Defesa realizada por videoconferência.

Orientador: Prof. Carlos Eduardo Gux Falcão

Santa Maria, RS  
2023

**Tales Fraga Rodrigues**

**AVALIAÇÃO DA PERFORMANCE TÉRMICA E DO POSICIONAMENTO DE SENSORES  
DE FIBRA ÓTICA EM TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA POR MEIO DE  
SIMULAÇÕES CFD**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Mecânica, Área de Concentração em Área de concentração do CNPq, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Bacharel em Engenharia Mecânica**.

**Aprovado em 1 de março de 2023:**

---

**Carlos Eduardo Guex Falcão, Dr. (UFSM)  
(Presidente/Orientador)**

---

**Cesar Addis Valverde Salvador, Dr. (UFSM) (videoconferência)**

---

**Eduardo Xavier Barreto, Dr. (UFSM) (videoconferência)**

Santa Maria, RS  
2023

## RESUMO

### AVALIAÇÃO DA PERFORMANCE TÉRMICA E DO POSICIONAMENTO DE SENSORES DE FIBRA ÓTICA EM TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA POR MEIO DE SIMULAÇÕES CFD

AUTOR: Tales Fraga Rodrigues  
Orientador: Carlos Eduardo Guex Falcão

As temperaturas internas do transformador e sua capacidade de dissipar calor gerado pela parte ativa influencia na deterioração no sistema de isolamento dos enrolamentos e determina o quanto longa será a vida útil do transformador. Devido à grande importância desse equipamento para os sistemas elétricos, é necessária a realização de estudos para evitar falhas e degradação precoce do sistemas essenciais ao seu funcionamento. Esse trabalho apresenta a análise da performance térmica de um transformador de potência e do posicionamento de sensores de fibra ótica para o monitoramento de temperatura. Para isso, resultados experimentais de um transformador de potência sob condições de arrefecimento ODAN (Óleo dirigido e Ar Natural) com 20 sensores de fibra óticas instalados nos enrolamentos são comparados com resultados de simulação CFD realizados no software ANSYS Fluent. Foi constatado que as temperaturas pontuais medidas pelos sensores não representariam necessariamente as temperaturas críticas ao longo dos enrolamentos do transformado. Além disso, foi mostrado que as características construtivas dos enrolamentos impactam no fluxo de óleo e na distribuição de temperatura, considerando o número e posicionamento de desvios de óleo que devem ser considerados para o melhor posicionamento dos sensores de fibra ótica e no monitoramento das temperaturas.

**Palavras-chave:** Simulação CFD. Sensor de fibra ótica. Transformador de potência. Performance térmica.



## ABSTRACT

### EVALUATION OF POWER TRANSFORMER THERMAL PERFORMANCE AND OPTICAL SENSOR POSITIONING USING CFD SIMULATIONS

AUTHOR: Tales Fraga Rodrigues  
ADVISOR: Carlos Eduardo Guex Falcão

The internal temperatures and the ability to dissipate the heat from active part influence the windings' insulation deterioration and determine how long power transformers are able to remain in operation. Due to the great importance of this equipment for the electrical system, studies to avoid failures and early aging are needed. This work presents an evaluation of thermal performance of power transformers and the optical fiber sensor positioning to temperature monitoring. For this, experimental results of a power transformer under ODAN (Oil Direct and Air Natural) cooling conditions with 20 optical fiber sensors along its windings were compared with CFD simulations results performed on ANSYS FLUENT. It was verified that the punctual temperature measured by optical sensors may not accurately represent the critical temperatures along transformers' windings, and the windings' arrangements impact on oil flow and temperature distribution, as the number and positioning of block washers being necessary to be considered in previous studies for a better positioning of the sensors and temperature monitoring.

**Keywords:** CFD simulations. Optical fiber sensors. Power transformer. Thermal Performance.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – Sistemas de arrefecimento em transformadores. ....	17
FIGURA 2 – Sistemas de arrefecimento em transformadores. ....	18
FIGURA 3 – Óleo dirigido ao longo do enrolamento. ....	19
FIGURA 4 – Fluxograma da metodologia. ....	21
FIGURA 5 – Geometria simplificada da coluna do transformador. ....	21
FIGURA 6 – Esquema com o posicionamento dos sensores com as características construtivas das colunas. ....	22
FIGURA 7 – Pontos coletados nos canais entre os enrolamentos. ....	22
FIGURA 8 – Transformador. ....	23
FIGURA 9 – Dimensões do enrolamento de alta tensão (AT). ....	24
FIGURA 10 – Malha inicial na entrada coluna 1 (Discos 1 e 2). (a) 7476984 elementos.(b) Distribuição de temperatura. ....	25
FIGURA 11 – Malha final na entrada coluna 1 (Discos 1 e 2). (a) 15989990 elementos.(b) Distribuição de temperatura. ....	25
FIGURA 12 – Distribuição de temperatura ao longo do enrolamento de AT - Coluna 1: Discos (a) 01-15, (b) 16-30, (c) 31-45, (d) 46-60. ....	26
FIGURA 13 – Distribuição de temperatura ao longo do enrolamento de AT - Coluna 2: Discos (a) 01-15, (b) 16-30, (c) 31-45, (d) 46-60. ....	27
FIGURA 14 – Distribuição de temperatura: (a) Coluna 1 (b) Coluna 2. ....	28
FIGURA 15 – Vetores de velocidades: (a) Coluna 1 (b) Coluna 2. ....	28
FIGURA 16 – Distribuição vertical de temperatura - Coluna 1 - Canal radiais entre os discos 01 e 02. ....	29
FIGURA 17 – Distribuição vertical de temperatura - Coluna 1 - Canal radial entre os discos 29 e 30. ....	29
FIGURA 18 – Distribuição vertical de temperatura - Coluna 1 - Canal radial entre os discos 59 e 60. ....	30
FIGURA 19 – Distribuição vertical de temperatura - Coluna 2 - Canal radial entre os discos 01 e 02. ....	30
FIGURA 20 – Distribuição vertical de temperatura - Coluna 2 - Canal radiais entre os discos 29 e 30. ....	31
FIGURA 21 – Distribuição vertical de temperatura - Coluna 2 - Canal radiais entre os discos 59 e 60. ....	31
FIGURA 22 – Temperaturas do ensaio e da simulação - Coluna 1. ....	33
FIGURA 23 – Temperaturas do ensaio e da simulação - Coluna 2. ....	33
FIGURA 24 – Temperaturas medidas no ensaio e média das temperaturas verticais - Coluna 1. ....	34

FIGURA 25 – Temperaturas medidas no ensaio e média das temperaturas verticais -  
Coluna 2. .... 34

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Perdas térmicas usadas nas simulações .....	24
--	----

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<i>CAE</i>	Computer-aided Engineering
<i>CAD</i>	Computer-aided Design
<i>AT</i>	Alta Tensão
<i>HV</i>	High Voltage
<i>THNM</i>	Thermal Hydraulic Models
<i>ODAN</i>	Oil Direct Air Natural
<i>ONAN</i>	Oil Direct Air Natural
<i>OFAF</i>	Oil Forced Air Force
<i>ONAN</i>	Oil Natural Air Natural
<i>ODAF</i>	Oil Direct Air Forced

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\dot{m}_{oil}$	Vazão mássica de óleo
$T_{in}$	Temperatura de entrada
$\mu_f$	Densidade do óleo
$c_{pf}$	Calor específico do óleo
$k_f$	Condutividade térmica
$\rho_f$	Densidade do óleo
$\dot{Q}_{g-w}$	Calor gerado pelas bobinas
$\dot{Q}_{c-w}$	Calor gerado pelo núcleo
$\dot{Q}_c$	Calor dissipado por convecção
$\dot{Q}_k$	Calor dissipado por condução
$\dot{Q}_r$	Calor dissipado por radiação

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>11</b>
1.1	OBJETIVOS .....	12
1.1.1	<b>Objetivo Geral</b> .....	<b>12</b>
1.1.2	<b>Objetivos Específicos</b> .....	<b>12</b>
1.2	JUSTIFICATIVA.....	13
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>14</b>
2.1	TRANSFORMADORES .....	14
2.1.1	<b>Divisão dos enrolamentos e construção</b> .....	<b>14</b>
2.1.2	<b>Perdas em Transformadores</b> .....	<b>14</b>
2.1.3	<b>Meios de transferência de calor</b> .....	<b>15</b>
2.1.3.1	Condução .....	15
2.1.3.2	Convecção .....	16
2.1.3.3	Radiação .....	16
2.1.4	<b>Sistemas de arrefecimento em transformadores</b> .....	<b>17</b>
2.2	SIMULAÇÃO FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL .....	19
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b> .....	<b>20</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS</b> .....	<b>23</b>
4.1	DESCRIÇÃO DO TRANSFORMADOR .....	23
4.2	CONDIÇÕES DE CONTORNO DA SIMULAÇÃO .....	24
4.3	ESTUDO DE CONVERGÊNCIA DE MALHA .....	25
4.4	RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES .....	26
4.5	COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS DOS ENSAIOS E DAS SIMULA- ÇÕES .....	28
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>35</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>36</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Transformadores são um dos equipamentos mais importantes e caros em sistemas de distribuição de energia, eles são responsáveis por converter a energia elétrica para tensão adequadas para os consumidores (RAEISIAN et al., 2018; LIN et al., 2022; LIU et al., 2022). Apesar de serem máquinas altamente eficientes, uma pequena parte da energia convertida são perdidas em forma de calor nas bobinas principalmente devido às perdas Joules (SANTISTEBAN et al., 2019; KULKARNI; KHAPARDE, 2004b). Esse calor ocasiona o aumento da temperaturas internas do transformador, como o seu sistema de isolamento o qual consiste basicamente de papel *kraft* impregnado de óleo. Esse papel se degrada gradualmente em condições de operação normais do transformador e a ocorrência de estresse térmico acelera sua degradação e conseqüentemente suas propriedades mecânicas também. Uma vez que a substituição do papel é inviável, o tempo de vida dos transformadores estão majoritariamente relacionados à integridade do seu sistema de isolamento (FERNÁNDEZ et al., 2016; ISHAK; JAMAIL; OTHMAN, 2016; LIU et al., 2022; BARUAH; NAYAK; PRATIHAR, 2022).

Atualmente, duas técnicas são comumente usadas durante a fase de projeto de transformadores para predeterminar o fluxo de óleo e a distribuição de temperatura nas bobinas: *Computational Fluid Dynamics* (CFD) e *Thermal Hydraulic Models* (THNM) (CIGRE, 2016; CHI et al., 2022). Ambas as técnicas mostram bons resultados em estimar as condições de operação de transformadores de potência. No entanto, estudos mostram que o uso do CFD é mais preciso que o uso de THNM, por conta que o perfil do escoamento não é modelado em THNM, portanto fenômenos como fluxo reversos e linhas quentes não são bem observados (SANTISTEBAN et al., 2019; CAMPELO et al., 2016). No entanto, o uso de THNM são mais atrativos para fins de projeto devido a gerarem resultados mais rápidos e na sua facilidade em pode integrá-los com outros algoritmos (SANTISTEBAN et al., 2019; RADAKOVIC; SORGIC, 2010; CIGRE, 2016; ZHANG et al., 2017; YUAN et al., 2021). No entanto, o desenvolvimento de ambas as técnicas são essenciais para o desenvolvimento de melhores projetos de transformadores.

A elevação de temperaturas dos transformadores é um dos parâmetros mais importantes para determinar seu tempo de vida e sua capacidade carga (KULKARNI; KHAPARDE, 2004a; RAEISIAN et al., 2018; EDIRIWEERA et al., 2020). Devido a sua importância, sensores de fibras óticas são colocados dentro dos transformadores para monitorar suas temperaturas em condições reais de operação. Esses dados são utilizados para monitorar o funcionamento do transformador, envelhecimento do sistema de isolamento, risco de formação de bolhas e descargas parciais.

Sensores de fibra ótica funcionam sem o uso de eletricidade ou interferência magnética, além de não serem constituídos de materiais condutivos, dessa forma são ideais



para a aferição de temperaturas dentro das bobinas de transformadores. No entanto, esses sensores somente medem temperaturas pontuais, e a maior temperatura ao longo do transformador não possui uma localização exata onde o sensor deve ser colocado. Portanto, um maior número de sensores distribuídos ao longo do transformador possibilitaria um monitoramento mais confiável acerca da operação do transformador e sua distribuição de temperaturas, mas uma desvantagem dessa tecnologia é que ela possui um custo muito alto, então o uso de muitos sensores aumentaria o preço total do transformador (CIGRE, 2009; JIANG; MA, 2021). Além disso, o posicionamento estratégico dos sensores ao longo dos canais entre os enrolamentos também é importante, porque as maiores temperaturas nem sempre estão no centro dos canais, onde o sensor é geralmente posicionado. Portanto, o posicionamento preciso desses sensores é essencial para uma avaliação satisfatória da performance térmica dos transformadores.

## 1.1 OBJETIVOS

Nesta seção, são descritos o objetivo geral e objetivos específicos propostos para realização do trabalho.

### 1.1.1 Objetivo Geral

O presente trabalho tem como objetivo apresentar a distribuição de temperaturas de um transformador de potência e realizar uma análise acerca do posicionamento de sensores de fibras óticas ao longo dos canais entre os enrolamentos dos transformadores.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

Para que o objetivo geral seja atingido, foram definidos os objetivos específicos, os quais são elencados abaixo:

- Realizar a revisão bibliográfica sobre o tema;
- Realizar um modelo simplificado de um transformador para realizar as simulações;
- Determinar um método adequado para coleta de temperaturas ao longo dos canais entre os enrolamentos na simulação;
- Analisar os resultados das simulações;

- Comparar os resultados das simulações com resultados prévios de ensaios térmicos anteriores;

## 1.2 JUSTIFICATIVA

A comparação entre os resultados das simulações com os ensaios de temperatura serão importantes para determinar qual a melhor forma de posicionar os sensores de fibras óticas ao longo dos canais entre os enrolamentos. Além disso, será mostrado por meio da simulação de como as características construtivas dos enrolamentos são importantes fatores para o posicionamento desses sensores.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 TRANSFORMADORES

De acordo com Kulkarni e Khaparde (2004a, p.1):

Os transformadores são equipamentos estáticos que transferem energia elétrica de um circuito para outro por meio da indução eletromagnética sem a mudança de sua frequência. Esses equipamentos exercem um papel fundamental em redes de energia elétrica. Como por exemplo, o uso de transformadores elevadores que aumentam o nível de tensão em unidades geradoras para que seja possível o transporte de energia produzidas por essa usinas a longas distâncias.

#### 2.1.1 Divisão dos enrolamentos e construção

O funcionamento do transformador se baseia no acoplamento magnético entre duas bobinas, uma bobina primária que recebe energia elétrica numa determinada tensão e corrente e uma bobina secundária pela qual esta energia, com tensão e corrente diferentes, é transferida a uma carga. O circuito magnético que acopla as bobinas primária e secundária pode ser o ar ou um material ferro-magnético para aumentar o acoplamento. Transformadores destinados a transferir energia elétrica com potências elevadas têm o circuito magnético construído com material ferro-magnético (RIES, 2007).

O enrolamento que possui o maior número de espiras é denominado enrolamento de alta tensão (AT ou HV (*High Voltage*)) e o enrolamento que tem o menor número de espiras é denominado enrolamento de baixa tensão (BT ou LV (*Low Voltage*)). O transformador funcionará como elevador de tensão quando se alimenta como primário o enrolamento BT ou como redutor de tensão se o enrolamento AT funcionar como primário (MARTIGONI, 1991).

#### 2.1.2 Perdas em Transformadores

Parte da energia processada pelo transformador é convertida em calor devido a perdas no núcleo e nos enrolamentos. Segundo Ries (2007), as perdas nos transformadores podem ser divididas em:

- Perdas no núcleo e perdas de excitação;

- Perdas joule nos enrolamentos;
- Perdas parasitas por fluxo de dispersão.

Devido à essas perdas, os transformadores de potência estão constantemente sofrendo estresse térmico. O processo de degradação do papel kraft impregnado em óleo pode ser relacionado por meio das equações de Arrhenius, onde o aumento da temperatura além dos limites normais de operação do equipamento resulta em uma aceleração exponencial do seu envelhecimento. Portanto, um limite de aumento de temperatura de 65 °C para o topo de óleo é estipulado, de forma a evitar o envelhecimento precoce do transformador (IEEE, 2012; LIN; MA; ZHU, 2022).

Portanto, o monitoramento das temperaturas internas ao longo das bobinas, principalmente no topo de óleo e nos pontos quentes, são essenciais para a manutenção da integridade e do tempo de vida do transformador (JIANG; MA, 2021). Sensores PT100 e termopares são usados para medir as temperaturas ao longo das bobinas (TORRIANO et al., 2018; LIU et al., 2019; DAGHRAH et al., 2020). Devido às suas características, sensores de fibras ótica são alocados ao longo das bobinas e fornecem um meio confiável de coletar dados para monitorar e prever a performance térmica e o tempo de vida de transformadores (JIANG; MA, 2021). De forma geral, esse sensores são posicionados na região central ao longo dos canais radiais dos enrolamento no espaço entre dois discos, colocado na face do disco superior.

### **2.1.3 Meios de transferência de calor**

A transmissão de calor das perdas geradas pelo transformador são realizadas por diferentes modos : condução, convecção e radiação(THULUKKANAM, 2013; RIES, 2007).

#### **2.1.3.1 Condução**

Segundo Çengel e Ghajar (2012), a condução é a transferência de energia das partículas mais energéticas de uma substância para partículas vizinhas adjacentes menos energéticas, como resultado da interação entre elas.

No contexto de transformadores, o calor é transmitido por condução do centro do núcleo e dos enrolamentos até as superfícies em contato com o meio refrigerante, e o calor é conduzido através das paredes do tanque (caixa do transformador) e dos radiadores (RIES, 2007).

### 2.1.3.2 Convecção

De acordo com Çengel e Ghajar (2012), a convecção é o modo de transferência de energia entre a superfície sólida e a líquida ou gás adjacente, que está em movimento e que envolve os efeitos combinados de condução e de movimento de um fluido.

Em transformadores arrefecidos à óleo, a convecção é o meio de transferência de calor mais importante. A transmissão de calor entre as superfícies externas do núcleo e dos enrolamento para o meio refrigerante, entre as paredes externas dos tanque dos transformadores e dos radiadores para o ambiente ocorrem por convecção (RIES, 2007; KULKARNI; KHAPARDE, 2004a).

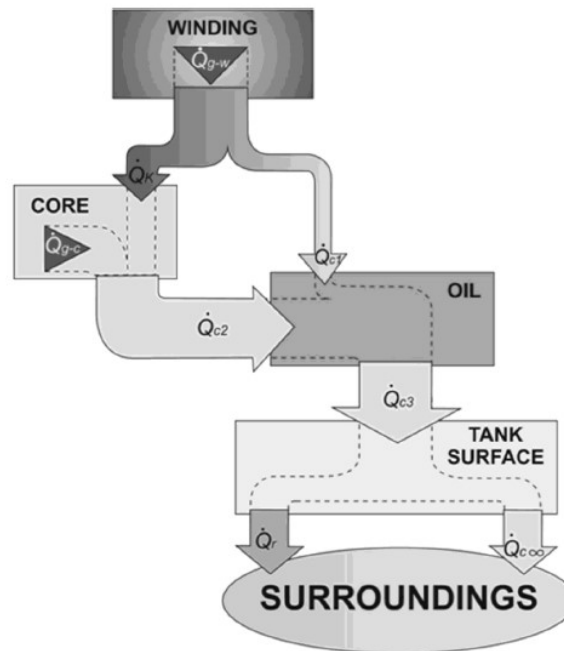
### 2.1.3.3 Radiação

A radiação por ser definida como a energia emitida pela matéria sob a forma de ondas eletromagnéticas (Sem a necessidade de um meio interveniente), como resultados das mudanças nas configurações eletrônicas de átomos ou moléculas. Dessa forma, a radiação térmica pode ser entendida como o tipo de radiação emitida pelos corpos por causa de sua temperatura (ÇENGEL; GHAJAR, 2012).

Em relação aos outros meios de transferência de calor em transformadores, a troca de calor por meio da radiação é a menos significativa e geralmente, quando há presença de convecção forçada, a radiação é desconsiderada (ÇENGEL; GHAJAR, 2012).

Na figura 1 é mostrado um diagrama de Sankey o qual ilustra uma simplificação do balanço de energia de um transformador. Nele é mostrado que o calor gerado pelas bobinas  $\dot{Q}_{g-w}$  é transferido por meio da condução para o núcleo  $\dot{Q}_k$  e por convecção para o óleo  $\dot{Q}_{c1}$ . O calor gerado pelo núcleo  $\dot{Q}_{g-c}$  é transferido por convecção para óleo  $\dot{Q}_{c2}$ . O óleo aquecido dissipa o calor por convecção ( $\dot{Q}_{c3}$ ) para a superfície do transformador (Tanque, radiador, trocador de calor) e finalmente o calor é dissipado para o exterior por convecção ( $\dot{Q}_{c\infty}$ ) e radiação ( $\dot{Q}_r$ ) para o exterior ( $\dot{Q}_{c\infty}$ ) (ROSILLO; JARAMILO, 2012).

Figura 1 – Sistemas de arrefecimento em transformadores.



Fonte: Rosillo e Jaramilo (2012).

#### 2.1.4 Sistemas de arrefecimento em transformadores

Parte da energia processada pelo transformador é convertida em calor devido a perdas no núcleo e nos enrolamentos. Esse calor deve ser dissipado para que as partes internas do transformador não atinjam temperaturas elevadas as quais podem comprometer o sistema de isolamento e consequentemente, afetar o tempo de vida útil do equipamento (KULKARNI; KHAPARDE, 2004a). Dessa forma, são instalados sistemas de arrefecimento que visam manter as temperaturas internas do transformador em níveis adequados.

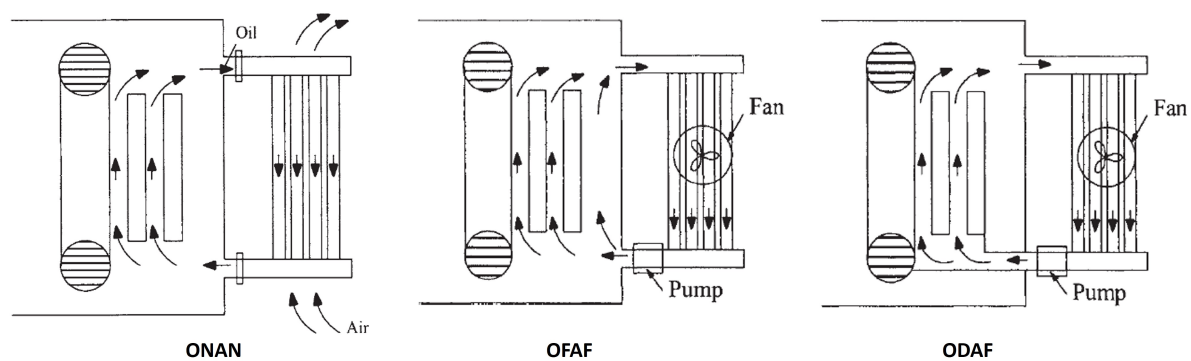
Em transformadores imersos em óleo, o óleo age como meio de isolamento e arrefecimento do transformador. O calor gerado pelo núcleo, enrolamentos e componentes estruturais é dissipado por meio da circulação do óleo na parte ativa do transformador. O óleo aquecido circula pelo sistema de arrefecimento e dissipa calor com ambiente externo (KULKARNI; KHAPARDE, 2004a).

Transformadores imersos em líquido são classificados de acordo com seu meio de arrefecimento por um código de 4 letras, o qual descreve seu meio de arrefecimento e a forma de circulação (IEEE, 2022). O óleo pode circular ao longo das bobinas por meio de 3 diferentes formas. O óleo natural (ON) na qual o fluido dissipa o calor das bobinas por meio da convecção natural. Óleo forçado (OF), na qual há utilização de uma bomba o bombeamento do óleo para o tanque do transformador ou óleo dirigido (OD) no qual

a bomba é utilizada para bombear óleo diretamente nas bobinas por meio de estruturas presentes na região inferior da parte ativa. De forma geral, sistemas ON são menos efetivos em relação a dissipação do calor em relação a sistemas OF, no entanto são mais confiáveis e econômicos, visto que não requerem a utilização de bombas. Outra característica importante desses sistemas de arrefecimento é o gradiente de temperatura entre a base e o topo dos enrolamentos do transformador. Sistemas OD resultam em gradiente de temperaturas menores do que sistemas ON e OF, essa diferença deve ser considerada para analisar o tempo de vida do equipamento (NOGUEIRA et al., 2022; KULKARNI; KHAPARDE, 2004a). Em relação ao meio de arrefecimento externo, o ar pode circular por meio do uso de ventiladores externos (AR Forçado (AF)) ou de forma natural com a dissipação de calor devido à convecção natural (Ar natural (AN)).

Na figura 2 mostram 3 exemplos de sistemas de arrefecimento utilizados em transformadores, ONAN (Óleo natural, ar natural) OFAF (Óleo forçado, ar forçado) e ODAF (Óleo dirigido, ar forçado).

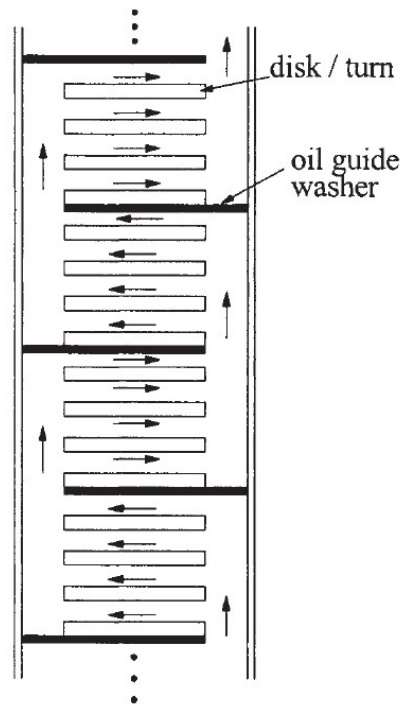
Figura 2 – Sistemas de arrefecimento em transformadores.



Fonte: Adaptado de Kulkarni e Khaparde (2004a).

Em transformadores de potência, desvios de óleo são comumente utilizados para arrefecer as bobinas efetivamente. O uso de desvios tem como objetivo guiar e distribuir o fluxo ao longo dos canais radiais e axiais dos enrolamentos como é mostrado no exemplo da figura 3.

Figura 3 – Óleo dirigido ao longo do enrolamento.



Fonte: Kulkarni e Khaparde (2004a).

## 2.2 SIMULAÇÃO FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL

Segundo Versteeg e Malalasekera (2007), simulação fluidodinâmica computacional é a análise de sistemas que envolvem fluxo de fluido, transferência de calor e fenômenos associados como reações químicas por meio do uso de computadores para a realização das simulações.

O uso do CFD em projetos de engenharia oferece inúmeras vantagens em relação ao uso da metodologia tradicional de realização de experimentos para o desenvolvimento de produto, como: redução de custo e tempo para o desenvolvimento de novos designs, possibilidade de poder simular grandes sistemas sem a necessidade de realizar modelos em escala e permite a avaliação de todas as variáveis relevantes (velocidade, pressão, temperatura, concentração, intensidade de turbulência) de um sistema (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007; PATANKAR, 1980).

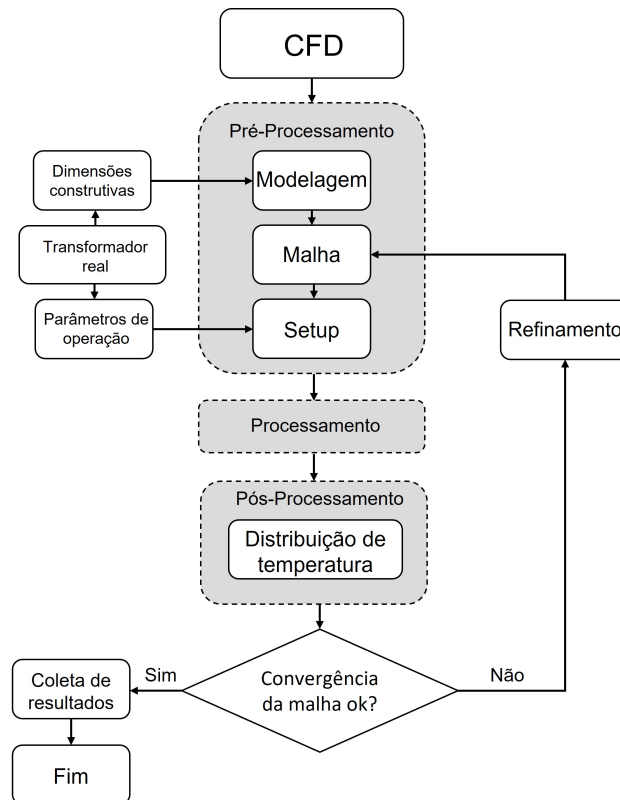


### 3 METODOLOGIA

O trabalho em questão busca apresentar a distribuição de temperatura de transformador assim como realizar uma análise acerca do posicionamento de sensores de fibra ótica ao longo dos canais de enrolamento por meio do uso da simulação.

A figura 4 mostra o fluxograma da metodologia empregada neste trabalho. O fluxograma foi dividido em três grandes etapas, pré-processamento, processamento e pós-processamento. Na etapa de pré-processamento, é realizado a modelagem do transformador, como o objetivo do estudo é analisar somente os canais entre os enrolamentos, o modelo usado nas simulações foi restrito somente aos dois enrolamentos de alta tensão do transformador estudado como é mostrada na figura 5. Após a modelagem, a geometria deve ser discretizada em vários elementos (Malha). Em sequência, no setup, as condições de contorno definidas na simulação foram: a temperatura de entrada e vazão mássica do óleo, fluxo de calor nos enrolamentos, e pressão relativa na saída. Os valores dessas condições de contorno foram definidos com base em ensaio previamente realizado no transformador. Na etapa de processamento, as equações de conservação são resolvidas numericamente usando o software ANSYS Fluent. Na etapa de pós-processamento, a distribuição de temperatura é coletada, e os resultados do ensaio e da simulação são comparados. Além disso, observa-se a partir da figura 4, que há uma etapa de estudo de convergência, essa etapa é fundamental para que haja uma maior confiabilidade nos resultados.

Figura 4 – Fluxograma da metodologia.



Fonte: Autor(2023).

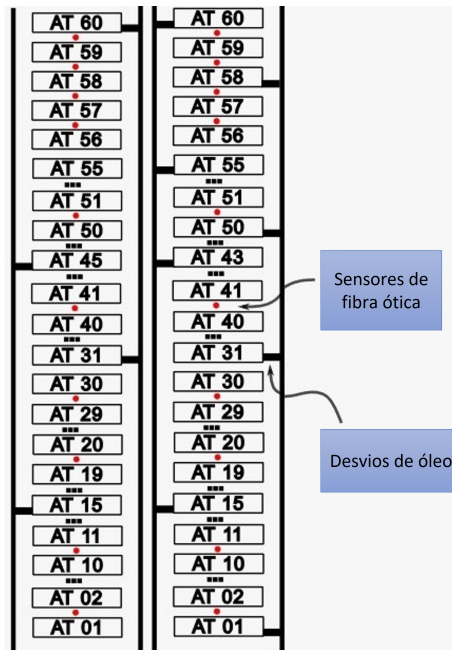
Figura 5 – Geometria simplificada da coluna do transformador.



Fonte: Autor(2023).

As regiões de interesse a serem analisadas nas simulações correspondem às localizações dos sensores de fibra ótica instalados no transformador estudado. O esquema dos dois enrolamentos do transformador com a posição dos sensores e suas características construtivas são mostrada na figura 6. Em tais regiões de interesse, foram coletados 15 valores de temperatura ao longo do canais entre os enrolamentos, 5 na parte interna do canal, 5 na parte central e 5 na parte externa, como mostra a figura 7. Dados acerca de como foi realizado os ensaios e mais informações são descritas em Rodrigues et al. (2023).

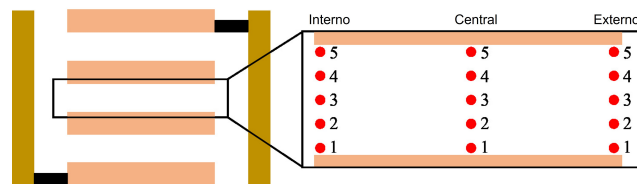
Figura 6 – Esquema com o posicionamento dos sensores com as características construtivas das colunas.



Fonte: Autor(2023).

Como um dos objetivos do trabalho, é realizar uma análise acerca do posicionamento dos sensores ao longo dos canais do enrolamento, foram coletadas 15 pontos ao longo dos canais entre os enrolamentos, 5 no parte interna do canal, 5 na parte central e 5 na parte externa, como mostra a figura 7.

Figura 7 – Pontos coletados nos canais entre os enrolamentos.



Fonte: Autor(2023).

## 4 RESULTADOS

### 4.1 DESCRIÇÃO DO TRANSFORMADOR

O transformador utilizado nos ensaios térmicos e foi base para as simulações, é um transformador monofásico com dois enrolamentos de alta tensão (AT) e um núcleo ferro magnético. Esse transformador foi projetado e montado com o objetivo de realizar análises de performance térmica com fins de obter perspectivas acerca de como melhorar o projeto térmico de transformadores de potência. Na figura 8 é mostrado o transformador utilizado nesse estudo.

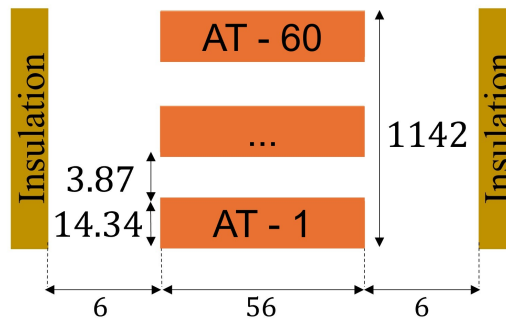
Figura 8 – Transformador.



Fonte: Autor(2023).

Cada enrolamento possui 60 discos cada e suas dimensões são mostrada na figura 9.

Figura 9 – Dimensões do enrolamento de alta tensão (AT).



Fonte: Autor(2023).

## 4.2 CONDIÇÕES DE CONTORNO DA SIMULAÇÃO

A densidade ( $\rho_f$ ), condutividade térmica ( $k_f$ ), calor específico ( $c_{pf}$ ) e viscosidade do óleo ( $\mu_f$ ) utilizado no transformador são apresentados nas equações 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4 respectivamente.

$$\rho_f = 1064 - 0.623 \cdot T_{oil} \quad [kg/m^3] \quad (4.1)$$

$$k_f = 0.145 - 6.5 \cdot 10^{-5} \cdot T_{oil} \quad [W/(m \cdot K)] \quad (4.2)$$

$$c_{pf} = 588 + 4.34 \cdot T_{oil} \quad [J/kg \cdot K] \quad (4.3)$$

$$\begin{aligned} \mu_f = & 7.085247 - 0.06097287 \cdot T_{oil} + 0.00017478 \cdot T_{oil}^2 \\ & - 1.668228 \cdot 10^{-7} \cdot T_{oil}^3 \quad [kg/m \cdot s] \end{aligned} \quad (4.4)$$

As perdas térmicas responsáveis pelo aquecimento interno do transformador são apresentadas na tabela 1. Como os discos não foram modelados, somente, foi imposto uma fluxo térmico ao longo da superfícies do óleo que correspondem as faces dos discos.

Tabela 1 – Perdas térmicas usadas nas simulações

<b>Winding</b>	<b>Coluna 1</b>	<b>Coluna 2</b>
AT	318.277 W/m <sup>2</sup>	325.362 W/m <sup>2</sup>

Como o sistema de arrefecimento do transformador é do tipo ODAN, na entrada do enrolamento foi imposta uma vazão mássica e uma temperatura para óleo, tais valores foram retirados do ensaio térmico previamente realizado no transformador. As equações 4.5 e 4.6 mostram os valores da vazão mássica e temperatura de entrada respectivamente.

Na saída do enrolamento, foi imposto uma pressão relativa de 0 Pa em relação a ambiente.

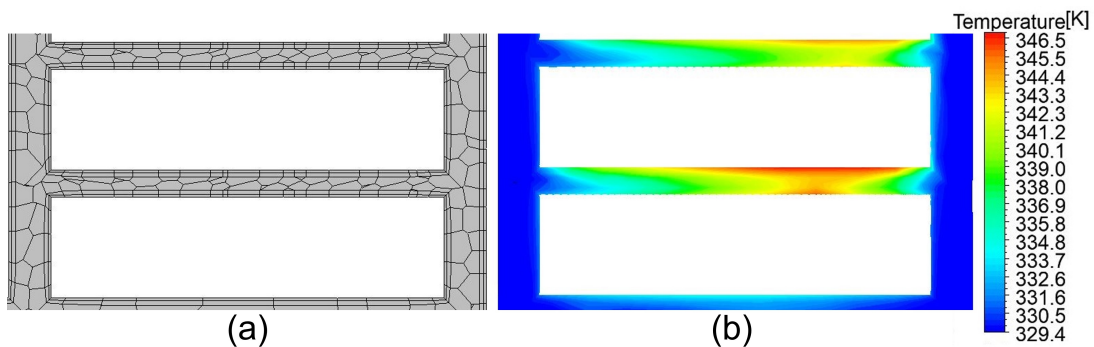
$$\dot{m}_{oil} = 0.000746666665 [m^3/s] \cdot 858.77 [kg/m^3] \quad (4.5)$$

$$T_{in} = 329.41 K \quad (4.6)$$

### 4.3 ESTUDO DE CONVERGÊNCIA DE MALHA

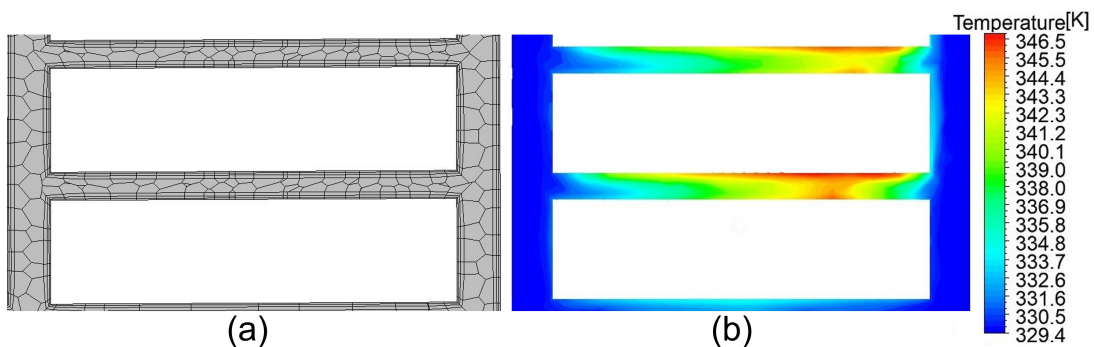
Como mostrado na figura 5, somente os enrolamentos de alta tensão foram modelados. Além disso somente o domínio do fluido foi considerado na simulação. Em sequência, foi realizado um estudo de convergência de malha, na figura 10 é mostrado a distribuição de temperatura e a uma malha inicial na entrada da coluna 1, enquanto que na 11 é mostrado a malha final e sua distribuição de temperatura. A partir das figuras, é possível observar a convergência dos resultados com o refino da malha.

Figura 10 – Malha inicial na entrada coluna 1 (Discos 1 e 2). (a) 7476984 elementos. (b) Distribuição de temperatura.



Fonte: Autor(2023).

Figura 11 – Malha final na entrada coluna 1 (Discos 1 e 2). (a) 15989990 elementos. (b) Distribuição de temperatura.

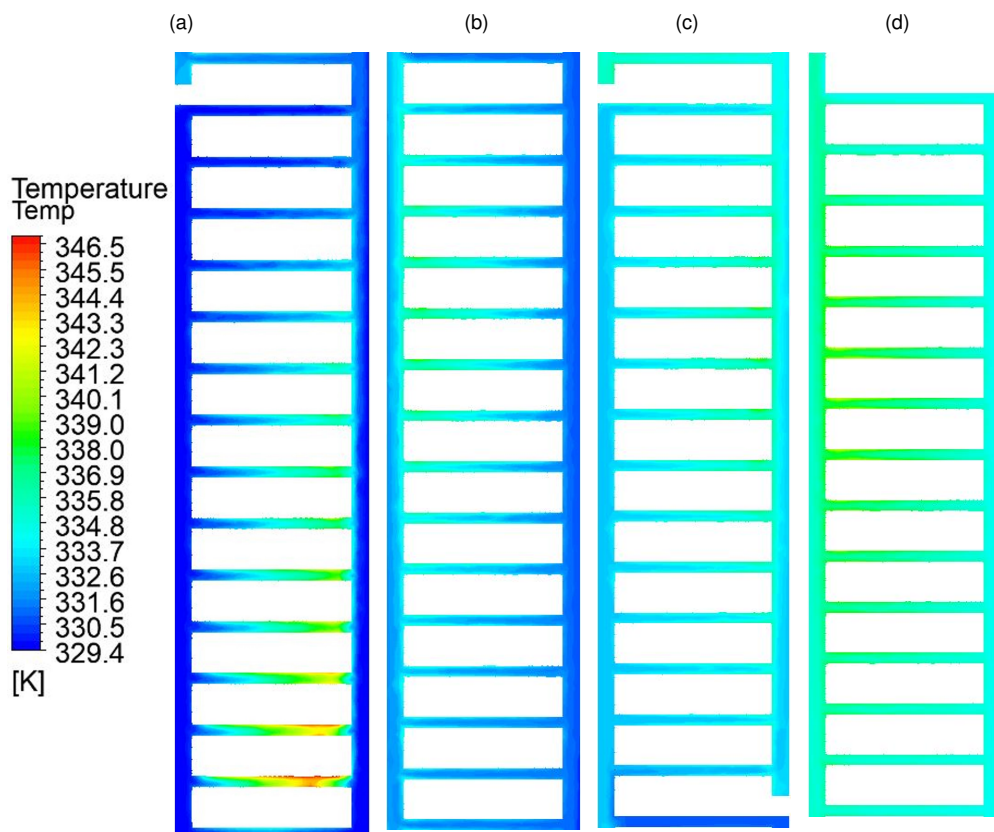


Fonte: Autor(2023).

#### 4.4 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

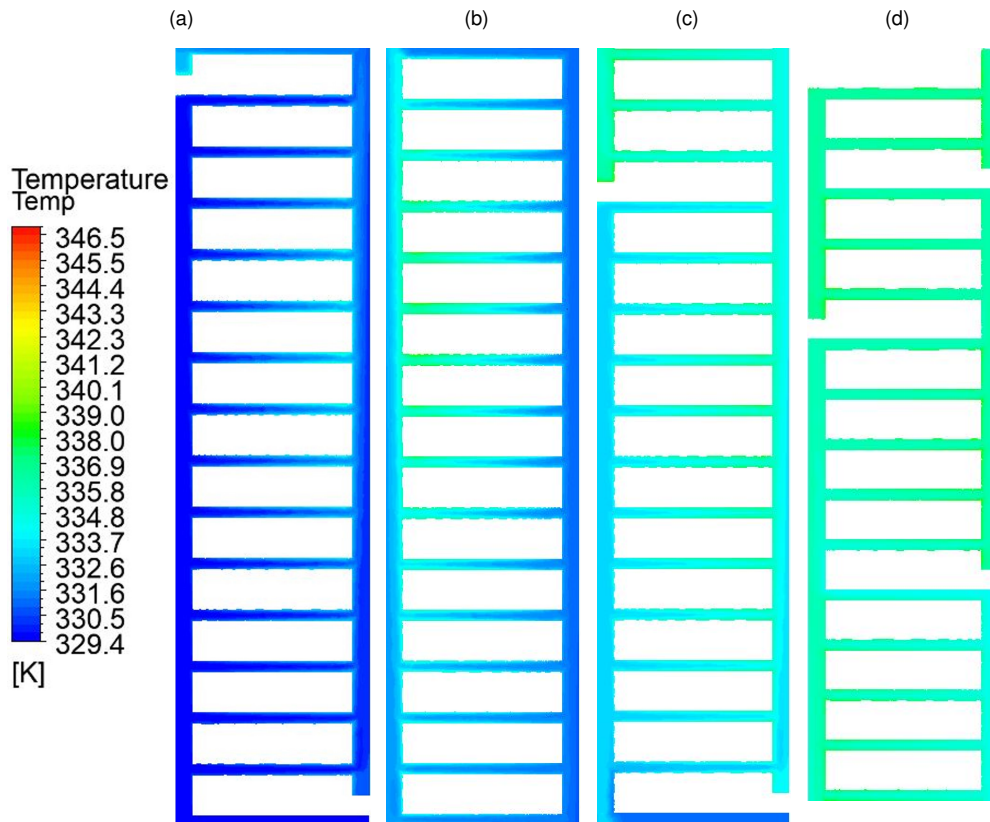
A partir das simulações, a distribuição de temperatura ao longo dos enrolamentos de alta tensão da foram coletas e estão apresentadas na figura 12 e 13, para coluna 1 e coluna 2 respectivamente. A partir das figuras, observa-se que em ambas enrolamentos a temperatura do óleo aumenta à medida que atinge o topo da bobina, entrando com  $56^{\circ}\text{C}$  e saindo com  $62^{\circ}\text{C}$ . A influência do posicionamento do desvios de óleo também é observada a partir da comparação entre as duas figuras, na coluna 1, em seu primeiro canal radial é observado a presença de um ponto quente enquanto que na coluna 2, devido à presença de um desvio de óleo, não é observado esse mesmo ponto quente.

Figura 12 – Distribuição de temperatura ao longo do enrolamento de AT - Coluna 1: Discos (a) 01-15, (b) 16-30, (c) 31-45, (d) 46-60.



Fonte: Autor(2023).

Figura 13 – Distribuição de temperatura ao longo do enrolamento de AT - Coluna 2: Discos (a) 01-15, (b) 16-30, (c) 31-45, (d) 46-60.



Fonte: Autor(2023).

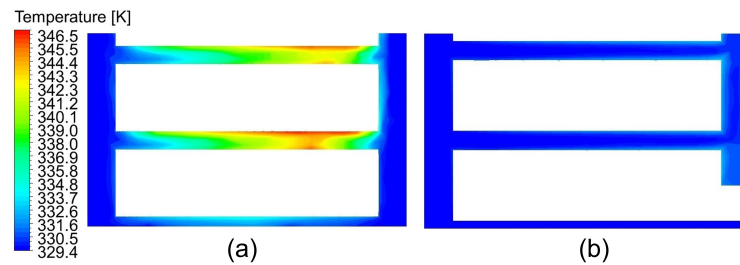
Com o objetivo de analisar a influência do desvio de óleo no escoamento do óleo ao longo dos canais dos enrolamentos, as figuras 14 e 15 mostram uma comparação entre as distribuições de temperatura e de velocidade entre a coluna 1 e a coluna 2. A presença de um desvio de óleo na entrada da coluna 2 gera um fluxo maior de óleo no primeiro canal radial, pois com a presença do desvio de óleo impedindo a entrada do óleo pelo canal axial externo, o óleo entra somente pelo o canal axial interno e devido ao posicionamento do segundo desvio do óleo (Sentido oposto ao do primeiro), o escoamento pelo canal radial é o que oferece menor resistência hidráulica. A coluna 1 não possui esse desvio de óleo na entrada e portanto a tendência do escoamento é seguir pelos canais axiais à medida que sobe pela bobina, dessa forma, com a consequente menor intensidade do fluxo de óleo nos canais radiais, há menor transferência de calor e o aumento da temperatura.

Além disso, a figura 14 mostra que a temperatura mais quente não está localizada no centro do canal radial e sua localização varia de acordo com o escoamento de óleo. Devido ao posicionamento invertido de dois desvios de óleo subsequentes, o escoamento do óleo segue de um lado para o outro. Por exemplo, figura 13d, a qual mostra a saída da coluna 2, o escoamento segue da parte externa para interna entre os discos 46 à 50, após o desvio de óleo localizado no disco 50 o sentido do escoamento é invertido, seguindo do parte interna para externa e esse comportamento é observado ao longo de todo o



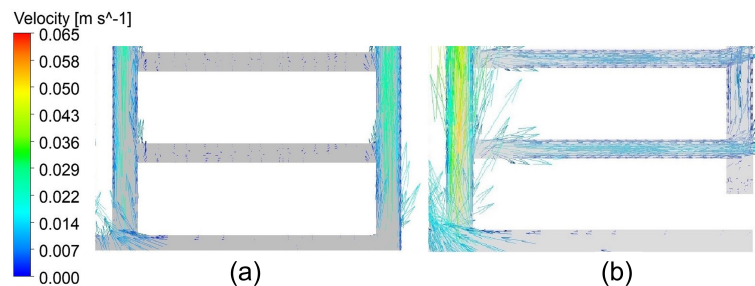
enrolamento e em ambas as colunas dos transformador.

Figura 14 – Distribuição de temperatura: (a) Coluna 1 (b) Coluna 2.



Fonte: Autor(2023).

Figura 15 – Vetores de velocidades: (a) Coluna 1 (b) Coluna 2.



Fonte: Autor(2023).

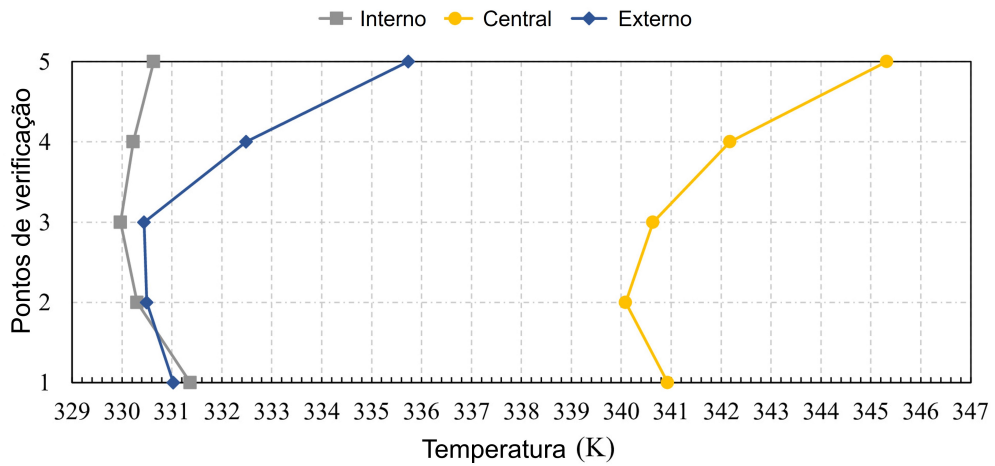
#### 4.5 COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS DOS ENSAIOS E DAS SIMULAÇÕES

De forma a comparar os resultados da simulação com os dados experimentais, as temperaturas dos canais radiais correspondentes a localização dos sensores de fibra ótica foram coletadas de acordo com a figura 7, foram coletados pontos nas regiões interna, central e externa desses canais. Para cada uma dessas regiões (Interna, central e externa) foram coletados 5 pontos na vertical.

As figuras 16, 17 e 18 mostram a distribuição de temperatura resultantes dos pontos coletados em três posições do enrolamento de alta tensão da coluna 1, na parte de baixo entre os discos 1 e 2, no meio entre os discos 29 e 30 e no topo entre os discos 59 e 60. No canal radial entre os discos 1 e 2, o valor de temperatura mais quente está localizado na região central do disco, enquanto no canal entre os discos 29 e 30 e no canal entre os discos 59 e 60, as curvas correspondentes a região interna dos canais possui os valores maiores de temperatura, devido ao posicionamento dos desvios de óleo que oferece um escoamento no sentido da região externa para interna, o que possibilita um maior fluxo de óleo e conseqüentemente gerando uma maior transferência de calor devido à convecção

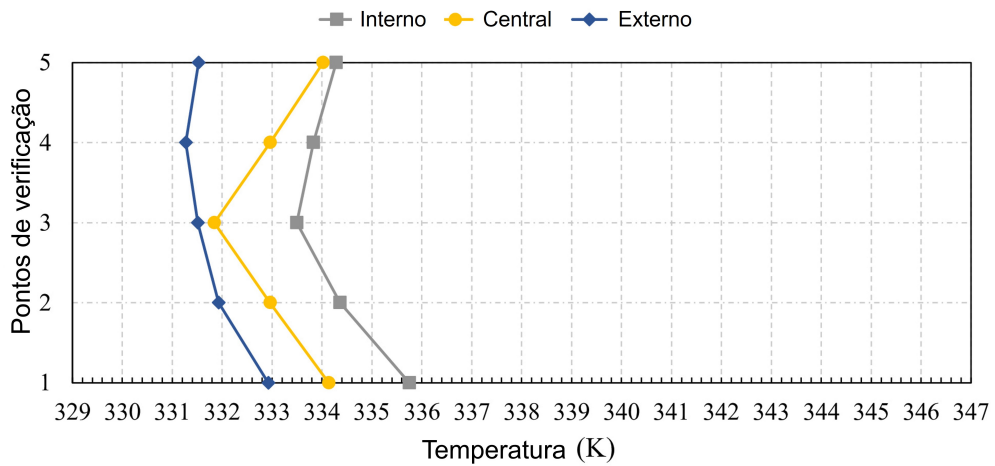
forçada. Além disso, a diferença de temperatura ao longo do canal dos canais entre os discos 29 e 30 e entre os discos 59 e 60 (De cerca de  $4^{\circ}\text{C}$ ) é menor que a do canal entre os discos 1 e 2.

Figura 16 – Distribuição vertical de temperatura - Coluna 1 - Canal radiais entre os discos 01 e 02.



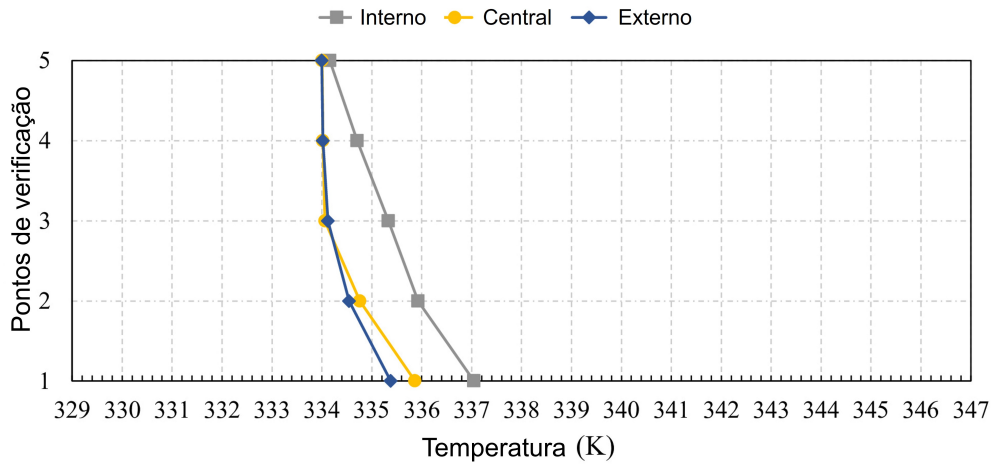
Fonte: Autor(2023).

Figura 17 – Distribuição vertical de temperatura - Coluna 1 - Canal radial entre os discos 29 e 30.



Fonte: Autor(2023).

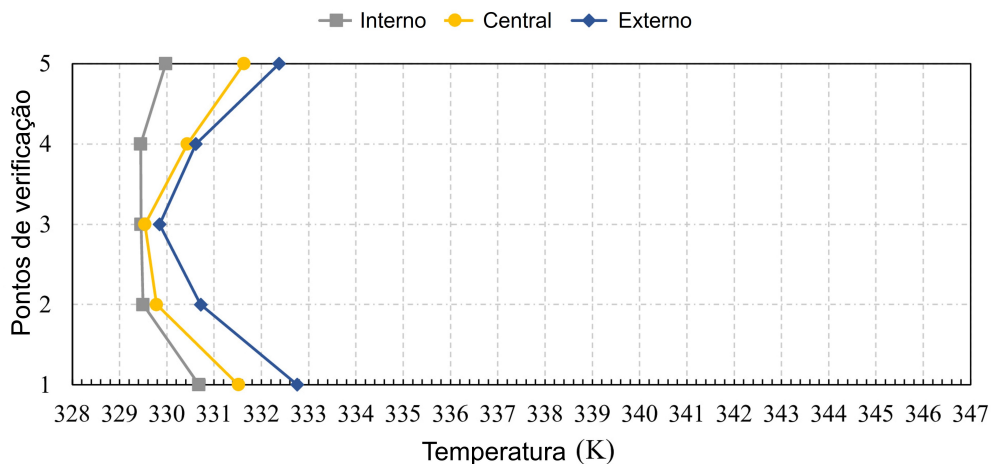
Figura 18 – Distribuição vertical de temperatura - Coluna 1 - Canal radial entre os discos 59 e 60.



Fonte: Autor(2023).

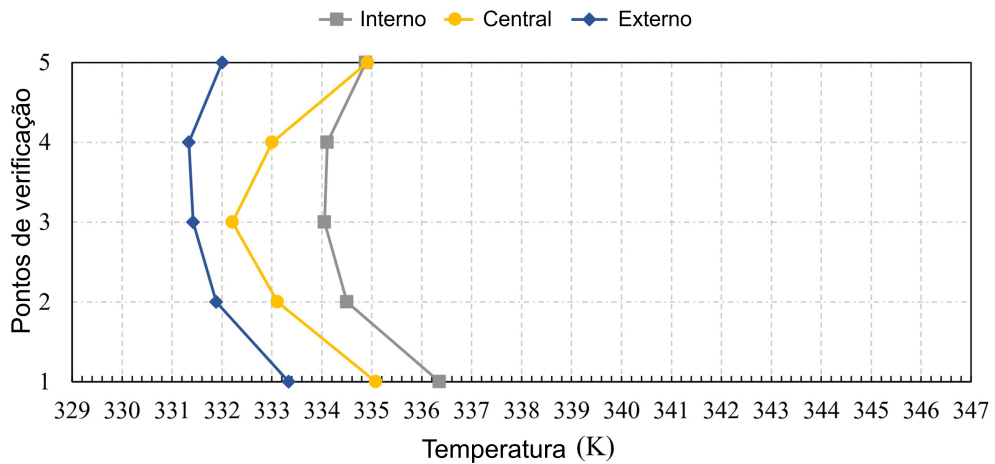
Da mesma forma como foi feito na coluna 1, os valores de temperaturas ao longo dos canais radiais entre os discos 1 e 2, discos 29 e 30 e discos 59 e 60 foram coletadas e são apresentadas nas figuras 19, 20 e 21. Diferente da coluna 1, as maiores temperaturas do canal radial entre os discos 1 e 2 estão na curva da região externa do canal. Essa mudança de localização da maior temperatura está relacionada a presença de um desvio de óleo na coluna 2. Da mesma forma, no canal entre os discos 59 e 60, a curva externa apresenta os maiores valores de temperatura enquanto que no canal entre o disco 29 e 30, a curva interna apresenta os maiores valores de temperatura. Nos três canais observados na coluna 2, a diferença de temperatura ao longo do canal é igual a aproximadamente  $4^{\circ}\text{C}$ .

Figura 19 – Distribuição vertical de temperatura - Coluna 2 - Canal radial entre os discos 01 e 02.



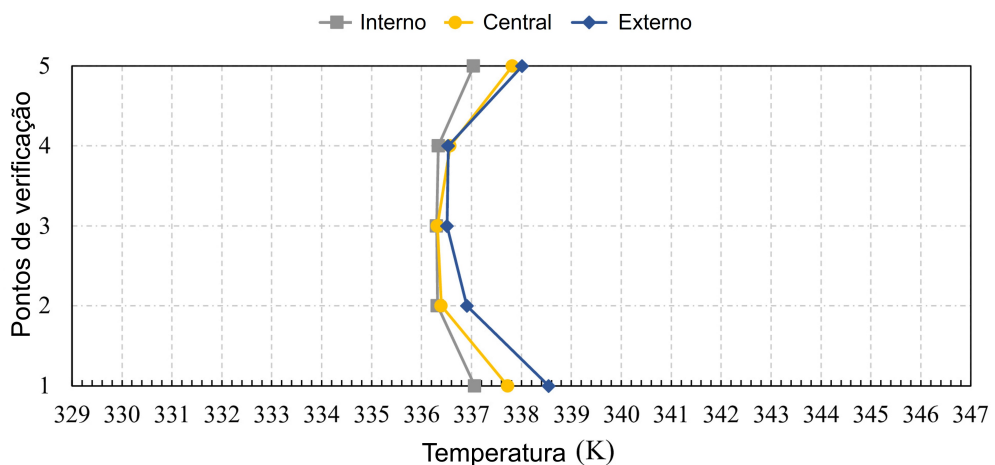
Fonte: Autor(2023).

Figura 20 – Distribuição vertical de temperatura - Coluna 2 - Canal radiais entre os discos 29 e 30.



Fonte: Autor(2023).

Figura 21 – Distribuição vertical de temperatura - Coluna 2 - Canal radiais entre os discos 59 e 60.



Fonte: Autor(2023).

Portanto, de forma geral, as temperaturas são maiores nas faces próximas aos discos e menores na região central dos discos. Devido ao escoamento ser igual a zero na parede do disco, o óleo estagnado nessa região é mais quente. A partir da comparação do perfil de temperatura entre os dois enrolamentos de alta tensão das colunas 1 e 2, é possível observar o impacto da alocação dos desvios de óleo ao longo dos enrolamentos, principalmente comparando os valores coletados do canal radial entre o disco 1 e 2 em ambas as colunas (Figuras 16 e 19).

Como as medições de sensores de fibras ótica indicam o valor de temperatura somente de um ponto ao longo do canal entre os discos, uma média dos 5 pontos nas regiões interna, central e externa foi calculada. Dessa forma, é possível comparar as medições dos

sensores com em três regiões diferentes da simulação. A comparação entre os valores medidos pelos sensores e valores coletados na simulação para as Colunas 1 e 2 é mostrado nas figuras 22 e 23, respectivamente, onde o eixo y corresponde aos discos onde os sensores foram alocados como mostrado na figura 6. Nas figuras 22 e 23 são representadas barras de incerteza de  $\pm 1^\circ\text{C}$  para os valores experimentais.

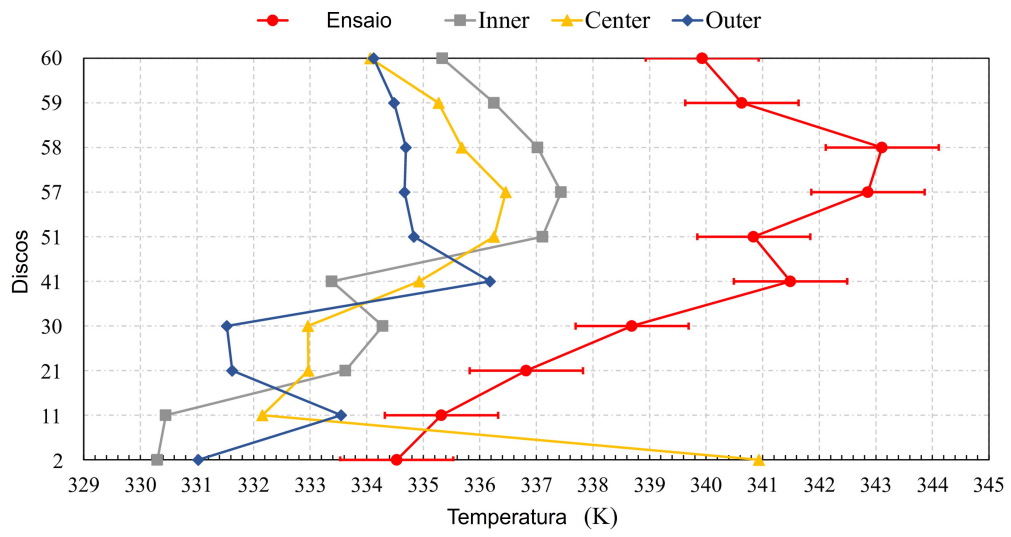
A partir dessa análise foi verificado que ambos dados experimentais e de simulação resultaram em comportamento similares de temperatura ao longo dos enrolamentos. Os valores de temperatura das simulação apresentaram resultados similares ao da simulação com erro médio de 1,59% para coluna 1 e 1,89% para coluna 2. Essas diferenças eram esperadas e podem ser explicadas pela simplificações realizada para o modelo de simulação, como por exemplo a distribuição uniforme de perda ao longo dos enrolamentos.

As temperaturas coletas na simulação para a coluna 2 são menores das temperaturas medidas nos ensaios. O mesmo comportamento é observado na coluna 1, com a exceção do primeiro ponto de medição. Como foi mostrado, na figura 14, a coluna 1 apresentou um ponto quente no canal radial entre o disco 1 e 2, não detectado pelo sensor de fibra ótica. É importante ressaltar que a medição do sensor de fibra ótica mostra a temperatura da face do disco onde foi instalado, enquanto que a simulação a temperatura do óleo adjacente foram coletadas. Portanto, é esperado que as temperaturas na face do disco seja maior do que o óleo adjacente.

Comparando ambas as colunas, a coluna 2 apresentou maiores valores de temperatura do que a coluna 1, indicando que a simples alocação de mais desvios de óleo não necessariamente indica que o sistema de arrefecimento do transformador apresentará uma melhor dissipação térmica. Os valores maiores de temperaturas alternam entre as médias das posição externas e interna a cada passo discos entre dois desvios de óleo, o que corrobora com os resultados observados pelos pontos de verificação e pela dinâmica do fluxo de óleo, mostrando que o ponto mais quente do disco do enrolamento não está necessariamente em sua região central.

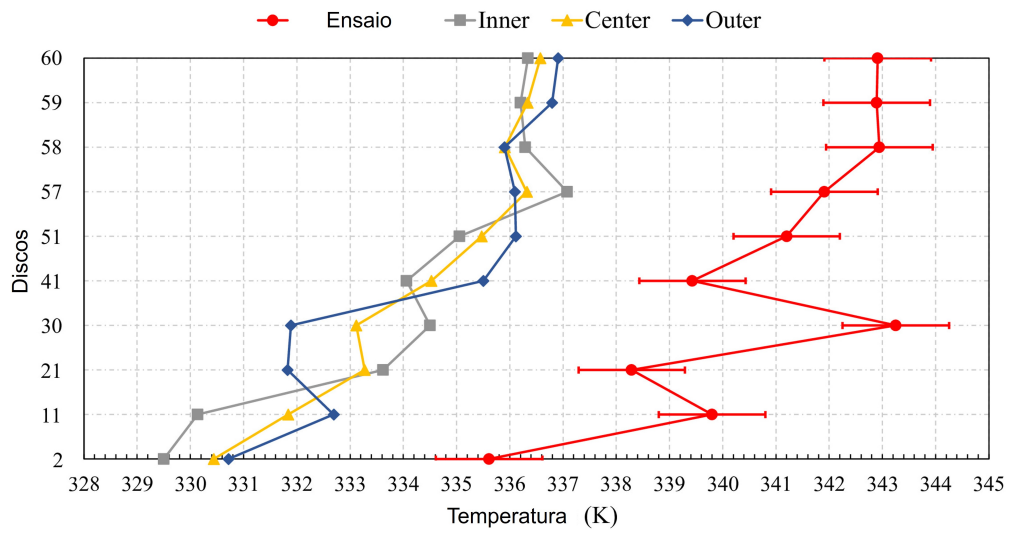
De forma similar, as temperaturas pontuais medidas no ensaio foram comparadas com as médias dos pontos de verificação na vertical. A temperatura média de todos os pontos 1 de verificação, todos os pontos 2 e até o ponto 5, nos canais radiais correspondentes ao posicionamento dos sensores foi calculada. Figuras 24 e 25 mostra a comparação entre os resultados do ensaio experimental e dos pontos de verificação coletados na simulação CFD para a coluna 1 e 2 respectivamente. A temperatura média dos pontos de verificação é chamada de "VP" nos gráficos. Em ambas as colunas, é observado que as médias dos pontos 1 e 5, que correspondem a temperatura do óleo em contato com o lado inferior e superior do disco, apresentaram maiores valores de temperaturas do que os outros pontos, e apresentaram valores mais próximos dos do ensaio.

Figura 22 – Temperaturas do ensaio e da simulação - Coluna 1.



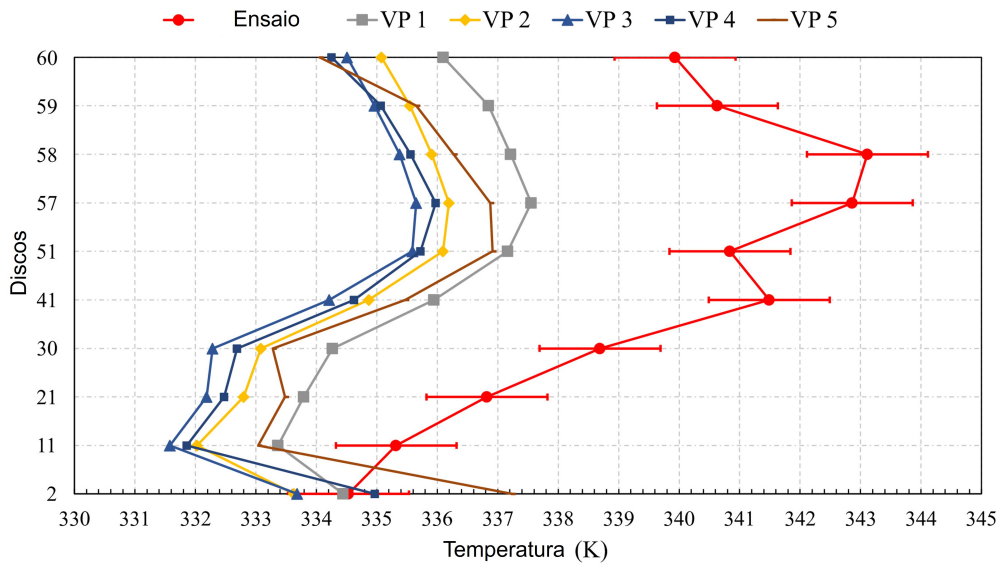
Fonte: Autor(2023).

Figura 23 – Temperaturas do ensaio e da simulação - Coluna 2.



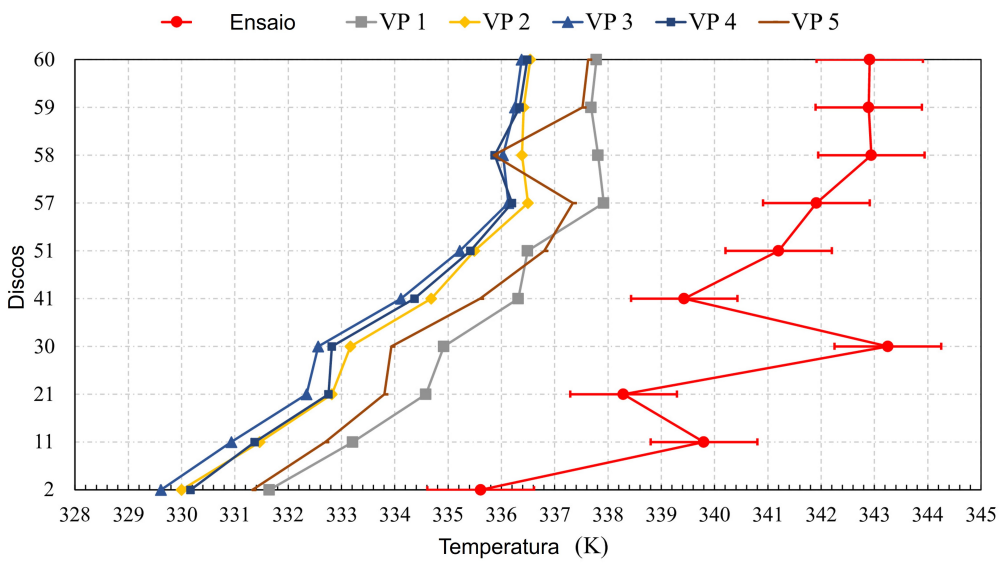
Fonte: Autor(2023).

Figura 24 – Temperaturas medidas no ensaio e média das temperaturas verticais - Coluna 1.



Fonte: Autor(2023).

Figura 25 – Temperaturas medidas no ensaio e média das temperaturas verticais - Coluna 2.



Fonte: Autor(2023).

## 5 CONCLUSÃO

Com o objetivo de entender a performance térmica de um transformador de potência e contribuir para a melhora do posicionamento de sensores fibra ótica, este trabalho apresentou a análise térmica de enrolamentos de alta tensão sob condições ODAN por meio de simulações CFD. Os resultados foram comparados com dados obtidos de um ensaio de aumento de temperatura de um transformador com 20 sensores de fibras ótica posicionados ao longo dos seus enrolamentos. As simulações mostraram uma boa precisão em determinar as temperaturas do transformador, apresentam baixo erro, e validando a metodologia empregada.

As simulações mostram detalhes que não são detectados pelos sensores, o que demonstra sua capacidade de ser uma ótima ferramenta para realização de projetos de transformadores. Foi observado que o número e o posicionamento dos desvios de óleo influenciam na distribuição do fluxo de óleo e sua orientação nos canais radiais, o que influencia na distribuição de temperatura ao longo dos enrolamentos. Além disso, a distribuição de temperatura mostrou que a falta de um desvio de óleo para guiar o fluxo de óleo pode resultar em pontos quentes ao longo dos canais radiais, sendo necessário em etapas anteriores de projeto considerar o efeito do posicionamento e quantidade de desvios de óleo na performance térmica do equipamento. A temperatura pontual medida não é necessariamente a mais quente ao longo do canal, e a análise prévia na etapa de projeto sobre o posicionamento dos sensores de fibra ótica deve ser realizada para que as temperaturas críticas de operação do transformador sejam monitoradas.

Portanto, analisando previamente o fluxo de óleo e as distribuições de temperatura por meio de simulação CFD ou THNM, é possível alocar os sensores da melhor forma. Por exemplo, para um transformador apresentado neste trabalho os sensores de fibra óticas deveriam ser alocados próximos a entradas ou saídas dos canais radiais, de acordo com o fluxo de óleo ao longo dos enrolamentos. Dessa forma, a alocação dos sensores deve ser flexível, permitindo que os sensores sejam fixados em diferentes posições ao longo da horizontal e vertical dos canais radiais para um melhor monitoramento das temperaturas do transformador.

Em relação à diferença encontrada entre os resultados das simulações e do ensaio, pode ser explicada por dois motivos. Primeiramente, as perdas térmicas ao longo dos enrolamentos não são uniformes na prática, como foi considerada nas simulações. Secundariamente, a construção do transformador possui características e restrições que não podem ser modeladas em ambiente de simulação. Portanto, uma vez validada a metodologia utilizada na simulação, ela pode ser usada em etapas de projetos de transformadores, contribuindo no melhor posicionamento e distribuição dos desvios de óleo e dos sensores de fibra ótica.



## REFERÊNCIAS

BARUAH, N.; NAYAK, S. K.; PRATIHAR, S. K. Quantitative effect of aging duration on dielectric parameters based on frequency response. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 71, p. 1–9, 2022.

CAMPELO, H. M. R. et al. Numerical thermofluid analysis of a power transformer disc-type winding. In: **2016 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC)**. [S.l.: s.n.], 2016. p. 362–365.

CHI, C. et al. A multi-scale thermal-fluid coupling model for onan transformer considering entire circulating oil systems. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, v. 135, p. 107614, 02 2022.

CIGRE. **Brochure 209, Thermal Performance of Transformers**. [S.l.]: Cigré, 2009.

\_\_\_\_\_. **Transformer Thermal Modelling**. [S.l.]: Cigré, 2016.

DAGHRAH, M. et al. Flow and temperature distributions in a disc type winding-part i: Forced and directed cooling modes. **Applied Thermal Engineering**, v. 165, p. 114653, 2020. ISSN 1359-4311. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431119349543>>.

EDIRIWEERA, E. G. P. et al. Localizing hotspot in an oil immersed distribution transformer using finite element analysis. In: **2020 IEEE Electric Power and Energy Conference (EPEC)**. [S.l.: s.n.], 2020. p. 1–6.

FERNÁNDEZ, I. et al. Thermal degradation assessment of kraft paper in power transformers insulated with natural esters. **Applied Thermal Engineering**, v. 104, p. 129–138, 2016. ISSN 1359-4311. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S135943111630672X>>.

IEEE. IEEE guide for loading mineral-oil-immersed transformers and step-voltage regulators. **IEEE Std C57.91-2011 (Revision of IEEE Std C57.91-1995)**, p. 1–123, 2012.

\_\_\_\_\_. IEEE standard for general requirements for liquid-immersed distribution, power, and regulating transformers. **IEEE Std C57.12.00-2021 (Revision of IEEE Std C57.12.00-2015)**, p. 1–74, 2022.

ISHAK, N. A. M.; JAMAIL, N. A. M.; OTHMAN, N. A. High voltage characteristics of kraft paper insulator with effect of palm oil and coconut oil. In: **4th IET Clean Energy and Technology Conference (CEAT 2016)**. [S.l.: s.n.], 2016. p. 1–8.

JIANG, J.; MA, G. **Optical Sensing in Power Transformers**. Hoboken: John Wiley & Sons, 2021.

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

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

LIN, J.; MA, J.; ZHU, J. Hierarchical federated learning for power transformer fault diagnosis. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 71, p. 1–11, 2022.

LIN, J. et al. A transfer ensemble learning method for evaluating power transformer health conditions with limited measurement data. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 71, p. 1–10, 2022.

LIU, G. et al. Numerical and experimental investigation of temperature distribution for oil-immersed transformer winding based on dimensionless least-squares and upwind finite element method. **IEEE Access**, v. 7, p. 119110–119120, 2019.

LIU, J. et al. Effects of temperature gradient induced aging and moisture distribution on dielectric response measurement for transformer insulation. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 71, p. 1–10, 2022.

MARTIGONI, A. **Transformadores**. 8. ed. São Paulo: GLOBO, 1991.

NOGUEIRA, G. C. et al. Thermal analysis of power transformers with different cooling systems using computational fluid dynamics. **Journal of Control, Automation and Electrical Systems**, v. 33, p. 359–368, 2022.

PATANKAR, S. **Numerical Heat Transfer and Fluid Flow**. Washington: Hemisphere Publishing Corporation, 1980.

RADAKOVIC, Z. R.; SORGIC, M. S. Basics of detailed thermal-hydraulic model for thermal design of oil power transformers. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 25, n. 2, p. 790–802, 2010.

RAEISIAN, L. et al. Prediction of oil hotspot temperature in a distribution transformer by cfd method. In: **VDE High Voltage Technology 2018; ETG-Symposium**. [S.l.: s.n.], 2018. p. 1–6.

RIES, W. **Transformadores: Fundamentos para o projeto e cálculo**. 1. ed. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2007.

RODRIGUES, T. F. et al. Evaluation of power transformer thermal performance and optical sensor positioning using cfd simulations and temperature rise test. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 72, p. 1–11, 2023.

ROSILLO, C. A. H. M. E.; JARAMILO, G. Advanced thermal modeling and experimental performance of oil distribution transformers. **IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY**, v. 27, n. 4, p. 1710–1717, 2012.

SANTISTEBAN, A. et al. Thermal modelling of a power transformer disc type winding immersed in mineral and ester-based oils using network models and cfd. **IEEE Access**, v. 7, p. 174651–174661, 2019.

THULUKKANAM, K. **Heat Exchanger Desing Handbook**. 2. ed. Boca Raton: CRC, 2013.

TORRIANO, F. et al. Numerical and experimental thermofluid investigation of different disc-type power transformer winding arrangements. **International Journal of Heat and Fluid Flow**, v. 69, p. 62–72, 2018. ISSN 0142-727X.

VERSTEEG, H.; MALALASEKERA, W. **An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The finite volume method**. Harlow: Pearson Education, 2007.

YUAN, F. et al. Thermal optimization research of oil-immersed transformer winding based on the support machine response surface. **Thermal Science**, n. 00, p. 264, 2021.

ZHANG, X. et al. Numerical investigation of oil flow and temperature distributions for on transformer windings. **Applied Thermal Engineering**, v. 130, 10 2017.

ÇENGEL, Y. A.; GHAJAR, A. J. **Transferência de calor e massa: Um abordagem prática**. 4. ed. Porto Alegre: AMGH, 2012.

NUP: 23081.161653/2023-10

Prioridade: Normal

**Homologação de ata de defesa de TCC e estágio de graduação**

125.322 - Bancas examinadoras de TCC: indicação e atuação

**COMPONENTE**

Ordem	Descrição	Nome do arquivo
18	Trabalho de conclusão de curso (TCC) (125.32)	tcc_Tales Fraga_Final_version.pdf

**Assinaturas**

**22/01/2024 18:49:26**

TALES FRAGA RODRIGUES (Aluno de Graduação - Aluno Regular)  
07.09.03.01.0.0 - Engenharia Mecânica - 120379

**22/01/2024 19:25:27**

CARLOS EDUARDO GUEX FALCÃO (PROFESSOR DO MAGISTÉRIO SUPERIOR (Ativo))  
07.35.00.00.0.0 - DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA - DEM

1960



Código Verificador: 3764839

Código CRC: 5f46f122

Consulte em: <https://portal.ufsm.br/documentos/publico/autenticacao/assinaturas.html>

