UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

RICARDO GOMES DA SILVA

MODELAGEM TÉRMICA DE UM TRANSFORMADOR DE POTENCIAL CAPACITIVO COM USO DE CFD

Recife
2017

RICARDO GOMES DA SILVA

MODELAGEM TÉRMICA DE UM TRANSFORMADOR DE POTENCIAL CAPACITIVO COM USO DE CFD

Dissertação submetida à Universidade Federal de Pernambuco como requisito para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica.
Área de concentração: Processos e Sistemas Térmicos.

Orientador: Dr. João Pereira de Brito Filho
Coorientador: Dr. José Claudino de Lira Júnior

Recife

2017

Catalogação na fonte
Bibliotecária Margareth Malta, CRB-4 / 1198

S586m Silva, Ricardo Gomes da.
Modelagem térmica de um transformador de potencial capacitivo com uso de CFD / Ricardo Gomes da Silva. - 2017.
81 folhas, il., gráfs., tabs.

Orientador: Prof. Dr. João Pereira de Brito Filho.
Coorientador: Prof. Dr. José Claudino de Lira Júnior.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2017.
Inclui Referências e Apêndices.

1. Engenharia Mecânica. 2. Transformador de potencial capacitivo. 3. CFD. 4. Transferência de calor. 5. Simulação numérica. 6. Termografia. I. Brito Filho, João Pereira de (Orientador). II. Lira Júnior, José Claudino de (Coorientador). III. Título.

UFPE

621 CDD (22. ed.) BCTG/2017-198

06 de março de 2017

"MODELAGEM TÉRMICA DE UM TRANSFORMADOR DE POTENCIAL CAPACITIVO COM USO DE CFD"

RICARDO GOMES DA SILVA

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: PROCESSOS E SISTEMAS TÉRMICOS

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA/CTG/EEP/UFPE

_____

Prof. Dr. JOÃO PEREIRA DE BRITO FILHO
ORIENTADOR/PRESIDENTE

_____

Prof. Dr. JOSÉ CLAUDINO DE LIRA JÚNIOR
COORIENTADOR

_____

Prof. Dr. CEZAR HENRIQUE GONZALEZ
COORDENADOR DO PROGRAMA

BANCA EXAMINADORA:

_____

Prof. Dr. JOÃO PEREIRA DE BRITO FILHO (UFPE)

_____

Prof. Dr. JOSÉ CLAUDINO DE LIRA JÚNIOR (UFPE)

_____

Prof. Dr. JORGE RECARTE HENRIQUEZ GUERRERO (UFPE)

_____

Prof. Dr. JOSÉ ÂNGELO PEIXOTO DA COSTA (IFPE)

À minha família...

AGRADECIMENTOS

À Deus pela graça e bênção.

À minha esposa Sorlandia e à minha filha Giovana, por todo o apoio e incentivo.

Aos meus pais, José Marcos e Maria José, pelo incentivo e carinho durante o desenvolvimento deste trabalho.

Ao meu primo Ivanilson Leão pelo incentivo.

Aos meus orientadores, professores João Brito e José Claudino, pelos ensinamentos e amizade construída.

Ao professor Jorge Henríquez, pelo apoio prestado ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

Ao professor José Ângelo (IFPE) pelos ensinamentos e amizade.

Ao professor Francisco Espedito pelo suporte e dicas.

À Companhia Hidro Elétrica do São Francisco (CHESF) pelo apoio e permissão para uso do projeto de pesquisa contrato CTNI – 92.2012.0540.00, que viabilizou a elaboração do presente trabalho.

Aos colegas da Divisão de Manutenção e Equipamentos de Transformação e Serviços Auxiliares (DOMA) da CHESF, em especial, a Heldemarcio Leite e Jurandir Pontes, pelas informações e apoio.

À Tereza Galindo, Marcos Antônio e Alcides Bonfim do Centro de Ensaios da CHESF (COES) pelo apoio e informações.

À todos os funcionários da Pós-Graduação (PPGEM).

RESUMO

Transformadores de Potencial Capacitivo (TPC) são importantes equipamentos instalados em subestações de alta tensão. Têm como função reduzir a tensão elétrica para valores compatíveis de medição, controle e proteção do sistema de potência. Esses equipamentos dissipam energia térmica resultando em campos de temperaturas superficiais definidos. Porém, quando há alguma avaria interna a dissipação térmica aumenta afetando o dielétrico e proporcionando uma elevação na temperatura da superfície externa. O objetivo do presente trabalho foi estudar o comportamento térmico de um TPC utilizando a simulação numérica por CFD na plataforma ANSYS-CFX. O modelo desenvolvido foi utilizado para analisar o comportamento térmico relacionado com o número de falhas, e ao fim das análises, foram constatados que pequenos aumentos na temperatura externa indicam altos valores internamente, contribuindo para degradação dos isolantes e consequentemente a diminuição da vida útil do equipamento. Esta metodologia será aplicada em subestações, onde a manutenção preditiva por meio de inspeções termográficas é a principal ferramenta de diagnóstico para tomada de decisões na predição de falhas.

Palavras-Chave: Transformador de potencial capacitivo. CFD. Transferência de calor. Simulação numérica. Termografia.

ABSTRACT

Capacitive Potential Transformers (TPC) are important equipment installed in high voltage substations. They have the function of reducing the electrical voltage to compatible values of measurement, control and protection of the power system. These devices dissipate thermal energy resulting in defined surface temperature fields. However, when there is some internal fault the thermal dissipation increases affecting the dielectric and providing a rise in the temperature of the external surface. The objective of the present work was to study the thermal behavior of a TPC using numerical CFD simulation in the ANSYS-CFX platform. The developed model was used to analyze the thermal behavior related to the number of faults. At the end of the analyzes, it was observed that small increases in the external temperature indicate high values internally, contributing to the degradation of the insulators and consequently the reduction of the useful life of the equipment. This methodology will be applied in substations, where predictive maintenance through thermographic inspections is the main diagnostic tool for decision making in predicting faults.

Keywords: Capacitive potential transformer. CFD. Heat transfer. Numerical simulation. Thermography.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1 - Estrutura básica do setor elétrico 16
Figura 1.2 - Diagrama simplificado de uma SE 17
Figura 1.3 - Equipamentos instalados em uma SE 17
Figura 1.4 - Diagrama esquemático de um sistema de proteção 18
Figura 1.5 - Termograma TI (coluna de um TPC aquecida) 19
Figura 3.1 - Condução de calor em equipamentos de AT 27
Figura 3.2 - Visualização do nível de óleo (tanque) 28
Figura 3.3 - Resistências térmicas na parede plana 29
Figura 3.4 - Efeito Joule em um conector elétrico 31
Figura 3.5 - Diagrama simplificado de um termovisor 32
Figura 3.6 - Faixa espectral 33
Figura 3.7 - Imagens termográficas em equipamentos elétricos 33
Figura 3.8 - Vista em corte de um TPC 34
Figura 3.9 - Diagrama básico de um TPC 35
Figura 4.1 - Imagens da bancada experimental 40
Figura 4.2 - Coluna capacitiva: (a) resistor e (b) células capacitivas 41
Figura 4.3 - Localização dos termopares: (1) temperatura interna, (2) temperatura óleo e (3) temperatura externa 41
Figura 4.4 - Termograma e parâmetros 42
Figura 4.5 - Termopar x Termografia (experimento 1) 43
Figura 4.6 – Termopar x Termografia (experimento 2) 43
Figura 4.7 - Perfil de temperatura da coluna do TPC (experimento 1) 44
Figura 4.8 - Perfil de temperatura da coluna do TPC (experimento 2) 45
Figura 4.9- Fluxograma modelagem CFD 46
Figura 4.10 - Domínios do TPC 47
Figura 4.11 - Geração da malha 48
Figura 4.12 - Condições de contorno 49
Figura 4.13 - Configuração simplificada da célula capacitiva 51
Figura 4.14 - Monitor de convergência e iterações 52
Figura 4.15 - Localização da coordenada temperatura externa 53
Figura 4.16 - Temperatura x Tamanho mínimo dos elementos 54

Figura 4.17 - Temperatura interna x Número de iterações 55
Figura 4.18 - Temperatura óleo x Numero de iterações 56
Figura 4.19 - Temperatura externa x Número de iterações 56
Figura 5.1 - Localização das fontes de calor 60
Figura 5.2 - Linha na coluna de capacitores 61
Figura 5.3 - Perfil de temperatura da coluna de capacitores 62
Figura 5.4 - Linha na coluna de óleo isolante 63
Figura 5.5 - Perfil de temperatura da coluna de óleo isolante 64
Figura 5.6 - Linha na superfície externa 65
Figura 5.7 - Perfil de temperatura da superfície externa 67
Figura 5.8 - Distribuição da temperatura superficial 67
Figura 5.9 - Linha centro à superfície externa 68
Figura 5.10 - Perfil de temperatura do centro à superfície externa do TPC 69

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 - Quantidade de defeitos e falhas em TIs (14 meses) 18
Tabela 2.1 - Critério delta T 22
Tabela 4.1 - Características elétricas do TPC 39
Tabela 4.2 - Dados geométricos do TPC 39
Tabela 4.3 - Estimativa das temperaturas 45
Tabela 4.4 - Domínios e simetria 47
Tabela 4.5 – Configuração da malha 48
Tabela 4.6 - *Setup* CFX 49
Tabela 4.7 - Propriedades termofísicas 50
Tabela 4.8 - Quantidade de nós e elementos da malha 53
Tabela 4.9 - Resultado do teste de malha 54
Tabela 4.10 - Erro relativo percentual e desvio para o teste de malha 55
Tabela 4.11 - Erro relativo percentual para teste de iterações 56
Tabela 4.12 - Comparativo CFX x Experimentos 57
Tabela 4.13 - Comparativo CFX x Termografia 58
Tabela 5.1 - Critério delta T para coluna de porcelana 66
Tabela 5.2 - Temperatura máxima e ambiente 66
Tabela 5.3 - Gradiente temperatura máxima e mínima na coluna de isoladores 66
Tabela 5.4 - Temperatura interna e externa no TPC 69

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRADEE	Associação Brasileira de distribuidores de Energia Elétrica
ANEEL	Agencia Nacional de Energia Elétrica
AT	Alta Tensão
CAD	Computer Aided Design
CFD	Computational Fluid Dynamics
CHESF	Companhia Hidro Elétrica do São Francisco
CS	Chaves Seccionadoras
DJ	Disjuntor
EAT	Extra Alta Tensão
IRT	Infrared Thermography
LW	Long Wave
NEMA	International Eletrical Testing Association
PR	Para Raio
P&D	Pesquisa e Desenvolvimento
SE	Subestação
SW	Short Wave
TC	Transformador de Corrente
TIs	Transformador de Instrumentos
TP	Transformador de Potencial
TPI	Transformador de Potencial Indutivo
TPC	Transformador de Potencial Capacitivo
UFPE	Universidade Federal de Pernambuco

LISTA DE SÍMBOLOS

Q_x	Taxa de fluxo de calor por condução na direção *x*
k	Coeficiente de condutividade térmica
A	Área transversal à direção *x*
Q_{conv}	Taxa de fluxo de calor por convecção
T_s	Temperatura da superfície
T_∞	Temperatura do fluido
h	Coeficiente de transferência de calor por convecção
$Q_{emit,max}$	Taxa de fluxo de calor por radiação máxima emitida por uma superfície
σ	Constante de Stefan Boltzamann
A_s	Área da superfície
Q_{emit}	Taxa de fluxo de calor por radiação emitida por uma superfície (real)
ε	Emissividade
Q_{rad}	Taxa líquida do fluxo de calor por radiação
T_{circ}	Temperatura da superfície vizinha
R_{cond}	Resistência térmica de condução
R_{conv}	Resistência térmica de convecção
R_{rad}	Resistência térmica de radiação
L	Espessura da parede plana
V_E	Tensão no enrolamento primário
Vs	Tensão no enrolamento secundário
ρ	Densidade
t	Tempo
u	Componente da velocidade na direção *x*
v	Componente da velocidade na direção *y*

w	Componente da velocidade na direção z
p	Pressão
μ	Viscosidade dinâmica
F_x	Termo Fonte do momento na direção x
F_y	Termo Fonte do momento na direção y
F_z	Termo Fonte do momento na direção z
g	Vetor gravidade
β	Expansividade térmica
S_h	Termo Fonte
k	Coeficiente de condutividade térmica
C_p	Calor específico a pressão constante
n	Número de camadas da célula capacitiva
H	Altura total
ΔT	gradiente de temperatura
R_{equiv}	Resistência térmica equivalente
R_{papel}	Resistência térmica do papel
$R_{óleo}$	Resistência térmica do óleo
$R_{aluminio}$	Resistência térmica do alumínio
E	Erro relativo percentual
T_{mm}	Temperatura da malha com tamanho maior do elemento
T_{mn}	Temperatura da malha com tamanho menor do elemento

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 16

1.1 Objetivo geral 19

1.2 Objetivos específicos 20

1.3 Organização da dissertação 20

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 21

3 FUDAMENTAÇÃO TEÓRICA 26

3.1 Princípios da transferência de calor 26

3.2 Efeito Joule 30

3.3 Termografia 31

3.4 Transformadores de instrumentos 34

3.4.1 Transformador de potencial capacitivo 34

3.4 Dinâmica dos fluidos computacionais 36

4 METODOLOGIA 39

4.1 Materiais e métodos 39

4.2 Análise experimental 43

4.2.1 Termopar x Termografia 43

4.2.2 Temperaturas em regime permanente 44

4.3 Modelo numérico 45

4.3.1 Geração da Geometria 46

4.3.2 Geração da Malha 48

4.3.3 ANSY CFX-*Pre* 48

4.3.4 ANSYS CFX-*Solver* 51

4.3.5 ANSY CFX-*Post* 52

4.4 Teste de malha 52

4.5 Iterações 55

4.6 Validação 57

4.7 Conclusões 58

5 ANÁLISE DO PERFIL TÉRMICO DO TPC 59

5.1 Defeitos na coluna capacitiva 59

5.1.1 Comportamento térmico na coluna capacitiva 60

5.1.2 Comportamento térmico no óleo isolante 62

5.1.3 Comportamento térmico na coluna de porcelana 64

6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS 70

6.1 Conclusões 70

6.2 Sugestões para trabalhos futuros 71

REFERÊNCIAS 72

APÊNDICE A – Resultados experimentais (ε = 0,85) 76

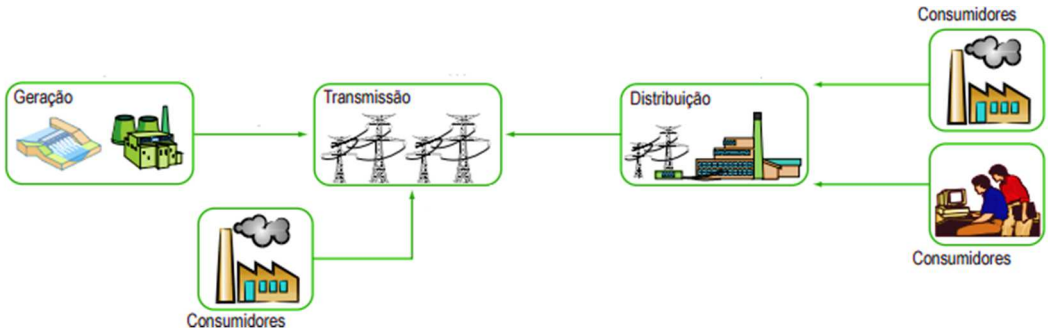
APÊNDICE B – Fotos de casos reais de sobreaquecimento na coluna capacitiva 77

APÊNDICE C – Termogramas de TPCs com coluna capacitiva sobreaquecida 79

1 INTRODUÇÃO

O sistema elétrico brasileiro tem uma estrutura que envolve basicamente a geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. As principais funções são: transformar energia para a forma elétrica, transportar e distribuir para os usuários finais (consumidores), conforme Figura 1.1. Neste sistema existem redes que interligam as fontes de energia com os usuários e as subestações têm um papel importante neste contexto, pois têm um conjunto de equipamentos de manobra e transformação que possibilitam uma maior confiabilidade na transmissão e distribuição da energia elétrica.

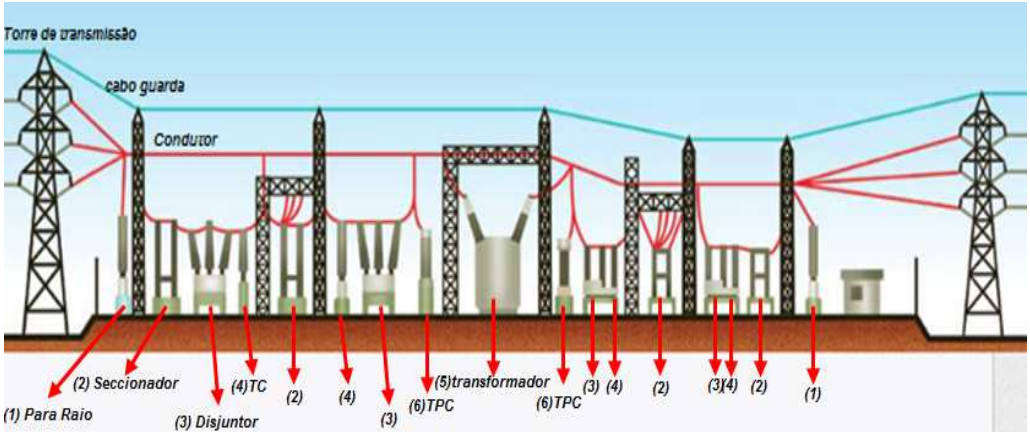
Figura 1.1 - Estrutura básica do setor elétrico



Fonte: (ANEEL, 2017) (adaptado)

A Subestação (SE) pode ser dividida em instalação de alta tensão (AT- até 230 kV) e extra alta tensão (EAT – acima de 230 kV). Dentro da SE, o equipamento responsável por elevar ou reduzir a tensão elétrica é conhecido como transformador. Outros equipamentos importantes são chaves seccionadoras (CS), disjuntores (DJ), para raios (PR), equipamentos de medição e proteção do sistema como transformadores de instrumentos (TIs), conforme Figura 1.2. Os TIs são equipamentos com a função de reduzir à corrente (transformador de corrente – TC) ou a tensão (transformadores de potencial – TP) a níveis que possam ser lidos em instrumentos elétricos de medição, controle e proteção. O TP ainda é dividido em transformador de potencial indutivo (TPI) e capacitivo (TPC). Em geral, são instalados juntos ao TC e sempre ligados em derivação ao circuito elétrico, conforme Figura 1.3.

Figura 1.2 - Diagrama simplificado de uma SE



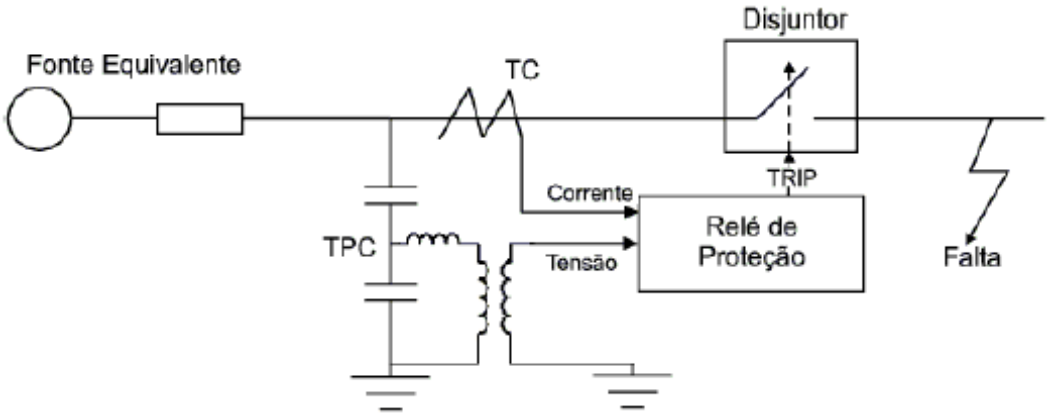
Fonte: (ABRADEE, 2017) (Adaptado)

Figura 1.3 - Equipamentos instalados em uma SE

Fonte: Autor

No seu funcionamento normal o TPC reproduz no seu circuito secundário (circuito externo alimentado pelo enrolamento secundário de um transformador de potencial) uma tensão proporcional à do circuito primário (circuito no qual alimenta o enrolamento primário de um transformador de potencial), quando isso não acontece os instrumentos de medição acionam relés que comandam através de sinais elétricos a abertura de disjuntores, que têm a função de isolar o circuito pela interrupção da corrente. A Figura 1.4 mostra um esquema básico de proteção envolvendo TIs.

Figura 1.4 - Diagrama esquemático de um sistema de proteção



Fonte: (PHADKE e THORP, 1988)

Devido à grande quantidade destes equipamentos, ocorrências de defeitos e falhas são comuns e resultam em indisponibilidades. Com a finalidade de pesquisa junto ao órgão de manutenção da Companhia Hidro Elétrica do São Francisco (CHESF), foram disponibilizadas as ocorrências que envolveram TIs em um período de 14 meses (de 01/12/2015 a 01/02/2017). No período considerado, o TPC foi o equipamento que apresentou maior taxa de falha, conforme Tabela 1.1. Os equipamentos que tiveram sua capacidade reduzida foram tratados como defeitos e os que foram impedidos de desempenhar a sua função como falhas.

Tabela 1.1 - Quantidade de defeitos e falhas em TIs (14 meses)

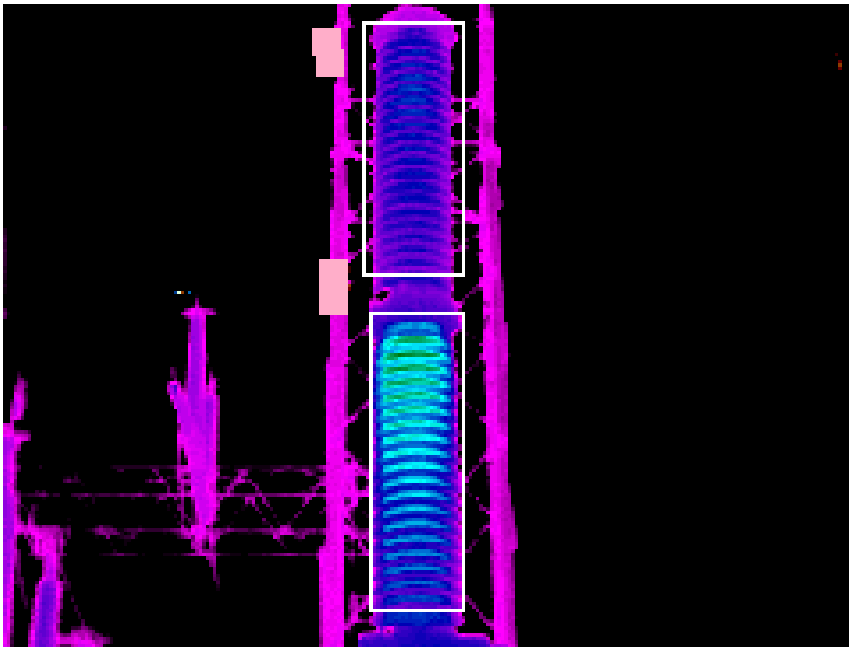
TI	Equipamentos	Defeitos	Falhas	Taxa Falha
TC	6743	151	2	0,142
TPI	1171	13	3	0,214
TPC	2267	37	7	0,5
Total	10181	201	12	

Fonte: Autor

As principais falhas em TPCs são causadas por perdas de estanqueidade, que permitem a penetração de umidade e oxigênio resultando em degradação dielétrica, por sobreaquecimento e por alterações do sinal de tensão que levam a danos ou atuação indevida da proteção (CARVALHO JR et al., 2007). Um aumento na energia térmica gerada internamente resulta em um campo de temperatura externo bem definido e que são registrados por câmeras infravermelhas utilizadas nas inspeções termográficas. A termografia é uma técnica de ensaio não destrutivo que permite mapear a distribuição de temperatura superficial de um corpo, tendo por base a radiação infravermelha emitida. Na presença de algum dano, essa temperatura quando comparada com equipamentos similares representam um sinal de alerta para reparo ou substituição, conforme Figura 1.5. Outra ferramenta de análise é a simulação numérica que

representa graficamente a distribuição de temperatura e o perfil térmico desenvolvido internamente. Esta previsão ajuda na detecção de falhas e possíveis riscos de indisponibilidade dos equipamentos. A simulação numérica é bastante atrativa para este fim e proporciona excelente custo benefício.

Figura 1.5 - Termograma TI (coluna de um TPC aquecida)



Fonte: Autor

Este trabalho avaliou a distribuição de temperatura e o comportamento térmico dos componentes de um TPC através da fluidodinâmica computacional (CFD – Computacional Fluid Dinamics). O uso da ferramenta numérica contribui na elaboração das análises, sendo bastante significativo para o setor elétrico, pois permite predição de falhas e antecipação das ações corretivas, garantindo maior disponibilidade dos equipamentos. Atualmente não existe uma metodologia especifica na plataforma ANSYS-CFX para estudos do perfil de temperatura do TPC, sendo portanto, a proposta do presente trabalho.

1.1 Objetivo geral

O objetivo do presente trabalho foi modelar e validar numericamente um transformador de potencial capacitivo com o uso de CFD, avaliando perfis de temperatura ao simular defeitos na coluna capacitiva.

Para alcançar este objetivo foi definido um conjunto de objetivos específicos relacionados a seguir:

1.2 Objetivos específicos

a) Realizar a modelagem numérica do TPC, por meio do uso de técnicas de CFD;
b) Validar o modelo numérico com dados experimentais;
c) Realizar análises do perfil de temperatura desenvolvido simulando defeitos.

1.3 Organização da dissertação

Este trabalho está dividido em cinco capítulos. Este primeiro capítulo faz um apanhado geral da dissertação e descreve como ela está organizada.

O capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica sobre os principais trabalhos publicados, como os envolvidos com a técnica da termografia para inspeções em equipamentos de subestações e modelagem de equipamentos elétricos com o uso de ferramentas computacionais.

O capítulo 3 descreve a fundamentação teórica dos principais assuntos que envolvem este trabalho, como uma breve revisão dos conceitos de transferência de calor, efeito Joule, TPC, termografia e sobre CFD.

O capítulo 4 apresenta a metodologia para a modelagem do transformador de potencial capacitivo, teste de malha, número de iterações e validação do modelo.

O capítulo 5 apresenta análises em configurações e localizações diferentes da fonte de calor no TPC com o uso da ferramenta numérica ANSYS-CFX.

O capítulo 6 apresenta as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O objetivo deste capítulo é apresentar trabalhos publicados sobre a utilização da termografia infravermelha aplicada no setor elétrico em equipamentos de alta tensão, assim como a modelagem em CFD de transformadores considerando os objetivos, metodologia e os principais resultados. Foram revisadas publicações que envolveram equipamentos de subestações com a metodologia proposta nesta dissertação.

A termografia infravermelha (IRT) usa termovisores portáteis capazes de detectar e converter a radiação infravermelha em imagens visíveis para medição do campo de temperatura. Com isso, tornou-se ideal para o uso em subestações de alta tensão, pois é uma técnica não intrusiva e não é afetada por campos eletromagnéticos presentes.

Jadin e Taib (2012) apresentaram uma revisão de alguns trabalhos com aplicações da termográfica infravermelha para diagnóstico de anomalias térmicas e métodos de medição em equipamentos elétricos. Os autores mostraram a importância da inspeção termográfica no programa de manutenção preventiva e corretiva dos equipamentos, a influência dos efeitos ambientais e condições no qual poderá afetar a análise das inspeções. Destacaram que um sistema de diagnóstico automático irá oferecer uma precisa e rápida tomada de decisão e o desenvolvimento do tratamento da imagem térmica integrada com técnicas de inteligência artificial traz vantagens no monitoramento e diagnóstico dos equipamentos elétricos.

Huda e Taib (2013) investigaram a aplicação da tecnologia do infravermelho na manutenção preventiva e preditiva para identificar defeitos térmicos (*hot-spot*) em equipamentos elétricos. Fizeram uso de um sistema inteligente de redes neurais artificiais e de análise discriminante para diagnosticar e classificar defeitos térmicos em equipamentos elétricos. Relataram que a energia térmica é um fator importante na confiabilidade operacional dos equipamentos e que a idade dos equipamentos é um fator determinante na degradação dos componentes. Os autores utilizaram o critério conhecido como delta T (ΔT) para identificação e monitoramento da temperatura. Esse critério pode ser consultado em normas internacionais como a International Eletrical Testing Association (NEMA, 2008) e é definido como o aumento do valor da temperatura acima de uma referência, que normalmente é a temperatura ambiente ou de um componente similar nas mesmas condições. O critério delta T classifica as condições térmicas dos equipamentos em três categorias baseadas na prioridade, conforme Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Critério delta T

Prioridade	ΔT (Componentes Similares) (°C)	ΔT (Temperatura Ambiente) (°C)	Ações Recomendadas
4	1 - 3	1 – 10	Normal
3	4- 15	11 - 20	Provável Deficiência – Reparar programado
2	-	21 - 40	Monitorar
1	>15	> 40	Defeito – Reparo imediato

Fonte: (NEMA, 2008)

Ramos et al. (2013) desenvolveram um modelo matemático baseado na resolução numérica de equações diferenciais para descrever o movimento do fluxo de ar (ventilação natural) e transferência de calor de dois transformadores de uma subestação subterrânea. A validação do modelo foi realizada por meio da comparação dos resultados da simulação com dados de oito testes experimentais em diferentes condições. A diferença encontrada pelos autores entre os resultados experimentais e numéricos foram menores que 2 K para sete experimentos. A simulação teve o objetivo de avaliar o comportamento do fluxo de ar e do calor dissipado pelos transformadores e consequentemente a distribuição de temperatura dentro da subestação. Os autores apresentam ainda um estudo numérico sobre a influência das condições de ventilação nos oito experimentos e concluíram que a relação entre a redução da ventilação e a perda de potência do transformador resulta no aumento da temperatura do óleo no topo do transformador. A partir dos resultados, os autores apresentaram uma correlação de parâmetros que influenciam a taxa de fluxo de ar da subestação, assim como, o coeficiente de transferência de calor por convecção da superfície do transformador e das paredes da subestação. Do mesmo modo, Mufuta e Duck (2000) estudaram o comportamento do óleo isolante e a dissipação de calor nos enrolamentos de um transformador do tipo disco. Os autores mostraram a influência da $ReGr^{-1/2}$ e correlações para cálculo da transferência de calor dentro do transformador.

Wakil et al. (2006) apresentaram um estudo numérico da transferência de calor e do fluxo de óleo isolante em um transformador abaixador de tensão (110/20,5 kV) nas três fases. O transformador é composto de um enrolamento primário e um secundário de cobre ao redor de um núcleo de aço e isolamento entre as partes. O estudo realizado teve como objetivo melhorar o arrefecimento do mesmo. Foram feitas simplificações geométricas e o software utilizado foi o FLUENT como programa numérico para verificação do perfil de pressão e velocidade para seis casos diferentes. Realizaram estudo paramétrico na variação da velocidade de entrada do óleo a fim de analisar a influência da transferência de calor em várias configurações. Como resultados, os autores descreveram que a troca de calor dentro do transformador é complexa e pode aparecer um fluxo reverso. Desse ponto de vista, a melhor

configuração é a geometria sem isolamento. O fluxo reverso deixa de forma homogênea a distribuição de temperatura do óleo e melhora a troca de calor entre os enrolamentos e o núcleo. A escolha da velocidade de entrada do óleo isolante de 1,7 m/s foi à melhor opção para o resfriamento do transformador, pois permitiu diminuir a temperatura nas paredes próximas ao enrolamento secundário que é um problema crítico.

Rossilo et al. (2012) propuseram uma análise do comportamento térmico de um transformador de 15 kVA. Com o objetivo de melhorar o projeto e o desempenho, assim como estudar a vida útil do equipamento e localização do ponto quente (hot-spot). O modelo foi validado de acordo com IEEE – 1995 Loading Guide, que é um guia que prescreve os limites térmicos de operação e as condições que devem ser observadas para o carregamento elétrico do transformador imerso em óleo isolante. Na análise experimental, os autores utilizaram doze termopares tipo J distribuídos no núcleo, enrolamentos e dentro do tanque de óleo. A temperatura apresentou variação depois de 12 horas indicando estado permanente. Os resultados de três experimentos mostraram uma dispersão de 3 K e os numéricos foram validados em relação aos resultados experimentais com um desvio de 3% para a temperatura no corpo sólido (isolante sólido) e 7,6% no óleo isolante.

Barroso (2014) estudou a distribuição de temperatura de um transformador trifásico de 5 kVA refrigerado a ar, considerando um modelo estacionário. Os resultados foram obtidos da simulação com o software COMSOL Multiphysics e compararam com os resultados experimentais. O autores conseguiram uma diferença de 2,3 K entre o numérico e o experimental para o ponto quente no núcleo do transformador. Do mesmo modo, Ortiz et al., (2009) realizaram a modelagem numérica em CFD de um transformador de alta tensão do tipo seco considerando o escoamento turbulento e validaram com resultados experimentais, no qual utilizaram termopares instalados nos enrolamentos e no núcleo. Os autores conseguiram resultados para temperaturas entre os valores medidos e simulados menores que 10%. Smolka, Nowak e Wrobel (2004) modelaram um transformador encapsulado com resina, o objetivo foi estudar a dissipação térmica entre a parede do transformador e o ambiente. Consideraram que estes equipamentos têm baixos riscos de explosões e são instalados em locais como hospitais e indústrias.

Madzarevic et al. (2011) desenvolveram modelos numéricos para estudo do comportamento do campo térmico de diferentes transformadores de potência. No estudo fizeram comparativo com os resultados obtidos analiticamente e conseguiram um desvio de 1,40% e 1,48% para a máxima temperatura dos enrolamentos e do núcleo, respectivamente. Os

autores conseguiram para o transformador com núcleo imerso em óleo um desvio de 4,98% para a temperatura máxima do enrolamento. Analisaram o efeito da flutuabilidade na distribuição da temperatura dos enrolamentos e enfatizaram a importância dos softwares numéricos para redução de tempo e custos.

Eslamian et al. (2011) modelaram um transformador de resina a seco que é muito utilizado em hospitais por não ser inflamável e compararam os resultados experimentais de um transformador de 800 kVA com os analíticos. Analisaram a influência de alguns parâmetros geométricos, radiação na superfície do transformador e o aumento do coeficiente de condutividade térmica da resina, na temperatura dos enrolamentos de alta tensão. Os autores concluíram que o aumento da radiação na superfície externa influencia a temperatura do enrolamento de AT. Assim como, o aumento da condutividade térmica da resina diminui a temperatura do enrolamento.

Medina et al. (2015) fizeram um estudo com dois modelos baseados em equações exponenciais e diferenciais com o objetivo de determinar o ponto mais quente em um transformador de potência. Utilizaram o programa MATLAB e compararam com os parâmetros de envelhecimento do isolamento sólido (papel isolante). Os resultados mostraram que o modelo das equações exponenciais tem um erro de 50% no cálculo do envelhecimento do papel comparado com o modelo de equações diferenciais. Em situações de sobrecargas as equações diferenciais têm um valor menor na estimativa da vida útil do equipamento, no qual considera a influência da temperatura e viscosidade (cuja fluidez aumenta com a diminuição da viscosidade), facilitando a troca de calor do óleo isolante nos radiadores com o ambiente.

Yang et al. (2014) fizeram simulações em CFD para analisar campos de velocidade e temperatura em um transformador de alta tensão abrigado, considerando a ventilação natural do ambiente. Os autores variaram parâmetros do projeto como a altura (em relação ao solo) e dimensões das janelas de entrada e saída de ar. Verificaram os efeitos da ventilação e resfriamento do ambiente. Após as simulações os resultados obtidos foram consistentes e concluíram que o aumento das dimensões da janela na saída do ar melhora a ventilação e o efeito de resfriamento. Porém, para a entrada do ar com altura menor que 1 metro ocorre pouca influência no campo de temperatura e o aumento da área da janela de entrada do ar melhora a temperatura ambiente facilitando a dissipação do transformador.

Paramane et al. (2014) desenvolveram simulações numérica em CFD para estudo do desempenho térmico de um conjunto de radiadores do sistema de arrefecimento de um transformador de potência de 25 MVA. Validaram o modelo com experimentos e utilizaram

como parâmetros o número de ventiladores e a direção do fluxo de ar. Os autores afirmaram que o sopro horizontal para a geometria proposta utilizando dois ventiladores aumenta a taxa de transferência de calor em 7,2% e 6,2% em relação ao fluxo vertical. Do mesmo modo, Campos et al. (2012) desenvolveram um modelo para estudo da distribuição térmica de um transformador de força baseado no método do volume finito e o software utilizado foi o FLUENT. Compararam os resultados numéricos com os experimentais para a temperatura interna dentro do duto de óleo e obtiveram concordância.

O trabalho apresentado por Smolka e Nowak (2008) para estudo de um transformador trifásico a seco, no qual foi utilizado uma abordagem multidisciplinar envolvendo transferência de calor, escoamento do fluido e eletromagnetismo teve como objetivo examinar as perdas de potência no núcleo e nas bobinas. Os autores validaram experimentalmente usando termopares e termômetros, assim como câmera termográfica para medição da temperatura nas paredes externas. Ressaltaram a importância da previsão exata da localização do ponto quente que ocorre especialmente no núcleo e bobinas. Também destacaram que o nível de temperatura nesses elementos influencia diretamente as perdas de energia e a vida útil dos transformadores. Os resultados obtidos pelos autores mostraram que a distribuição da temperatura no transformador foi precisa e que este modelo pode ser utilizado em diferentes configurações, precisando para isto, redefinição nas propriedades dos materiais.

Tsili et al. (2012) apresentaram um modelo tridimensional de um transformador imerso em óleo isolante pelo método dos elementos finitos com o objetivo de estudar a distribuição de temperatura e do fluxo de óleo isolante sob diferentes condições de cargas. A implementação do método proposto é necessário ao desenvolvimento de rotinas especiais que permitem a interação de seus pacotes de diferentes software e parametrização para o transformador analisado. O método é capaz de prever a distribuição térmica de um transformador considerando a convecção natural do óleo isolante.

3 FUDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo tem o objetivo de apresentar um resumo sobre os principais conceitos envolvidos neste trabalho, destacando a transferência de calor, efeito Joule, termografia, transformador de instrumentos e CFD.

3.1 Princípios da transferência de calor

A transferência de calor é a transição da energia térmica e ocorre devido à diferença de temperatura no sentido da maior para a menor. Pode ocorrer de três diferentes modos: condução, convecção e radiação. A transferência de calor tem direção e magnitude, ou seja, é uma grandeza direcional.

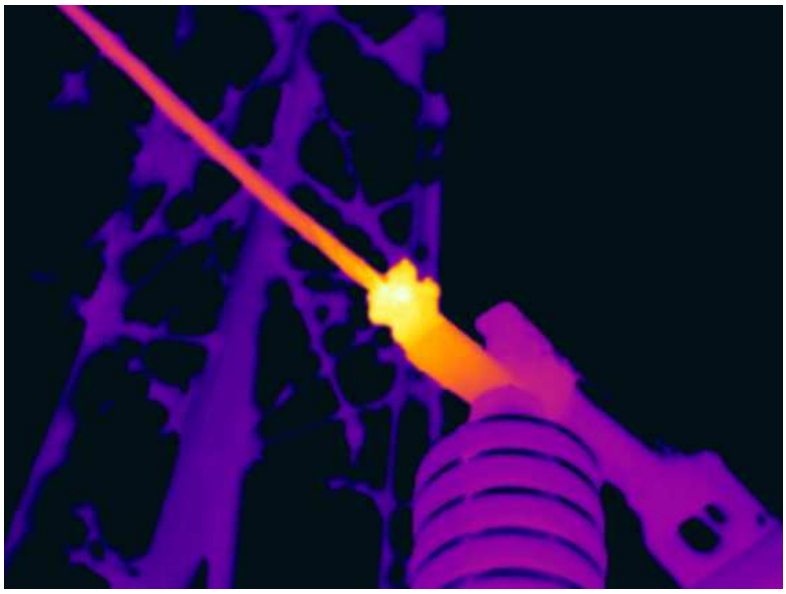
A condução é a transferência de energia térmica das regiões mais energéticas para as regiões menos energéticas, como resultado da iteração entre elas. A equação que rege a condução de calor é conhecida como lei de Fourier e estabelece que a taxa de condução de calor em dada direção é proporcional ao gradiente de temperatura na mesma direção (ÇENGEL e GHAJAR, 2012). A Equação 1 representa a lei de Fourier na direção positiva de *x*.

$$Q_x = -kA\frac{dT}{dx} \tag{1}$$

em que Q_x é a taxa de condução de calor em Watts que atravessa perpendicularmente a área A (m^2) na direção positiva de x (m), sendo proporcional a constante k (coeficiente de condutividade térmica do material - W/mK).

Para um sólido, o conhecimento da distribuição da temperatura pode ser usado para análise estrutural através das suas tensões, expansões, deflexões térmicas e pode ser usado para otimizar a espessura de um material isolante (INCROPERA et al., 2007). Um exemplo de condução de calor em subestações de alta tensão (AT) pode ser visualizado na Figura 3.1.

Figura 3.1 - Condução de calor em equipamentos de AT



Fonte: Autor

Outro modo de transferência de calor é a convecção, que ocorre com o contato entre um fluido e uma superfície com diferentes temperaturas. Apesar da complexidade da convecção, é bem retratada pela Equação 2. A taxa de transferência de calor por convecção é proporcional à diferença de temperatura e é conhecida como a lei do resfriamento de Newton (ÇENGEL e GHAJAR, 2012).

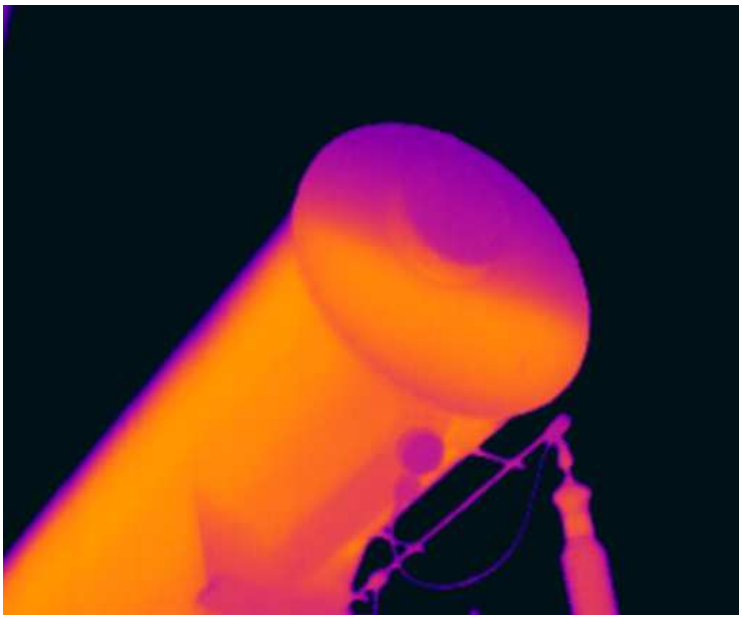
$$Q_{conv} = hA(T_s - T_\infty) \quad (2)$$

em que Q_{conv} é a taxa de transferência de calor por convecção em Watts, h (W/m^{2}K) é conhecido como coeficiente de transferência de calor por convecção e seu valor depende de vários fatores como a sua geometria, natureza do escoamento do fluido e uma série de propriedades termodinâmica e de transporte de fluidos.

A convecção é conhecida como forçada se o fluido flui sobre a superfície por meios externos, como por exemplo, ventilador e bomba. Em contrapartida, a convecção é chamada natural se o movimento do fluido é causado por forças de flutuação induzidas por diferenças de densidades devido a diferença da temperatura no fluido (ÇENGEL e GHAJAR, 2012).

O óleo isolante e o ar que circula pelo tanque dos transformadores são exemplos de fluidos que sofrem efeitos da convecção. Na Figura 3.2 é visto o efeito do resfriamento convectivo que permite visualizar o nível do óleo no tanque de expansão de um transformador de força.

Figura 3.2 - Visualização do nível de óleo (tanque)



Fonte: Autor

Todos os corpos a uma temperatura superior ao zero absoluto emitem radiação térmica. A radiação térmica é a energia transmitida por ondas eletromagnéticas e não exige a presença de um meio. A taxa máxima de radiação que pode ser emitida de uma superfície na temperatura termodinâmica T_S (K) é dada pela lei de Stefan Boltzmann da radiação térmica.

$$Q_{emit,max} = \sigma A_s T_s^4 \quad (3)$$

em que σ é a constante de Stefan Boltzmann e equivale a 5,67 x 10^{-8} W/m^2.K^4, A_s (m^2) é a área da superfície por meio da qual ocorre a transferência de calor por radiação. A superfície idealizada que emite radiação a taxa máxima é chamada de corpo negro. A taxa de radiação térmica emitida por uma superfície real é menor do que aquele emitido por um corpo negro a mesma temperatura e é dada por:

$$Q_{emit} = \varepsilon \sigma A_s T_s^4 \quad (4)$$

em que ε é a emissividade da superfície ($0 \leq \varepsilon \leq 1$). A emissividade é a medida de quanto uma superfície está próxima do comportamento de um corpo negro (ε = 1). Outra propriedade importante da radiação é a absorvidade (fração da radiação térmica absorvida incidente sobre a superfície) e o seu valor está na faixa de $0 \leq \alpha \leq 1$. O corpo negro é um perfeito absorvedor e emissor.

Para uma superfície com emissividade ε e área superficial A_S a uma temperatura termodinâmica T_S e completamente delimitada por uma superfície a uma temperatura

termodinâmica maior T_{circ} , separadas por um gás que não interfere na radiação, a taxa líquida de transferência de calor por radiação é dada pela Equação 5.

$$Q_{rad} = \varepsilon.\sigma.A_S(T_S^4 - T_{circ}^4) \quad (5)$$

Um conceito importante em transferência de calor é o de resistência térmica, que é a oposição ao fluxo de calor. A Equação 6 é a resistência térmica para a condução da parede plana.

$$R_{cond} = \frac{L}{KA} \quad (6)$$

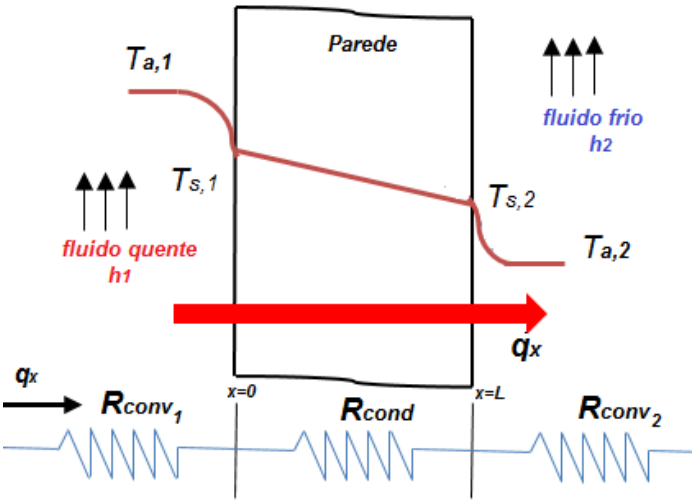
Normalmente os três fenômenos de transferência de calor são estudados e descritos de forma separada, mas podem ser combinados. Uma das formas de estudar transferência de calor e seus efeitos combinados é através da rede de resistências térmicas. As Equações 7 e 8 são a resistência térmica de convecção e radiação, respectivamente.

$$R_{conv} = \frac{1}{h_{conv}A} \quad (7)$$

$$R_{rad} = \frac{L}{h_{rad}A} \quad (8)$$

Considerando uma parede de espessura L, área A e condutividade térmica k, exposta à convecção em ambos os lados, conforme a Figura 3.3, o fluxo de calor é o mesmo mediante estas resistências.

Figura 3.3 - Resistências térmicas na parede plana



Fonte: (INCROPERA et al., 2007) (Adaptado)

Há três resistências a serem somadas: a resistência por convecção na superfície quente, a resistência à condução na parede, levando-se em conta a condutividade térmica do material da parede e a resistência por convecção na superfície fria, conforme Equação 9**.**

$$R_{total} = R_{conv1} + R_{cond} + R_{conv2} = \frac{1}{h_1 A} + \frac{L}{kA} + \frac{1}{h_2 A} \quad (9)$$

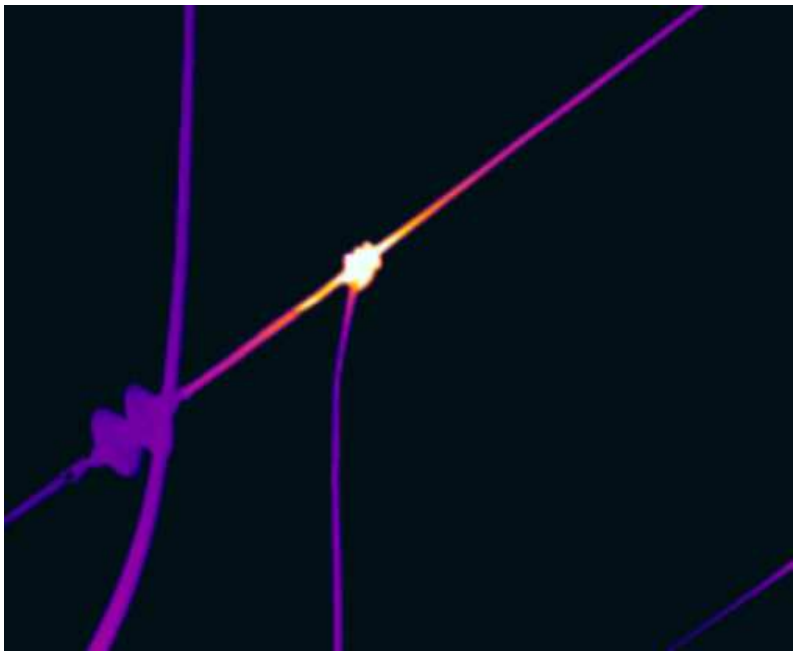
Esta é a lógica das resistências térmicas, à medida que for adicionada alguma parede extra, resistências ao fluxo de calor também serão adicionadas.

3.2 Efeito Joule

A transmissão de energia tem como desafio o transporte da energia elétrica a grandes distâncias e que apresente níveis aceitáveis de perdas por efeito Joule, que é o processo de transformação irreversível da energia elétrica em energia térmica. A elevação de tensão da energia nas linhas de transmissão é uma forma de reduzir o desperdício, uma vez que, para uma mesma potência de transmissão, tensões maiores possibilitam níveis de corrente elétrica mais baixos e, consequentemente, menores serão as perdas por efeito Joule. Além disso, a menor corrente permite o uso de cabos de menor área de seção transversal e peso, economizando em material condutor e estruturas de sustentação (DINIZ, 2013).

Nas subestações, em equipamentos elétricos onde ocorre passagem de corrente, constituirá uma geração de potência térmica, cuja dissipação se dará pelos processos da transferência de calor. A elevação de temperatura devido ao efeito Joule pode ser ou não um defeito, pois é inerente ao processo. A anomalia térmica de fato se manifesta quando o nível de temperatura apresentado está acima do habitual para condições normais de operação, conforme Figura 3.4. Para equipamentos elétricos em geral, uma anomalia térmica pode ocorrer por diversos fatores, incluindo defeitos em componentes internos, refrigeração e lubrificação.

Figura 3.4 - Efeito Joule em um conector elétrico



Fonte: Autor

A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) define a cada revisão tarifária um referencial regulatório de perdas que leva em consideração o desempenho da concessionária. O efeito Joule é inerente ao transporte da energia elétrica na rede, relacionado à transformação de energia elétrica em energia térmica nos condutores, perdas nos núcleos dos transformadores, perdas dielétricas e é conhecido como perdas técnicas (ANEEL, 2015).

Uma contribuição para a manutenção em equipamentos elétricos, ao buscar estabelecer o comportamento térmico da conexão investigando a relação entre a resistência elétrica com sua temperatura e dissipação térmica, foi realizado por Ferreira (2015), que desenvolveu modelos matemáticos para o processo de aquecimento e resfriamento de conectores e chaves seccionadoras.

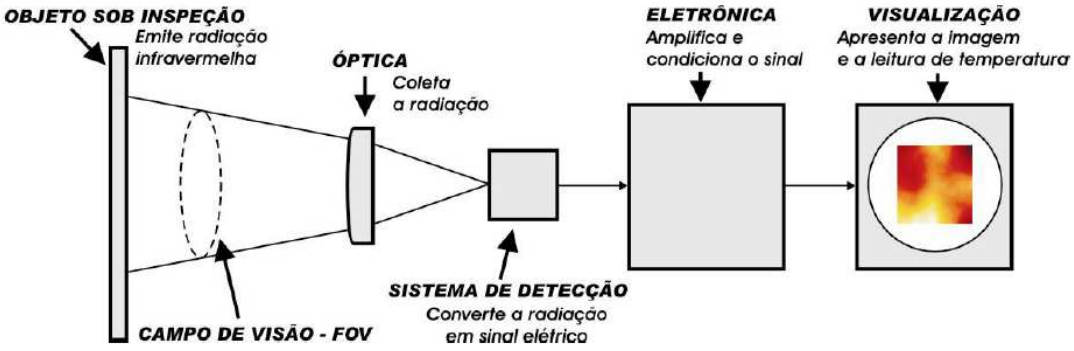
3.3 Termografia

Termografia por infravermelho ou IRT (*infrared thermography*) foi aplicada durante as últimas quatro décadas como uma técnica de medição eficiente sob o ponto de vista econômico, certamente porque é um procedimento não invasivo e que permite também um rápido mapeamento bidimensional da temperatura de uma superfície de um objeto não totalmente transparente.

No entanto, deve ser mencionado que a medição de temperatura pelo método IRT é afetada por alguns parâmetros, tais como emissividade do objeto, seu tamanho, a distância da câmera, a temperatura, a umidade ambiente, ângulo em relação ao objeto, etc. Uma discussão abrangente sobre o efeito da emissividade, o tamanho do objeto e da radiação emitida pelo ambiente no contexto de uma placa de circuito impresso para PC são apresentados por (LINNANDER, 1993). Compensados os efeitos desses parâmetros, IRT é uma ferramenta muito útil e tem sido amplamente utilizada em várias áreas de pesquisa, engenharia, medicina e indústria.

A termografia detecta a radiação infravermelha emitida pelo objeto inspecionado. O principal objetivo é transformá-la em imagens térmicas visíveis, e converte-la em leituras de temperaturas (MALDAGUE e MOORE, 2001). A Figura 3.5 mostra um diagrama simplificado de um termovisor genérico.

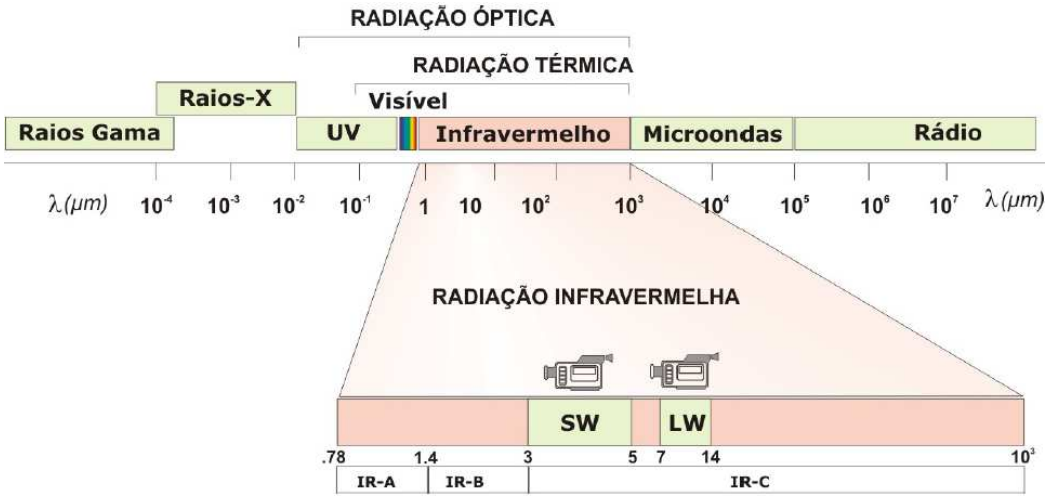
Figura 3.5 - Diagrama simplificado de um termovisor



Fonte: (SANTOS, 2006)

Todos os tipos de radiação do espectro eletromagnético obedecem aos mesmos princípios, por exemplo, propagam-se em linhas retas, na superfície refletem, refratam, são absorvidas e no vácuo tem uma velocidade de aproximadamente 3×10^{-8} m/s. De acordo com a Figura 3.6, a faixa de temperatura dos termovisores encontrados na subestação de alta tensão normalmente varia entre -20°C até 500°C e a faixa espectral tem uma variação do comprimento de onda de 3µm a 5µm (short wave – SW) e de 8µm a 14µm (long wave – LW).

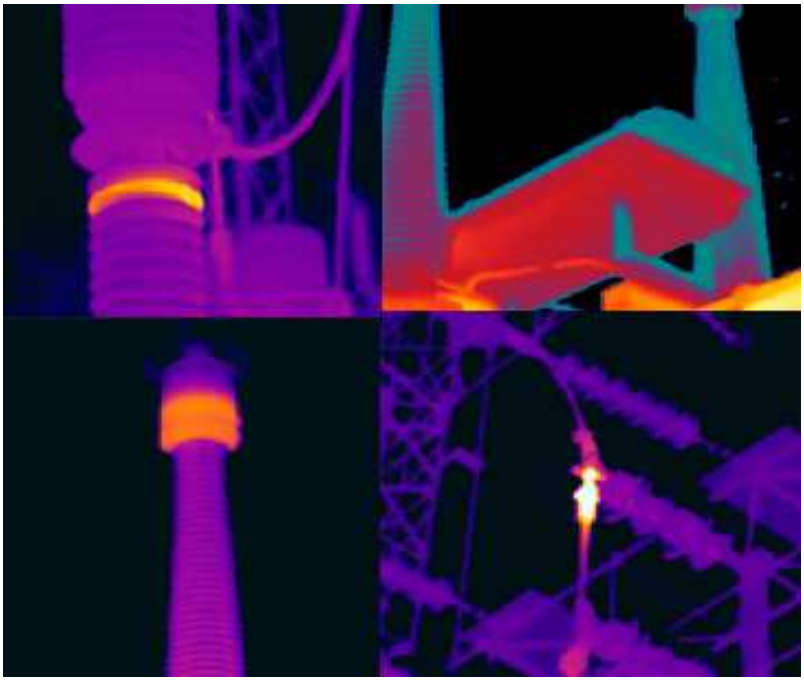
Figura 3.6 - Faixa espectral



Fonte: (SANTOS, 2006)

Outra característica importante na análise de imagens termográficas é o ganho de eficiência porque os resultados são apresentados na forma de uma imagem que contém o campo de temperatura do dispositivo ou sistema. Com isso, é possível se detectar visualmente e imediatamente um sobreaquecimento local. Como mostra a Figura 3.7.

Figura 3.7 - Imagens termográficas em equipamentos elétricos



Fonte: Autor

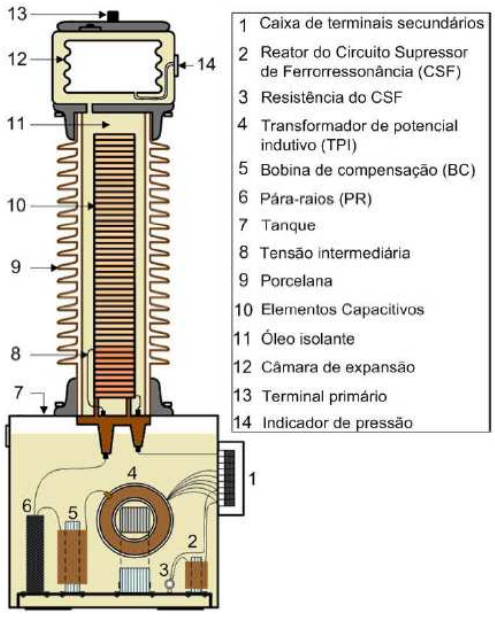
3.4 Transformadores de instrumentos

Os transformadores de instrumentos (TIs) possuem grande importância para a operação do sistema de transmissão de energia. Estes equipamentos reduzem os sinais de tensão e de corrente para níveis viáveis a fim de alimentar relés de proteção, instrumentação e medição. Os TIs são classificados em dois tipos: transformadores de corrente (TC) e o transformador de potencial (TP). O TC reproduz uma corrente proporcional a do primário (circuito no qual alimenta o enrolamento primário de um transformador de corrente), ou seja, é um redutor de corrente. O TP alimenta bobinas de potencial de instrumentos elétricos, sendo o seu primário ligado em derivação com o circuito elétrico de forma que o seu secundário reproduz uma tensão proporcional a do primário. Um dos tipos do TP é o Transformador de potencial capacitivo (TPC).

3.4.1 Transformador de potencial capacitivo

O TPC é construído basicamente de coluna capacitiva e unidade eletromagnética, projetados e interligados para reproduzir uma tensão secundária proporcional a primária (ABNT, 1991). A Figura 3.8 mostra um modelo em corte de um TPC.

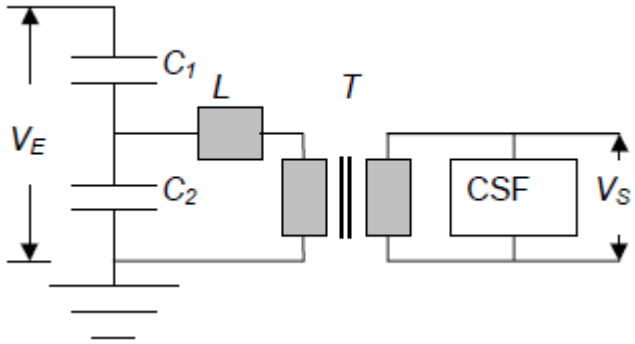
Figura 3.8 - Vista em corte de um TPC



Fonte: (CARVALHO JR, 2008)

A finalidade da coluna capacitiva é fornecer uma tensão de derivação entre C1 e C2, normalmente entre 10 e 20 kV, para o transformador (*T*), que por sua vez reduz a tensão primária (V_E) ao nível da tensão de serviço (*Vs*), enquanto o reator em série (*L*) tem a função de eliminar o efeito capacitivo do divisor (ROSA et al., 2003). O supressor de ferroressonância (CSF) tem a função de eliminar possíveis oscilações a frequência industrial e subharmônicas. O diagrama básico de um TPC é mostrado na Figura 3.9.

Figura 3.9 - Diagrama básico de um TPC



Fonte: (ROSA *et al.*, 2003)

Os ensaios e inspeções em transformadores de potencial capacitivos são importantes para o acompanhamento das propriedades e vida útil do equipamento, são essenciais para aceitação e instalação em campo e para acompanhamento em manutenções preventivas e preditivas. Os principais ensaios estão descritos abaixo:

a) Resistência de isolamento: consiste na determinação dos valores da resistência de isolamento entre os enrolamentos primário e secundário e entre estes e as partes aterradas do equipamento;
b) Relação de transformação: utiliza uma fonte que fornece a corrente de 0 a 2500 A (ampares), depois se faz as leituras das tensões do primário e do secundário e calcula-se a relação de transformação e seu respectivo erro;
c) Fator de potência de isolamento: consiste na determinação da qualidade do isolamento, usando um método não destrutivo (entre os enrolamentos primário e as partes aterradas);
d) Resistência ôhmica dos enrolamentos: a medição das resistências dos enrolamentos e sua comparação com os valores obtidos nos ensaios de fábrica possibilitam a detecção de alguma avaria nos enrolamentos;

e) Análise físico-química do óleo isolante: visa determinar as condições reais do óleo (aparência, densidade, viscosidade cinemática, ponto de fulgor, acidez, cor, rigidez dielétrica, fator de potência, teor de água, sulfatos, ponto de anilina, etc);
f) Inspeções visuais: vazamento, nível de óleo, trincas ou partes quebradas na porcelana, oxidação e deformação no cabeçote, etc;
g) Termografia: inspeção termográfica em conexões e barras de relação do primário, caixa do secundário, corpo do isolador e cabeçote.

3.4 Dinâmica dos fluidos computacionais

A Fluidodinâmica Computacional ou CFD (do inglês *Computational Fluid Dynamics*), é a área do conhecimento que trata da simulação numérica de escoamentos de fluidos**,** transferência de calor e fenômenos relacionados, como reações químicas, combustão, aeroacústica etc. As equações que regem o escoamento de fluidos têm origem na mecânica dos fluidos e podem ser resolvidas por meio de diferentes métodos numéricos (VERSTEEG e MALALASEKERA, 2007).

As equações de Navier-Stokes descrevem o escoamento de fluidos e permitem determinar campos de velocidade e de pressão. A equação da conservação da massa nas três dimensões para o escoamento do fluido é dada por:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial (\rho w)}{\partial z} = 0 \tag{10}$$

As equações de conservação da quantidade de movimento são dadas por:

$$\frac{\partial (\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u^2)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho uv)}{\partial y} + \frac{\partial (\rho uw)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \tag{11}$$

$$\frac{\partial (\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho uv)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho v^2)}{\partial y} + \frac{\partial (\rho vw)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + \rho g \beta \Delta T \tag{12}$$

$$\frac{\partial (\rho w)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho uw)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho vw)}{\partial y} + \frac{\partial (\rho w^2)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \tag{13}$$

em que ρ é densidade (kg/m^3), *u, v e w* são as componentes da velocidade do fluido no ponto (*x, y, z*), *p* é a pressão (N/m^2), μ é a viscosidade dinâmica (N.s/m^2), *g* (m/s^2) é o vetor gravidade, β é a expansividade térmica em (K^{-1}) e *T* é a temperatura em Kelvin (K). Tem-se F_x *e* $F_z = 0$, F_y é a componente vertical da força atuando no fluido na direção y. Para pequenas variações de densidade em função da temperatura, a aproximação de Boussinesq pode ser empregada. Essas

pequenas variações de densidades dão origem aos movimentos de massa entre as regiões frias e quentes.

A equação da energia é dada por:

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u T)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v T)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w T)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{k}{c_p}\frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{k}{c_p}\frac{\partial T}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{k}{c_p}\frac{\partial T}{\partial z}\right) + S_h \quad (14)$$

em que S_h é o termo fonte, k é a condutividade térmica (w/m.K), T é a temperatura (K), C_p é o calor específico do fluido (kJ/kg.K).

Os métodos de discretização mais difundidos são os métodos das diferenças finitas, elementos finitos e o dos volumes finitos. Com esses métodos, troca-se o domínio contínuo por um domínio discreto, onde um conjunto de volumes de controle é utilizado para representar o domínio original. A forma algébrica da equação apresentada anteriormente é resolvida em cada um dos volumes de controle, gerando um sistema de equações no qual são resolvidos numericamente. Essas equações são resolvidas com o apoio de softwares de Fluidodinâmica Computacional, os quais possuem capacidade para solucionar rapidamente e com precisão os mais diversos problemas de CFD.

Pode-se resumir a metodologia CFD como:

a) Criar a geometria e malha: é o primeiro passo, criar ou importar a geometria e logo em seguida definir a malha;
b) Definir a física do modelo: cria entradas requeridas pelo solver, ou seja, seleciona os parâmetros físicos que permitirão a solução do problema como exemplo as condições de contorno, modelo de turbulência, energia, propriedades dos sólidos e fluidos, domínios, subdomínios, etc.;
c) Resolver o problema em CFD (Solver): componente para resolução dos problemas em CFD, carrega embutido um método numérico. É utilizado o método de volumes finitos, que através de volumes elementares, conserva as propriedades em pequenos volumes e realiza, nestes elementos, balanços ou uma integração no espaço e no tempo para converter em um sistema de equações algébricas e estas, então, serem resolvidas de forma iterativa (MALISKA, 1995). Como as equações são não-lineares, uma abordagem iterativa é necessária e quando o resultado se aproxima da solução exata, diz que “convergiu”. Sendo uma aproximação, o critério para parada das iterações ou é a quantidade pré-determinada ou o valor do resíduo desejado.

d) Pós-processamento, onde os resultados são apresentados e analisados. O pós-processador permite a visualização da geometria, vetores de direção e magnitude de fluxo; variação de variáveis escalares; cálculos quantitativos; animação; produção de gráficos.

O software comercial ANSYS CFX combina recursos avançados de pré-processamento e *solver*, inclui a modelagem dos seguintes fenômenos: fluxo em estado estacionário e transitório, fluxo turbulento e laminar, fluxos subsônicos e supersônicos, transferência de calor e radiação térmica, fluxos não-newtonianos, fluxo multifásico, combustão, etc. O ANSYS-CFX é a ferramenta sobre a qual foi desenvolvida uma metodologia para validação e análise do comportamento térmico dos transformadores de potencial capacitivo.

4 METODOLOGIA

O presente capítulo abordará a metodologia utilizada para modelagem da coluna do TPC na plataforma numérica ANSYS CFX. Serão apresentados os resultados obtidos em laboratório através dos termopares instalados na coluna e parte interna do TPC, assim como suas imagens termográficas. A escolha do tamanho mínimo dos elementos da malha e do número de iterações são importantes para diminuir o tempo e o esforço computacional e serão abordados. E por fim, os resultados obtidos através da modelagem CFD serão comparados com os resultados experimentais.

4.1 Materiais e métodos

O TPC utilizado no experimento foi o modelo TEM 230-H da TRENCH, com as especificações de acordo com as Tabelas 4.1 e 4.2.

Tabela 4.1 - Características elétricas do TPC

Parâmetros	Valor	Unidade
Tensão máxima do sistema	265	Kv
Tensão secundária	115-69	V
Relação de transformação	1200/2000: 1	

Fonte: (TRENCH, 1982)

Tabela 4.2 - Dados geométricos do TPC

Grandeza	Valor	Unidade
Altura total da coluna superior	917	mm
Número de saias da coluna superior	25	-
Diâmetro interno porcelana	150	mm
Diâmetro externo base porcelana	208	mm
Diâmetro externo da saia maior	290	mm
Diâmetro externo da saia menor	250	mm

Fonte: (TRENCH, 1982)

Com o objetivo de validar o modelo CFD, foram realizados ensaios em um laboratório da CHESF em conjunto com uma equipe de pesquisadores da UFPE no âmbito de um projeto de P&D. O projeto P&D, “Caracterização Térmica de Equipamentos Elétricos de Alta Tensão pelo Método da Análise Inversa”, CTNI - 92.2012.0540.00, N° ANEEL: 0048-054/2010, viabilizou a elaboração do presente trabalho.

A Figura 4.1 mostra imagens do laboratório de ensaios e apresenta todos os equipamentos utilizados que consistem basicamente de uma fonte de alimentação, sistema de aquisição de dados, câmera termográfica, computador e uma coluna do transformador de potencial capacitivo.

Figura 4.1- Imagens da bancada experimental

Fonte: Autor

Durante o experimento, a coluna capacitiva foi aquecida uniformemente em seu interior por resistores. Uma fonte de alimentação foi usada para gerar o fluxo de calor, por efeito *Joule* nos resistores. Esta fonte de alimentação permitiu o controle da intensidade do fluxo de calor aplicado por meio da variação dos parâmetros de tensão e corrente. A tensão de saída foi medida e monitorada com um multímetro digital. O valor gerado pelos resistores foi de aproximadamente 36 W no circuito em paralelo de 5 resistores de 33 Ω.

Uma coluna capacitiva é formada por um conjunto de capacitores em série montados no interior de um invólucro cilíndrico preenchido de óleo isolante e prensados para que ocorra a máxima impregnação. A fonte de dissipação de energia térmica foi disposta em um conjunto de resistências elétricas colocadas no interior de uma das unidades capacitivas, conforme a Figura 4.2. Com a possibilidade de simular diversas intensidades de carga térmica no interior da célula capacitiva (HENRIQUEZ et al., 2014).

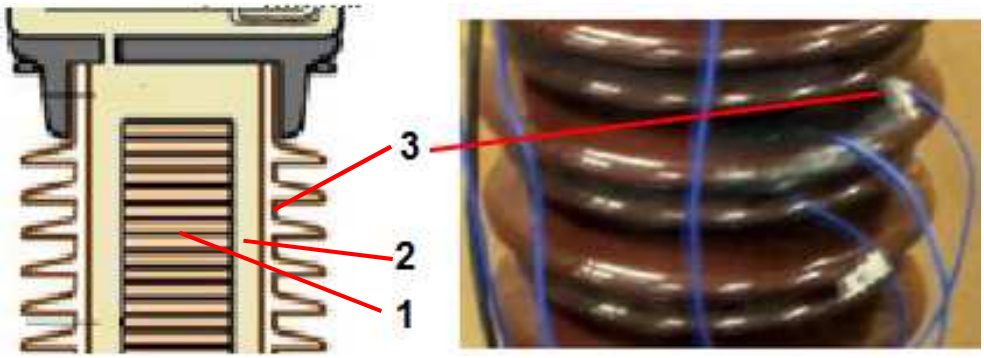
Figura 4.2 - Coluna capacitiva: (a) resistor e (b) células capacitivas

(a) (b)

Fonte: (HENRIQUEZ et al., 2014)

As temperaturas foram medidas por termopares tipo T com precisão de 1 K ligados a um sistema de aquisição de dados, controlado por um computador. Os termopares foram inseridos em pontos definidos na coluna capacitiva e no invólucro de porcelana, como descrito em Henriquez et al. (2014). A superfície externa recebeu termopares localizados na aleta da coluna de porcelana e no interior do invólucro, no qual foram inseridos mais dois termopares: um dentro da célula capacitiva e outro na interface com o óleo isolante. Porém, na mesma altura que se encontram as resistências elétricas e preservando a configuração dos seus componentes principais. A Figura 4.3 mostra a localização dos termopares.

Figura 4.3- Localização dos termopares: (1) temperatura interna, (2) temperatura óleo e (3) temperatura externa



Fonte: Autor

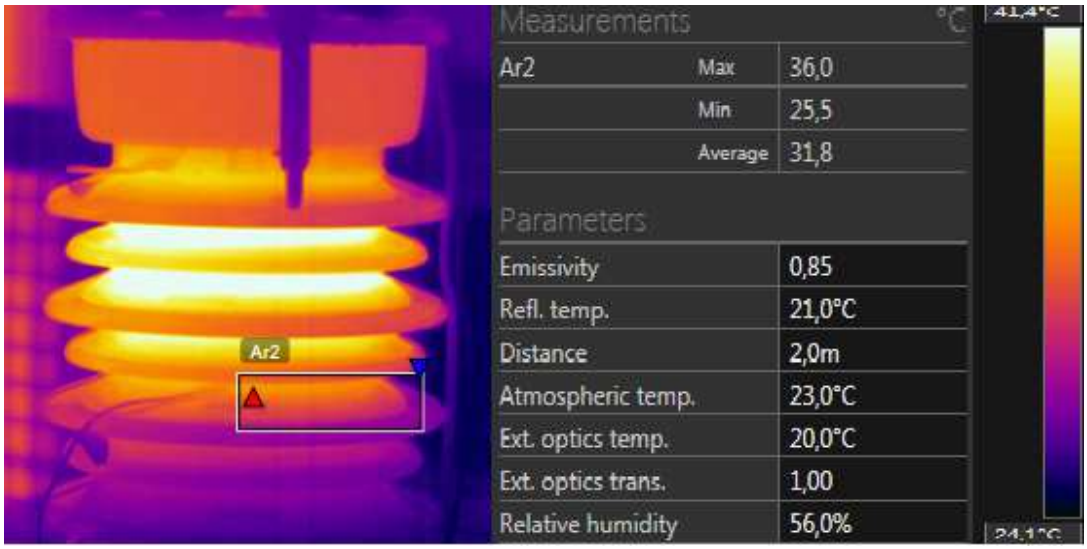
Uma câmera termográfica foi usada para capturar as imagens radiométricas da superfície da coluna de porcelana em intervalos de tempo predefinidos e comparados com as medições dos termopares. O objetivo foi avaliar a distribuição de temperatura na superfície e analisar como a falha inserida influencia essa distribuição. A coleta das imagens termográficas foi realizada por um termovisor FLIR® (modelo SC660 com uma precisão de ± 2K).

As medições foram realizadas laboratório com temperatura ambiente média de 23°C, tendo sido fechadas todas as portas do laboratório com o intuito de não haver corrente de ar que pudessem interferir na convecção natural durante o aquecimento.

As imagens radiométicas foram analisadas e editadas com o programa FLIR TOOLS®, um software que possui ferramentas para importar, editar, analisar imagens e transformá-las em relatórios de inspeções. Dentre outros recursos deste aplicativo, pode-se destacar: editar imagens radiométricas, alterar a paleta, ajustar parâmetros tais como emissividade, temperatura refletiva, adicionar ferramentas de medição como pontos, caixas de área, círculos, linhas, Delta T, adicionar anotações de texto etc.

O objetivo da edição das imagens foi de obter os valores máximos das temperaturas na superfície externa da coluna de porcelana. Esta será a temperatura lida pelos inspetores nas inspeções termográficas e corresponde a área localizada na qual foram instalados os termopares**,** conforme Figura 4.4. No termograma as cores azul e violeta representam temperaturas baixas, próxima a ambiente, as cores amarela e branca representam temperaturas mais altas e a cor laranja indica temperaturas intermediárias.

Figura 4.4 - Termograma e parâmetros



Fonte: Autor

É de suma importância o controle dos parâmetros fornecidos ao termovisor, como emissividade, distância do objeto ao termovisor e outros parâmetros relativos ao ambiente, que são necessários para o cálculo da temperatura do objeto sob inspeção (SANTOS, 2006).

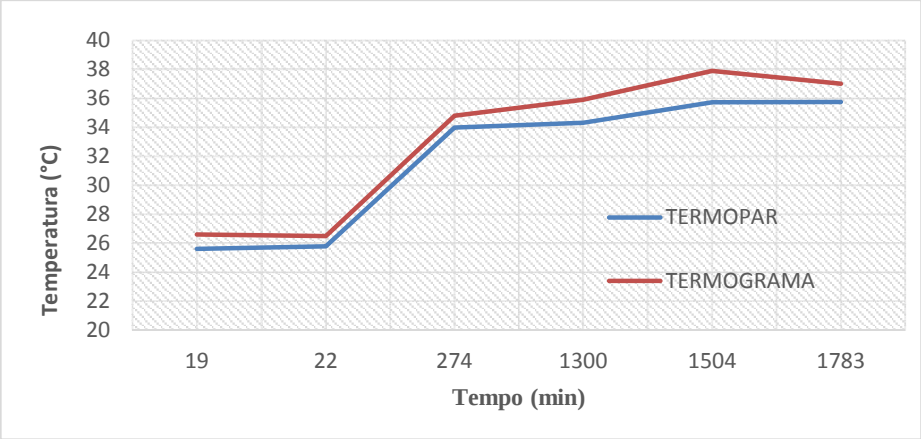
4.2 Análise experimental

4.2.1 Termopar x Termografia

Com o objetivo de validar os resultados obtidos na termografia foram comparados os valores registrados no sistema de aquisição de dados referente aos termopares e as imagens termográficas. Coincidindo o momento das medições, o modelo foi verificado através da análise de erros e foi validado com os resultados de dois experimentos apresentados no APÊNDICE A.

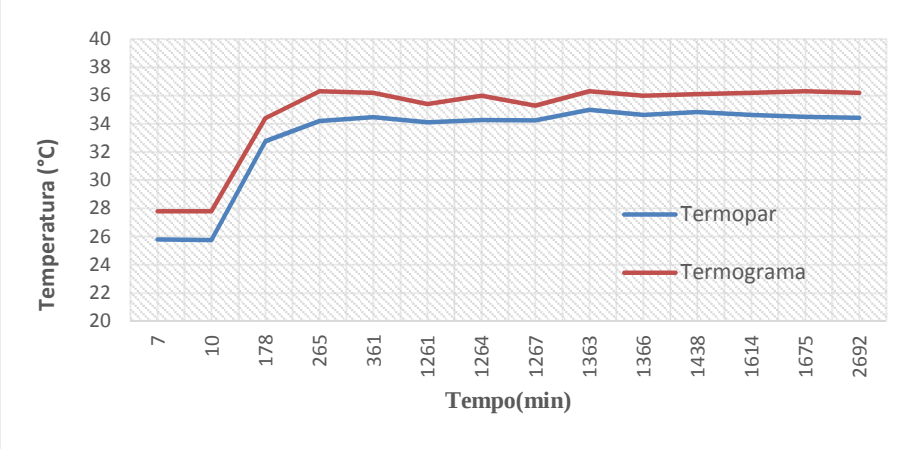
Observa-se um alinhamento na evolução do perfil das temperaturas medidas pelo termopar e câmera de infravermelha. Devido ao aquecimento imposto pelas resistências houve uma evolução da temperatura superficial ao longo do tempo de forma crescente e linear, logo em seguida estabilizando-se, conforme as Figura 4.5 e 4.6.

Figura 4.5 - Termopar x Termografia (experimento 1)



Fonte: Autor

Figura 4.6 – Termopar x Termografia (experimento 2)



Fonte: Autor

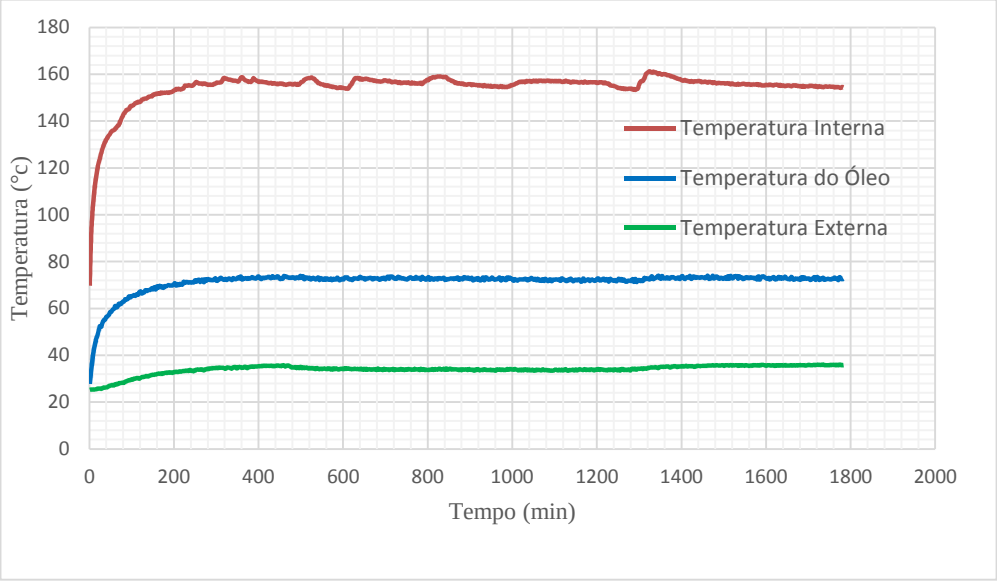
Para os experimentos a diferença foi menor que 3K, considerando a emissividade de 0,85 e uma precisão da câmera termográfica de ±2 K ou 2% da leitura e de ±1 K ou 1,5% da leitura para o termopar. Ambos os experimentos mostraram comportamentos bastante semelhantes.

4.2.2 Temperaturas em regime permanente

Os valores medidos pelos termopares foram comparados com a simulação numérica. Foram considerados os dados após 300 minutos de aquecimento, ou seja, em uma condição no qual as temperaturas alcançaram valores de regime permanente.

As Figura 4.7 e 4.8 mostram a evolução da temperatura ao longo do tempo medida em três pontos: temperatura interna (centro da coluna de capacitores), óleo e externa (ponto da base externa da coluna de isoladores). Os experimentos apresentaram padrões de curvas semelhantes e indicam como esperado que há um elevado gradiente de temperatura entre as regiões interna e externa da coluna capacitiva. O regime permanente ocorreu a partir de 300 minutos.

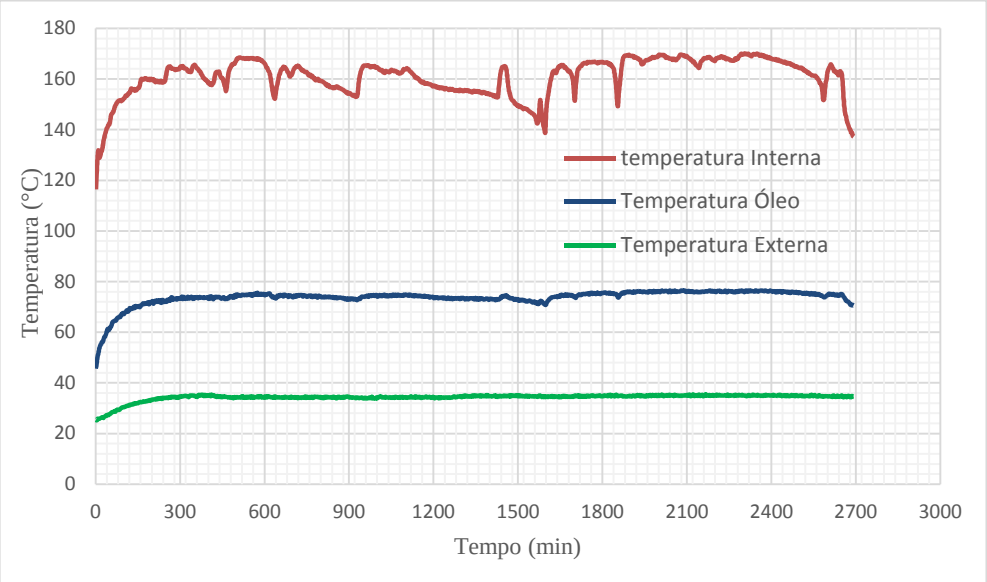
Figura 4.7 - Perfil de temperatura da coluna do TPC (experimento 1)



Fonte: Autor

Os resultados experimentais poderão no futuro ser associados a uma análise inversa tendo como objetivo a determinação da fonte de calor de acordo com a distribuição da temperatura superficial.

Figura 4.8 - Perfil de temperatura da coluna do TPC (experimento 2)



Fonte: Autor

Os valores obtidos estão resumidos na Tabela 4.3, que mostra a média da temperatura interna, externa e do óleo, assim como os seus respectivos desvios padrão (σ) para cada experimento.

Tabela 4.3 - Estimativa das temperaturas

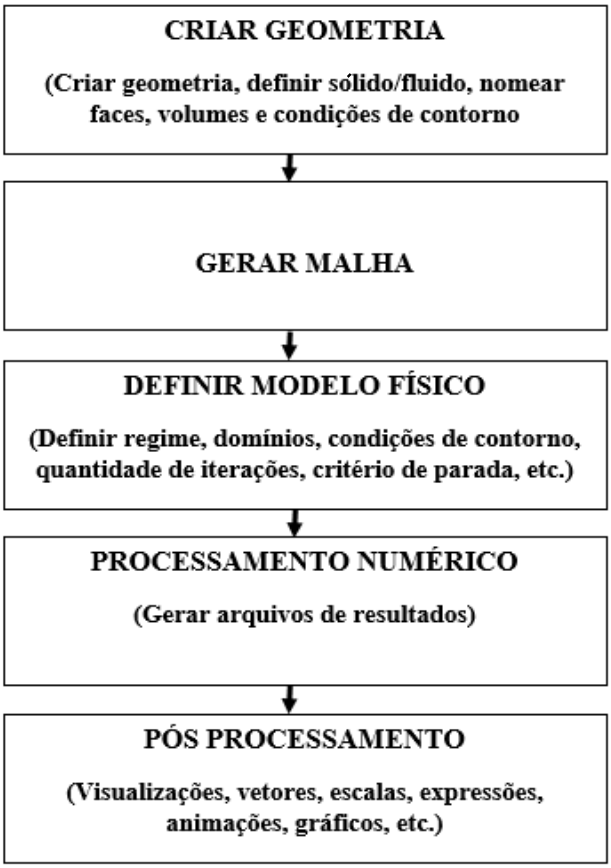
		Interna		Óleo		Externa	
Experimento	**N° amostras**	**Média (°C)**	**σ**	**Média (°C)**	**σ**	**Média(°C)**	**σ**
1	594	156,39	1,45	72,73	0,51	34,60	0,80
2	897	161,88	6,47	74,54	1,22	34,66	0,34

Fonte: Autor

4.3 Modelo numérico

A Figura 4.9 apresenta as etapas sugeridas no uso do pacote computacional CFD.

Figura 4.9- Fluxograma modelagem CFD



Fonte: Autor

4.3.1 Geração da Geometria

O ANSYS CFX não edita geometrias, porém as importa de outros *softwares* ou pode ser criada e editada em um modelador de geometria que se encontra dentro da plataforma do ANSYS, que é conhecido como *Designer Modeler* (DM). Este modelador oferece a funcionalidade para converter desenhos 2D de linhas e arcos, por exemplo, em modelos 3D. No ANSYS DM também pode-se importar geometrias de modelos CAD de outros *softwares*.

Neste trabalho, a geometria do TPC foi editada no DM, porém o perfil geométrico da coluna do capacitor foi criado em *software* CAD. Considerou-se algumas simplificações, como por exemplo, cantos sem chanfros, abertura do cabeçote de alumínio superior e da base inferior. As simplificações tiveram o objetivo de não gerar elementos que apenas aumentaria o esforço computacional e obter uma malha conforme que não gere elementos defeituosos. Para facilitar o trabalho da etapa de inserção das condições de contorno, domínios e simetria no DM, selecionou-se as faces e volumes que atenderão a estas condições, como mostra a Tabela 4.4.

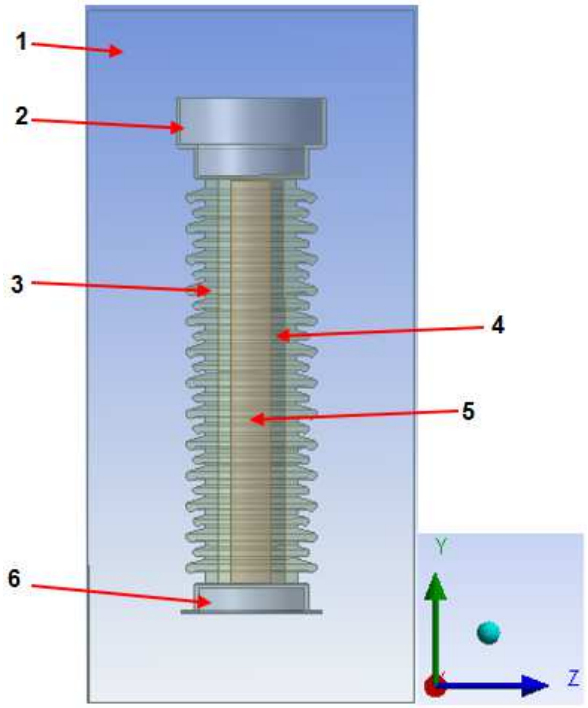
Tabela 4.4 - Domínios e simetria

Volume	
Named Select	**Localização**
AR_VC	Ar do volume de controle
CABECOTE_ALUMINIO	Cabeçote superior de alumínio
PORCELANA	Coluna de isolador de cerâmica
OLEO_ISOLANTE	Óleo isolante no invólucro do TPC
CAPACITORES	Coluna capacitiva
BASE_ALUMINIO	Base inferior de alumínio
Faces	
SYMMETRY_AR_VC	Face de simetria do ar do
SYMMETRY_CABECOTE_ALUMINIO	Simetria do cabeçote de alumínio
SYMMETRY_PORCELANA	Simetria do isolador de cerâmica
SYMMETRY_OLEO_ISOLANTE	Simetria do óleo isolante
SYMMETRY_CAPACITORES	Simetria da coluna de capacitores
SYMMETRY_BASE_ALUMINIO	Simetria da base de alumínio

Fonte: Autor

A principal simplificação adotada foi considerar apenas a metade da coluna do TPC, assumindo uma simetria no plano vertical YZ, diminuindo desta forma a quantidade de elementos da malha e consequentemente o esforço computacional. A Figura 4.10 mostra a simetria da geometria e os domínios para volumes e faces do TPC: (1) ar do volume de controle, (2) cabeçote de alumínio, (3) porcelana, (4) óleo isolante, (5) capacitores e (6) base de alumínio.

Figura 4.10 - Domínios do TPC

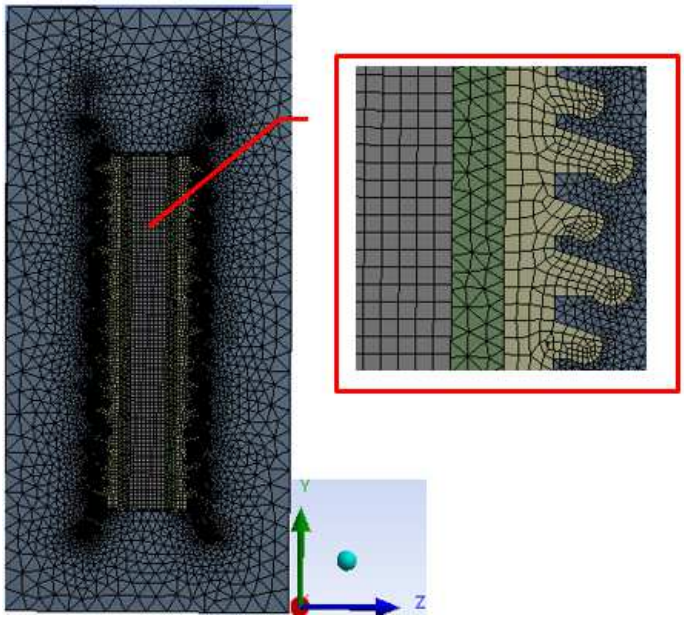


Fonte: Autor

4.3.2 Geração da Malha

Os tipos de malhas utilizados no presente trabalho foram hexaédricas, tetraédrica, prismática e piramidal, conforme Figura 4.11. Para este trabalho, foram realizados testes quanto ao tamanho mínimo dos elementos, como poderá ser verificado mais adiante na seção de teste de malha. A Tabela 4.5 mostra a configuração utilizada na geração da malha.

Figura 4.11 - Geração da malha



Fonte: Autor

Tabela 4.5 – Configuração da malha

Componente	Característica	Detalhes
Mesh	Preferência Física	CFD
	Preferência do *Solver*	CFX
	Função do Tamanho	Proximidade e curvatura
	Suavização	Alta (*High*)
	Centro de Relevância	Grossa (*Coarse*)

Fonte: Autor

4.3.3 ANSY CFX-*Pre*

Considerando o tipo de análise em regime permanente, condições de contorno, fonte de dissipação térmica e a criação de seis domínios, dentre eles dois domínios fluidos (ar do volume de controle e óleo isolante) e quatro domínios sólidos (porcelana, capacitores, base alumínio e cabeçote alumínio). Na análise dos domínios fluidos foram inseridos os parâmetros como tipo

de fluido, material, opção de flutuabilidade, pressão de referência, modelo matemático de transferência de calor e turbulência. Para o domínio sólido foram desconsideradas a flutuabilidade e a turbulência.

O modelo matemático de transferência de calor selecionado foi o *Thermal Energy*, pois envolve problemas de condução de calor no sólido e convecção nas paredes e no óleo isolante, e é adequado para fluxos com velocidade baixa e fluidos incompressíveis. Outro domínio, que normalmente é automaticamente gerado no "*setup*" é o domínio interface que define as interfaces entre os fluidos, sólidos e entre ambos. A Tabela 4.6 mostra um resumo do *setup* do CFX.

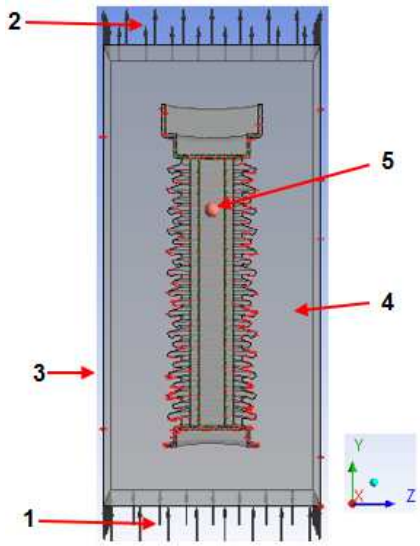
Tabela 4.6 - *Setup* CFX

Componente	Características	Detalhes
ANSYS CFX - Pre	Tipo de Regime	Permanente
	Modelo de Turbulência	Modelo *k-Episilon*
	Transferência de Calor	*Thermal Energy*
	Flutuabilidade	Ativada
	Tipo de Domínio	Múltiplos Domínios
	Subdomínio	*Source Point* (36 W)
	Condições de Contorno	*Inlet* (Subsonic) (v=0,5 m/s)
		Outlet
		Wall (No-slip, Adiabático)
		Plano de Simetria

Fonte: Autor

A Figura 4.12 mostra as condições de contorno: (1) *inlet*, (2) *outlet*, (3) *wall*, (4) *simetria* e (5) *source point*.

Figura 4.12 - Condições de contorno



Fonte: Autor

O subdomínio *source point* está inserido como um ponto físico que dissipa energia térmica e simula o defeito na coluna capacitiva. A localização do ponto está em coordenadas cartesianas. Os monitores estão localizados em pontos nos domínios do TPC para acompanhamento da convergência das temperaturas no CFX-*Solver*.

Há dois fluidos diferentes (ar e óleo isolante). Cada um dos fluidos deve ser inserido na biblioteca do programa com as propriedades termofísicas apropriadas, conforme Tabela 4.7. Depois de inserido foi criado no CFX-*Pre* um material (Mix) com os dois fluidos, porém cada material foi habilitado de acordo com o domínio.

Tabela 4.7 - Propriedades termofísicas

	Estado (fase)	**Densidade (ρ)kg/m^3**	**Condutividade (k)W/m K**
Ar a 25°C	Gás	1,185	0,0261
Alumínio	Sólido	2702	237
Cerâmica	Sólido	2400	2,8
Óleo isolante	Líquido	900	0,145
Capacitor	Sólido	504,74	21,74

Fonte: Autor

As propriedades termofísicas do ar a 25°C e do alumínio estão presentes na própria biblioteca do CFX-*Pre*. As propriedades da porcelana utilizada em materiais elétricos foram retiradas da literatura (ROSA JR., 2010) e do óleo mineral em função da temperatura foram calculadas a partir das seguintes correlações dada por Wakil et al. (2006):

$$\rho(T) = 1098{,}72 - 0{,}712T \tag{15}$$

$$k(T) = 0{,}1509 - 7{,}101E - 05T \tag{16}$$

$$Cp(T) = 807{,}163 + 3{,}58T \tag{17}$$

$$\mu(T) = 0{,}08467 - 0{,}0004T + 5E - 7T^2 \tag{18}$$

O TPC possui a parte ativa do capacitor composta por um grande número de células capacitivas conectadas em série. Esses elementos capacitivos são compostos por papel (tipo Kraft) impregnado com óleo isolante e finas folhas de alumínio. Para o cálculo do coeficiente de condutividade térmica equivalente foi usado um circuito térmico.

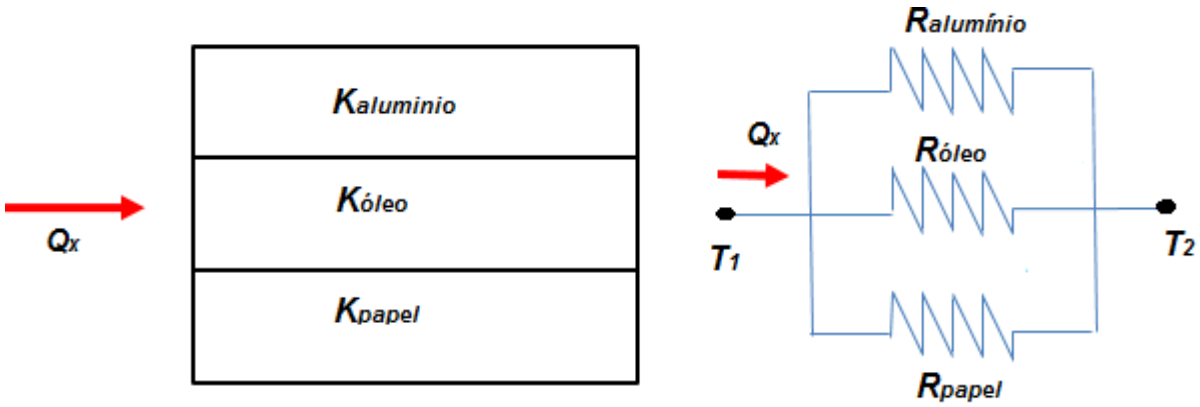
A resistência térmica (K/W) e a condutividade térmica (W/m.K) equivalentes da célula capacitiva são:

$$\frac{1}{R_{equiv}} = \frac{1}{R_{papel}} + \frac{1}{R_{oleo}} + \frac{1}{R_{aluminio}} \tag{19}$$

$$K_{equiv} = \frac{n.h.(k_{aluminio}+K_{papel}+K_{óleo})}{H} \quad (20)$$

em que *n* é o número de camadas para cada componente, h é a altura de cada componente e *H* é a altura total, em metros. A Figura 4.13 mostra o circuito térmico paralelo composto por papel, óleo isolante e alumínio.

Figura 4.13 - Configuração simplificada da célula capacitiva



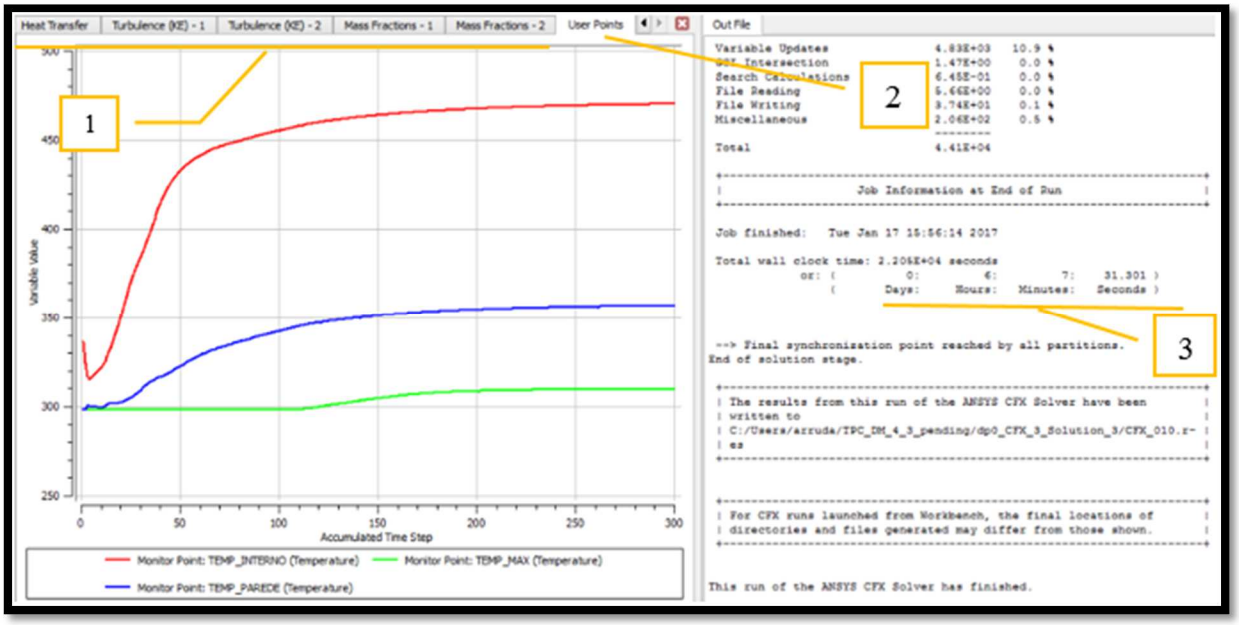
Fonte: Autor

O valor calculado do coeficiente de condutividade térmica ficou próximo ao encontrado por Wakil et al. (2006) de 16.14 W/m.K. Esse valor foi adotado para o material que serve de isolamento entre componentes de um transformador de força. Os valores das propriedades físicas para o capacitor estão de acordo com Tabela 4.7.

4.3.4 ANSYS CFX-*Solver*

O CFX-*Solver* é a parte destinada ao processamento numérico do modelo do TPC. Neste módulo os parâmetros foram definidos como processamento serial, simples precisão e a configuração da malha foi definida na etapa anterior. O acompanhamento da solução é por meio da convergência dos resíduos das equações ou dos monitores inseridos. A Figura 4.14 mostra a tela do CFX-solver: (1) monitores de resíduos, (2) monitores das temperaturas e (3) tempo de simulação.

Figura 4.14 - Monitor de convergência e iterações



Fonte: Autor

4.3.5 ANSY CFX-*Post*

O CFD-Post é a etapa de pós-processamento que permite uma fácil visualização e análise quantitativa dos resultados das simulações. Dispõe de ferramentas gráficas, geração de relatórios, tabelas, criação de expressões, variáveis, etc. A interface e o uso das ferramentas do CFD-*Post* serão utilizadas no próximo capítulo.

4.4 Teste de malha

Para a solução numérica, os domínios são discretizados e compostos de vários subdomínios. O fluxo das propriedades dentro dos volumes discretizados pode ser afetado diretamente pela disposição e forma dos elementos da malha, afetando desta forma a acurácia da solução**,** a taxa de convergência numérica e o tempo computacional necessário. A geração de uma malha de alta qualidade se torna de suma importância na solução de um problema CFD. Na calibração da malha é admitida uma margem de erro de 1% para o valor das temperaturas. Admitiu-se que os instrumentos de medição de temperatura atuais (por exemplo, os termopares) geram erros nestas proporções. O critério de escolha da malha ocorreu de acordo com pontos

localizados no domínio do TPC. O computador utilizado para a simulação numérica foi um Intel® core(TM) i7-2600 CPU@ 3,40 GHz.

A Tabela 4.8 mostra a quantidade de nós e elementos da malha.

Tabela 4.8 - Quantidade de nós e elementos da malha

Tamanho dos elementos	**1mm**	**2mm**	**4mm**	**6mm**	**8mm**
Quantidade de nós	1.037,245	1.012,504	756.968	603.240	554.956
Quantidade de elementos	4.501.681	4.393.639	3.317.629	2.703.130	2.483.132

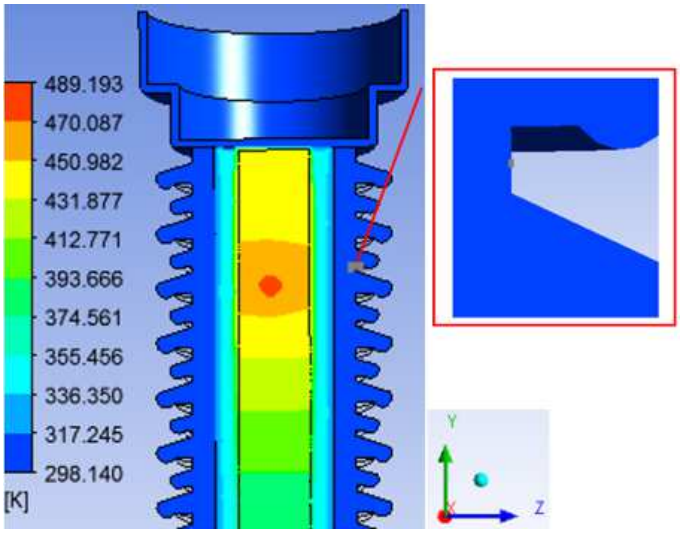
Fonte: Autor

Para o teste de malha foi necessário definir pontos para medições das temperaturas. As coordenadas estão em um plano YZ, conforme Figura 4.15, onde a origem encontra-se na base da coluna capacitiva. As coordenadas são:

a) Temperatura interna: T(0.85 , 0)
b) Temperatura do óleo isolante: T(0.739 , 0,060)
c) Temperatura externa: T(0.76 , 0,104)

O recurso para inserir as coordenadas no CFX é conhecido como *probe*. A Figura 4.15 mostra o ponto selecionado representando o termopar para a temperatura externa.

Figura 4.15 - Localização da coordenada temperatura externa



Fonte: Autor

A Tabela 4.9 mostra os resultados variando o tamanho mínimo dos elementos da malha.

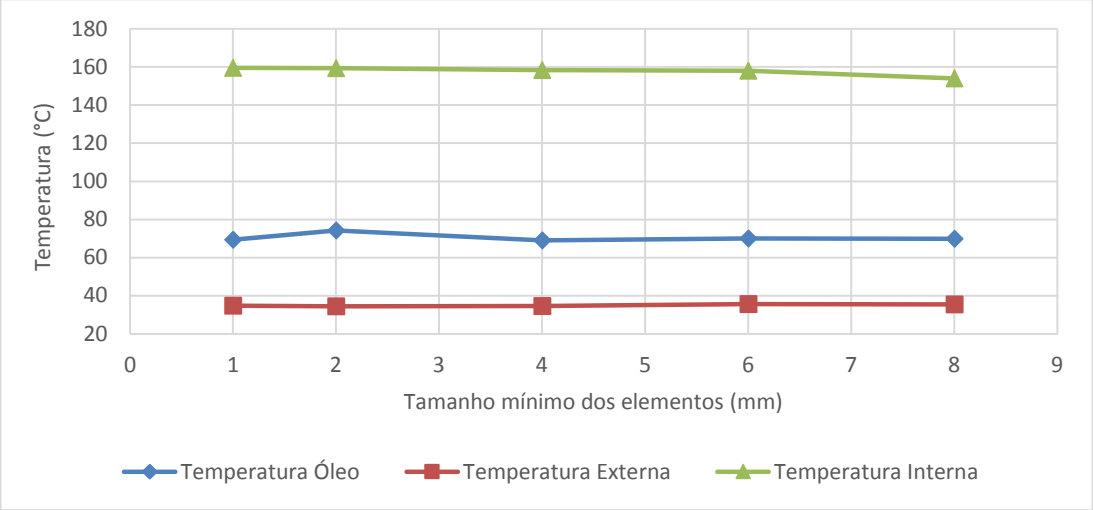
Tabela 4.9 - Resultado do teste de malha

Tamanho malha (mm)	Temperatura (°C)			Tempo de simulação
	Interna	Óleo	Externa	
1	159,49	69,31	34,65	09h e 43min
2	159,24	74,28	34,57	08h e 51min
4	158,27	69,12	34,74	07h e 18min
6	157,93	70,14	35,65	05h e 30min
8	153,12	69,97	35,49	04h e 46min

Fonte: Autor

Foram testados tamanhos diferentes dos elementos. A Figura 4.16 mostra o comportamento da temperatura com o tamanho mínimo dos elementos. Observa-se que as temperaturas interna, óleo e externa possuem baixa variabilidade com a mudança do tamanho mínimo da malha.

Figura 4.16 - Temperatura x Tamanho mínimo dos elementos



Fonte: Autor

O erro relativo foi calculado de acordo com a Equação 21. Para o caso específico da malha, tem-se:

$$E\% = \frac{T_{mm} - T_{mn}}{T_{mm}} x\ 100 \qquad (21)$$

em que E% representa o erro relativo Percentual, T_{mm} a temperatura em análise da malha de maior tamanho e T_{mn} a temperatura em análise da malha de menor tamanho. A Tabela 4.10, mostra os resultados para o erro relativo percentual e a diferença (desvio) em relação à temperatura posteriormente medida.

Tabela 4.10 - Erro relativo percentual e desvio para o teste de malha

Tamanho mínimo (mm)	Interna (%)	Desvio (°C)	Óleo (%)	Desvio (°C)	Externa (%)	Desvio (°C)
8 - 6	0,95	4,81	0,05	0,17	0,05	0,16
6 - 4	0,08	0,34	0,30	1,02	0,29	0,90
4 - 2	0,23	0,97	1,51	5,16	0,06	0,18
2 –1	0,06	0,25	1,41	4,91	0,08	0,26

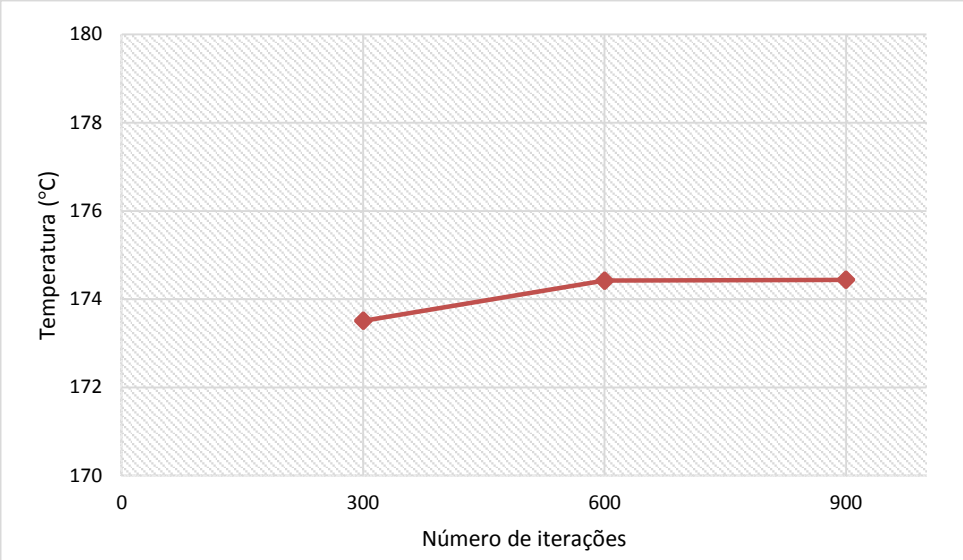
Fonte: Autor

Os erros relativos percentuais ficaram abaixo de 1% nos intervalos de elementos com tamanho mínimo de (6-4) e (8-6). Portanto, a malha escolhida para a realização das simulações foi a que contém o tamanho de elemento mínimo de 8 mm, pois está dentro da margem de resultados e o tempo de simulação é menor.

4.5 Iterações

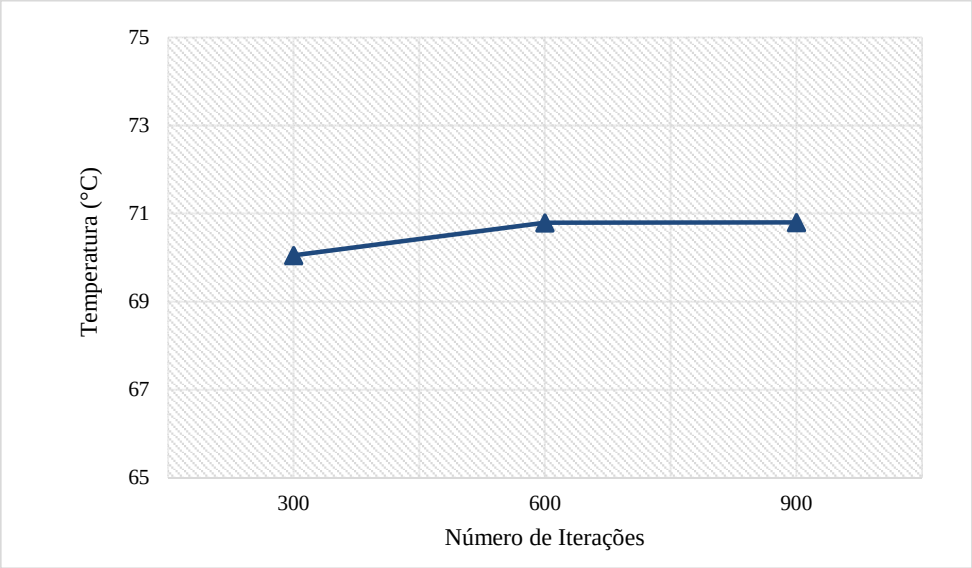
Para a quantidade ideal de iterações, utilizou-se o tamanho mínimo do elemento de malha de 8 mm e para a obtenção da temperatura em função da quantidade de iterações, como mostram as Figuras 4.17 - 4.19. Considerou-se um critério de convergência de 10^{-4} e um erro relativo máximo de 1%.

Figura 4.17 - Temperatura interna x Número de iterações



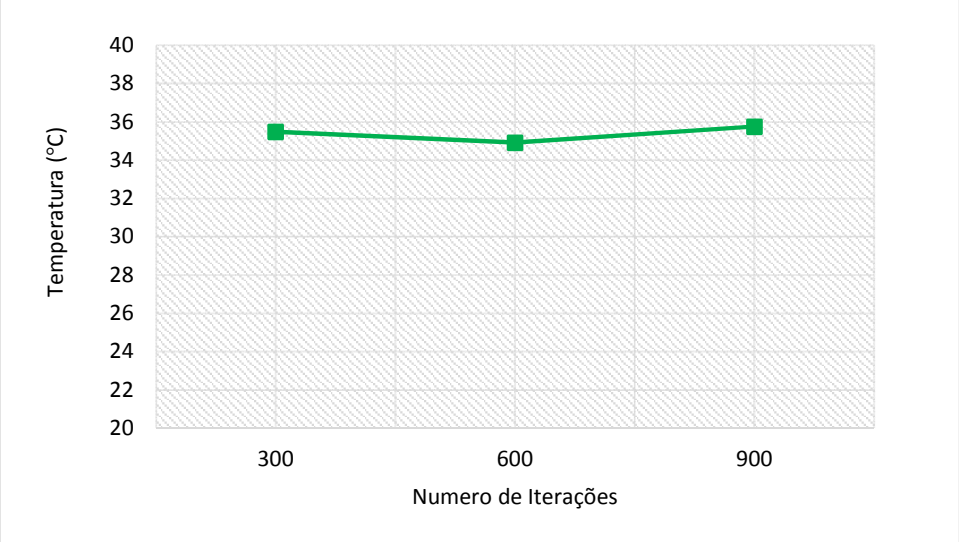
Fonte: Autor

Figura 4.18 - Temperatura óleo x Numero de iterações



Fonte: Autor

Figura 4.19 - Temperatura externa x Número de iterações



Fonte: Autor

A partir de 300 iterações as temperaturas ficaram dentro da margem de erro de 1% e permaneceram estáveis com uma tendência de reta, conforme a Tabela 4.11.

Tabela 4.11 - Erro relativo percentual para teste de iterações

	Erro percentual (%)		
Iterações	**Interna**	**Óleo**	**Externa**
300 /600	0,91	0,74	0,57
600/900	0,02	0,01	0,83

Fonte: Autor

Foi escolhido o número de 300 iterações para a simulação, pois apresenta o erro dentro da margem considerada, não sendo importante consumir horas de simulação utilizando maior quantidade de iterações.

4.6 Validação

A verificação de que o modelo experimental ou numérico se comporta de maneira satisfatória com relação aos objetivos do estudo é chamada de validação do modelo. Foi realizada comparando o comportamento do modelo com o sistema real quando ambos são submetidos às mesmas condições de entrada. A Tabela 4.12 mostra os resultados comparando os experimentos (termopar) com o modelo numérico. O valor da temperatura no modelo numérico foi calculada como sendo a média de 20 pontos próximos a fonte de calor para a interna e no óleo isolante. Para a temperatura externa foi utilizada a coordenada anteriormente mostrada.

Tabela 4.12 - Comparativo CFX x Experimentos

Temperatura(°C)	CFX	Experimento 1	Desvio	Experimento 2	Desvio
Interna	174,57	156,39	18,18	161,88	12,69
Óleo	70,79	72,73	-1,94	74,54	-3.75
Externa	35,72	34,6	1,12	34,66	1,06

Fonte: Autor

A temperatura interna apresentou resultados com maior discordância. Os erros foram de 4,23% para o experimento 1 e 2,91% para o experimento 2. Essas diferenças podem ser explicadas pela incerteza da localização do termopar interno, maior sensibilidade à geração interna de calor e o valor estimado para o coeficiente de condutividade térmica para as células capacitivas, que têm forte influência nos resultados.

A temperatura do óleo calculada apresentou boa concordância com o experimental, com erro percentual absoluto de 0,56% e 1,07% para o experimento 1 e experimento 2, respectivamente.

A temperatura externa calculada apresentou concordância com os resultados experimentais e permaneceu dentro da incerteza da medição de 1% do termopar. O maior desvio foi para o experimento 2 com 1,06 K (0,34%). Essa região sofre pequena influência da dissipação interna de calor justificada pela baixa condutividade térmica dos dielétricos. Os

resultados mostram que pequenas variações na temperatura externa podem representar altas temperaturas internas.

A validação do modelo CFX foi realizada comparando os resultados da simulação numérica e dos termogramas. O valor da temperatura do termograma é a média a partir de 300 minutos (regime permanente) para os dois experimentos. A Tabela 4.13 mostra o valor comparativo entre CFX e a temperatura média dos termogramas para cada experimento.

Tabela 4.13 - Comparativo CFX x Termografia

Temperatura (°C)	CFX	Termograma Experimento 1	Desvio	Termograma experimento 2	Desvio
Externa	35,72	36,90	1,18	36	0,51

Fonte: Autor

A temperatura do modelo numérico apresentou concordância com os resultados experimentais e permaneceu dentro da margem de incerteza da medida de 2 K da câmera termográfica. O maior desvio foi para o experimento 1 com 1,18 K e erro relativo de 0,45%.

4.7 Conclusões

Como discutido nos itens anteriores, a malha utilizada para o teste de validação e estudos de casos foi a de tamanho mínimo de elementos de 8 mm e a quantidade de iterações de 300 para as temperaturas interna, óleo e externa. Os valores encontrados para a validação do modelo estão resumidos nas Tabelas 4.12 e 4.13 e pode-se concluir que a validação do modelo foi exitosa. Para temperaturas mais próximas da fonte de calor os erros são maiores devido à maior sensibilidade nas medições e para a temperatura externa pequenos gradientes podem representar grandes variações da temperatura interna.

5 ANÁLISE DO PERFIL TÉRMICO DO TPC

Este capítulo tem objetivo de analisar os principais componentes de um TPC do ponto de vista térmico, com o uso da plataforma numérica ANSYS-CFX. O modelo numérico foi validado no capítulo anterior e para análise do perfil de temperatura foram inseridas combinações de fonte de geração de calor, simulando defeitos em vários pontos na coluna de capacitores.

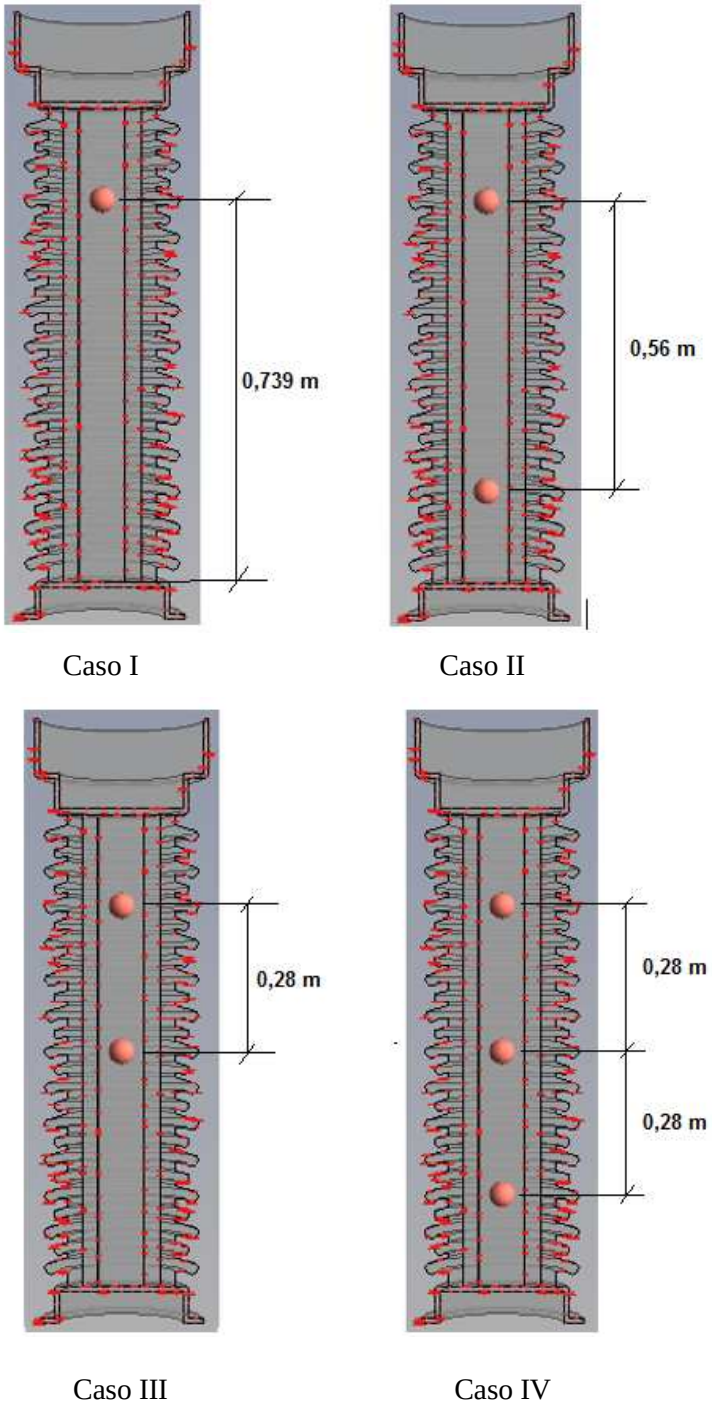
5.1 Defeitos na coluna capacitiva

Na simulação numérica, foram inseridas na coluna capacitiva combinações de fontes de geração da energia térmica de 36 W. Os casos foram divididos em:

a) ***Caso I*** – uma fonte de calor: este foi o modelo base tomado como referência para comparação com os dados obtidos nos experimentos.
b) ***Caso II*** – duas fontes de calor: modelo que foi inserida outra fonte de calor na extremidade inferior a uma distância de 0,56 metros da primeira fonte.
c) ***Caso III*** – duas fontes de calor: modelo que foi inserida outra fonte no meio da coluna capacitiva a uma distância de 0,28 metros da primeira fonte.
d) ***Caso IV*** – três fontes de calor: modelo no qual foi posicionada três fontes de calor equidistantes com um afastamento de 0,28 metros.

Em todos os casos foram preservadas as mesmas condições de contorno, variando apenas a distância e a quantidade das fontes, conforme Figura 5.1. A localização do defeito na coluna de capacitores no caso I foi de acordo a localização no experimento, porém para os outros casos não existe parâmetros que defina o local dos defeitos e foram distribuídos uniformemente na coluna de capacitores. Fotos de casos reais de sobreaquecimento na célula capacitiva podem ser visualizadas no APÊNDICE B.

Figura 5.1 - Localização das fontes de calor



Caso I Caso II

Caso III Caso IV

Fonte: Autor

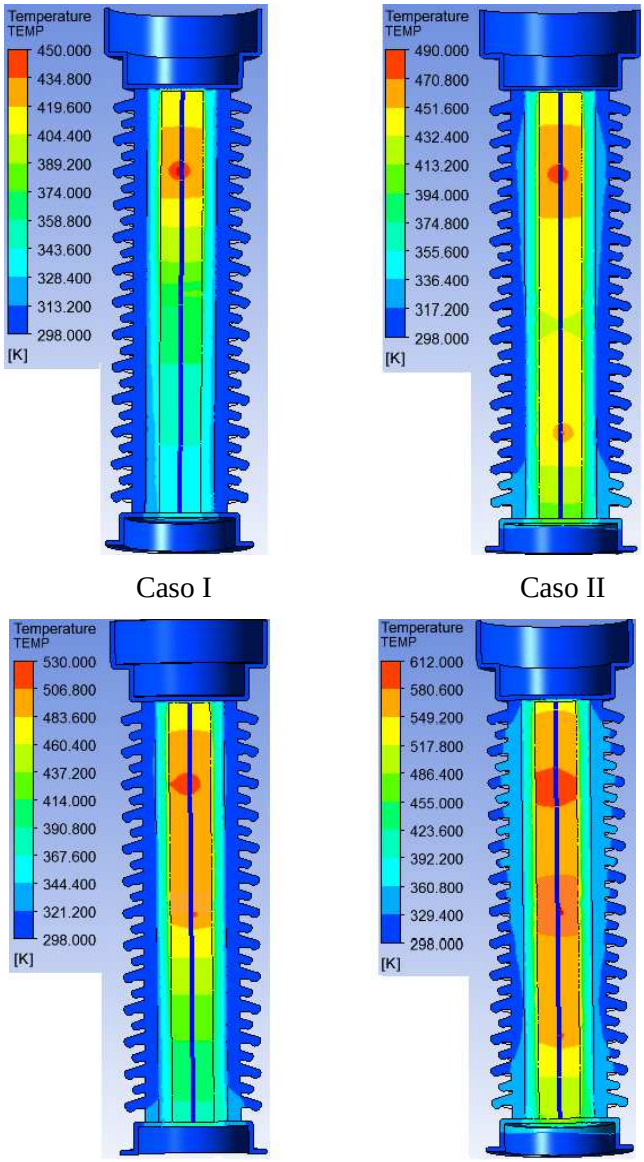
5.1.1 Comportamento térmico na coluna capacitiva

Os transformadores isolados com papel tipo kraft (celulose), devem ser projetados para operarem com temperaturas relativamente baixas. Na norma NBR 5416 (ABNT, 1997) que

trata da aplicação de cargas em transformadores de potência, é sugerido que a temperatura máxima do isolante sólido (celulose) seja entre 95°C e 120°C (temperatura máxima recomendada do óleo isolante para uma expectativa de vida normal do equipamento), dependendo da composição do papel. No caso de temperaturas superiores às de operação contínua do óleo isolante causam envelhecimento acelerado da celulose.

Então, para análise da temperatura no plano de simetria da coluna de capacitores, foi inserida uma linha vertical em todo o seu comprimento para acompanhamento da evolução do perfil de temperatura. A Figura 5.2 mostra o plano de simetria com a linha em análise.

Figura 5.2 - Linha na coluna de capacitores



Caso I Caso II

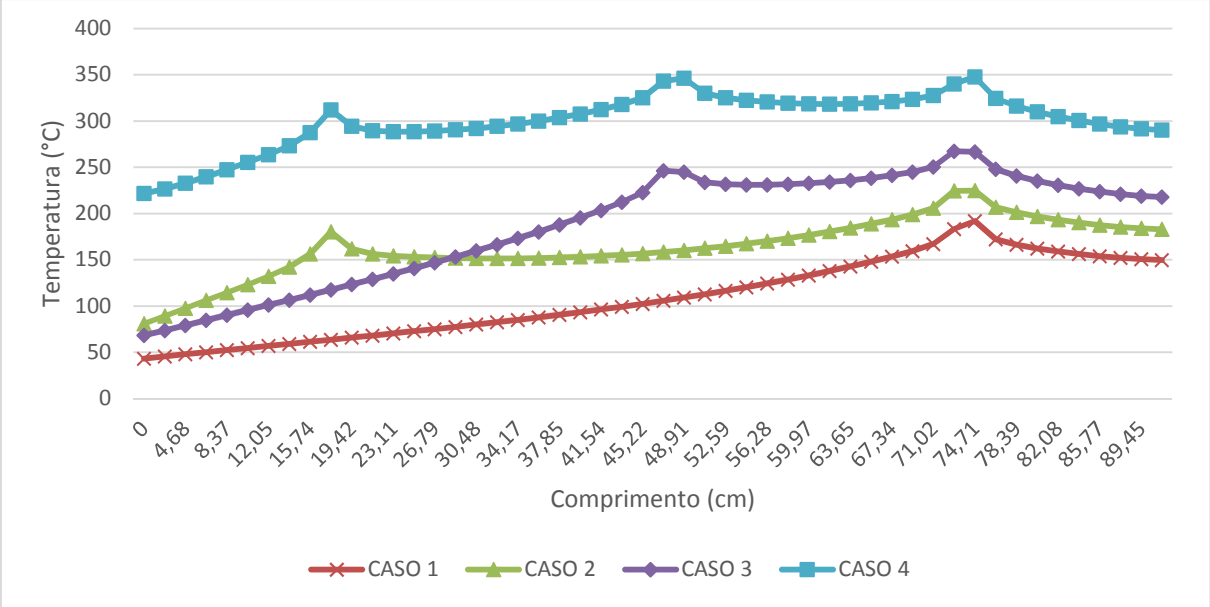
Caso III Caso IV

Fonte: Autor

Considerando a potência da fonte de calor nos casos analisados, o valor limite recomendado pela NBR 5416 (ABNT, 1997) para o isolamento sólido (celulose) foi ultrapassado nos quatro casos. O caso I a temperatura interna máxima foi de 192,13°C, o caso II foi de 224,98°C, caso III de 267,53°C e o caso IV foi de 347,69°C. Comparando o caso II e III pode-se observar que a distância entre as fontes têm influência nos resultados para a temperatura interna máxima.

Percebe-se na Figura 5.3 que as fontes de calor quanto mais próximas, maior será a influência sobre a evolução da temperaturas na coluna de capacitores. O ponto com a temperatura máxima para cada caso coincide com a localização das fontes de calor. Nestes pontos, considerando o conjunto papel-óleo, a temperatura será um agente de aceleração da degradação e envelhecimento do sistema do isolamento sólido, assim como, poderá ocorrer abertura de arcos elétricos devido a degradação do dielétrico.

Figura 5.3 - Perfil de temperatura da coluna de capacitores



Fonte: Autor

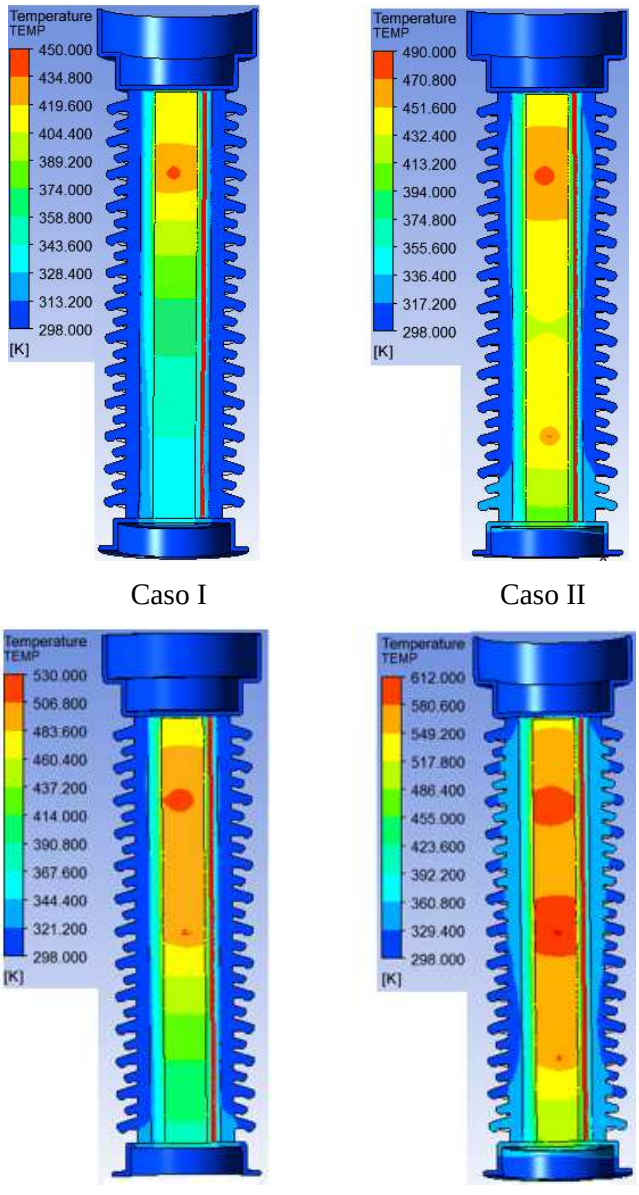
5.1.2 Comportamento térmico no óleo isolante

Os óleos minerais isolantes são utilizados em equipamentos elétricos, e o desempenho depende das propriedades para atender a função de dielétrico, agente de transferência de calor e extinção de arco (ABNT, 2012). O óleo usado em transformadores deve possuir certas propriedades básicas como: rigidez dielétrica suficiente para suportar tensões elétricas,

viscosidade adequada para circular calor e resistência a oxidação adequada para assegurar uma vida útil satisfatória.

Descargas elétricas no óleo ou exposição prolongada a altas temperaturas, podem produzir quantidades de hidrocarbonetos causando a diminuição do ponto de fulgor (ABNT, 2012). As análises foram feitas considerando o ponto de fulgor do óleo isolante de 140°C (MILASCH, 2012) e a recomendação da norma NBR 5416 (ABNT, 1997), no qual o limite de temperatura para o óleo é de 95°C a 120°C. Como referência para análise da distribuição de temperatura no plano de simetria, inseriu-se uma linha vertical ao longo do comprimento conforme a Figura 5.4.

Figura 5.4 - Linha na coluna de óleo isolante



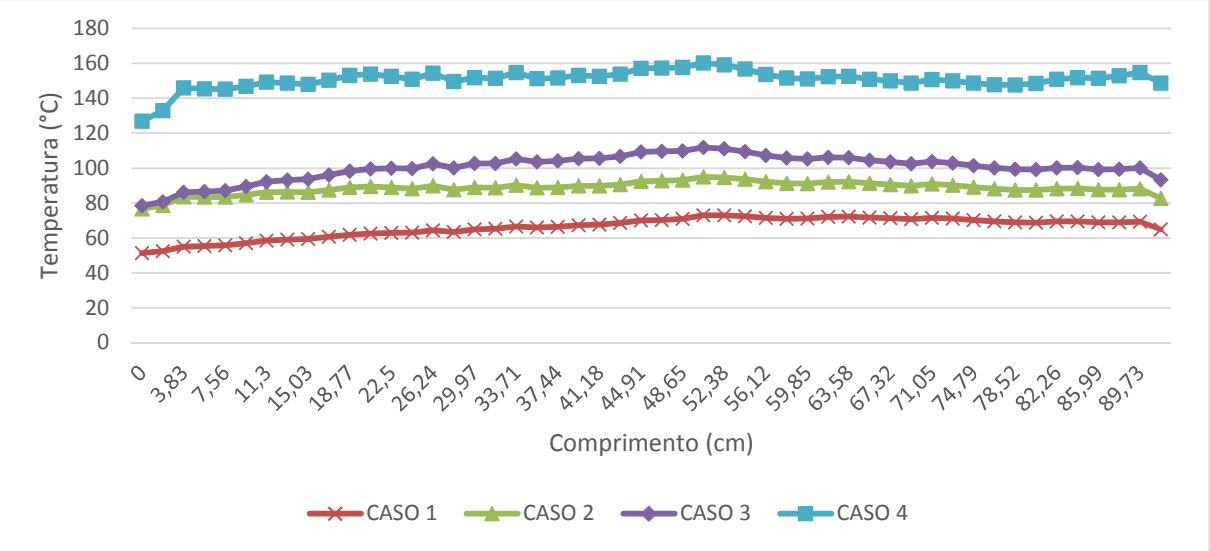
Caso I Caso II

Caso III Caso IV

Fonte: Autor

Os caso I e II, a temperatura do ponto mais quente no óleo isolante encontra-se abaixo dos valores recomendados pela norma (ABNT, 1997) e do ponto de fulgor do óleo, os valores foram 73,02°C e 94,91°C, respectivamente. O caso III permanece no intervalo limite, mas não atinge a temperatura do ponto de fulgor (111,85°C). O caso IV é a situação mais crítica ultrapassando todos os limites recomendados (160,23°C). A Figura 5.5 mostra os resultados obtidos para o perfil de temperatura desenvolvido em cada caso e a evolução do gradiente de acordo com o aumento do número de fontes de calor.

Figura 5.5 - Perfil de temperatura da coluna de óleo isolante



Fonte: Autor

Observa-se na Figura 5.5 que o perfil de temperatura desenvolvido tem comportamento semelhante para os casos analisados, sendo pequena a elevação da temperatura para pontos próximos a fonte de calor e que a dissipação térmica e a rigidez dielétrica do óleo isolante são propriedades importantes para que isto ocorra, ou seja, proporcionando estabilidade térmica dentro do involucro.

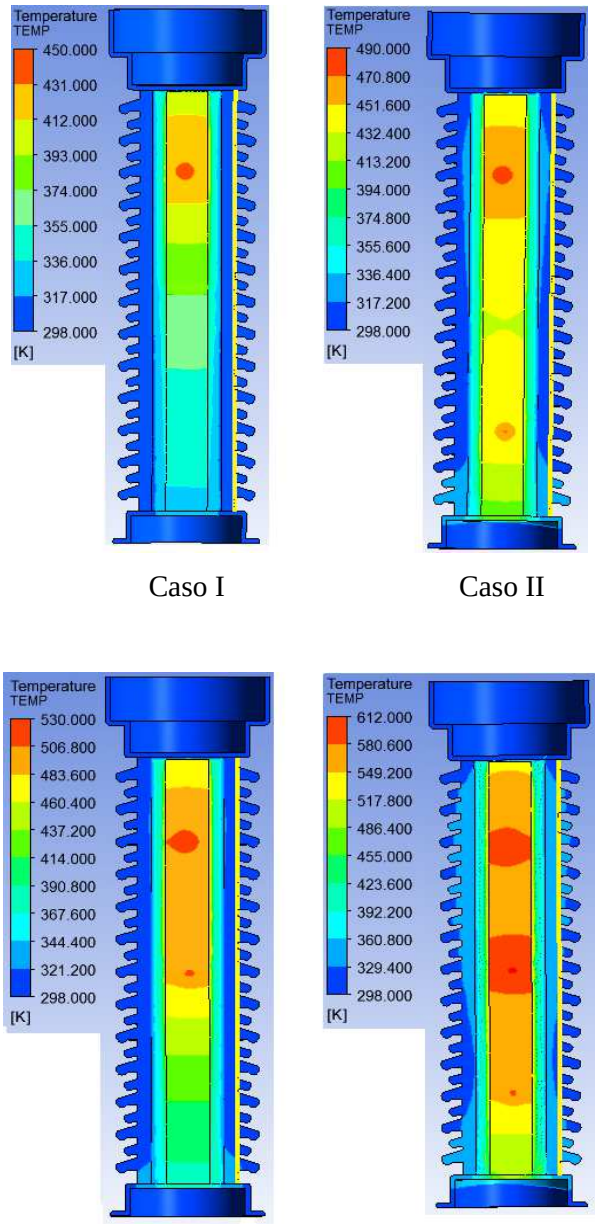
5.1.3 Comportamento térmico na coluna de porcelana

A coluna de porcelana é um excelente isolador elétrico, térmico e possui também alta resistência mecânica (ROSA JR., 2010). Por possuir grande resistência à perda de calor (baixa condutividade térmica), proporciona temperaturas superficiais com pequenos gradientes. Porém, quando aumenta a geração interna de calor afetando o dielétrico e consequentemente a

temperatura da superfície externa, altos gradientes de temperatura poderão ser visualizados através de inspeções termográficas.

Para análise dos casos, foi inserida uma linha no comprimento da coluna em pontos externos, com o objetivo de medir o maior gradiente de temperatura. A Figura 5.6 mostra a linha posicionada para obtenção do perfil de temperatura. Os resultados foram avaliados por critérios para determinar a serenidade de uma anomalia térmica, na qual é definido como qualquer indicação de temperatura que se desvie de um padrão térmico conhecido (ABNT, 2016). Os critérios foram divididos pelos seguintes métodos: quantitativo e qualitativo.

Figura 5.6 - Linha na superfície externa



Caso I Caso II

Caso III Caso IV

Fonte: Autor

O método quantitativo é definido como a diferença entre a temperatura máxima medida de um elemento e a ambiente ou entre equipamentos similares (ABNT, 2010). Através deste método é que se define a gravidade do problema. A Tabela 5.1 mostra o critério delta T (ΔT) adotado nas inspeções termográficas da CHESF para o caso da coluna de porcelana do TPC.

Tabela 5.1 - Critério delta T para coluna de porcelana

Quantitativo	Normal (°C)	Nível 1 (°C)	Nível 2 (°C)
Similares	≤ 3	$3< \Delta T \leq 7$	> 7
Ambiente	≤ 5	$5< \Delta T \leq 10$	>10

Fonte: (CHESF, 2016) (adaptado)

A criticidade de nível 1 exige um acompanhamento e a de nível 2 substituição ou reparo (dentro dos limites de tempo estabelecidos por norma). A Tabela 5.2 mostra a diferença entre o valor máximo e a temperatura ambiente (30°C) para cada caso simulado. Considerando os valores do método quantitativo, tem-se para todos os casos criticidade. No caso I, a criticidade foi de nível 1 e os demais foram de nível 2, exigindo medidas de intervenção.

Tabela 5.2 - Temperatura máxima e ambiente

Temperatura (°C)	*Caso I*	*Caso II*	*Caso III*	*Caso IV*
Máxima	37,07	46,81	48,28	59,58
Ambiente	30	30	30	30
ΔT	7,07	16,81	18,28	29,58

Fonte: Autor

O outro método é o qualitativo, que é uma análise dos padrões térmicos diferentes, sem considerar os valores de temperatura medidos como critério (ABNT, 2010). Para a coluna de porcelana a distribuição de temperatura superficial é uniforme e qualquer alteração é uma indicação de defeito. Por isto, visualizar a coluna de porcelana em diferentes ângulos é uma forma de inspecionar a existência de áreas sobreaquecidas, como por exemplo, os gradientes desenvolvidos na superfície de porcelana. A Tabela 5.3 mostra o valor do ΔT referente às simulações para a temperatura externa na coluna de porcelana.

Tabela 5.3 - Gradiente temperatura máxima e mínima na coluna de isoladores

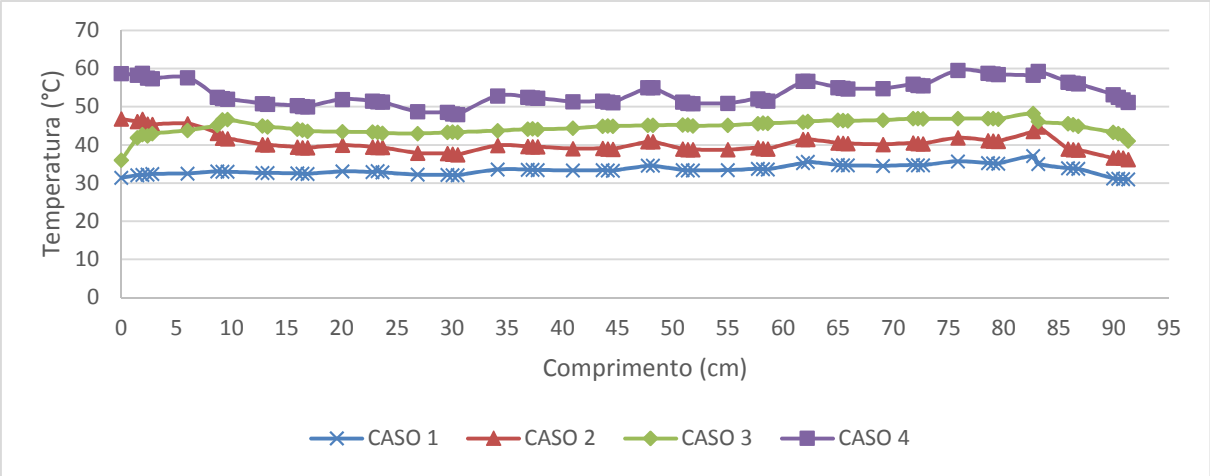
Temperatura (°C)	*Caso I*	*Caso II*	*Caso III*	*Caso IV*
Mínima	30,96	36,19	35,98	48,08
Máxima	37,07	46,81	48,28	59,58
ΔT	6,11	10,62	12,3	11,5

Fonte: Autor

Padrões térmicos com gradientes de temperatura para a coluna de porcelana, na qual normalmente têm uma distribuição regular, é um indício de anomalia térmica no equipamento.

A Figura 5.7 mostra a evolução do perfil de temperatura para a linha inserida no plano de simetria para cada caso.

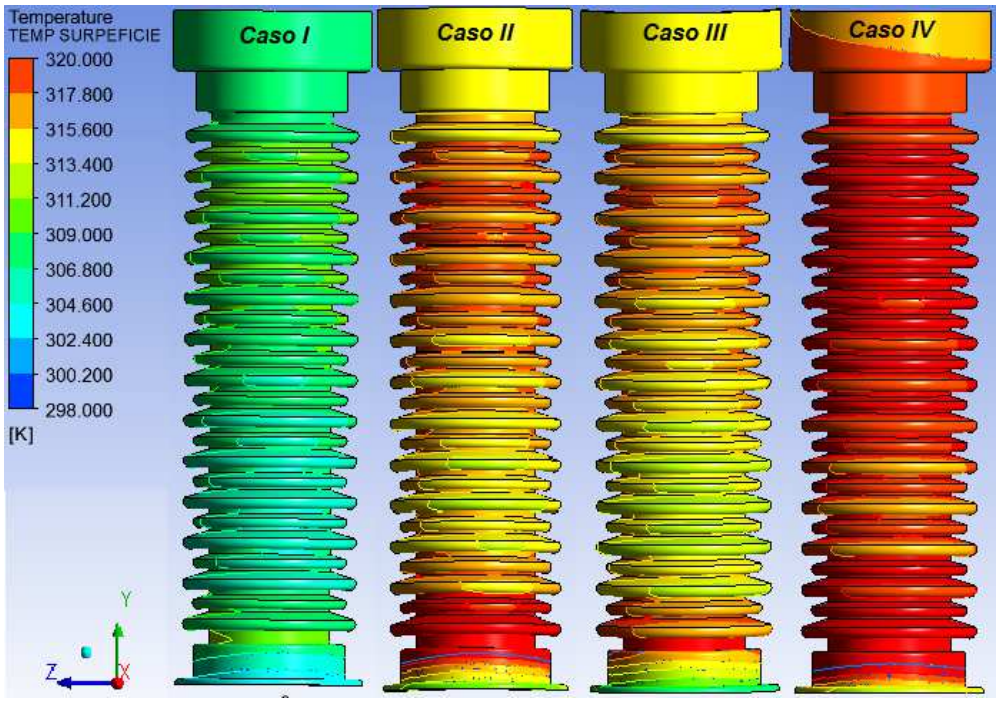
Figura 5.7 - Perfil de temperatura da superfície externa



Fonte: Autor

A distribuição superficial da temperatura para cada caso na coluna de porcelana pode ser visualizado na Figura 5.8. Casos reais de imagens térmicas do perfil desenvolvido na coluna de porcelana de TPCs são mostrados no APÊNDICE C.

Figura 5.8 - Distribuição da temperatura superficial



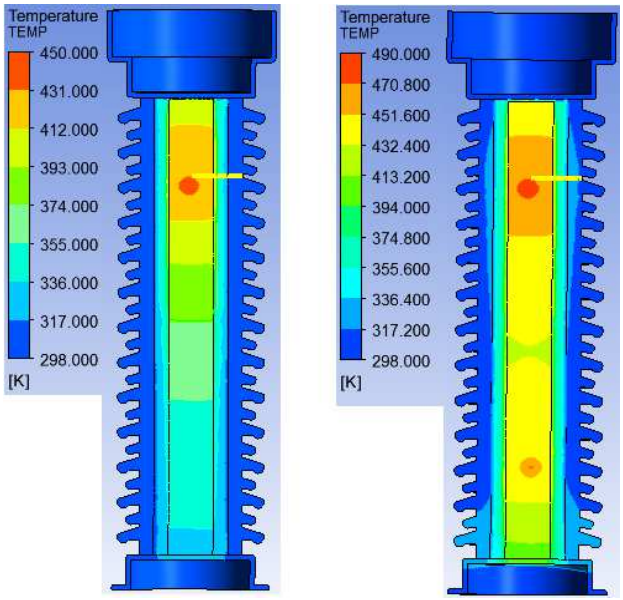
Fonte: Autor

Outra observação importante é a localização do ponto mais quente na coluna de porcelana. A coluna capacitiva está imersa em um volume de óleo isolante e a dissipação

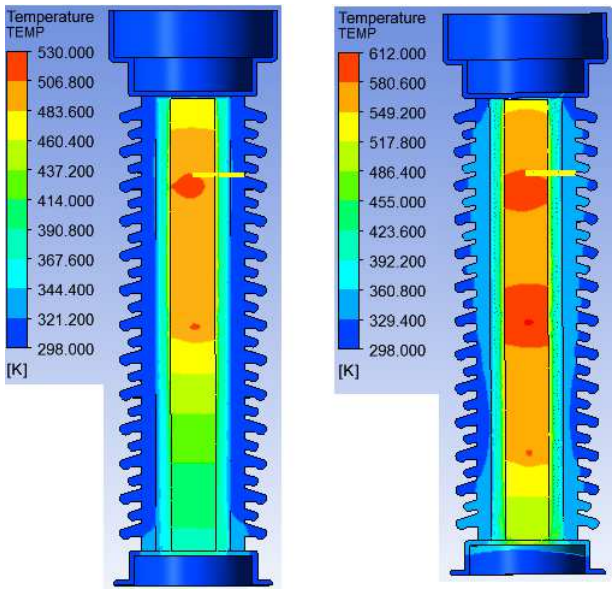
térmica que simula o defeito dentro da coluna provoca forças convectivas que aquecem mais intensamente em regiões acima do defeito. Com isto, pode-se também inferir a localização interna do defeito.

No plano de simetria do TPC, para acompanhamento da evolução do perfil de temperatura, foi inserida uma linha do centro da coluna capacitiva à superfície externa, conforme Figura 5.9.

Figura 5.9 - Linha centro à superfície externa



Caso I Caso II



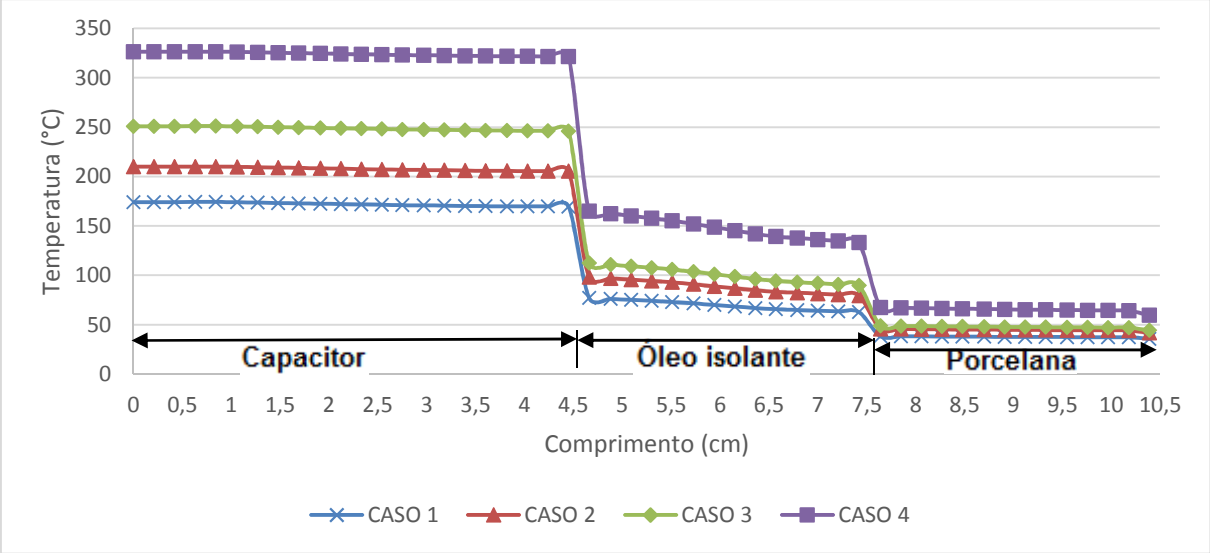
Caso III Caso IV

Fonte: Autor

Devido ao aumento do número de defeitos inseridos na coluna de porcelana, observa-se o comportamento do perfil de temperatura do centro da coluna de capacitores à superfície

externa. A medida que aproxima-se da superfície externa a temperatura diminui devido à alta resistência térmica do óleo e da porcelana. Consequentemente a superfície externa possui uma sensibilidade menor ao aumento da temperatura em relação a interna, ou seja, embora possa ser detectada uma pequena elevação da temperatura na superfície do TPC, internamente a temperatura é maior, como mostra a figura 5.10. Estes resultados mostram a importância do conhecimento da temperatura superficial para inferência da temperatura interna e relacionar com falhas.

Figura 5.10 - Perfil de temperatura do centro à superfície externa do TPC



Fonte: Autor

A tabela 5.4 mostra a evolução do gradiente em função do número de defeitos. A medida que aumenta o número de defeitos maior será o gradiente entre a temperatura interna e externa.

Tabela 5.4 - Temperatura interna e externa no TPC

Temperatura (°C)	***Caso I***	***Caso II***	***Caso III***	***Caso IV***
Interna	174,15	210,01	250,97	326,38
Externa	35,72	41,85	44,31	59,56
ΔT	138,43	168,16	206,66	266,82

Fonte: Autor

6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

6.1 Conclusões

O presente trabalho apresenta uma metodologia na ferramenta ANSYS-CFX para análise da distribuição de temperatura em um TPC, validada através da comparação com os dados experimentais. O modelo desenvolvido na plataforma numérica apresentou resultados satisfatórios comparados com os experimentais. Os dados experimentais (medição das temperaturas com os termopares) apresentaram concordância com os resultados das imagens termográficas (desvio máximo de 2,2 K). Para a temperatura externa o erro relativo situou-se abaixo de 1% e dentro da incerteza da medida do termopar. Para a temperatura do óleo o maior erro percentual foi de 1,07%. A temperatura interna foi a que apresentou maior discordância e os erros foram de 4,23% para o experimento 1 e 2,91% para o experimento 2. Essas diferenças podem ser explicadas pela incerteza da localização do termopar interno, maior sensibilidade à geração interna de calor, valor estimado para o coeficiente de condutividade térmica para as células capacitivas, erros experimentais (sistemáticos e aleatórios) e numéricos (truncamento, iteração, arredondamento e programação).

A partir da modelagem no ANSYS-CFX foi possível realizar diversas simulações variando a localização da fonte de dissipação térmica e observando a influência no perfil de temperatura do TPC, localização do ponto mais quente e distribuição da temperatura nas regiões analisadas. Considerando o valor sugerido pela NBR 5416 (ABNT, 1991) para a temperatura máxima do isolamento sólido (celulose), apenas para uma fonte de calor (defeito) o valor foi superado em 50 K, ocasionando condições favoráveis para a aceleração da degradação da celulose da coluna capacitiva do TPC. O efeito da temperatura no perfil de velocidade do óleo isolante atingiu valores maiores na região superior do invólucro, desta forma observa-se a dinâmica do efeito da flutuabilidade.

Por fim, pode-se concluir que o modelo numérico na plataforma ANSYS-CFX é uma ferramenta poderosa que auxilia de forma confiável. Os resultados deste trabalho mostram que embora possa ser detectada uma pequena elevação de temperatura na superfície externa da coluna de porcelana do TPC, internamente a temperatura é maior ocasionando aceleração do isolamento sólido, redução da vida útil do equipamento, riscos de falhas e consequentemente indisponibilidade do sistema. Além disto, as simulações oferecem informações importantes na localização do defeito.

6.2 Sugestões para trabalhos futuros

A seguir, algumas sugestões para trabalhos futuros:

- Modelagem e simulação em CFX considerando a transferência de calor por radiação;
- Modelagem do TPC em regime transiente;
- Análise de simulações FSI (interação fluido-estrutura);
- Análise de simulações multifísicas (interação elétrico-térmica-estrutura);
- Estudo do coeficiente de condutividade térmica da célula capacitiva do TPC;
- Criação de um banco de dados para consulta e inferência da temperatura interna do TPC;
- Análise inversa considerando os métodos existentes;
- Estudo da dissipação térmica e inferência da distribuição de temperatura interna na caixa do secundário do TPC;
- Estudo da degradação e estimativa da vida útil do isolante sólido (celulose) do TPC.

REFERÊNCIAS

ABRADEE. Associação Brasileira de Distribuição de Energia Elétrica. **Redes de energia elétrica**, 2017. Disponivel em: <http://www.abradee.com.br/setor-eletrico/redes-de-energia-eletrica>. Acesso em: 16 Fevereiro 2017.

ANEEL. Agencia Nacional de Energia ELétrica. **Perdas de Energia**, 25 Novembro 2015. Disponivel em: <http://www.aneel.gov.br/metodologia-distribuicao/-/asset_publisher/e2INtBH4EC4e/content/perdas/654800?inheritRedirect=false>. Acesso em: 16 Fevereiro 2017.

ANEEL. Agencia Nacional de Energia Elétrica. **Energia no Brasil e no mundo**, 2017. Disponivel em: <http://www2.aneel.gov.br/arquivos/pdf/atlas_par1_cap1.pdf>. Acesso em: 13 Março 2017.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6546. **Transformadores de instrumentos. Terminologia**, Rio de Janeiro, 1991.

ABNT- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5416. Aplicação de cargas em transformadores de potência, Rio de Janeiro, 1997.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15866. **Ensaios não destrutivo - Termografia - Metodologia de avaliação de temperatura de trabalho de equipamentos em sistemas elétricos**, 2010.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10576. **Óleo mineral isolante de equipamentos elétricos**, 2012.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15424. **Ensaios não destrutívos - Termografia: Termologia**, 2016.

BARROSO, R. **Simulation and experimental validation of the core temperature distribuition of a three-phase transformer**. COMSOL Conference. Curitiba: [s.n.]. 2014.

CAMPOS, A. R. T.; MARISCAL, I. C.; HERNANDEZ, S. G. Simulation of a distribution transformer. **WSEAS Transactions on Fluid Mechanics**, v. 07, p. 106 - 114, July 2012.

CARVALHO JR, A. V. Interação transitória entre transformadores de potencial capacitivo e linhas de transmissão: uma contribuição para minimizar falhas. **Dissertação de Mestrado-Universidade Federal de Pernambuco - UFPE**, Recife - PE, 2008.

CARVALHO JUNIOR, A. V.; SANTOS, C. M. P.; PENA, M. C. M. A experiência da Chesf na detecção e dos modos de falha em transformadores para instrumentos. **Eletroevolução**, v. 48, Setembro de 2007, p. 25-31, 2007.

ÇENGEL, Y. A.; GHAJAR, A. J. **Transferência de calor e massa**. [S.l.]: Mc Graw Hill, 2012.

CHESF. **Norma de manutenção -** Inspeção termográfica. [S.l.]: [s.n.], 2016.

DINIZ, H. E. P. Termografia qualitativa como ferramenta de gestão de ativos do sistema elétrico de potência. **Dissertação Mestrado em Engenharia Mecânica - Universidade Federal de Minas Gerais -** UFMG, Belo Horizonte, 2013.

ESLAMIAN, M.; VAHIDI, B.; ESLAMIAN, A. thermal analysis of cast-resin dry tipe transformers. **Energy Conversion and Management**, v. 52, p. 2479 - 2488, 2011.

FERREIRA, R. A. M. Modelagem matemática aplicada ao diagnóstico de falha de componentes elétricos de subestações. **Dissertação de Mestrado- Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG**, Belo Horizonte - MG, 2015.

HENRIQUEZ, J. R.; OCHOA, A. A.; DA COSTA, J. A. P; DE BRITO FILHO, J. P.; DUTRA J. C.C.; RIBEIRO, J. H. R.; PORTO M. A. L.; GALINDO T. C. L. **Avaliação do perfil de temperatura em coluna de capacitores de um transformador de potencial capacitivo**. Convención Científica de Inginiería y Arquitectura. Habana: [s.n.]. 2014.

HUDA, A. S. N.; TAIB, S. Application of infrared thermography for predictive/preventive maintenance of thermal defect in electrical equipment. **Appliec Thermal Engineering**, v. 61, p. 220-227, 2013.

INCROPERA, F. P.; DEWIT, D. P.; BERGAMAN T. L.; LAVINE A. S. **Fundamentos da transferência de calor e massa**. Rio de Janeiro: LTC, 2007.

JADIN, M. S.; TAIB, S. Recent progress in diagnosing the reliability of electrical equipment by using infrared thermography. **Infrared Physics & Technology**, v. 55, p. 236-245, 2012.

LINNANDER, B. When it's too hot touch use infrared thermography. **IEEE circuits and devices magazina**, v. 9, p. 35-37, 1993.

MADZAREVIC, V.; KAPETONOVIC I.; TESANOVIC, M.; KASUMOVIC, M. Different approach to thermal modeling of transformers - a comparison of methods. **International Journal of Energy and Environment**, v. 5, p. 610 - 617, 2011.

MALDAGUE, X. P. V.; MOORE, P. O. **Infrared and thermal testing**. New York: Hardcover, 2001.

MALISKA, C. R. **Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional**. Rio de Janeiro: LTC, 1995.

MEDINA, R. D.; ROMERO, A. A.; MOMBELO, E.E.; TRATTÁ G.; Comparative study of two thermal aging estimating methods for power transformers. **IEEE Latin America Transactions**, v. 13, n. 10, p. 3287-3293, 2015.

MILASCH, M. **Manutenção de transformadores em líquido isolante**. São Paulo - SP: Blucher, 2012.

MUFUTA, J. M.; DUCK, E. V. Modelling of the mixed convection in the winding of a disc-type power transformer. **Applied Thermal Engineering**, v. 20, p. 417 - 437, 2000.

NEMA. International Eletrical Testing Association. **Standard for Infrared Inspection of Electrical Systems & Rotating Equipment**, New york, 2008.

ORTIZ, C.; SKOREC, A.W.; LAVOIE M.; BENARD P. Parallel CFD analysis conjugate heat transfer in a dry-type transformer. **IEEE Transactions on industry applications**, v. 45, p. 1530 - 1534, Julho/Agosto 2009.

PARAMANE, S.B.; JOSHI K. DER VEKER, W.V.; SHARMA, A. CFD Study on thermal performance of radiators in a power transformer: effect of blowing direction and offset of Fans. **IEEE Transactions on power delivery**, v. 29, p. 2597 - 2604, 2014.

PHADKE, A. G.; THORP, J. S. **Computer realying for power system**. [S.l.]: Wiley, 1988.

RAMOS, J.C.; BEIZA, M.; GASTERRULITIA, J.; RIVAS, A.; ANTON, R.; LARRAONA, G.S.; MIGUEL, I. Numerical modelling of natural ventilation of underground transformer substations. **Applied Thermal Enginnering**, v. 51, p. 852-863, 2013.

ROSA, J.C.; VASCONCELOS, S.A.; NEVES, L.A.; JUNIOR, D.F. **Subsídios para a modelagem de transformadores de potêncial capacitivos em função da frequência**. Seminário Nacional de produção e transmissão de Energia Elétrica. Uberlândia - MG: [s.n.]. 2003.

ROSA JR., A. L. R. DA. Materiais Elétricos, 2010. Disponível em: <http://www.foz.unioeste.br/~lamat/downcompendio/compendiov1.pdf#page=45>. Acesso em: 29 Julho 2016.

ROSSILO, M. E.; HERRERA, C. A.; JARAMILLO, G. Advanced thermal modeling and experimental performance of oil distribution transformers. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 27, p. 1710 - 1717, 2012.

SANTOS, L. Termografia infravermelha em subestações de alta tensão desabrigadas. **Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Itajubá**, Itajubá - MG, 2006.

SMOLKA, J.; NOWAK, A. J. Experimental validation of the coupled fluid flow, heat transfer and electromagnetic numerical model of the medium-power dry-type electrical transformer. **International Journal of Thermal Sciences**, v. 47, p. 1393 - 1410, 2008.

SMOLKA, J.; NOWAK, A. J.; WROBEL, L. C. Numerical modelling of thermal processes in an electrical transformer dipped into polymerised resin by using commercial CFD package fluent. **Computers & Fluids**, n. 33, p. 859 - 868, 2004.

TRENCH, E. Instruction manual for capacitor voltage transformer and coupling capacitor, 1982.

TSILI, M. A. AMOIRALES, E.I.; KLADAS, A.G.; SOUFLARIS, A.T. Power transformer thermal analysis by using an advanced coupled 3D heat transfer and fluid flow FEM model. **International Journal of Thermal Sciences**, v. 53, p. 188 - 201, 2012.

VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. **Computational fluid dynamics**. London: Pearson, 2007.

WAKIL, N. E.; CHERECHES, N. C.; PADET, J. Numerical study of heat transfer and fluid in a power transformer. **Internal Journal of Thermal Sciences**, v. 45, p. 615-629, 2006.

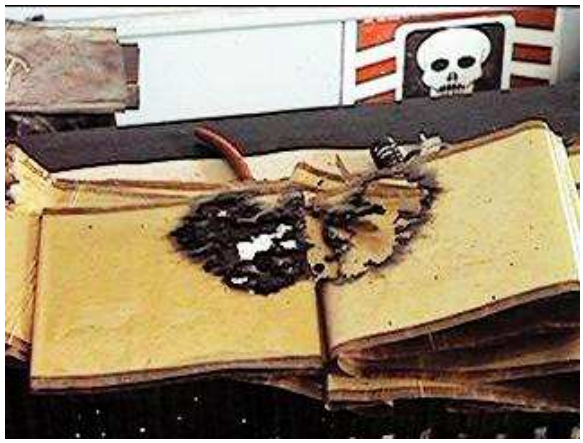
YANG, H.; YU, T.; XU, R.; PENG, C. Simulation study on ventilation & cooling for main transformer room of an indoor substation. **Journal of Multimedia**, v. 9, p. 1040 - 1047, 2014.

APÊNDICE A - Resultados experimentais (ε = 0,85)

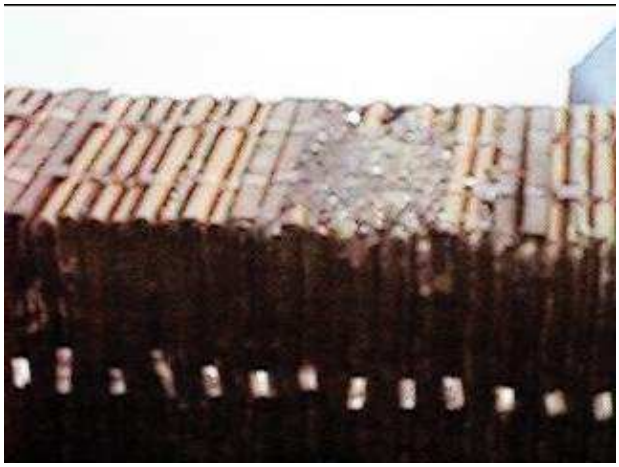
Experimento	Tempo (min.)	Termopar (°C)	Termograma (°C)	Desvio(°C)
Experimento 1	19	25,6	26,6	1
	22	25,8	26,5	0,8
	274	34	34,8	0,8
	1300	34,3	35,9	1,6
	1504	35,7	37,9	2,2
	1783	35,8	37	1,2
Experimento 2	7	25,8	27,8	2
	10	25,8	27,8	2
	178	32,8	34,4	1,6
	265	34,2	36,3	2,1
	361	34,5	36,2	1,7
	1261	34,1	35,4	1,3
	1264	34,3	36	1,7
	1267	34,2	35,3	1,1
	1363	35	36,3	1,3
	1366	34,6	36	1,4
	1438	34,8	36,1	1,3
	1614	34,6	36,2	1,6
	1675	34,5	36,3	1,8
	2692	34,4	36,2	1,8

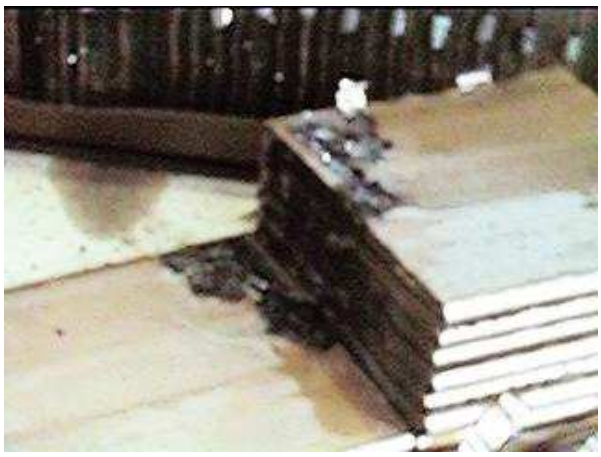
APÊNDICE B – Fotos de casos reais de sobreaquecimento na coluna capacitiva

Células capacitivas carbonizadas devido a sobreaquecimento.



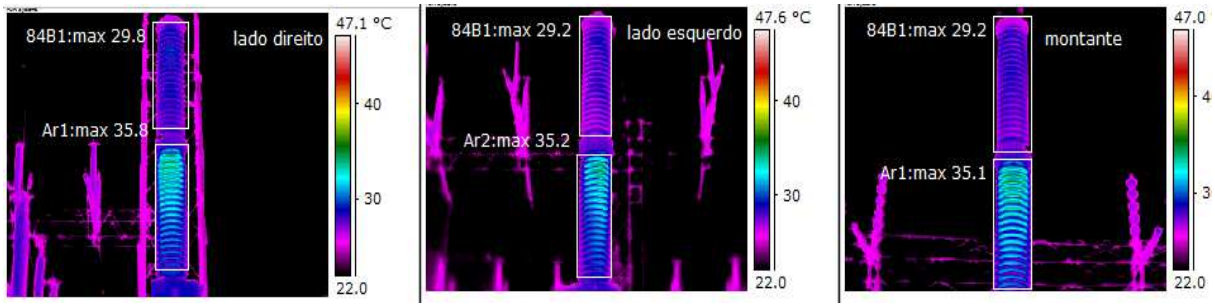
PERIGO
DE VIDA



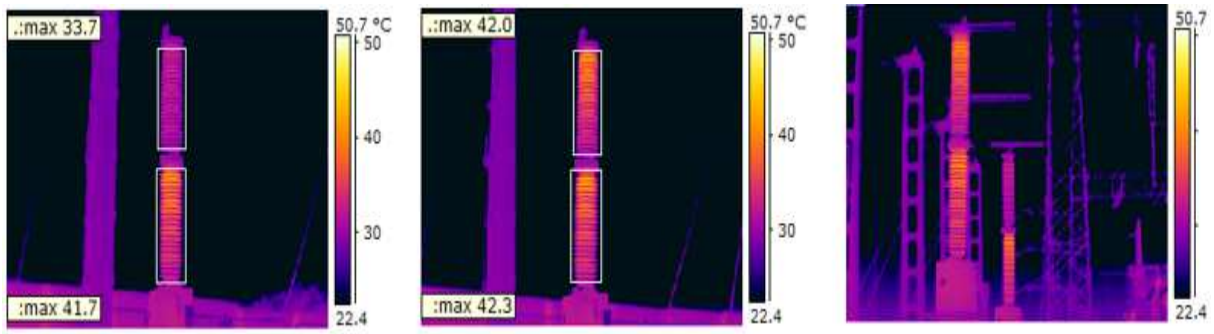


APÊNDICE C – Termogramas de TPCs com coluna capacitiva sobreaquecida

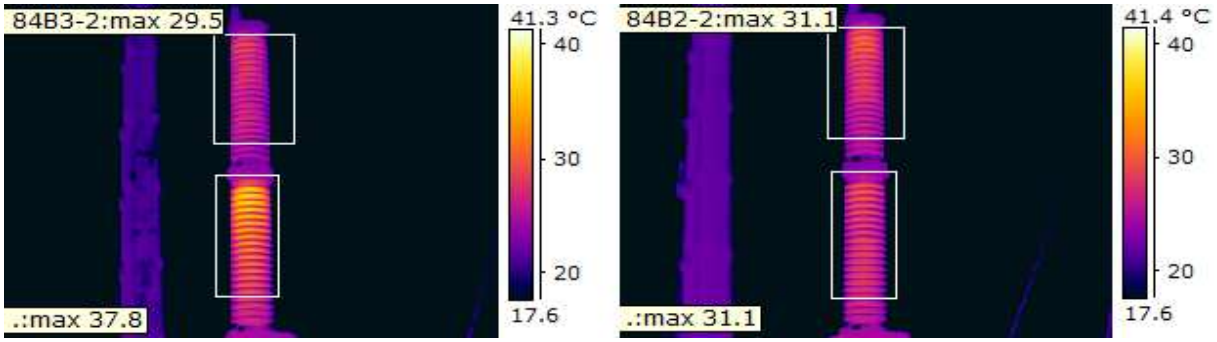
a) Imagens termográficas registradas mostrando o aquecimento da coluna inferior e comparando a temperatura máxima do perfil térmico desenvolvido em posições diferente no corpo de porcelana do TPC. Considerando a emissividade de 0,85 e temperatura ambiente medida no momento da inspeção de 27°C, tem-se um ΔT_{max} = 8,8°C (criticidade nível 1).



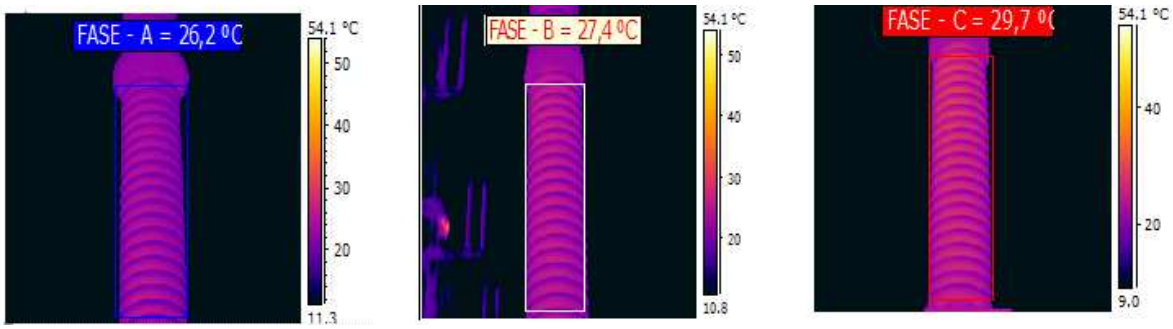
b) Imagens termográficas do aquecimento da coluna capacitiva de dois equipamentos similares pelo método quantitativo (ΔT_{max} = 8,3°C, criticidade nível 2).



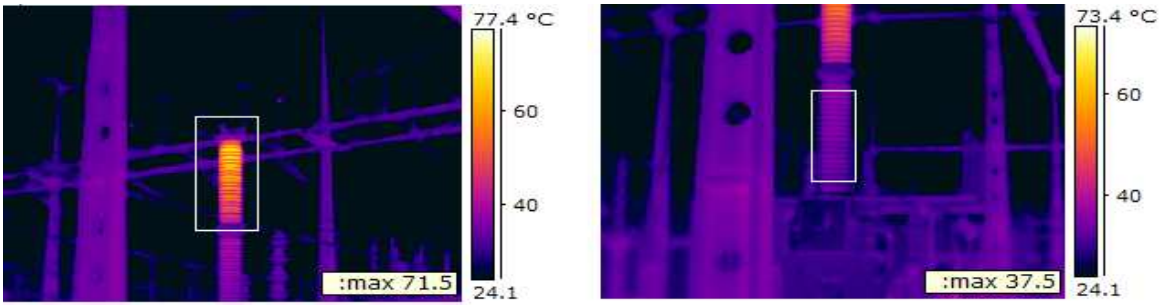
c) Imagens termográficas do aquecimento da coluna capacitiva do TPC, comparando pelo método quantitativo de equipamentos similares (ΔT_{max} = 6,7°C, criticidade nível 1).



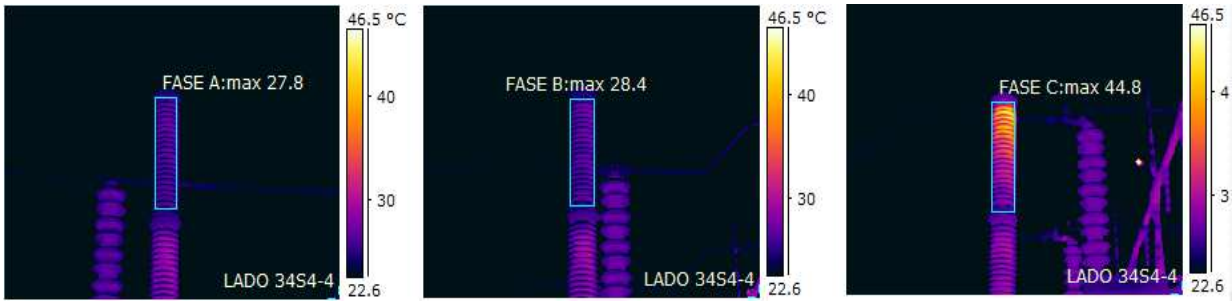
d) Imagens termográficas do aquecimento da coluna capacitiva do TPC, comparando pelo método quantitativo de equipamentos similares instalados nas três fases A, B e C (ΔT_{max} = 3,5°C, criticidade nível 1).



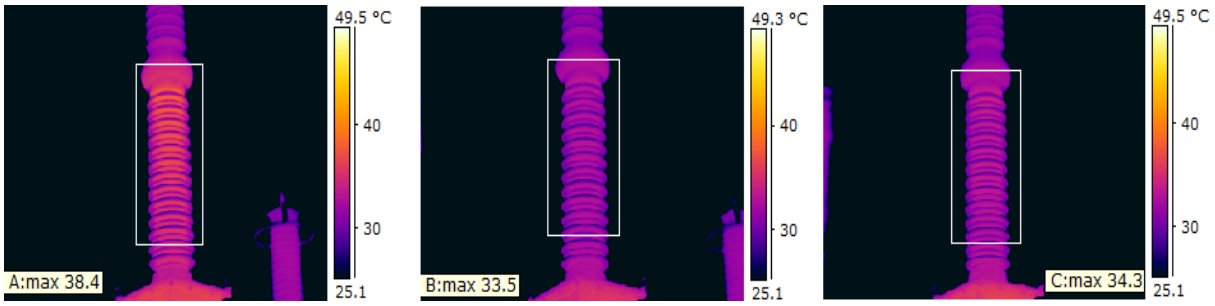
e) Imagens termográficas registrada mostrando o aquecimento da coluna superior. Comparando a temperatura máxima do perfil térmico desenvolvido em posições diferente no corpo cerâmico do TPC. O gradiente máximo de temperatura foi de 34°C (criticidade nível 2).



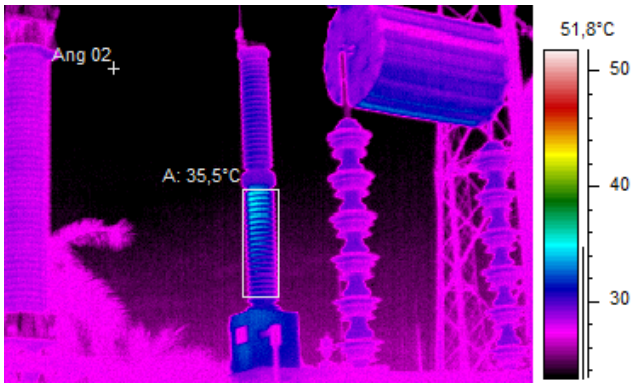
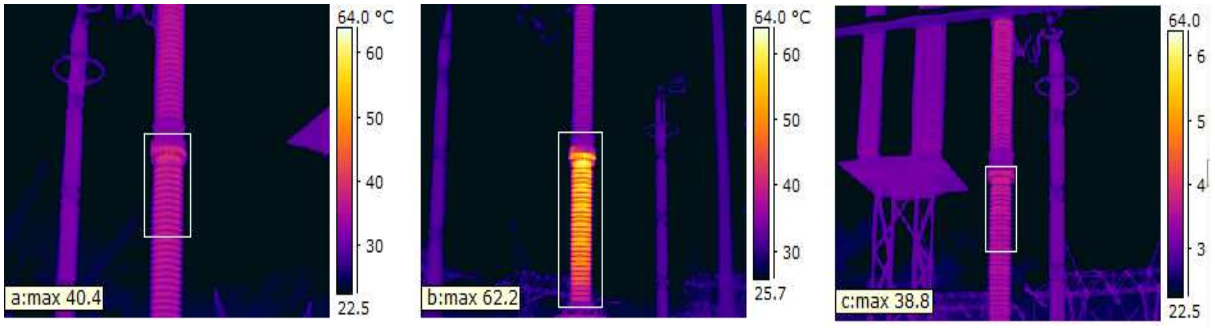
f) Imagens termográficas do aquecimento da coluna capacitiva do TPC, comparando pelo método quantitativo de equipamentos similares instalados nas três fases (A, B e C). Gradiente de temperatura máximo de 17 °C (criticidade nível 2).



g) Imagens termográficas do aquecimento da coluna capacitiva do TPC, comparando pelo método quantitativo de equipamentos similares instalados nas três fases (A, B e C). Gradiente de temperatura máximo de 4.9 °C entre equipamentos similares (criticidade nível 1).



h) Imagem termográfica registrada mostrando o aquecimento da coluna inferior e comparando a temperatura máxima do perfil térmico desenvolvido no TPC. Considerando a emissividade de 0,85 e temperatura ambiente medida no momento da inspeção de 30°C, tem-se um ΔT_{max} = 5,5°C (críticidade nível 1).



i) Imagens termográficas do aquecimento da coluna capacitiva do TPC, comparando pelo método quantitativo de equipamentos similares instalados nas três fases (A, B e C). Gradiente de temperatura máximo de 23.4 °C (criticidade nível 2).