

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
Centro de Engenharia Elétrica e Informática
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Mestrado Profissional em Sistemas de Energia Elétrica

MARCELO AUGUSTO BASTOS DA SILVA

Estudo do Comportamento Térmico do Para-Raios de Óxido de Zinco com
Invólucro Polimérico Utilizando o Método dos Elementos Finitos

Campina Grande, Paraíba
Agosto de 2014

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
Centro de Engenharia Elétrica e Informática
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Mestrado Profissional em Sistemas de Energia Elétrica

Estudo do Comportamento Térmico do Para-Raios de Óxido de Zinco com
Invólucro Polimérico Utilizando o Método dos Elementos Finitos

MARCELO AUGUSTO BASTOS DA SILVA

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Mestre em Sistemas de Energia Elétrica.

Área de Concentração: Processamento de Energia

Edson Guedes da Costa, D.Sc.
Orientador

Campina Grande, PB
Agosto de 2014



S586e Silva, Marcelo Augusto Bastos da.
Estudo do comportamento térmico do para-raios de óxido de zinco com invólucro polimérico utilizando o método dos elementos finitos / Marcelo Augusto Bastos da Silva. - Campina Grande, 2014.
73 f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Engenharia Elétrica e Informática, 2014.
"Orientação : Prof. Dr. Edson Guedes da Costa".
Referências.

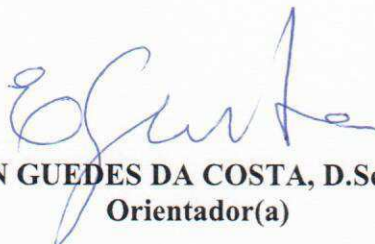
1. Para-Raios. 2. Elementos Finitos. 3. Energia Elétrica. 4. Dissertação - Engenharia Elétrica. I. Costa, Edson Guedes da. II. Universidade Federal de Campina Grande - Campina Grande (PB). III. Título

CDU 621.316.933(043)


**"ESTUDO DO COMPORTAMENTO TÉRMICO DO PARA-RAIOS DE ÓXIDO DE ZINCO
COM INVÓLUCRO POLIMÉRICO UTILIZANDO O MÉTODO DOS ELEMENTOS
FINITOS"**

MARCELO AUGUSTO BASTOS DA SILVA

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 30/10/2014



EDSON GUEDES DA COSTA, D.Sc., UFCG
Orientador(a)



NUBIA SILVA DANTAS BRITO, D.Sc., UFCG
Examinador(a)



GEORGE ROSSANY SOARES DE LIRA, D.Sc., UFCG
Examinador(a)

CAMPINA GRANDE - PB

Aos meus pais, pelo exemplo, carinho, incentivo e confiança. À minha esposa, pela ajuda, compreensão, paciência, companheirismo, dedicação e amor.

Agradecimentos

Agradeço a DEUS por ter me dado condições de buscar as oportunidades.

Ao meu irmão Noberto, pelo companheirismo, ajuda e carinho.

Aos amigos, Iunes, Leonor, Roberto, Rolim, Valmir, Paulo, Cinthia e Sônia, por terem contribuído para o meu ingresso e permanência neste curso.

Ao professor Edson Guedes pela orientação, incentivo, compreensão e confiança.

Aos alunos de graduação, Helem e Rafael pelo auxílio durante a pesquisa.

Aos amigos da turma pelas madrugadas compartilhadas durante as disciplinas.

Aos amigos da DAEC, Aline e José Roberto por estarem sempre à disposição.

À Chesf, por ter proporcionado esta grande oportunidade.

Enfim, a todos que contribuíram de forma direta ou indireta para a realização deste trabalho.

Resumo

Os para-raios são utilizados para proteger instalações elétricas contra sobretensões de manobra e atmosféricas. Um para-raios defeituoso ou dimensionado inadequadamente pode causar falhas ou danos aos demais equipamentos da subestação. Exames de rotina e tipo são usados para avaliar a capacidade operacional dos para-raios. Além disso, uma das técnicas utilizadas no monitoramento e diagnóstico é a obtenção de imagens térmicas. Para o uso e interpretação corretos das imagens térmicas obtidas, torna-se necessário conhecer o nível de temperatura aceitável dos materiais que compõem o para-raios. Simulações computacionais têm sido utilizadas para analisar modelos eletrotérmicos. Esta técnica apresenta diversas vantagens, tais como, possibilidade de análises prévias, antes da fabricação, e apresenta um custo mais baixo quando comparado com os testes em laboratório. Neste trabalho foi analisado o comportamento térmico de um para-raios que tem um invólucro polimérico e tensão nominal de 120 kV. Testes baseados em normas IEC e ANSI foram computacionalmente simulados utilizando um *software* comercial baseado no Método dos Elementos Finitos. O comportamento térmico dos blocos de varistor e do invólucro foram determinados e analisados.

Abstract

Abstract: Surge arresters are used to protect electrical systems against switchgear and atmospheric surges. A defective or bad-dimensioned arrester may cause failures or damage to substation apparatus. Routine and type tests are used to evaluate the surge arresters operating capacity. Moreover, one of the techniques used in monitoring and diagnosis of arrester is the thermal imaging. For the correct use of thermal imaging, it becomes necessary to know the acceptable temperatures level of the materials that compose the arrester. Computational simulations have been used to analyze electro-thermal model. This technique present several advantages, i.e. possibility of previous analyses before the manufacturing and presents lower cost when compared with the tests in laboratory. In this work, the surge arrester thermal behavior will be analyzed. The surge arrester that was analyzed has a polymeric housing and 120 kV nominal voltage. Tests based on IEC and ANSI standards were computationally simulated using a comercial software based on Finite Elements Method. The temperature behavior of the varistor blocks and housing was determined and analyzed.

Índice de Ilustrações

Figura 1 – Representação esquemática das tensões versus duração	15
Figura 2 – Estrutura de um para-raios de ZnO com invólucro polimérico.	17
Figura 3 – Varistores utilizados em para-raios a ZnO.	18
Figura 4 – Curva característica de um para-raios à ZnO de 475kV.	21
Figura 5 – Sistema tridimensional	24
Figura 6 – Elemento coordenadas cilíndricas.....	26
Figura 7 – Elemento coordenadas esféricas	27
Figura 8 – Transferência de calor por convecção em uma placa.....	28
Figura 9 – Discretização do domínio.	32
Figura 10 – Problema em duas dimensões.	34
Figura 11 – Aquecedor elétrico, com revestimento, imerso em um fluido.....	41
Figura 12 – Seção do revestimento.....	41
Figura 13 – Seção do revestimento desenhada no COMSOL.	42
Figura 14 – Malha para solução através do FEM.	43
Figura 15 – Distribuição de temperatura na seção do revestimento de cobre.....	43
Figura 16 – Temperatura ao longo de um corte no meio da seção.....	44
Figura 17 – Solução do problema com simetria cilíndrica.....	44
Figura 18 – Modelo criado em AutoCAD.....	47
Figura 19 – Para-raios modelado em 3D.....	48
Figura 20 – Esboço do para-raios de ZnO para o sistema de 138 kV.....	49
Figura 21 – Definição dos materiais empregados na simulação	50
Figura 22 – Curva característica da densidade de corrente versus o campo elétrico de um varistor.....	52
Figura 23 – Malha gerada para a simulação.....	53

Figura 24 – Distribuição da temperatura 10 segundos após impulso de corrente de 10 kA, 8/20 μ s.	55
Figura 25 – Imagem ampliada da distribuição de temperatura 10 segundos após impulso de corrente de 10 kA, 8/20 μ s.....	55
Figura 26 – Distribuição da temperatura 30 minutos após impulso de corrente de 10 kA, 8/20 μ s.....	56
Figura 27 – Imagem ampliada da distribuição de temperatura 30 minutos após impulso de corrente de 10 kA, 8/20 μ s.....	56
Figura 28 – Pontos escolhidos para análise da temperatura ao longo do tempo.	57
Figura 29 – Evolução da temperatura em pontos definidos para um impulso de 10 kA, 8/20 μ s.....	57
Figura 30 – Evolução da temperatura em pontos definidos para um impulso de 10 kA, 8/20 μ s, em escala logarítmica.	58
Figura 31 – Distribuição da temperatura 10 segundos após impulso de corrente de 100 kA, 4/10 μ s.	59
Figura 32 – Imagem ampliada da distribuição de temperatura 10 segundos após impulso de corrente de 100 kA, 4/10 μ s.....	59
Figura 33 – Distribuição da temperatura 30 minutos após impulso de corrente de 100 kA, 4/10 μ s.	60
Figura 34 – Imagem ampliada da distribuição de temperatura 30 minutos após impulso de corrente de 100 kA, 4/10 μ s.....	60
Figura 35 – Evolução da temperatura em pontos definidos para um impulso de 100 kA, 4/10 μ s.....	61
Figura 36 – Evolução da temperatura em pontos definidos para um impulso de 100 kA, 4/10 μ s, em escala logarítmica.	61

Figura 37 – Diagrama do teste de impulso de corrente de acordo com a IEC.	62
Figura 38 – Diagrama do teste de impulso de corrente de acordo com a ANSI/IEEE... 63	
Figura 39 – Perfil térmico no centro do varistor e no isolador polimérico para o teste de impulso baseado na IEC.....	64
Figura 40 – Perfil térmico no centro do varistor e no isolador polimérico para o teste de impulso definido na ANSI.....	65
Figura 41 - Diagrama do ensaio de ciclo de operação da IEC.	66
Figura 42 - Perfil térmico do para-raios para o ensaio de ciclo de operação da IEC.	67
Figura 43 - Evolução térmica do para-raios no ensaio do limite de temperatura.....	69

Lista de abreviaturas

- Chesf - Companhia Hidroelétrica do São Francisco.
- CIGRÉ - International Council on Large Electric Systems.
- CNPq - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico.
- FEM - Finite Element Method (Método dos Elementos Finitos)
- ICHVE - International Conference on High Voltage Engineering and Application.
- IEC - International Electrotechnical Commission.
- IEEE - Institute of Electrical and Electronics Engineers.
- LAT - Laboratório de Alta Tensão.
- MCOV - Maximum Continuous Operating Voltage (Máxima Tensão de Operação Contínua).
- SiC - Carboneto de Silício.
- UFMG - Universidade Federal de Campina Grande.
- ZnO - Óxido de Zinco.

Sumário

Capítulo 1 – Introdução	12
1.1 Motivação	12
1.2 Objetivos.....	13
1.3 Organização do Trabalho.....	14
Capítulo 2 – Fundamentação Teórica	15
2.1 Para-Raios.....	15
2.1.1 Característica Construtiva do Para-Raios de Óxido de Zinco.....	17
2.1.2 Curva Característica dos Para-Raios de Óxido de Zinco.....	20
2.2 Transferência de Calor	22
2.2.1 Transferência de calor por condução.....	22
2.2.2 Transferência de calor por convecção.....	27
2.2.3 Transferência de calor por radiação.....	29
2.3 Método dos Elementos Finitos (FEM)	30
2.3.1 Método dos Elementos Finitos aplicado ao problema de transferência de calor.....	33
2.4 <i>Software</i> para simulação	40
2.4.1 Resolvendo um problema utilizando o <i>software</i>	40
Capítulo 3 – Revisão Bibliográfica	45
Capítulo 4 – Metodologia.....	47
4.1 Construção do modelo gráfico	47
4.2 Atribuição das características físicas e simulação	49
Capítulo 5 – Simulações, resultados e análises.....	54
5.1 Simulação com a corrente nominal de descarga	54
5.2 Simulação com alta corrente.....	58
5.3 Simulações de testes com impulsos de corrente consecutivos	62
5.4 Ensaio de ciclo de operação.....	65
5.5 Simulação do limite de temperatura aceitável	68
Capítulo 6 – Conclusão	71
Referências	72

Capítulo 1 – Introdução

1.1 Motivação

Para-raios são dispositivos utilizados em sistemas elétricos com o intuito de proteger os equipamentos que estão sujeitos a surtos de tensão provenientes de ocorrências no próprio sistema ou de descargas atmosféricas. Desta forma, acabam por contribuir diretamente na confiabilidade, economia e continuidade de operação dos sistemas onde são empregados.

Devido à importância dos para-raios para os sistemas elétricos, torna-se necessário o investimento em desenvolvimento de técnicas eficazes para monitoramento e diagnóstico de defeitos, uma vez que sua falha pode causar danos aos demais equipamentos e em situações extremas, conduzir a desligamentos, gerando altos custos para as empresas responsáveis, bem como transtornos para seus clientes.

Dentre os tipos disponíveis no mercado, o para-raios à base de óxido de zinco (ZnO) com invólucro polimérico vem ganhando destaque em virtude do seu baixo custo e maior segurança em caso de falhas, quando comparado aos demais. No entanto, ainda não existem técnicas consolidadas de avaliação da degradação dos para-raios que permitam identificar possíveis falhas.

Não há, também, um conhecimento pleno dos padrões térmicos e limites de temperatura aceitáveis dos para-raios a ZnO com invólucro polimérico além disso, não é adequado aplicar os dados e práticas obtidos a partir do estudo do comportamento térmico dos para-raios com invólucros de porcelana, uma vez que tanto os materiais utilizados quanto seus projetos, são bastante diferentes.

1.2 Objetivos

O objetivo deste trabalho é estudar o comportamento térmico do para-raios de óxido de zinco (ZnO) com invólucro polimérico, quando submetido a estresses elétricos definidos em normas técnicas internacionais. Com o resultado deste estudo é possível determinar, por exemplo, os pontos de temperatura mais alta ao longo da coluna de varistores, a capacidade de absorção de energia do para-raios e efetuar modificações nos projetos a fim de se alcançar um melhor desempenho térmico.

Para o estudo do comportamento térmico do para-raios utilizou-se um *software* comercial baseado no Método dos Elementos Finitos (FEM), que é um método numérico utilizado na engenharia a fim de se encontrar soluções aproximadas para problemas complexos.

1.3 Organização do Trabalho

Esta Dissertação está organizada em seis capítulos. No Capítulo 2 é apresentado um embasamento teórico sobre para-raios de ZnO, descrevendo suas características construtivas, elétricas e térmicas e transferência de calor. São abordados os mecanismos de condução, convecção e radiação, método dos elementos finitos e por último, o *software* utilizado nas simulações.

No capítulo 3 é apresentada uma breve revisão bibliográfica, onde são reunidos alguns trabalhos sobre o comportamento térmico do para-raios que fizeram uso de algum método numérico para solução do problema.

No Capítulo 4 é descrita a metodologia empregada para o modelo que permitirá a avaliação do comportamento térmico do para-raios.

No Capítulo 5 são apresentadas as simulações e os resultados obtidos a partir das simulações, bem como análise desses resultados.

Por fim, no Capítulo 6 são apresentadas as conclusões e contribuições, além de propostas para trabalhos futuros.

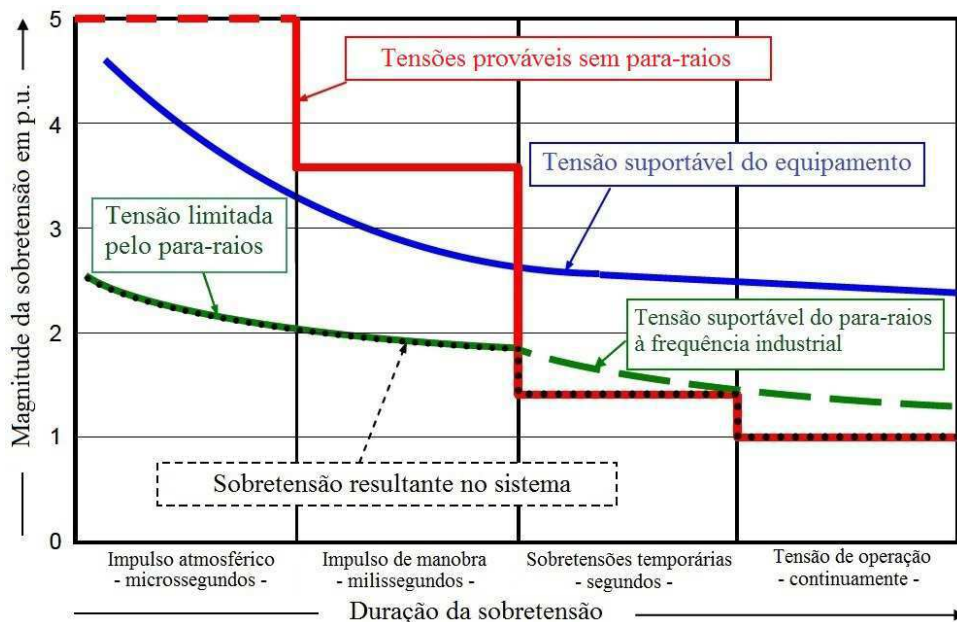
Capítulo 2 – Fundamentação Teórica

2.1 Para-Raios

Os para-raios são utilizados nos sistemas elétricos de potência como equipamentos de proteção contra surtos de tensão, quer sejam de origem externa ao sistema, como é o caso das descargas atmosféricas, ou de origem interna, como os surtos de manobra. Atuam de forma a limitar o nível de tensão que atinge os demais equipamentos importantes do sistema, como transformadores de potência, evitando que os mesmos sejam submetidos a sobretensões que venham prejudicar seu funcionamento (D'AJUZ, RESENDE, *et al.*, 1985).

A Figura 1 mostra os prováveis níveis de tensão, dados em p.u., presentes em um sistema de potência e suas durações.

Figura 1 – Representação esquemática das tensões versus duração



Fonte: (HINRICHSEN, 2011).

Na Figura 1, o eixo do tempo foi dividido em: microssegundos, onde predominam os impulsos atmosféricos; milissegundos, que é a região dos impulsos de manobra; segundos, onde se encontram as sobretensões temporárias e regime contínuo com a tensão de operação. O nível de tensão ou sobretensão que pode ser alcançado sem o uso do para-raios é elevado quando comparado à tensão de operação do sistema em regime permanente. Considerando a tensão suportável de um determinado equipamento, um transformador de potência por exemplo, é possível verificar que na região de sobretensões por impulsos de manobra e principalmente na região de impulsos atmosféricos o isolamento do equipamento não suportaria o surto. É exatamente nessas regiões onde o para-raios atua de forma a garantir que as sobretensões nos terminais do equipamento permaneçam abaixo de sua tensão suportável, protegendo desta forma o equipamento. Por outro lado, os para-raios são projetados para suportarem, sem atuar, a tensão de operação do sistema em regime permanente, bem como as sobretensões temporárias (HINRICHSEN, 2011).

O principal tipo de para-raios utilizado atualmente em sistemas elétricos é o de óxido de zinco (ZnO), o qual possui as seguintes vantagens em relação a seu antecessor, o para-raios de Carboneto de Silício (SiC) (COSTA, 1999) (HILEMAN, 1999):

- Não linearidade - A curva $v-i$ dos para-raios de ZnO é extremamente não linear, apresentando uma impedância alta para níveis normais de tensão e uma impedância baixa na presença de sobretensões. Portanto, têm pouca influência no sistema na situação de regime permanente, mas devem atuar de maneira rápida e eficiente na ocorrência de surtos;
- Confiabilidade – A eliminação dos centelhadores-série presentes nos para-raios de SiC, resultou no aumento significativo da confiabilidade dos para-raios de

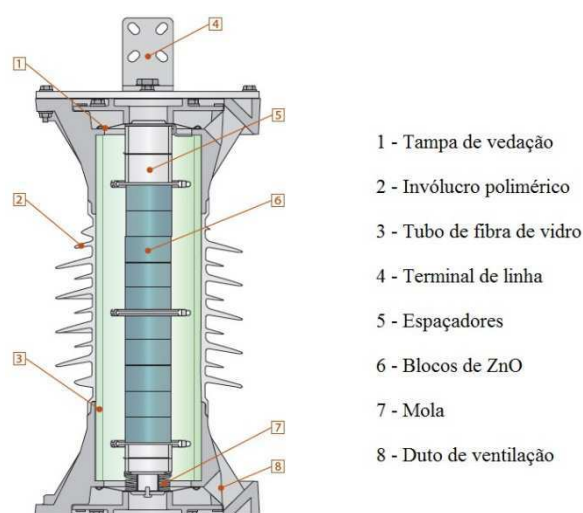
ZnO, visto que eliminou peças mecânicas que poderiam gerar o mau funcionamento do equipamento.

- Capacidade de absorção de energia - Os varistores de óxido de zinco possuem densidade elevada, em torno de 5450 kg/m^3 e calor específico elevado em torno de 5443 J/cm^3 , na temperatura de 25°C . Estas características proporcionam aos para-raios de óxido de zinco o dobro da capacidade de absorção de energia de um para-raios de SiC.

2.1.1 Característica Construtiva do Para-Raios de Óxido de Zinco

De forma sucinta, um para-raios de óxido de zinco é constituído por uma coluna de varistores envolvida por um material isolante, como porcelana ou polimérico, além de outros componentes. A Figura 2 apresenta uma estrutura simples de para-raios com invólucro polimérico.

Figura 2 – Estrutura de um para-raios de ZnO com invólucro polimérico.



Fonte: (ABB, 2014).

A parte ativa do para-raios é a coluna formada por blocos de ZnO empilhados, os quais são quase sempre produzidos em forma cilíndrica, sendo o diâmetro quem determina a capacidade de absorção de energia. Para aplicações em sistemas de distribuição, o diâmetro é cerca de 30 mm, enquanto que em sistemas de alta e extra alta tensão, onde grandes quantidades de energia estão envolvidas, pode chegar a ultrapassar 100 mm. Em caso especiais, pode-se utilizar a técnica de múltiplas colunas ligadas em paralelo.

A altura dos blocos varistores varia entre 20 mm e 45 mm. Na maioria das vezes a altura está associada à capacidade da produção, dependendo das ferramentas de fabricação disponíveis. No entanto, não se deve produzir blocos com dimensões muito grandes para que não se comprometa a homogeneidade do material (HINRICHSEN, 2011).

Figura 3 – Varistores utilizados em para-raios a ZnO.



Fonte: (HINRICHSEN, 2011).

Na coluna interna ainda podem ser colocados espaçadores de tubo de alumínio, com o objetivo de se atingir a altura necessária para garantir a distância de escoamento no invólucro. Se a distância de escoamento mínima não for atendida, podem ocorrer arcos elétricos na superfície do invólucro.

A coluna de varistores é sustentada por uma mola e por um tubo de fibra de vidro, que impede o deslocamento das partes internas do para-raios. A mola também auxilia no contato entre os componentes da coluna.

O involucro do para-raios pode ser feito de porcelana ou de material polimérico. Recentemente, o uso de invólucros poliméricos vem aumentando, em virtude do seu baixo custo e maior segurança em caso de falhas. Numa situação onde o para-raios venha a explodir, se o seu invólucro for de porcelana, os pedaços que são arremessados durante a explosão podem causar grandes danos na instalação onde se encontra o equipamento, bem como acidentes graves com os técnicos que estejam trabalhando no local. No caso de involucro de material polimérico, as chances de acidentes graves e de danos a outros equipamentos da instalação, em virtude do arremesso de partes do involucro, é bastante reduzida.

Em alguns projetos de para-raios o invólucro polimérico pode ser diretamente ligado à coluna de varistores. Neste caso, a sustentação da coluna é feita por bastões de fibra de vidro e não por um tubo.

Para um desempenho satisfatório e prolongamento da vida útil, é importante que as unidades sejam hermeticamente seladas. O processo de moldagem por HTV (alta pressão e temperatura) sob vácuo garante a selagem unindo a parte ativa ao polímero ao longo de todo o comprimento. Como resultado, não existe ar ou qualquer gás retido entre a parte ativa e o invólucro. Assim, juntas ou anéis de vedação não são necessários (ABB, 2014).

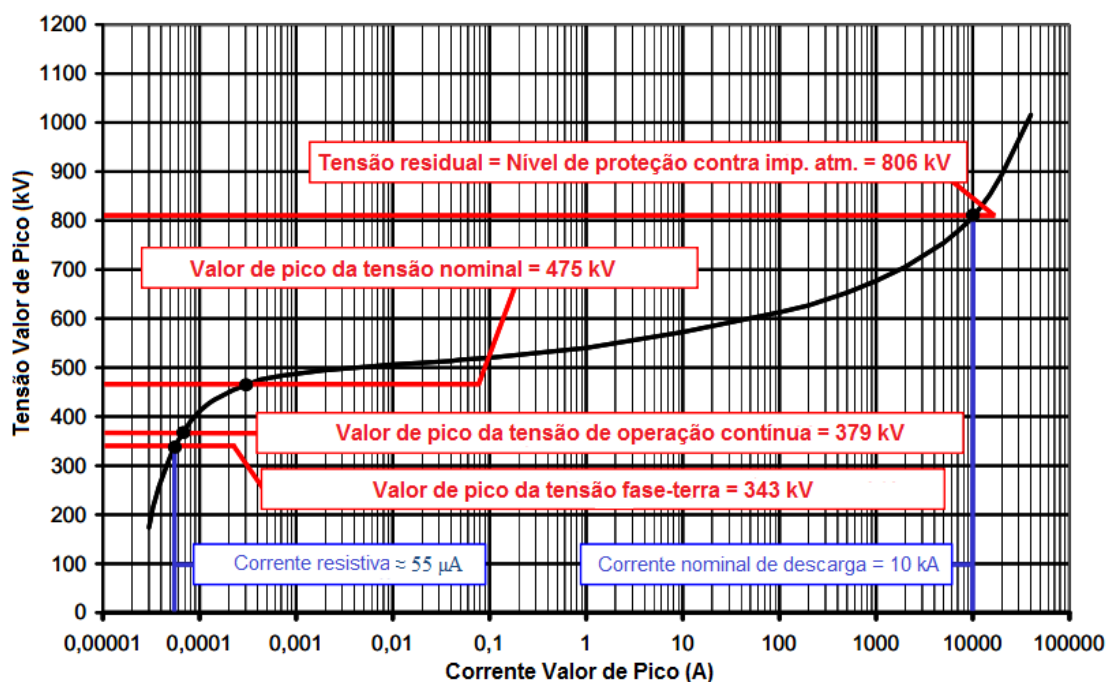
2.1.2 Curva Característica dos Para-Raios de Óxido de Zinco

A principal característica do para-raios de ZnO é a não linearidade da curva $v-i$. Esta característica representou um avanço em relação aos para-raios convencionais de carboneto de silício, pois dispensou o uso de centelhadores em série com a coluna de elementos varistores.

Uma curva característica típica de um para-raios de ZnO é mostrada na Figura 4, na qual são destacadas suas principais regiões. Na primeira região do gráfico tem-se a região de baixas correntes, na qual o para-raios opera em regime permanente. A curva característica nesta região apresenta-se como uma função de comportamento aproximadamente linear (PHILIPP e LEVINSON, 1977).

O primeiro ponto em destaque representa a corrente de fuga. Como o para-raios de ZnO dispensa o uso de centelhadores em série, haverá sempre a presença de uma corrente de fuga devido à formação de um caminho de condução permanente entre o sistema elétrico e a terra. Esta corrente é constituída de uma componente capacitiva e uma pequena corrente resistiva, da ordem de $55 \mu\text{A}$, enquanto que a corrente de fuga total apresenta um pico da ordem de miliampères (HINRICHSEN, 2011). Portanto, nessa região, os para-raios de ZnO apresentam um comportamento capacitivo (LIRA, 2007) (ZHAO, LI e QIAN, 2005).

Figura 4 – Curva característica de um para-raios à ZnO de 475kV.



Fonte: (HINRICHSEN, 2011).

A próxima região do gráfico é a de alta não linearidade, onde o para-raios conduz uma corrente elevada, mesmo para pequenas variações de tensão. O primeiro ponto de interesse é o valor da tensão nominal. Apesar do que o nome possa sugerir, a tensão nominal do para-raios não representa a tensão que pode ser aplicada continuamente sobre o mesmo, e sim aquela que pode ser aplicada temporariamente (geralmente por um período de 10 s) sem causar danos ao para-raios. Dessa forma, consegue-se avaliar a capacidade do para-raios em lidar com sobretensões temporárias (HINRICHSEN, 2011). O valor da tensão nominal corresponde geralmente, a 1,25 vezes o valor da máxima tensão de operação contínua. É nessa região que normalmente, o para-raios opera diante sobretensões lentas.

A terceira região é a de altas correntes, que está diretamente relacionada ao nível de proteção oferecido pelo para-raios. É uma região de condução aproximadamente linear e o seu principal ponto é o nível de proteção contra impulsos atmosféricos,

representando a queda de tensão no para-raios quando uma descarga de corrente nominal (impulso de corrente com forma de onda 8/20 μ s e amplitude de 10 kA) é aplicada a seus terminais.

2.2 Transferência de Calor

A transferência de calor pode ser explicada como a propagação de energia entre duas regiões em virtude da diferença de temperatura entre elas. Essa transferência pode ocorrer de três maneiras: através da condução, da convecção e da radiação. Além desses três mecanismos de transferência de calor, também é importante conhecer as equações de geração e de armazenamento de energia em um corpo.

2.2.1 Transferência de calor por condução

É fato que, havendo um gradiente de temperatura em um corpo, ocorre transferência de energia da região de temperatura mais alta para a região de temperatura mais baixa. Em tais situações, a energia é transferida por condução e a taxa de transferência de calor por unidade de área é proporcional ao gradiente normal de temperatura (HOLMAN, 2010),

$$\frac{q_x}{A} \sim \frac{\partial T}{\partial x}. \quad (2.1)$$

Quando a constante de condutividade térmica do material “k” é inserida, tem-se:

$$q_x = -kA \frac{\partial T}{\partial x}. \quad (2.2)$$

Sendo:

q_x – Taxa de transferência de calor.

A – Área, perpendicular à direção do fluxo, por onde flui o calor.

T – Temperatura.

x – Coordenada que indica o sentido da transferência de calor.

k – Condutividade térmica do material.

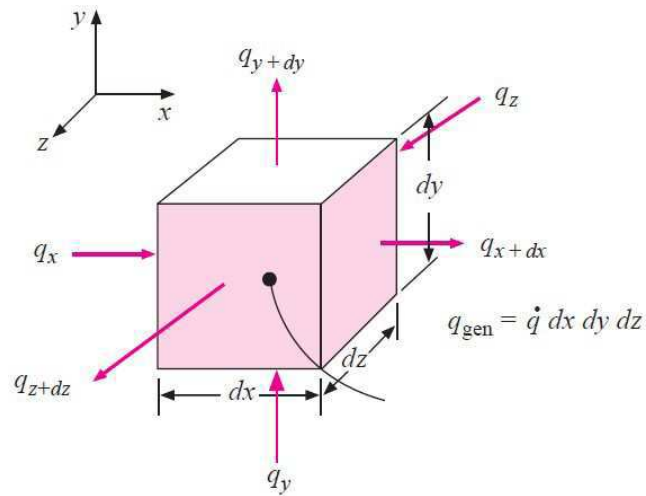
O sinal negativo é inserido para satisfazer o segundo princípio da termodinâmica, ou seja, o calor deve fluir no sentido de maior temperatura para a menor.

A Equação (2.2) é chamada Lei de Fourier da condução térmica, em homenagem ao matemático francês Joseph Fourier, que contribuiu de maneira significativa no estudo analítico da transferência de calor por condução.

Para ilustrar, considere o sistema tridimensional mostrado na Figura 5, no qual a temperatura possa variar com o tempo e fontes de calor possam existir no interior do corpo. A equação de balanço de energia para este corpo é conforme a Equação (2.3):

$$\begin{aligned} & \text{Energia conduzida para dentro do corpo} + \text{Geração de calor no interior} = \\ & \text{Energia conduzida para fora} + \text{variação de energia interna} \end{aligned} \quad (2.3)$$

Figura 5 – Sistema tridimensional



Fonte: (HOLMAN, 2010).

Utilizando as equações de condução, convecção e radiação de calor, a Equação (2.3) pode ser reescrita da forma:

$$(q_x + q_y + q_z)dt + \dot{q}dx dy dz dt = (q_{x+dx} + q_{y+dy} + q_{z+dz})dt + \rho c dT dx dy dz. \quad (2.4)$$

Sendo q_x a taxa de fluxo de calor na face localizada em x :

$$q_x = -k_x A_x \frac{\partial T}{\partial x}$$

ou

$$q_x = -k_x \frac{\partial T}{\partial x} dy dz. \quad (2.5)$$

Sendo q_{x+dx} a energia conduzida para dentro através da face localizada em $x + dx$:

$$q_{x+dx} \approx q_x + \frac{\partial q_x}{\partial x} dx = -k_x A_x \frac{\partial T}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x A_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) dx$$

$$q_{x+dx} = -k_x \frac{\partial T}{\partial x} dydz - \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) dydz. \quad (2.6)$$

Sendo:

- $\dot{q} dx dy dz dt$ = calor gerado no interior do sólido, sendo \dot{q} a taxa de calor gerado por unidade de volume por unidade de tempo.
- $\rho c dT dx dy dz$ = variação de energia interna no intervalo de tempo dt , sendo ρ a densidade do material usado, c o calor específico do material e T , a temperatura do corpo.
- k_x a condutividade térmica do material na direção x e $A_x (= dy dz)$, a área normal à direção x através da qual o calor flui. Substituindo as Equações (2.5) e (2.6) e as expressões similares para q_y e q_z na Equação (2.4) e dividindo cada termo por $dx dy dz dt$, tem-se:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q} = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.7)$$

A Equação (2.7) é a equação diferencial que governa a condução de calor em um corpo sólido. Se as condutividades térmicas nas direções x, y e z forem iguais ($k_x = k_y = k_z = k$) e constantes, a Equação (2.7) pode ser reescrita como:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\dot{q}}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (2.8)$$

sendo $\alpha = (k/\rho c)$ a difusividade térmica. A Equação (2.8) é a equação de condução de calor que governa a distribuição de temperatura e a condução de calor em um sólido com material uniforme. Se as fontes de calor estiverem ausentes no corpo, a Equação (2.8) se reduz à equação de Fourier (RAO, 2004) (HOLMAN, 2010):

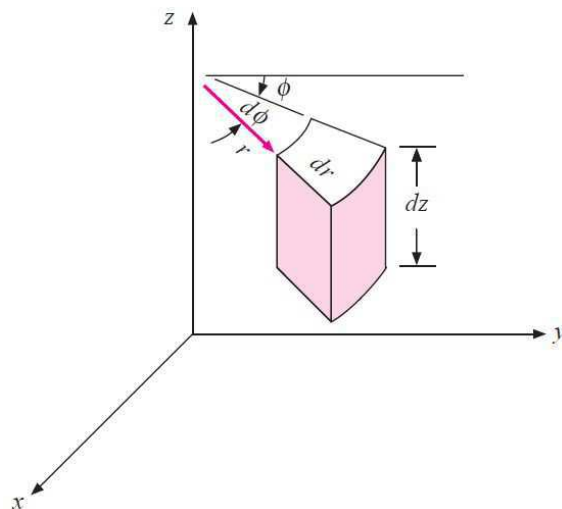
$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.9)$$

A Equação (2.8) em coordenadas cilíndricas é definida como:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\dot{q}}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.10)$$

Esta equação pode ser deduzida do elemento mostrado na Figura 6.

Figura 6 – Elemento coordenadas cilíndricas

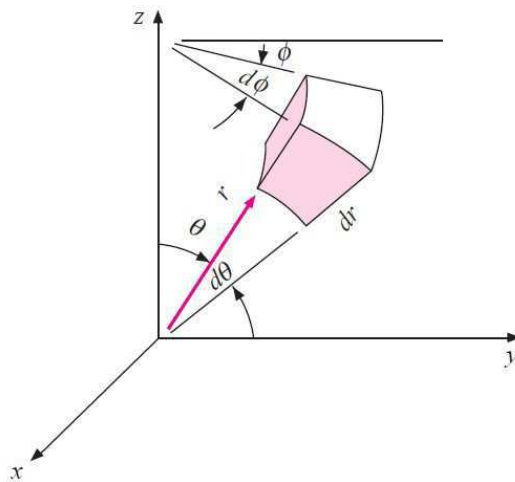


Fonte: (HOLMAN, 2010).

Em coordenadas esféricas pode ser deduzido do elemento mostrado na Figura 7:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial^2}{\partial r^2} (rT) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial^2 T}{\partial \phi^2} + \frac{\dot{q}}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t}. \quad (2.11)$$

Figura 7 – Elemento coordenadas esféricas



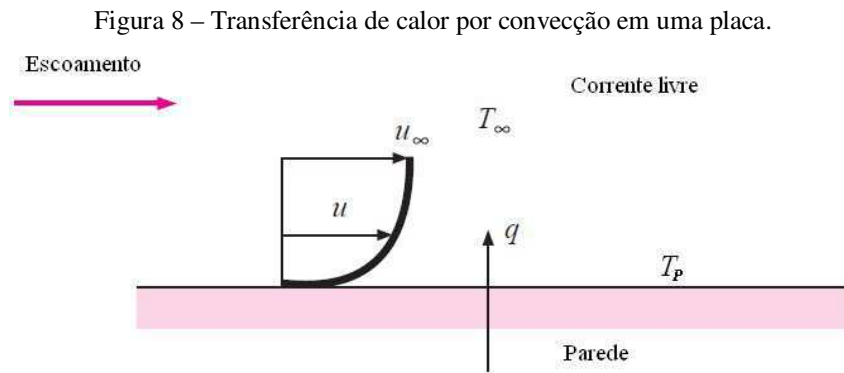
Fonte: (HOLMAN, 2010).

2.2.2 Transferência de calor por convecção

O processo de transferência de calor por convecção acontece quando há movimento de fluidos ou entre um fluido e uma superfície sólida, em diferentes temperaturas.

A Figura 8 apresenta uma placa aquecida a uma temperatura T_p e um fluido com temperatura T_∞ . Nesta figura está representado o comportamento da velocidade do escoamento que é reduzida a zero na superfície da placa, como resultado de ação viscosa. Uma vez que a velocidade da camada de fluxo junto à superfície da placa é

nula, neste ponto a transferência de calor deve ocorrer apenas pelo mecanismo de condução. No entanto, fora da superfície da placa, o gradiente de temperatura é dependente da taxa à qual o fluido transporta o calor para longe (HOLMAN, 2010).



Fonte: (HOLMAN, 2010).

Para expressar a transferência de calor por convecção entre duas partes, utiliza-se a Equação (2.12), que também é conhecida como a Lei de Arrefecimento de Newton.

$$q = hA(T_p - T_\infty). \quad (2.12)$$

Sendo:

q – Taxa de transferência de calor.

A – Área da superfície pela qual o calor está sendo transferido.

T_p – Temperatura da superfície do sólido.

T_∞ – Temperatura média do fluido.

h – Coeficiente de transferência de calor por convecção.

A taxa de transferência de calor é proporcional à diferença de temperatura entre a superfície do sólido e o fluido e à área da superfície. A constante h é chamada de coeficiente de transferência de calor por convecção, dado em watts por metro quadrado por grau Celsius, quando o fluxo de calor é em watts. É uma grandeza de difícil determinação, pois depende da geometria da superfície, do fluxo do fluido, das propriedades do fluido e das diferentes condições ambientais (HOLMAN, 2010).

2.2.3 Transferência de calor por radiação

Diferentemente dos mecanismos de condução e convecção, onde a transferência de energia envolve um meio material, a transferência de calor por radiação pode ocorrer inclusive no vácuo.

Um radiador térmico ideal ou um corpo negro, emite energia a uma taxa proporcional à quarta potência da temperatura absoluta do corpo e diretamente proporcional à área da sua superfície (HOLMAN, 2010):

$$q = \sigma AT^4. \tag{2.13}$$

Sendo:

q – Taxa de emissão de calor.

σ – Constante de Stefan-Boltzmann ($5,6697 \times 10^{-8}$ W/m²K⁴).

T – Temperatura.

A Equação (2.13) é conhecida como a Lei da Radiação Térmica de Stefan-Boltzmann, e se aplica apenas a corpos negros.

Na situação onde dois corpos negros trocam calor por radiação, a transferência líquida de calor é proporcional à diferença da quarta potência das temperaturas:

$$q = \sigma A(T_1^4 - T_2^4). \quad (2.14)$$

A Equação (2.14) se aplica aos casos nos quais um corpo envolve o outro ou quando há duas placas planas de grandes dimensões dispostas em paralelo.

Para os demais tipos de corpos (não negros), considera-se a emissividade ε , que faz a relação entre a radiação da superfície de um determinado material com a radiação da superfície negra ideal (COSTA, 1999):

$$q = \varepsilon \sigma A_1(T_1^4 - T_2^4). \quad (2.15)$$

2.3 Método dos Elementos Finitos (FEM)

O método dos elementos finitos ou FEM (do inglês *Finite Element Method*) é um método numérico utilizado para encontrar soluções aproximadas para os problemas de engenharia de um modo geral. A proposta principal do FEM é considerar que o domínio do problema é formado por várias sub-regiões interligadas. Desta maneira, as complexas equações diferenciais que regem o problema podem ser reduzidas a equações mais simples. A divisão da região em um número de pequenas regiões reduz o problema

contínuo, que tem um número infinito de incógnitas, a um problema com um número finito de incógnitas, em pontos específicos referidos como os nós. Uma vez que o método dos elementos finitos permite formar os elementos, ou sub-regiões, em um sentido arbitrário, uma representação próxima dos limites de domínios complexos é possível (LEWIS, NITHIARASU e SEETHARAMU, 2004).

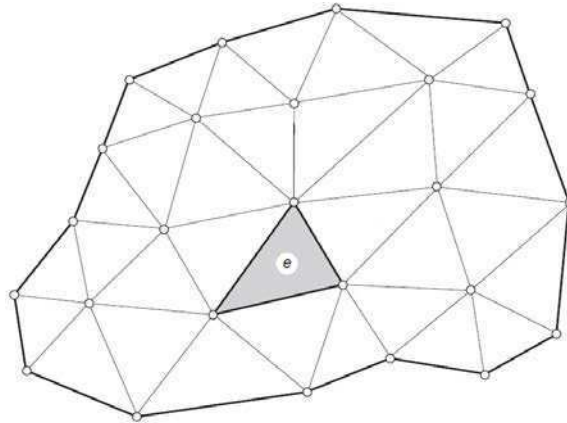
É impossível definir qual a origem exata do método dos elementos finitos, porque os conceitos básicos têm evoluído ao longo de um período de 150 anos ou mais. O método conhecido atualmente, é uma consequência de vários artigos publicados na década de 1950 que estenderam a análise matricial de estruturas a corpos contínuos. A exploração espacial da década de 1960 forneceu recursos para pesquisas de base, as quais possibilitaram uma fundamentação matemática firme do FEM e estimulou o desenvolvimento de programas de computador de múltiplos propósitos, que implementaram o método. O projeto de aviões, mísseis, cápsulas espaciais e similares, forneceram áreas de aplicação para o método (SEGERLIND, 1984).

De acordo com Lewis, Nithiarasu & Seetharamu (2004), a solução de um problema utilizando o Método dos Elementos Finitos é um processo que utiliza os seguintes passos:

1 – Discretização

O domínio do problema é dividido em um número finito de elementos (sub-regiões) não sobrepostos. Os elementos podem ter formas geométricas variadas, tais como triângulos, quadriláteros, entre outros. Cada elemento é formado pela ligação de um certo número de pontos chamados nós.

Figura 9 – Discretização do domínio.



Fonte: (ZIENKIEWICZ e TAYLOR, 2000).

2 – Seleção das funções de interpolação

Nesta etapa se escolhe as funções que representam os fenômenos físicos estudados em cada elemento.

3 – Formulação

Nesta etapa se determinam as equações matriciais que expressam as propriedades dos elementos individuais.

4 – Junção das equações matriciais dos elementos

Para encontrar as propriedades do sistema como um todo, é preciso combinar as equações matriciais de cada elemento de tal forma que a matriz resultante represente o comportamento da região inteira (domínio do problema). Isso é feito nesta etapa, na

qual se aplicam ainda as condições de contorno do problema, reduzindo-se o número de incógnitas.

5 – Solução do sistema de equações

O conjunto resultante de equações matriciais pode então ser resolvido para obter os valores nodais da variável em estudo, como por exemplo, a temperatura.

6 – Cálculo de valores de outras variáveis

A partir dos valores nodais da variável de campo, pode-se então determinar o valor de outras variáveis relacionadas ao problema, como por exemplo o fluxo de calor.

2.3.1 Método dos Elementos Finitos aplicado ao problema de transferência de calor.

O conhecimento da distribuição de temperatura dentro de um corpo é fundamental em vários problemas de engenharia, uma vez que esta informação é útil no cálculo da quantidade de calor adicionada ou removida deste corpo. (RAO, 2004)

Para exemplificar o uso do método dos elementos finitos na transferência de calor, considere um problema em duas dimensões conforme mostrado na Figura 10, o qual é governado pela Equação (2.16):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \dot{q} = 0. \quad (2.16)$$

As condições de contorno são:

$$T = T_0(x, y) \text{ em } S_1, \quad (2.17)$$

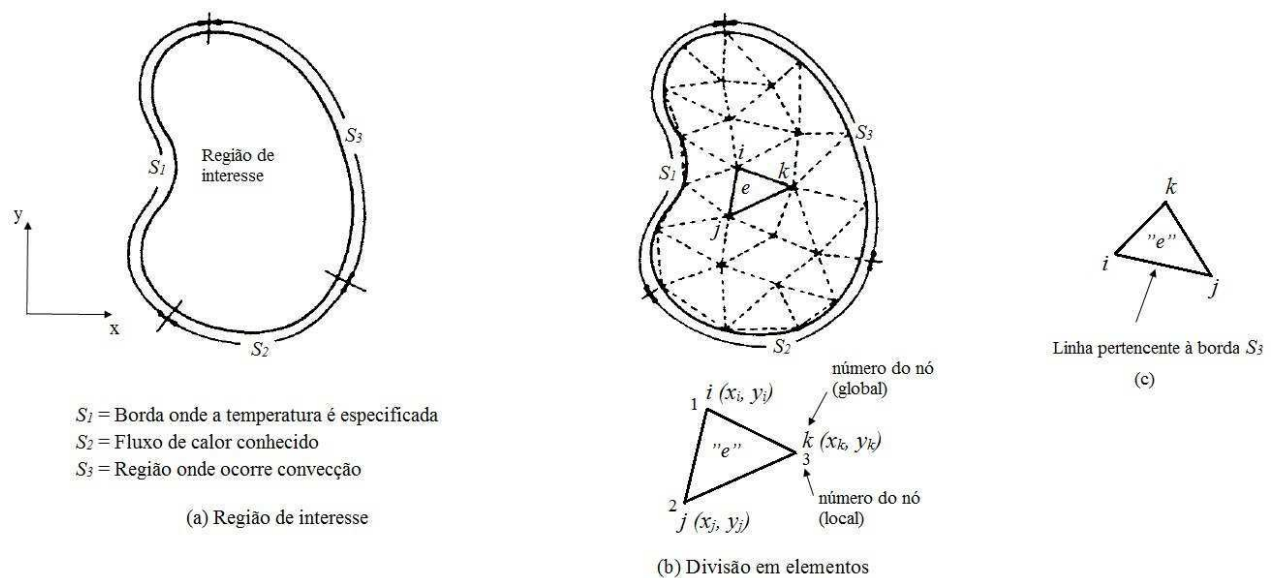
$$k_x \frac{\partial T}{\partial x} l_x + k_y \frac{\partial T}{\partial y} l_y + q = 0 \text{ em } S_2, \quad (2.18)$$

e

$$k_x \frac{\partial T}{\partial x} l_x + k_y \frac{\partial T}{\partial y} l_y + h(T - T_\infty) = 0 \text{ em } S_3. \quad (2.19)$$

Sendo: k_x e k_y as condutividades térmicas nas direções x e y ; \dot{q} a força da fonte de calor; q a magnitude do fluxo de calor na borda; $h(T - T_\infty)$ o fluxo de calor na superfície devido à convecção e l_x e l_y , os cossenos diretores da normal à superfície.

Figura 10 – Problema em duas dimensões.



Fonte: (RAO, 2004).

De acordo com Rao (2004), solução do problema descrito acima é equivalente a encontrar $T(x, y)$, que minimiza a integral

$$I = \frac{1}{2} \iint_A \left[k_x \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + k_y \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)^2 - 2\dot{q}T \right] dA + \frac{1}{2} \int_{S_2} qT dS_2 + \int_{S_3} h(T^2 - 2TT_\infty) dS_3 \quad (2.20)$$

e satisfaz a Equação (2.17). A solução pelo método dos elementos finitos para este problema pode ser obtida conforme mostrado a seguir.

Passo 1: Divisão do objeto em pequenos elementos, conforme mostrado na Figura 10(b).

Passo 2: Assumir que dentro de cada elemento a temperatura varia de forma linear.

$$T^{(e)}(x, y) = \alpha_1 + \alpha_2 x + \alpha_3 y = [N(x, y)] \vec{q}^{(e)}, \quad (2.21)$$

sendo:

$$[N(x, y)] = \begin{bmatrix} N_i(x, y) \\ N_j(x, y) \\ N_k(x, y) \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} (a_i + xb_i + yc_i)/2A^{(e)} \\ (a_j + xb_j + yc_j)/2A^{(e)} \\ (a_k + xb_k + yc_k)/2A^{(e)} \end{bmatrix}^T, \quad (2.22)$$

$$\vec{q}^{(e)} = \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{bmatrix} \equiv \begin{bmatrix} T_i \\ T_j \\ T_k \end{bmatrix}, \quad (2.23)$$

e $A^{(e)}$, a área e T_i , T_j e T_k , as temperaturas nodais do elemento e . As expressões para a_i , b_i , c_i e $A^{(e)}$ são dadas por:

$$\begin{aligned} a_i &= x_j y_k - x_k y_j & a_j &= x_k y_i - x_i y_k & a_k &= x_i y_j - x_j y_i \\ b_i &= y_j - y_k & b_j &= y_k - y_i & b_k &= y_i - y_j \\ c_i &= x_k - x_j & c_j &= x_i - x_k & c_k &= x_j - x_i \end{aligned} \quad (2.24)$$

e

$$A^{(e)} = \frac{1}{2} \det \begin{bmatrix} 1 & x_i & y_i \\ 1 & x_j & y_j \\ 1 & x_k & y_k \end{bmatrix} = \frac{1}{2} (x_i y_j + x_j y_k + x_k y_i - x_i y_k - x_j y_i - x_k y_j). \quad (2.25)$$

Passo 3: Definição das equações matriciais.

A Equação (2.20), para cada elemento, pode ser escrita na forma:

$$[K_1^{(e)}] \bar{T}^{(e)} + [K_2^{(e)}] \bar{T}^{(e)} - \bar{P}^{(e)} = \bar{0}. \quad (2.26)$$

Sendo:

$$[k_1^{(e)}] = \iint_{A^{(e)}} [B]^T [D] [B] dA, \quad (2.27)$$

$$[k_2^{(e)}] = \iint_{S_3} h [N]^T [N] dS_3, \quad (2.28)$$

e

$$\bar{P}^{(e)} = \bar{P}_1^{(e)} - \bar{P}_2^{(e)} + \bar{P}_3^{(e)}. \quad (2.29)$$

Para o desenvolvimento da Equação (2.27), define-se:

$$[B] = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial x} & \frac{\partial N_j}{\partial x} & \frac{\partial N_k}{\partial x} \\ \frac{\partial N_i}{\partial y} & \frac{\partial N_j}{\partial y} & \frac{\partial N_k}{\partial y} \end{bmatrix} = \frac{1}{2A^{(e)}} \begin{bmatrix} b_i & b_j & b_k \\ c_i & c_j & c_k \end{bmatrix} \quad (2.30)$$

e

$$[D] = \begin{bmatrix} k_x & 0 \\ 0 & k_y \end{bmatrix}. \quad (2.31)$$

Assim, $[K_1^{(e)}]$ é da forma:

$$[K_1^{(e)}] = \frac{k_x}{4A^{(e)}} \begin{bmatrix} b_i^2 & b_i b_j & b_i b_k \\ b_i b_j & b_j^2 & b_j b_k \\ b_i b_k & b_j b_k & b_k^2 \end{bmatrix} + \frac{k_y}{4A^{(e)}} \begin{bmatrix} c_i^2 & c_i c_j & c_i c_k \\ c_i c_j & c_j^2 & c_j c_k \\ c_i c_k & c_j c_k & c_k^2 \end{bmatrix}. \quad (2.32)$$

Para um material isotrópico, onde $k_x = k_y = k$, a Equação (2.32) se reduz a:

$$[K_1^{(e)}] = \frac{k}{4A^{(e)}} \begin{bmatrix} (b_i^2 + c_i^2) & (b_i b_j + c_i c_j) & (b_i b_k + c_i c_k) \\ (b_i b_j + c_i c_j) & (b_j^2 + c_j^2) & (b_j b_k + c_j c_k) \\ (b_i b_k + c_i c_k) & (b_j b_k + c_j c_k) & (b_k^2 + c_k^2) \end{bmatrix}. \quad (2.33)$$

Para determinar $[K_2^{(e)}]$, deve-se resolver a integral definida em (2.28) na superfície

$S_3^{(e)}$:

$$[K_2^{(e)}] = h \iint_{S_3^{(e)}} \begin{bmatrix} N_i^2 & N_i N_j & N_i N_k \\ N_i N_j & N_j^2 & N_j N_k \\ N_i N_k & N_j N_k & N_k^2 \end{bmatrix} dS_3. \quad (2.34)$$

Assim, a superfície $S_3^{(e)}$, onde ocorre o fenômeno de convecção, deve ser conhecida para tornar possível a solução da integral na Equação (2.34). Considerando que a linha i-j do elemento "e" está na borda S_3 , como mostrado na Figura 10(c), então $N_k = 0$ ao longo desta linha. Desta forma, a Equação (2.34) pode ser reescrita como:

$$[K_2^{(e)}] = h \iint_{S_3^{(e)}} \begin{bmatrix} N_i^2 & N_i N_j & 0 \\ N_i N_j & N_j^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} dS_3. \quad (2.35)$$

Como se tratam de elementos triangulares é possível fazer uso das coordenadas triangulares e, uma vez que se assumiu que a temperatura varia linearmente dentro de cada elemento, tem-se a seguinte relação (RAO, 2004):

$$N_i = L_1; N_j = L_2; N_k = L_3. \quad (2.36)$$

Logo, a Equação (2.35) pode ser reescrita como:

$$[K_2^{(e)}] = h \iint_{S_3^{(e)}} \begin{bmatrix} L_1^2 & L_1 L_2 & 0 \\ L_1 L_2 & L_2^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} dS_3. \quad (2.37)$$

Considerando agora a Equação (2.29), define-se:

$$\bar{P}_1^{(e)} = q_0 \iint_{A^{(e)}} \begin{bmatrix} L_1 \\ L_2 \\ L_3 \end{bmatrix} dA, \quad (2.38)$$

$$\bar{P}_2^{(e)} = \int_{s=s_i}^{s_j} \begin{bmatrix} L_1 \\ L_2 \\ 0 \end{bmatrix} dS, \quad (2.39)$$

e

$$\bar{P}_3^{(e)} = \frac{hT_\infty S_{ji}}{2} \begin{bmatrix} L_1 \\ L_2 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (2.40)$$

Passo 4: A equação geral pode ser escrita como:

$$[K]\bar{T} = \bar{P}, \quad (2.41)$$

sendo

$$[K] = \sum_{e=1}^E ([K_1^{(e)}] + [K_2^{(e)}]) \quad (2.42)$$

e

$$\bar{P} = \sum_{e=1}^E (\bar{P}_1^{(e)} - \bar{P}_2^{(e)} + \bar{P}_3^{(e)}). \quad (2.43)$$

Passo 5: Com as equações matriciais definidas, o sistema pode ser resolvido aplicado às condições de contorno, para se obter as temperaturas nodais.

2.4 *Software* para simulação

O *software* utilizado foi o COMSOL *Multiphysics*^{®1}, que é uma plataforma utilizada para simulação, solução e análise de problemas científicos e de engenharia em modo geral. Baseado no método dos elementos finitos, o *software* encontra soluções através de aproximações das equações diferenciais parciais que regem o problema estudado.

Com uma vasta biblioteca e possibilidade de visualização da solução do problema em várias formas, tais como gráficos, tabelas, linhas equipotenciais, mapa de cores, gráficos tridimensionais, entre outras, o COMSOL constitui-se uma ferramenta computacional importante, contribuindo para uma melhor construção do modelo, bem como análise dos resultados obtidos.

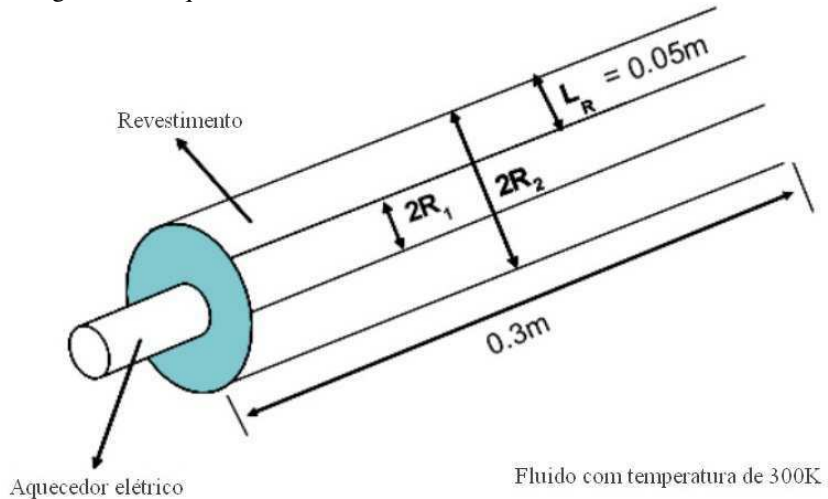
Considerando as inúmeras facilidades proporcionadas pelo *software*, é fundamental, no entanto, que o usuário entenda os fenômenos presentes no estudo, conheça as propriedades dos materiais empregados e também entenda o Método dos Elementos Finitos, para que se diminua o risco de uma interpretação equivocada dos resultados.

2.4.1 Resolvendo um problema utilizando o *software*

O uso do *software* é exemplificado através da solução do problema de determinação da distribuição de temperatura numa haste revestida imersa em um fluido, conforme mostrado na Figura 11.

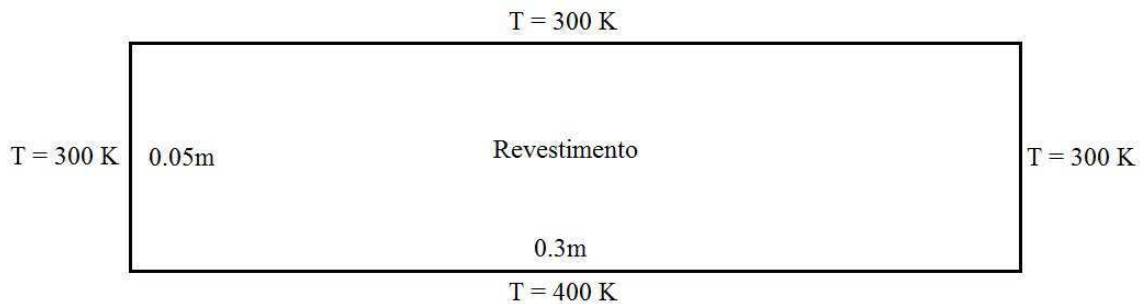
¹ COMSOL Multiphysics é marca registrada de (COMSOL AB).

Figura 11 – Aquecedor elétrico, com revestimento, imerso em um fluido.



A temperatura do aquecedor (haste) é constante em 400 K e a do fluido é constante em 300 K, que é a mesma temperatura da superfície externa do revestimento. Considerando que a difusão de calor é a mesma em qualquer direção, pode-se definir o problema em duas dimensões, conforme mostrado a seguir e ilustrado na Figura 12.

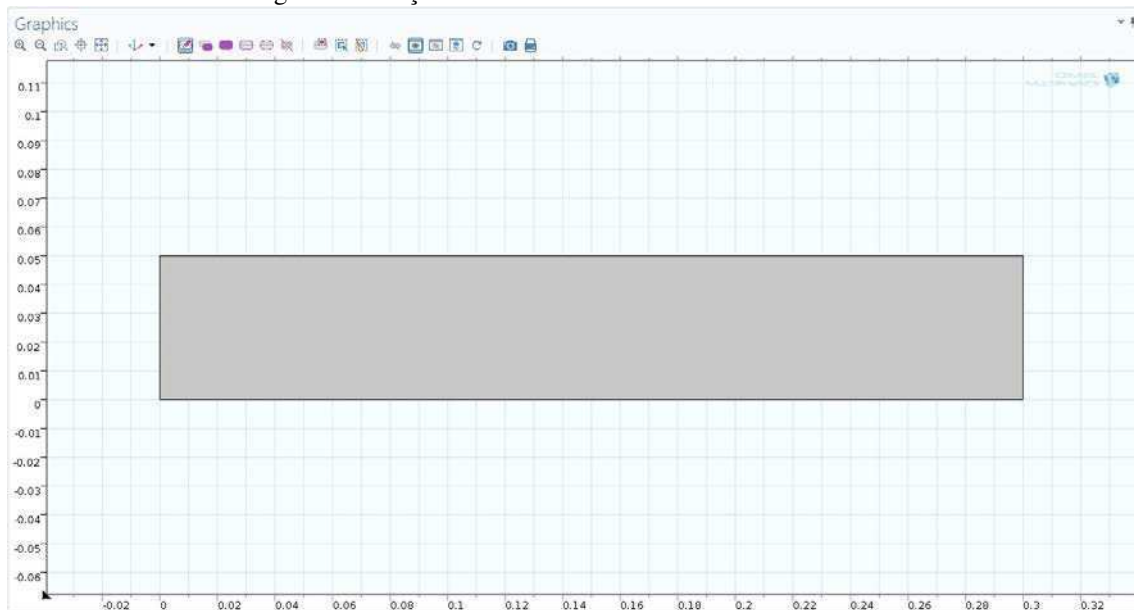
Figura 12 – Seção do revestimento.



Uma vez definido o problema em duas dimensões é necessário modelá-lo no *software*. Para isso, inicialmente devem ser informadas as características do estudo que será realizado. No caso deste exemplo, a análise será em duas dimensões, a física será a transferência de calor em sólidos e em estado estacionário. Em seguida, deve-se desenhar o modelo. Como o problema será resolvido em duas dimensões, reduzindo a

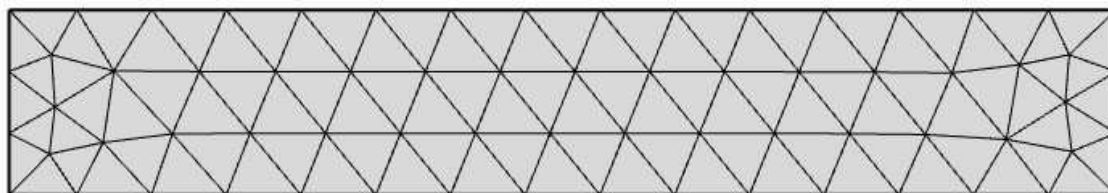
região de interesse a um retângulo, a criação da figura usando as ferramentas de desenho do próprio *software* se torna trivial. No entanto, em problemas com geometria mais complexa é necessário que o desenho seja feito em um *software* mais específico (com ferramentas que facilitem a construção do modelo) e depois seja importado no COMSOL.

Figura 13 – Seção do revestimento desenhada no COMSOL.



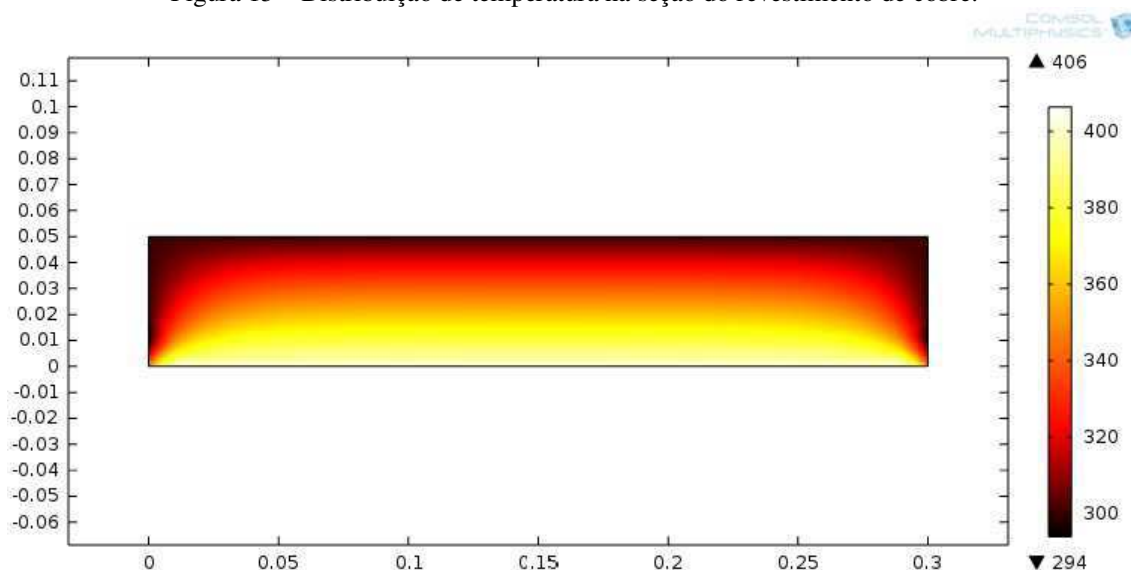
Uma vez criado o modelo, é necessário definir os materiais presentes. Neste caso será considerado que o revestimento é feito de cobre. O *software* tem uma vasta biblioteca e no momento em que se define quais materiais serão utilizados, todas as propriedades relacionadas ao tipo de física estudada são automaticamente carregadas. Como o problema é estacionário, não é necessário informar as condições iniciais, porém, deve-se definir as condições de contorno, que neste caso são as temperaturas em pontos específicos. Na região em contato com a haste aquecida a temperatura é de 400 K, já nas demais fronteiras, que estão em contato com o fluido, a temperatura é de 300 K. Após a inclusão das condições de contorno é necessário gerar a malha:

Figura 14 – Malha para solução através do FEM.



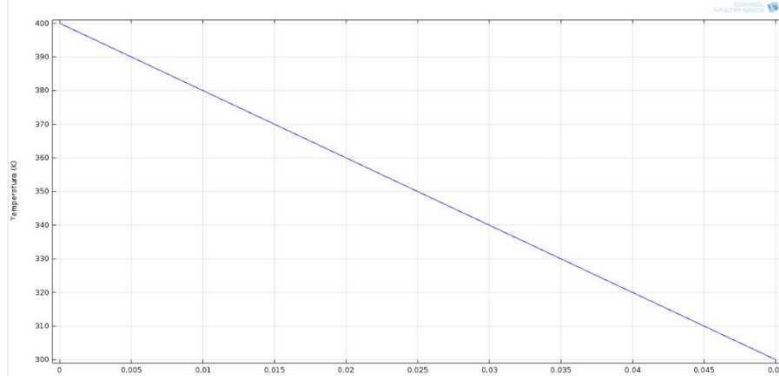
Com a malha gerada a simulação pode ser iniciada. O tempo de simulação pode variar tanto com a complexidade do problema, quanto com a capacidade computacional do *hardware* utilizado. Ao se completar a simulação, a distribuição de temperatura na seção reta do revestimento é na Figura 15.

Figura 15 – Distribuição de temperatura na seção do revestimento de cobre.



Além de imagens térmicas, também é possível obter a resposta representada de outras maneiras, como por exemplo, em gráficos, mapas de cores, tabelas, entre outros, cabendo ao usuário a escolha adequada ao seu trabalho (Figura 16).

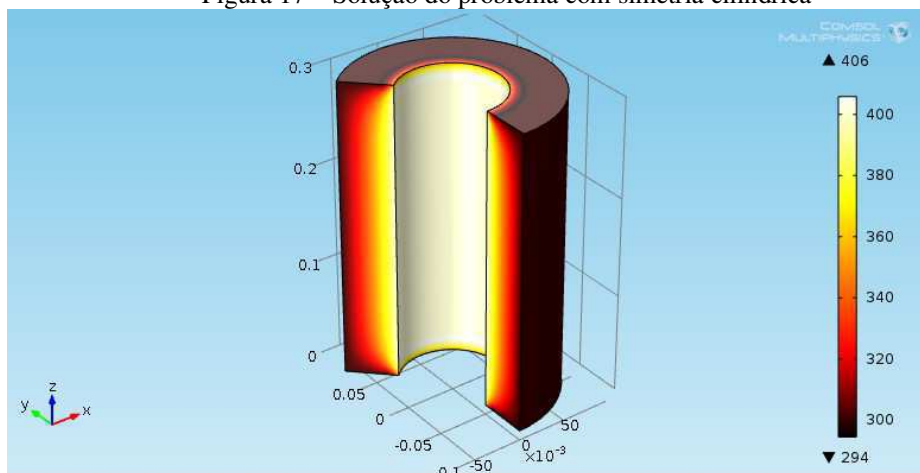
Figura 16 – Temperatura ao longo de um corte no meio da seção.



Conforme se vê, o gráfico apresenta a temperatura ao longo de uma linha reta imaginária traçada no meio da seção do revestimento de cobre, iniciando na superfície em contato com a haste aquecida e indo até a superfície oposta, em contato com o fluido.

Este mesmo problema poderia ter sido resolvido em três dimensões, ou duas dimensões com simetria cilíndrica. Neste caso a imagem térmica seria conforme mostrado na Figura 17.

Figura 17 – Solução do problema com simetria cilíndrica



Conforme se vê, é possível verificar que, considerando-se uma seção reta, a resposta é a mesma encontrada na solução anterior.

Capítulo 3 – Revisão Bibliográfica

No passado alguns trabalhos trataram de problemas de distribuição de temperatura em para-raios de óxido metálico, fazendo uso de algumas técnicas numéricas, como Diferenças Finitas e Volumes Finitos. Estes trabalhos, mesmo não tratando do para-raios com invólucro polimérico especificamente, constituem uma boa base para o estudo tratado nesta dissertação.

Em 1993, HUANG apresentou um modelo baseado na técnica das Diferenças Finitas, que simulava o comportamento térmico do para-raios de óxido metálico. Seu modelo proposto produz variação temporal da distribuição da temperatura nas direções radial e axial. Também pode ser usado para simular o comportamento térmico do para-raios de óxido metálico em regime permanente e transitório. A técnica de modelagem proposta pode ser aplicada em diferentes condições de operação do para-raios, como tensões aplicadas de várias amplitudes e sobretensões temporárias com diferentes durações e magnitudes. As equações em diferenças finitas foram elaboradas para uma secção de teste, no entanto constatou-se que a secção tem comportamento térmico idêntico ao para-raios completo, que a mesma representa.

STOCKUM (1994) apresentou uma metodologia para determinação de temperatura em vários pontos do para-raios, utilizando o método das diferenças finitas. Estudou o comportamento térmico não-linear do para-raios de óxido de zinco através de simulações e experimentos simplificados. Seu modelo, no entanto, foi simplificado pois considerou o para-raios composto por uma coluna de varistores e invólucro sem aletas. Também não considerou a transferência de calor de forma axial.

Em 1999, COSTA, utilizando o método das Diferenças Finitas, desenvolveu um modelo computacional a fim de estudar o desempenho eletrotérmico dos para-raios de óxido de zinco quando submetidos a esforços elétricos e térmicos. O modelo proposto

possibilita quantificar a energia absorvida pelos varistores bem como determinar a propagação de calor em para-raios. O modelo considera a inclusão das aletas, a entrada de energia solar, transferência de calor nas direções axial e radial, variações de calor específico com a temperatura, diversidade nos tipos de entrada de energia, entrada simplificada para os dados e reprodutibilidade de novas configurações do para-raios.

Em 2006, NÓBREGA deu continuidade ao trabalho de COSTA (1999), aprimorando sua metodologia desenvolvida para estudo do desempenho eletrotérmico do para-raios de óxido de zinco com invólucro de porcelana. Sua proposta utiliza o método dos Volumes Finitos para simular a transferência de calor em todo o para-raios. O uso de coordenadas generalizadas permitiu a representação das aletas com mais detalhes, deixando-as bem próximas das aletas reais. A utilização da técnica multiblocos tornou a implementação computacional mais simples, uma vez que cada elemento do para-raios pode ser representado como um único bloco. Com a rotina proposta há a possibilidade de se usar entrada de energia variável, permitindo a realização de experimentos tanto em regime permanente quanto em transitórios, quando a energia responsável pelo aquecimento do para-raios varia com o tempo.

O trabalho proposto nesta dissertação trata do estudo do comportamento térmico do para-raios de óxido de zinco quando submetido a determinados estresses elétricos. Diferentemente dos anteriores, o estudo se concentra nos para-raios com invólucro polimérico, uma vez que seu uso está cada vez mais comum devido a fatores como custo e segurança. O método numérico utilizado é o Método dos Elementos Finitos, implementado por uma ferramenta computacional moderna que permite um resultado mais preciso nas simulações.

Capítulo 4 – Metodologia

4.1 Construção do modelo gráfico

O modelo utilizado nas simulações foi baseado em um para-raios para o sistema de 138kV pertencente à Companhia Hidroelétrica do São Francisco – Chesf. Para o desenho do modelo, utilizou-se o *software* AutoCAD^{®2}, conforme mostrado na Figura 18.

Figura 18 – Modelo criado em AutoCAD.



Em virtude da simetria cilíndrica do equipamento não foi necessário criar o desenho em três dimensões. O modelo tridimensional pôde ser gerado a partir do modelo mostrado na Figura 18, através de um comando de revolução de 360° (Figura 19).

² AutoCAD é marca registrada de (AUTODESK, INC.).

O para-raios modelado possui as seguintes dimensões:

Altura: 1240 mm.

Distância mínima de escoamento: 4495 mm.

Diâmetro do varistor: 60 mm.

Altura do varistor: 44 mm.

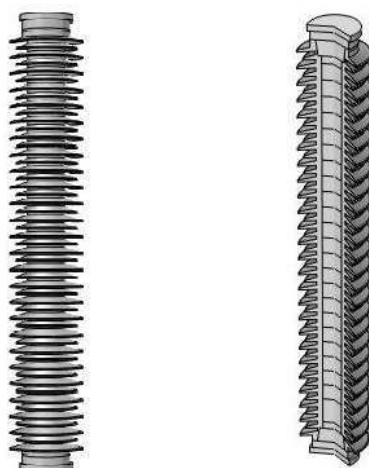
Quantidade de varistores: 22.

Figura 19 – Para-raios modelado em 3D.



Como o problema também tem simetria cilíndrica, o arquivo exportado para o *software* de simulação foi o mostrado na Figura 18. Uma vez carregado o arquivo no COMSOL, informativo que a análise será realizada em duas dimensões com simetria em um dos eixos é fornecido. Desta forma, a resposta será dada em três dimensões, porém o esforço computacional será reduzido. Na Figura 20, pode ser visto o modelo no *software* de simulação.

Figura 20 – Esboço do para-raios de ZnO para o sistema de 138 kV.

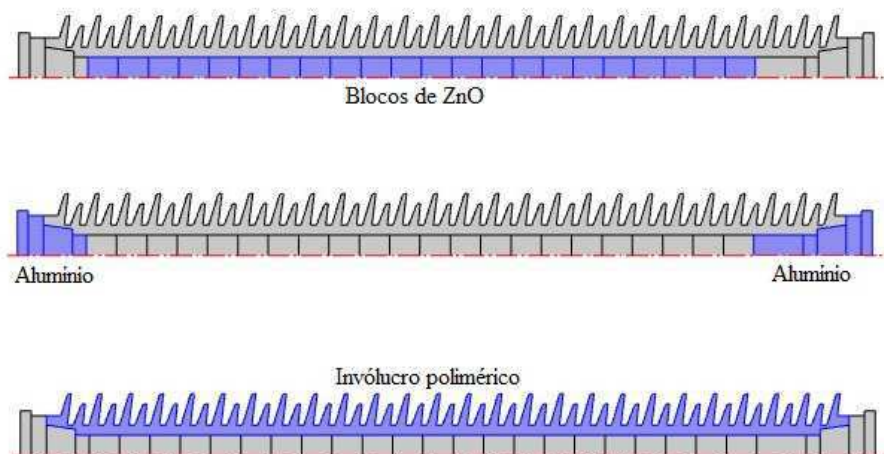


Inicialmente, foram realizadas algumas simplificações no modelo para efeito de cálculo e simplificação do processo de construção das malhas. As extremidades dos terminais foram omitidas, assim como os bastões de fibra de vidro que dão sustentação à coluna de varistores, pois não agregariam benefícios aos resultados. Essas simplificações, entretanto, não causam erro significativo na análise térmica, já que as características eletrotérmicas da fibra de vidro e do revestimento polimérico são praticamente equivalentes.

4.2 Atribuição das características físicas e simulação

Concluído o modelo gráfico, o próximo passo consistiu em definir os tipos de materiais presentes no equipamento e suas constantes físicas. O simulador tem uma extensa biblioteca onde se encontra grande parte destas constantes, as que não estavam presentes foram retiradas da literatura.

Figura 21 – Definição dos materiais empregados na simulação



Para simular o comportamento térmico de um objeto no COMSOL é necessário definir as condições de contorno, que neste caso foram impulsos de corrente com formas de onda definidas pelas normas técnicas ANSI e IEC e operações com MCOV (Máxima Tensão de Operação Contínua). A equação de temperatura aplicada na simulação corresponde à forma diferencial da lei de Fourier, que contém contribuições de uma fonte de calor eletromagnética, representada por “ $Q (W/m^3)$ ” na Equação (4.1).

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot (k \nabla T) = Q. \quad (4.1)$$

O aquecimento ôhmico devido à corrente elétrica é calculado pela equação:

$$Q = J \cdot E. \quad (4.2)$$

O *software* também resolve as equações de conservação abaixo, com base na lei de Ohm.

$$\nabla \cdot J = Q_i. \quad (4.3)$$

$$J = \sigma E + \frac{\partial D}{\partial t} + J_e. \quad (4.4)$$

$$F = -\nabla V. \quad (4.5)$$

NIGOL (1992), estabeleceu que a relação entre J e E por um material de óxido de metal pode ser expressa aproximadamente por (4.6).

$$J = C_0 E^\alpha. \quad (4.6)$$

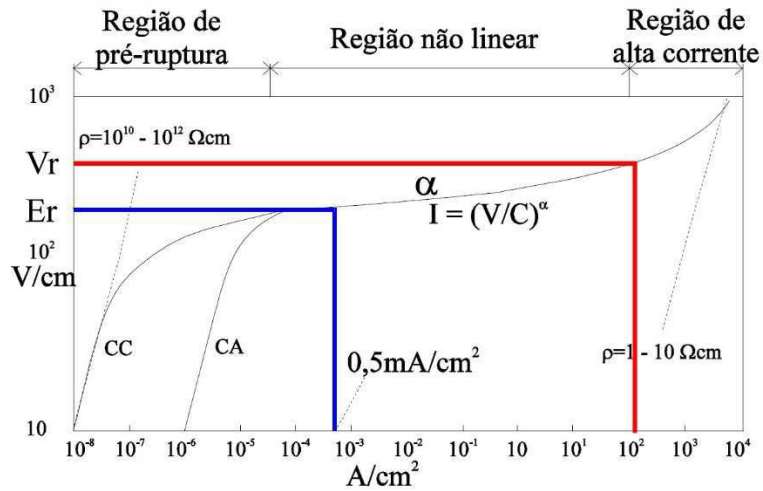
Sendo J (A/cm^2) a densidade de corrente e E (kV/cm), o campo elétrico no varistor. Assim, a curva característica mostrada na Figura 4 e também na Figura 22, pode ser aproximada pela Equação (4.6), sendo C_0 e α distintos para cada região.

$$J = 1 \times 10^{-6} \text{ a } 4.5 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2 \quad \alpha = 1.74 \quad C_0 = 1.2 \times 10^{-5};$$

$$J = 4.5 \times 10^{-5} \text{ a } 10 \text{ A/cm}^2 \quad \alpha = 33.6 \quad C_0 = 3.1 \times 10^{-16};$$

$$J = 10 \text{ a } 3100 \text{ A/cm}^2 \quad \alpha = 10.33 \quad C_0 = 2.36 \times 10^{-4}.$$

Figura 22 – Curva característica da densidade de corrente versus o campo elétrico de um varistor.

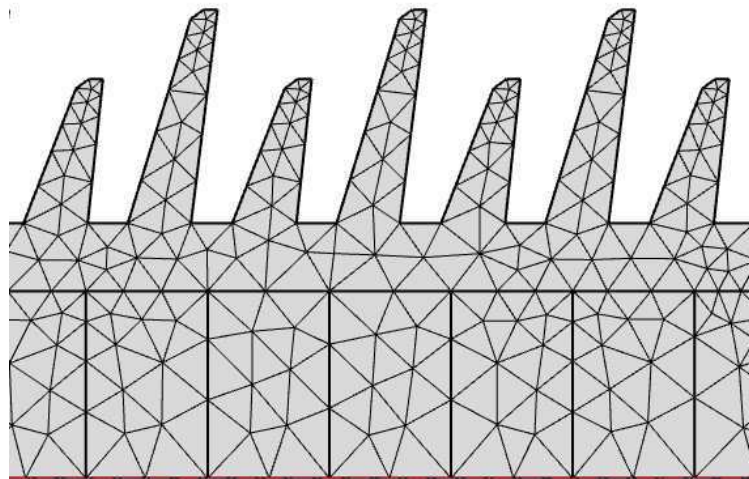


Fonte: (COSTA, 1999).

Conforme se vê, a condutividade elétrica σ (S/m) é um parâmetro variável, e depende principalmente do campo elétrico aplicado e da temperatura do varistor, sendo seu valor obtido para cada ponto na curva característica E versus J . No entanto, para fins de simulação, um valor constante para a condutividade foi atribuído, o qual corresponde ao valor do ponto na curva onde o para-raios é operacional. No caso da aplicação de um impulso de corrente, por exemplo, o para-raios atua na região mais à direita da curva na Figura 22 (região de alta corrente).

O próximo passo consiste na geração da malha que transforma o problema com domínio contínuo em discreto através da criação de elementos com geometria simples, tais como triângulos e quadriláteros. A malha gerada é mostrada na Figura 23.

Figura 23 – Malha gerada para a simulação.



Finalmente pode-se iniciar a simulação, onde o *software* utilizando o método dos elementos finitos encontra as soluções aproximadas das equações nos nós da malha gerada.

Capítulo 5 – Simulações, resultados e análises

Para avaliar o comportamento térmico do para-raios com invólucro polimérico, foram simulados alguns testes elétricos baseados nas características do para-raios e também definidos nas normas técnicas (IEC 99-4) e (IEEE C62.11).

5.1 Simulação com a corrente nominal de descarga

Para início dos estudos do comportamento térmico do para-raios tipo estação de óxido de zinco para o sistema de 138 kV, optou-se pela simulação de aplicação de impulso de corrente com forma 8/20 μ s, que é a corrente nominal de descarga do equipamento. Adotou-se o seguinte procedimento:

- 1 – Definir as temperaturas iniciais em 20°C.
- 2 – Aplicar impulso de corrente com amplitude máxima 10 kA, com forma de onda 8/20 μ s.
- 3 – Fazer o gráfico da imagem térmica do equipamento, em um determinado intervalo de tempo, após a aplicação do impulso.

Figura 24 – Distribuição da temperatura 10 segundos após impulso de corrente de 10 kA, 8/20 μ s.

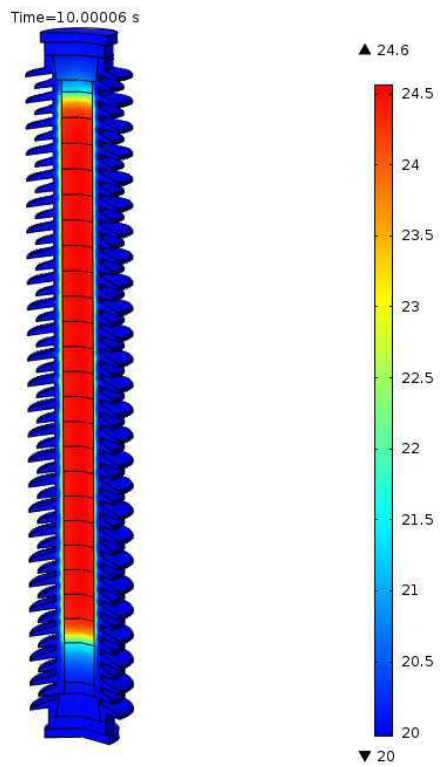


Figura 25 – Imagem ampliada da distribuição de temperatura 10 segundos após impulso de corrente de 10 kA, 8/20 μ s.

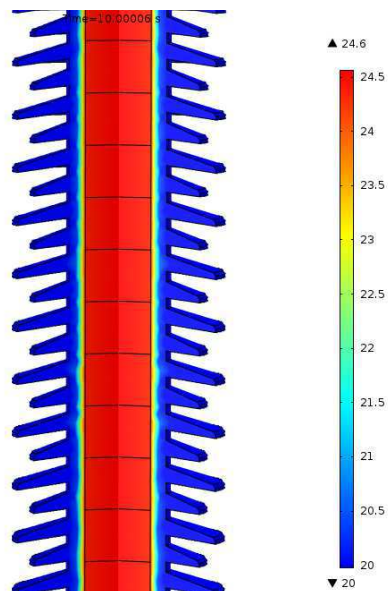


Figura 26 – Distribuição da temperatura 30 minutos após impulso de corrente de 10 kA, 8/20 μ s.

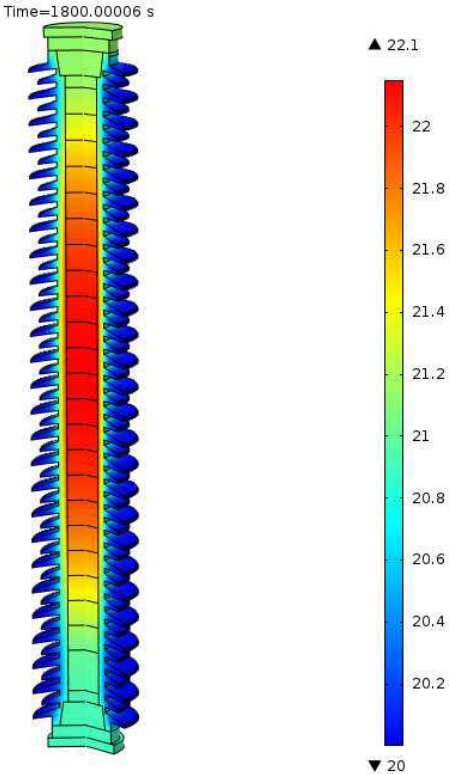
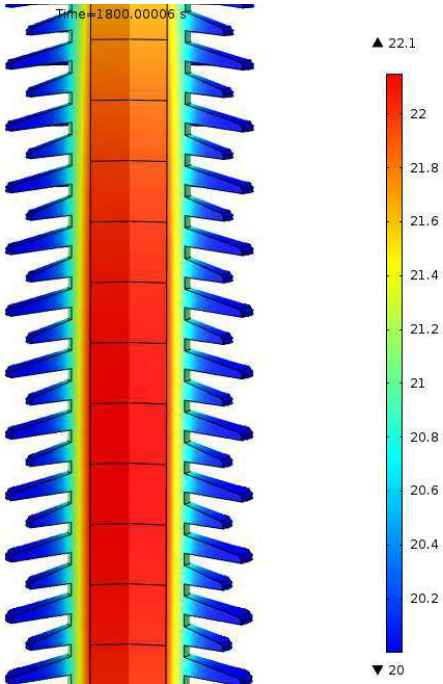


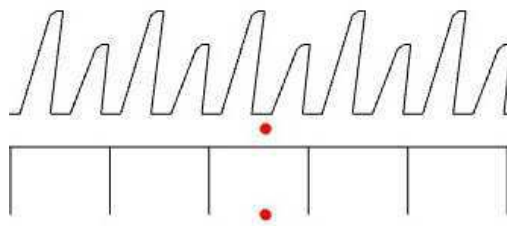
Figura 27 – Imagem ampliada da distribuição de temperatura 30 minutos após impulso de corrente de 10

kA, 8/20 μ s.



Foram escolhidos dois pontos no para-raios, um no centro do varistor e outro no isolador polimérico, com o objetivo de analisar a evolução da temperatura durante o tempo de simulação quando o equipamento é submetido aos impulsos de corrente. Para esta análise foram elaborados gráficos que relacionam a temperatura com o tempo (Figura 28).

Figura 28 – Pontos escolhidos para análise da temperatura ao longo do tempo.



Nas figuras a seguir, é possível visualizar o comportamento da temperatura no centro do varistor (linha contínua) e no invólucro (linha tracejada).

Figura 29 – Evolução da temperatura em pontos definidos para um impulso de 10 kA, 8/20 μ s.

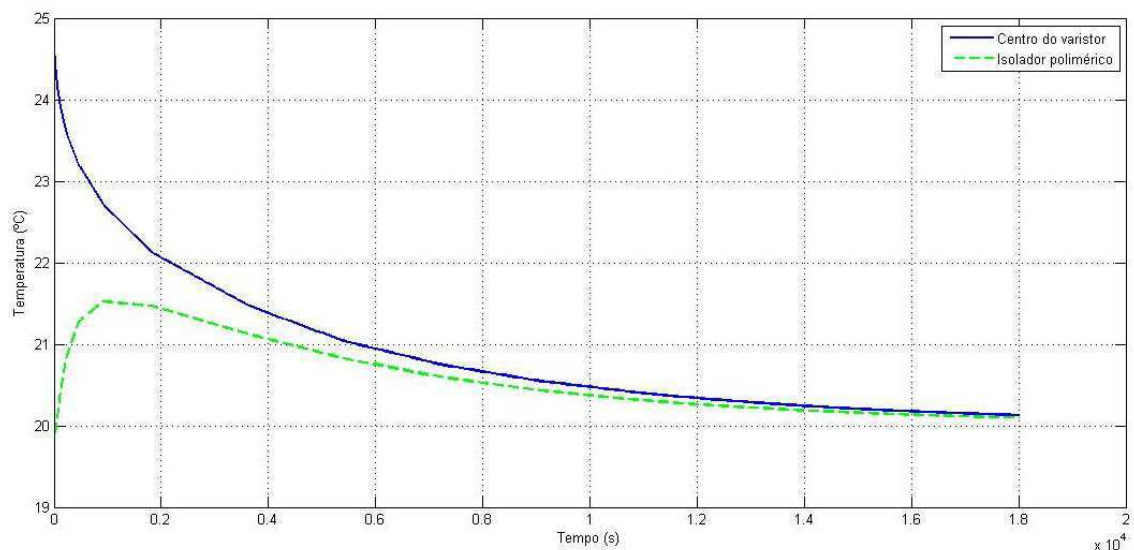
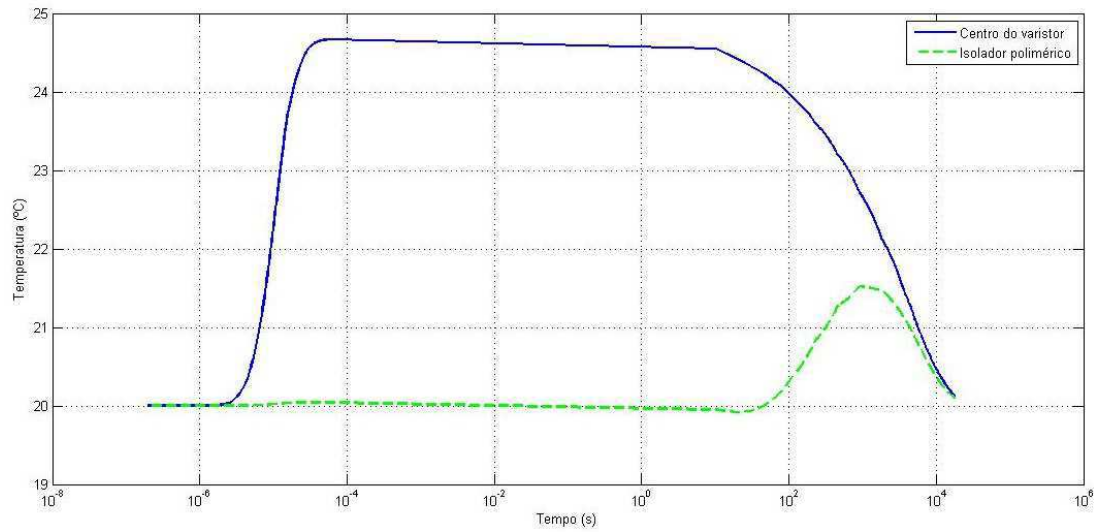


Figura 30 – Evolução da temperatura em pontos definidos para um impulso de 10 kA, 8/20 μ s, em escala logarítmica.



A Figura 29 apresenta uma pequena diferença de temperatura, cerca de 4,5°C, entre o centro do varistor e o invólucro polimérico provocado pelo impulso de 10 kA. Na Figura 30, em escala logarítmica, é possível verificar aumento da temperatura no varistor de forma exponencial e que, após cerca de 1 minuto, a temperatura do isolador começa a aumentar. Isto ocorre em virtude da condução de calor entre as partes do para-raios. Em ambas as figuras é possível perceber que em dado momento, começa um resfriamento do para-raios, devido à transferência de calor por convecção.

5.2 Simulação com alta corrente

Dando continuidade ao estudo, foi aplicado um impulso de corrente com forma 4/10 μ s, definido como a alta corrente de curta duração. De maneira similar à simulação anterior, o procedimento adotado foi:

- 1 – Definir as temperaturas iniciais em 20°C.
- 2 – Aplicar impulso de corrente com amplitude máxima 100 kA, com forma de onda 4/10 μ s.

3 – Fazer gráfico da imagem térmica do equipamento num determinado intervalo de tempo após a aplicação do impulso.

Figura 31 – Distribuição da temperatura 10 segundos após impulso de corrente de 100 kA, 4/10 μ s.

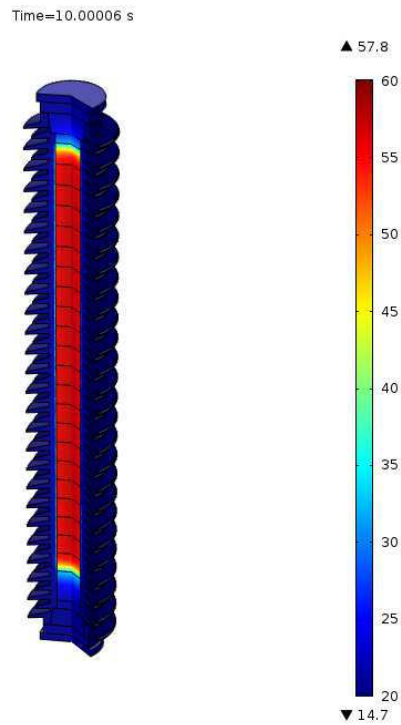


Figura 32 – Imagem ampliada da distribuição de temperatura 10 segundos após impulso de corrente de 100 kA, 4/10 μ s.

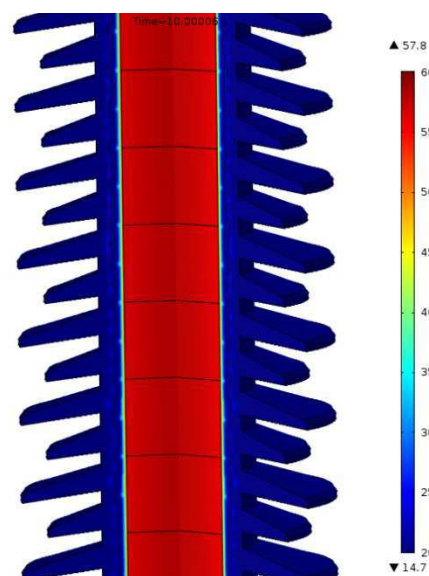


Figura 33 – Distribuição da temperatura 30 minutos após impulso de corrente de 100 kA, 4/10 μ s.

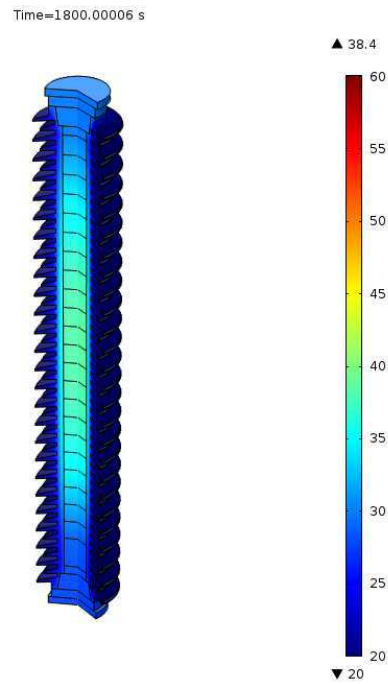


Figura 34 – Imagem ampliada da distribuição de temperatura 30 minutos após impulso de corrente de 100 kA, 4/10 μ s.

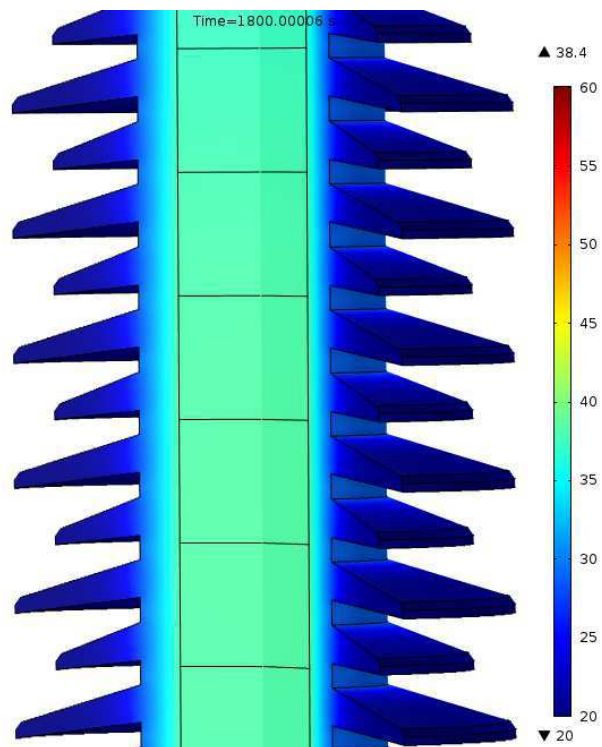


Figura 35 – Evolução da temperatura em pontos definidos para um impulso de 100 kA, 4/10 μ s.

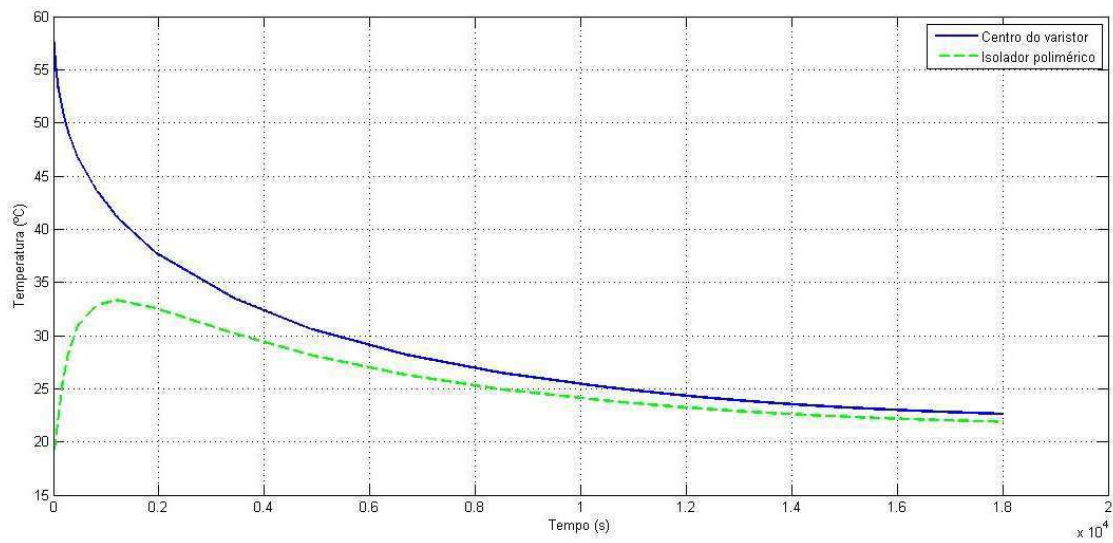
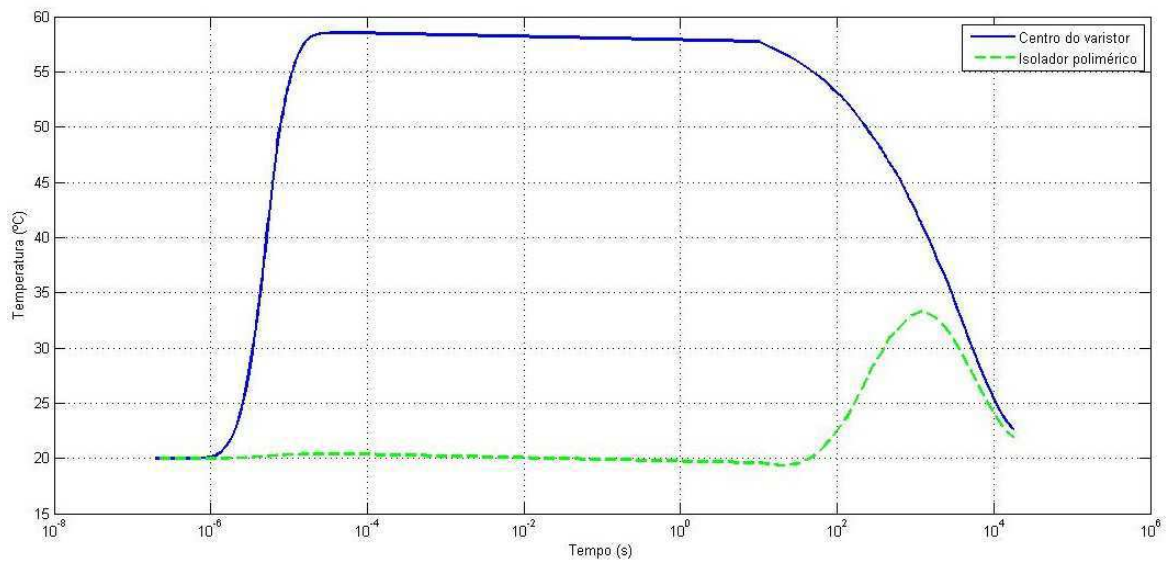


Figura 36 – Evolução da temperatura em pontos definidos para um impulso de 100 kA, 4/10 μ s, em escala logarítmica.



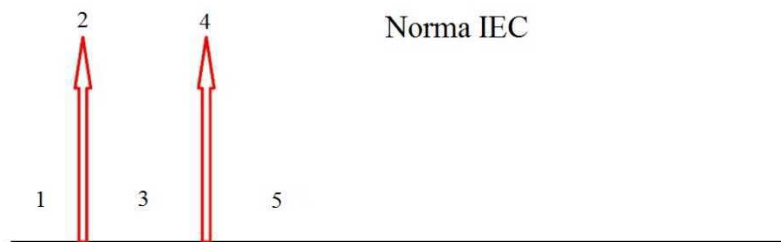
De maneira similar ao caso anterior, os gráficos mostram uma visualização do comportamento da temperatura ao longo do tempo para os pontos mostrados na Figura 28. Entretanto, por se tratar de um impulso de 100 kA, que é definido como alta corrente de curta duração, a temperatura do varistor atinge valores mais altos, quando comparados aos provocados pelo impulso de 10 kA. Nos primeiros instantes, após a

aplicação do impulso, a diferença de temperatura entre o centro do varistor e o isolador polimérico atinge cerca de 38°C. Trinta minutos após a aplicação do impulso, a temperatura do isolador atinge seu ponto máximo (33°C). Neste momento, a temperatura do varistor já decaiu para cerca de 40°C, levando a diferença de temperatura entre eles para apenas 7°C.

5.3 Simulações de testes com impulsos de corrente consecutivos

Na Figuras 37 e 38, podem ser vistos os procedimentos baseados nas Normas Técnicas IEC 99-4 e IEEE C62.11, respectivamente.

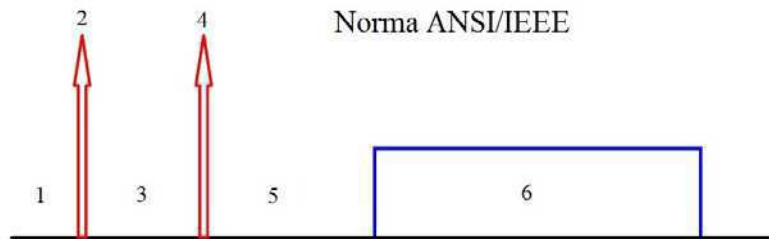
Figura 37 – Diagrama do teste de impulso de corrente de acordo com a IEC.



Fonte: (COSTA, 1999).

- 1 – Fixar todas as temperaturas.
- 2 – Aplicação do primeiro impulso de corrente de 100 kA com forma de onda 4/10 μ s.
- 3 – Resfriamento.
- 4 – Aplicação do segundo impulso de corrente, com a mesma forma do primeiro.
- 5 – Novo resfriamento.

Figura 38 – Diagrama do teste de impulso de corrente de acordo com a ANSI/IEEE.

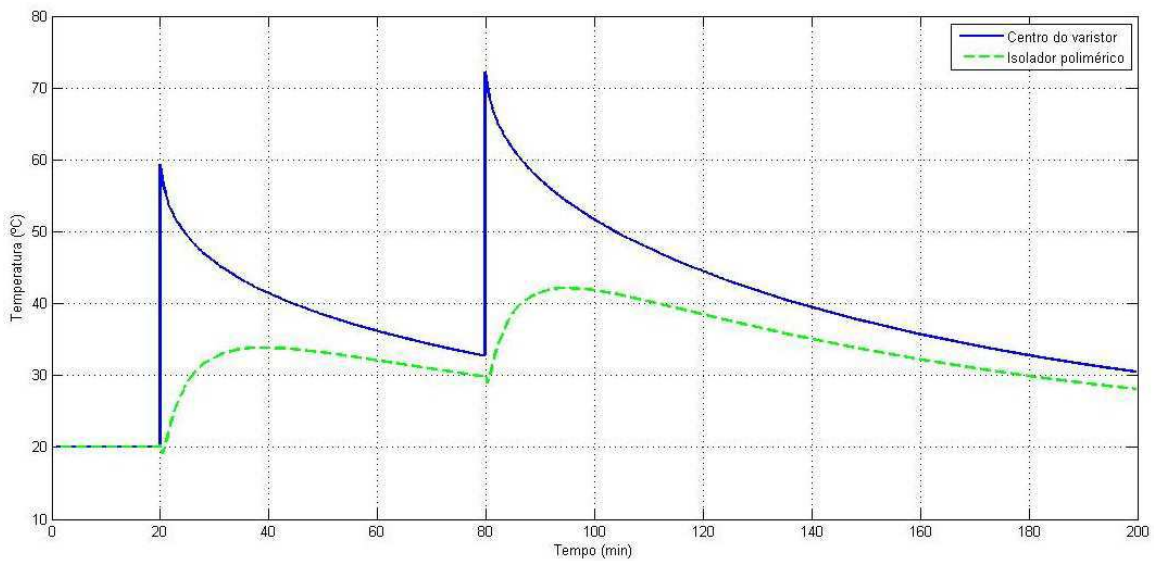


Fonte: (COSTA, 1999).

- 1 – Fixar todas as temperaturas.
- 2 – Aplicação do primeiro impulso de corrente de 65 kA com forma de onda 4/10 μ s.
- 3 – Resfriamento até a temperatura ambiente.
- 4 – Aplicação do segundo impulso de corrente, com a mesma forma do primeiro.
- 5 – Resfriamento por no máximo 5 minutos.
- 6 – Aplicação do MCOV (96 kV).

Novamente foram escolhidos os dois pontos mostrados na Figura 28 para análise da temperatura. Os resultados podem ser vistos a seguir.

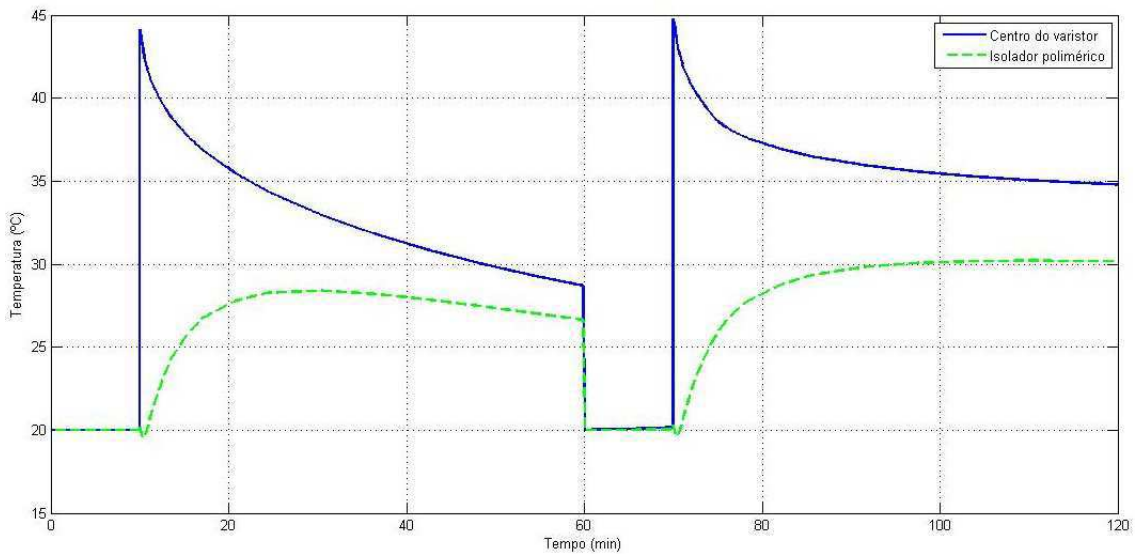
Figura 39 – Perfil térmico no centro do varistor e no isolador polimérico para o teste de impulso baseado na IEC.



O gráfico da Figura 39 mostra que, após a aplicação do primeiro impulso, o bloco de varistor sofre um aumento instantâneo na temperatura de 60°C e em seguida, é submetido a um arrefecimento por convecção descrita pela Lei de Arrefecimento de Newton. No mesmo instante, o isolador polimérico sofre uma pequena diminuição da temperatura e logo em seguida, a temperatura começa a aumentar exponencialmente. Esse aumento é proveniente do calor que está sendo lançado pela coluna de varistores. A diminuição inicial da temperatura do polímero pode estar relacionada com o aumento da temperatura instantânea da coluna de varistores e a capacidade volumétrica de calor elevado do material de polimérico.

Com a aplicação do segundo impulso, as etapas descritas se repetem. No entanto, a temperatura máxima atingida é superior a do primeiro impulso. Isto ocorre porque no momento da aplicação do segundo impulso, o para-raios ainda não tinha resfriado completamente até a temperatura ambiente.

Figura 40 – Perfil térmico no centro do varistor e no isolador polimérico para o teste de impulso definido na ANSI.

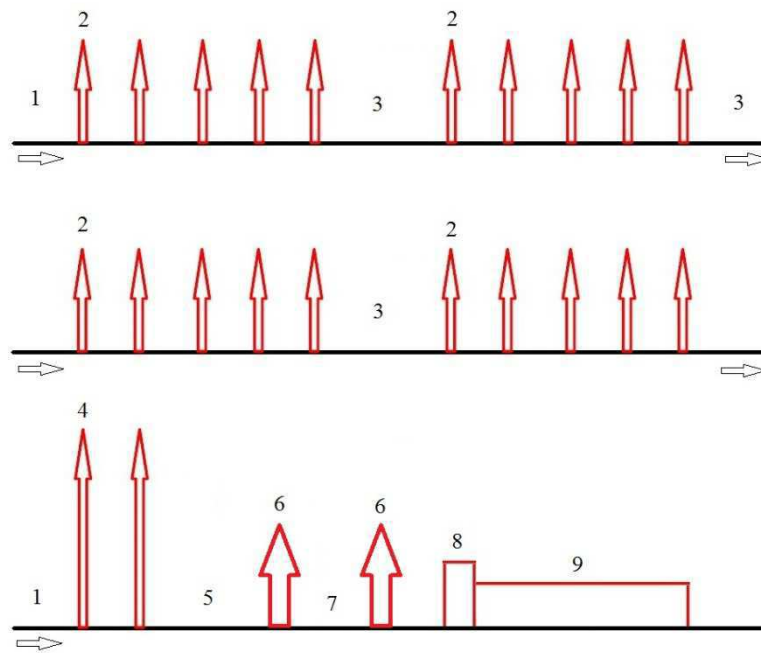


Análise semelhante à anterior pode ser realizada para o gráfico da Figura 40. Neste caso, entretanto, o aumento instantâneo da temperatura do bloco do varistor, após a aplicação do impulso, é de 24°C. Este aumento menor de temperatura ocorre porque, no teste padrão da ANSI, o impulso de corrente tem uma amplitude de 65 kA. Desta forma, os varistores absorvem uma menor quantidade de energia em relação ao teste da IEC. Quando a MCOV (96 kV) é aplicada ao para-raios, tanto a temperatura do bloco do varistor quanto a do invólucro polimérico começam a tender para um valor de regime diferente da temperatura ambiente. Isto pode ser constatado através da diferença de inclinação entre as duas curvas de resfriamento.

5.4 Ensaio de ciclo de operação

O ensaio de ciclo de operação simula as condições de serviço do para-raios pela aplicação de impulsos em combinação com a energização em frequência industrial. Na Figura 41 pode ser visto o procedimento determinado pela Norma IEC 99-4.

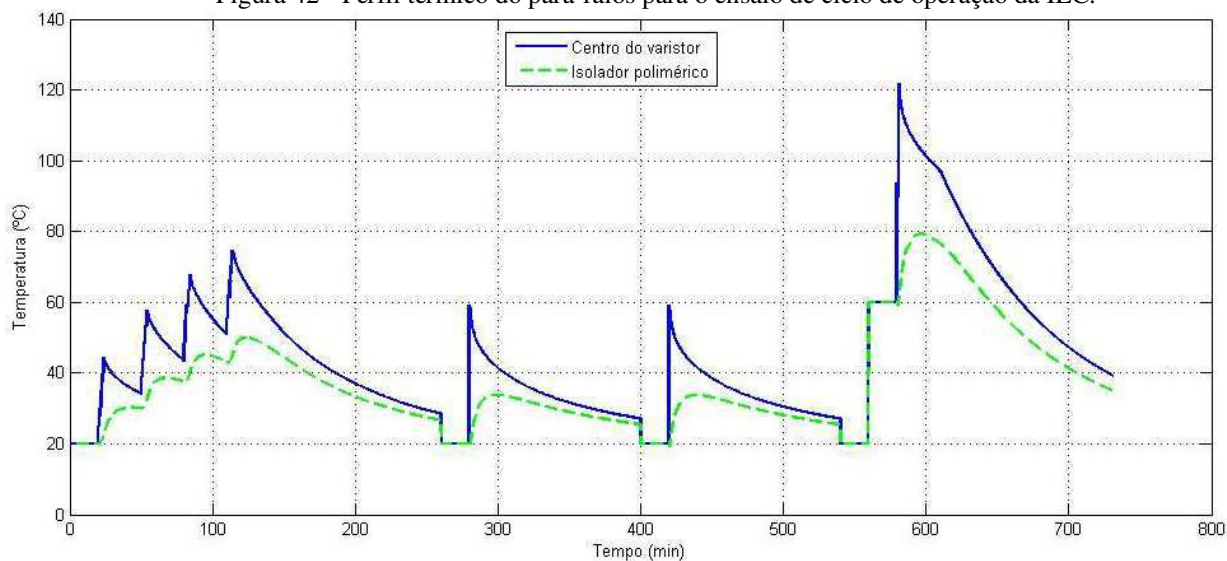
Figura 41 - Diagrama do ensaio de ciclo de operação da IEC.



- 1 – Temperatura do para-raios igual à temperatura ambiente, 20°C.
- 2 – Grupo de cinco impulsos 10 kA, 8/20 μ s, com intervalo de um minuto entre os impulsos juntamente com energização à 1,2xMCOV (115,2 kV).
- 3 – Intervalo de trinta minutos entre os grupos de impulso, sem energização.
- 4 – Dois impulsos de alta corrente 100 kA, 4/10 μ s.
- 5 – Aquecimento até a temperatura de 60°C.
- 6 – Aplicação de impulso de longa duração referente à descarga de linhas classe 3, com energia de 450 kJ, para cada impulso.
- 7 – Resfriamento de um minuto entre os dois impulsos de longa duração.
- 8 – Aplicação da tensão nominal (120 kV) durante dez segundos.
- 9 – Aplicação do MCOV (96 kV) durante 30 minutos.

O gráfico da Figura 42 mostra o resultado da simulação do ciclo e operação.

Figura 42 - Perfil térmico do para-raios para o ensaio de ciclo de operação da IEC.



A linha contínua representa o comportamento da temperatura no centro do varistor e a linha tracejada, a temperatura no isolador, conforme mostrado na Figura 28.

É possível verificar que o comportamento térmico durante a simulação do ciclo de operação é similar aos casos estudados anteriormente. Na primeira etapa, chamada de acondicionamento, que compreende os vinte impulsos de 10 kA, com forma 8/20 μ s, observa-se que ao término da aplicação de cada grupo de cinco impulsos a temperatura atinge um patamar superior ao atingido pelo grupo anterior. Entre o fim da aplicação do primeiro grupo e o fim da aplicação do quarto e último grupo, há uma diferença aproximadamente de 30°C no centro do varistor. Ainda na etapa de acondicionamento, os dois impulsos de alta corrente 100 kA, 4/10 μ s, mostram uma elevação de 40°C na temperatura do varistor e aproximadamente 10°C no isolador, seguidas por um resfriamento até a temperatura ambiente, 20°C.

Ao término da fase de acondicionamento, a temperatura do para-raios é elevada até o patamar de 60°C para que sejam aplicados os dois impulsos de descarga de linha. Neste ponto a temperatura no centro do varistor atinge o patamar dos 120°C e a temperatura no isolador em 80°C. Imediatamente após a aplicação dos dois impulsos, o para-raios é energizado com sua tensão nominal (120 kV) durante dez segundos. Após

esse tempo, a tensão é reduzida até o valor do MCOV (96 kV) e mantida por trinta minutos. No gráfico é possível notar que, ao término da aplicação do MCOV, há uma diferença na curva de resfriamento, que começa a cair mais rapidamente, uma vez que não existe tensão aplicada.

5.5 Simulação do limite de temperatura aceitável

A Companhia Hidroelétrica do São Francisco (CHESF) faz uso do ensaio não destrutivo de termografia como técnica de manutenção dos seus equipamentos de subestação. Tal técnica consiste na realização de leituras térmicas nos equipamentos em operação, utilizando-se um termovisor e em seguida avaliação dos resultados obtidos tomando-se como parâmetro valores limites normatizados pela empresa. Estes valores limites foram definidos com base nas características dos materiais, normas técnicas e principalmente no histórico de cada tipo de equipamento que a empresa possui em suas instalações. Uma vez completa a análise dos resultados, a equipe responsável decide qual será a ação mais adequada para cada caso. Um exemplo de ação seria a retirada de operação de um determinado equipamento.

No caso específico dos para-raios os valores limites foram definidos com base no histórico dos para-raios com invólucro de porcelana, no entanto, a CHESF adota os mesmos valores limites para os para-raios com invólucro polimérico. O principal motivo para esta prática é a falta de histórico e estudos comprobatórios para os equipamentos com material polimérico, uma vez que seu uso é recente na empresa. Um exemplo de resultado que pode levar um para-raios a ser retirado de operação é uma diferença de temperatura de 10°C, entre sua superfície e o ambiente. Esse critério se mostrou eficiente, ao longo dos anos, para os modelos com invólucro de porcelana, no entanto, o uso dos valores limites definidos para um para-raios com invólucro de

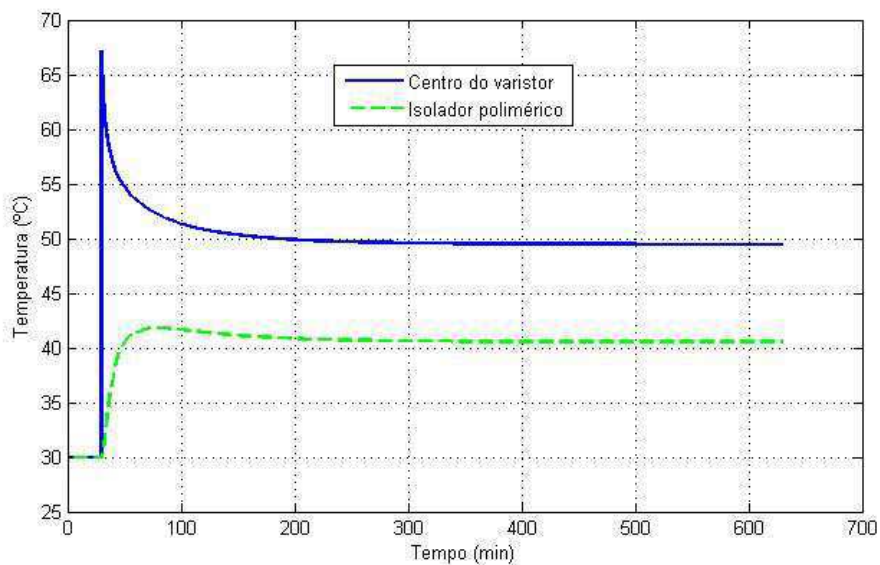
porcelana para avaliação dos resultados da termovisão de um para-raios com invólucro polimérico pode não ser adequado em virtude da diferença de projeto e materiais empregados, que proporcionam comportamentos térmicos distintos.

Visando um melhor entendimento do para-raios com invólucro polimérico na condição descrita acima, foi realizada uma simulação com o seguinte procedimento:

- 1 – Definir as temperaturas iniciais e temperatura ambiente em 30°C.
- 2 – Aplicar impulso de corrente com amplitude máxima 100 kA, com forma de onda 4/10 μ s.
- 3 – Aplicar uma quantidade de energia (em forma de tensão ou corrente) para que a temperatura da superfície externa do isolador polimérico possa estabilizar em torno de 40°C (10°C acima da temperatura ambiente).
- 4 – Construir o gráfico da evolução da temperatura na superfície externa do isolador e no centro do bloco varistor.

O gráfico da Figura 43 mostra o resultado da simulação.

Figura 43 - Evolução térmica do para-raios no ensaio do limite de temperatura.



Como pode ser visto no gráfico acima, após a aplicação do impulso de corrente a temperatura no varistor aumenta rapidamente até atingir o patamar de 67°C, ficando cerca de 37°C acima da temperatura ambiente. Num instante após esse aumento de temperatura o varistor começa a trocar calor com o invólucro polimérico e este por sua vez troca calor com o ambiente. Desta maneira a temperatura no varistor começa a diminuir enquanto a temperatura no invólucro aumenta e este comportamento se mantém até que se atinja um patamar de equilíbrio de temperatura, definido pela entrada de energia a uma taxa constante após a aplicação do impulso de corrente. No gráfico é possível verificar que três horas após o impulso, a temperatura na superfície externa do isolador estabiliza em cerca de 41°C e a temperatura no varistor estabiliza em aproximadamente 50°C. Como dito anteriormente, se a temperatura na superfície externa do isolador do para-raios atingir um nível de 10°C acima da temperatura ambiente pode levar a equipe responsável na Chesf a decidir pela retirada de operação do equipamento por questões de segurança. No entanto, como pode ser visto no resultado da simulação deste caso, a temperatura interna no bloco de varistores é aproximadamente 50°C, temperatura esta que não representa risco para o funcionamento do para-raios e conseqüentemente não justificaria uma retirada imediata de operação do equipamento.

Capítulo 6 – Conclusão

Esta dissertação apresenta o estudo do comportamento térmico do para-raios de óxido de zinco com invólucro polimérico, utilizando nas simulações um *software* comercial como ferramenta computacional que faz uso do Método dos Elementos Finitos. As simulações foram baseadas em testes de impulsos de corrente descritos por normas internacionais, ANSI e IEC.

Com a técnica proposta é possível uma análise mais completa do perfil térmico do para-raios e também, determinar as regiões com maiores gradientes de temperatura. A técnica também pode ajudar as companhias do setor elétrico a estimar a temperatura interna do para-raios na coluna de varistores, através do perfil térmico da superfície do isolador polimérico.

Como sugestão para trabalhos futuros, propõe-se que: os resultados obtidos através das simulações realizadas, sejam confrontados com resultados de experimentos realizados em laboratório; as imagens térmicas obtidas através da simulação sejam comparadas com o resultado de imagens térmicas obtidas através de um termovisor em um para-raios do mesmo tipo, para validação do modelo computacional desenvolvido.

Referências

ABB. **High Voltage Surge Arresters - Buyer's Guide**, 2014.

AUTODESK, INC. **AutoCAD 2012**, 2012.

COMSOL AB. **COMSOL Multiphysics**, 2013.

COSTA, E. G. D. **Análise do desempenho de para-raios de óxido de zinco**. (Tese de doutorado em engenharia elétrica - Universidade Federal da Paraíba). Campina Grande, 1999.

D'AJUZ, A.; RESENDE, F. M.; CARVALHO, F. M. S.; NUNES, I. G.; FILHO, J. A.; DIAS, L. E. N.; PEREIRA, M. P.; FILHO, O. K.; MORAIS, S. de A. **Equipamentos Elétricos: Especificação e Aplicação em Subestações de Alta Tensão**. Universidade Federal Fluminense, 1985.

FERREIRA, T. V. **Estudo do Trilhamento de Núcleo em Isoladores Poliméricos**. Campina Grande, 2007.

HILEMAN, A. R. **Insulation Coordination for Power Systems**. New York: Marcel Dekker, Inc, 1999.

HINRICHSEN, V. **Metal-Oxide Surge Arresters in High-Voltage Power Systems - Fundamentals - 3rd edition**. Berlin, 2011.

HOLMAN, J. P. **Heat Transfer - 10th ed.** New York: The McGraw-Hill, 2010.

HUANG, L. **Electro-Thermal Simulation of MOSA and Derivation of Thermal Equivalent Test Sections**. Master of Science, Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Manitoba, April, 1993.

IEC 99-4. **IEC 60099-4 Surge Arresters Part 4. Metal-oxide surge arresters without gaps for a.c. systems**. ed. 2, 2004.

IEEE C62.11. **ANSI/IEEE C 62.11:2012 Standard for metal oxide surge arresters for ac power circuits (>1 kV)**, 2012.

LEWIS, R. W.; NITHIARASU, P.; SEETHARAMU, K. N. **Fundamentals of the Finite Element Method for Heat and Fluid Flow**. John Wiley & Sons, Ltd, 2004.

LIRA, J. G. A. **Sistema de aquisição de dados para monitoramento e diagnóstico remoto das condições de pára-raios de óxido de zinco**. Campina Grande: Universidade Federal de Campina Grande, (Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica). Campina Grande, 2007.

NIGOL, O. **Methods for Analyzing the Performance of gapless Metal Oxide Surge Arrester**. **IEEE Trans. on Power delivery**, vol. 7, n. 3, p. 1656-1665, July, 1992.

NÓBREGA, R. S. D. **Modelo eletrotérmico de um pára-raios de óxido de zinco: simulação e experimentos.** Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica. Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2006.

PHILIPP, H. R.; LEVINSON, L. M. Low-Temperature Electrical Studies On Metal-Oxide Varistors - A Clue to Conduction Mechanisms. **Journal of Applied Physics**, v. 48, n. 4, p. 1621–1627, April, 1977.

RAO, S. S. **The Finite Element Method in Engineering - Fourth Edition.** Miami: Elsevier Science & Technology Books, 2004.

SEGERLIND, L. J. **Applied Finite Element Analysis - Second Edition.** East Lansing: John Wiley & Sons, 1984.

STOCKUM, F. R. Simulation of nonlinear thermal of metal oxide surge arresters using a hibrid finite difference and empirical model. **IEEE Trans. on Power Delivery**, vol. 9, n. 1, p. 306 - 313, January, 1994.

ZHAO, T.; LI, Q.; QIAN, J. Investigation on Digital Algorithm for On-Line Monitoring and Diagnostics of Metal Oxide Surge Arrester Based on an Accurate Model. **Power Delivery, IEEE Transactions on**, v. 20, n. 2, p. 751–756. April, 2005.

ZIENKIEWICZ, O. C.; TAYLOR, R. L. **The Finite Element Method, Fifth Edition, Volume 1 - The Basis.** Butterworth-Heinemann, 2000.