
**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
COORDENAÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA**

**ESTUDO DA PROPAGAÇÃO DE
CALOR EM PÁRA-RAIOS DE
ÓXIDO DE ZINCO**

ALEKSANDRO GUEDES DE LIMA

**CAMPINA GRANDE - PB
DEZEMBRO/1997**

ALEKSANDRO GUEDES DE LIMA

**ESTUDO DA PROPAGAÇÃO DE CALOR EM
PÁRA-RAIOS DE ÓXIDO DE ZINCO**

Dissertação apresentada ao Curso de
Pós-Graduação em Engenharia
Mecânica da Universidade Federal da
Paraíba em cumprimento às exigências
para obtenção do Grau de Mestre.

Orientador: JOSÉ MAURÍCIO GURGEL, Dr. Ing.

Co-Orientador: EDSON GUEDES DA COSTA, MSc.

**CAMPINA GRANDE-PB
DEZEMBRO/1997**



L732e

Lima, Aleksandro Guedes de.

Estudo da propagação de calor em para-raios de óxido de zinco / Aleksandro Guedes de Lima. - Campina Grande, 1997. 99 f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia.

1. Para-Raios de ZnO - Componente Térmico. 2. Propagação de Calor. 3. Dissertação - Engenharia Mecânica. I. Gurgel, José Maurício. II. Costa, Edson Guedes da. III. Universidade Federal da Paraíba - Campina Grande (PB). IV. Título

CDU 621.316.938(043)

**ESTUDO DA PROPAGAÇÃO DE CALOR EM
PÁRA-RAIOS DE ÓXIDO DE ZINCO**

ALEKSANDRO GUEDES DE LIMA

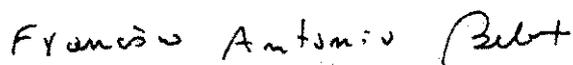
DISSERTAÇÃO APROVADA COM DISTINÇÃO EM: 17 / 12 / 97



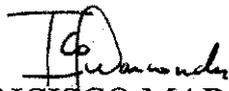
Dr. JOSÉ MAURÍCIO ALVES DE MATOS GURGEL
ORIENTADOR



M.Sc. EDSON GUEDES DA COSTA
CO-ORIENTADOR



Dr. FRANCISCO ANTONIO BELO
MEMBRO



Dr. FRANCISCO MARCONDES
MEMBRO

CAMPINA GRANDE - PB
DEZEMBRO - 1997

A meus pais, Manoel Guedes
Bezerra (in memoriam) e Teresinha de
Lima Guedes pela ajuda,
compreensão e incentivo, DEDICO.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela força para resistir e constância para perseverar.

Ao professor Edson Guedes da Costa, pela orientação, pela disposição em dividir seus conhecimentos, pelo incansável esforço, pela dedicação, paciência e incentivo, que sem os quais seria impossível a realização deste trabalho.

Ao professor José Maurício Gurgel, pela orientação, incentivo e confiança.

Aos funcionários do Laboratório de Alta tensão, pela grande ajuda durante a realização deste trabalho.

Ao Laboratório de Alta tensão, na pessoa do professor Washington Neves pela colaboração para a realização deste trabalho.

A coordenação de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, na pessoa da secretária Lúcia Márcia Quirino, pelo apoio.

Aos professores do Curso de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, que deram os subsídios para a realização deste trabalho.

Aos professores do Curso de Mecânica da Escola Técnica Federal da Paraíba, pelo apoio e incentivo.

A minha família, pela compreensão e ajuda nos momentos difíceis.

Aos amigos e todos que direta e indiretamente me ajudaram nessa caminhada.

SUMÁRIO

pag.

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE VARIÁVEIS

RESUMO

ABSTRACT

INTRODUÇÃO

1 - PÁRA-RAIOS DE ÓXIDO DE ZINCO E MODELOS TÉRMICOS.....	15
1.1 - Varistores.....	15
1.2 - Propriedades Elétricas dos Varistores de Óxido de Zinco.....	18
1.3 - Modelos Matemáticos / Computacionais.....	21
1.4 - Cálculo de Energia Absorvida nos Pára-raios.....	26
1.5 - Importância do Trabalho.....	27
2 - MODOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR.....	29
2.1 - Introdução.....	29
2.2 - Transferência de Calor por Condução.....	29
2.3 - Transferência de Calor por Convecção.....	31
2.4 - Transferência de Calor por Radiação.....	34
2.5 - Modelo Matemático para a Seção de Pára-raios.....	36
3 - TRANSFORMAÇÃO DE COORDENADAS, GERAÇÃO DE MALHA E PROGRAMA COMPUTACIONAL	42
3.1 - Introdução.....	42
3.2 - Conceitos Básicos de Mapeamento e Geração Numérica de Malha.....	46
3.3 - Geração Numérica de Malha.....	52
3.4 - Funções de Controle.....	57
3.5 - Relações de Transformações.....	59

pag.

3.6 - Representação das Derivadas em Diferenças Finitas.....	62
3.7 - Transformação das Equações que Governam o Problema.....	64
3.8 - Programa Computacional para Geração de Malha e Cálculo de Temperatura.....	67
4 - METODOLOGIA EXPERIMENTAL.....	74
4.1 - Materiais.....	74
4.2 - Métodos.....	78
4.3 - Obtenção das Temperaturas.....	84
5 - DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	86
5.1 - Introdução.....	86
5.2 - Simulação Numérica.....	87
5.3 - Ensaio Experimentais.....	88
5.4 - Análise dos Resultados.....	89
CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....	95
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	97

LISTA DE FIGURAS

	pag.
Figura 1.1 - Pára-raios instalado em um sistema elétrico.....	17
Figura 1.2 - Curva característica típica dos pára-raios de ZnO.....	17
Figura 1.3 - Divisão da curva característica de varistores de ZnO em regiões.....	18
Figura 1.4a - Modos de transferência de calor em um pára-raios de distribuição típico.....	23
Figura 1.4b - Circuito elétrico representando os parâmetros térmicos de um pára-raios de ZnO.....	23
Figura 2.1 - Esquema da seção de pára-raios, com os fenômenos térmicos.....	36
Figura 3.1 - Discretização cartesiana (a) coincidente com a fronteira (b).....	44
Figura 3.2 - Mapeamento de uma geometria simplesmente conexa irregular para uma geometria regular no domínio computacional.....	47
Figura 3.3 - Mapeamento de um triângulo no plano físico para um retângulo no plano computacional.....	49
Figura 3.4 - Mapeamento de um triângulo no plano físico para um retângulo no plano computacional.....	49
Figura 3.5 - Mapeamento de uma região irregular duplamente conexa em uma região regular duplamente conexa.....	50
Figura 3.6 - Mapeamento de uma região duplamente conexa em uma região simplesmente conexa usando um corte.....	51
Figura 3.7 - Discretização estruturada (a) e não estruturada (b).....	52
Figura 3.8 - Atração da linha $\xi = \text{constante}$: (a) linha de coordenada $\xi = \xi_i$, (b) ponto de coordenada (ξ_i, η_i)	58
Figura 3.9 - Localização de pontos para diferenciação de uma propriedade f	62
Figura 3.10 - Fluxograma do projeto PRTEMP.....	68
Figura 3.11 - Malha bidimensional gerada com os varistores e o invólucro de porcelana.....	69

Figura 4.1 - Vista de um invólucro de porcelana utilizado na seção de teste.....	75
Figura 4.2 - Representação dos componentes básicos de uma seção de pára-raios.....	75
Figura 4.3 - Representação do tampão de PVC e do eletrodo com lâmina de latão.....	76
Figura 4.4 - Seção de teste de um pára-raios.....	77
Figura 4.5 - Seção de pára-raios.....	77
Figura 4.6 - Vista da seção de teste com os termômetros.....	78
Figura 4.7 - Vista da bancada de controle e medição.....	80
Figura 4.8 - Ciclo de tensão - sobretensão versus tempo nos ensaios de tensão alternada.....	80
Figura 4.9 - Vista da montagem experimental.....	81
Figura 4.10 - Vista da montagem experimental.....	82
Figura 4.11 - Vista do gerador de impulsos de corrente da UFPb.....	83
Figura 4.12 - Ciclo de impulsos versus tempo.....	83
Figura 4.13 - Localização dos pontos de medição de temperaturas.....	85
Figura 5.1 - Ciclo de sobretensão - resfriamento versus tempo.....	87
Figura 5.2 - Ciclo de tensão - sobretensão versus tempo nos ensaios de tensão alternada.....	87
Figura 5.3 - Ciclo de impulsos versus tempo.....	88
Figura 5.4 - Simulação x Experimento, na aplicação de ciclo de sobretensão, resfriamento com $hc = 1hc_1$	90
Figura 5.5 - Simulação x Experimento, na aplicação de ciclo de sobretensão, resfriamento com $hc = 2hc_1$	92
Figura 5.6 - Simulação x Experimento, na aplicação de ciclo de tensão, sobretensão com $hc = 2hc_1$	93
Figura 5.7 - Simulação x Experimento na aplicação de impulsos com $hc = 2hc_1$	94

LISTA DE VARIÁVEIS

A = área, m^2 .

a_v = difusividade térmica, m^2/s .

a_v = difusividade térmica dos varistores, m^2/s .

a_l = difusividade térmica do invólucro, m^2/s .

a_s = razão de aspecto.

c_p = calor específico, $J/kg\ ^\circ C$.

E = campo elétrico, V/m .

g = taxa de geração de energia por unidade de volume, W/m^3 .

Gr = número de Grashof.

H = altura, m .

hc = coeficiente de convecção, $W/m^2\ ^\circ C$.

hr = coeficiente de radiação, $W/m^2\ ^\circ C$.

I = corrente, A .

J = jacobiano.

J_c = densidade de corrente A/cm^2 .

k = condutividade térmica, $W/m\ ^\circ C$.

k_v = condutividade térmica dos varistores, $W/m\ ^\circ C$.

k_l = condutividade térmica do invólucro, $W/m\ ^\circ C$.

k_t = condutividade térmica do tampão, $W/m\ ^\circ C$.

L = comprimento, m .

Nu = número de Nusselt.

Pr = número de Prandtl.

Q = taxa de fluxo de calor, W .

q = fluxo de calor por unidade de área, W/m^2 .

Ra = número de Rayleigh.

r = coordenada radial, m.

r_{ξ}, r_{η} = derivadas computacionais.

T = temperatura, K.

t = tempo, s.

V = tensão, V.

y = coordenada vertical, m

y_{ξ} e y_{η} = derivadas computacionais.

α = coeficiente de transformação de coordenadas.

β = coeficiente de transformação de coordenadas.

ε = emissividade.

γ = coeficiente de transformação de coordenadas.

η = coordenada do plano computacional.

η_r, η_y = métricas.

ρ = massa específica, kg/m^3 .

σ = constante de Stefan Boltzmann,

ξ = coordenada do plano computacional.

ξ_r, ξ_y = derivadas métricas.

RESUMO

O Pára-raios de ZnO é um dispositivo largamente utilizado na proteção de sistemas elétricos contra sobretensões. A proteção se faz pela limitação da tensão, transformando parte da energia elétrica oriunda do surto, em energia térmica. Este trabalho estuda o comportamento térmico dos pára-raios de ZnO quando submetidos a esforços elétricos e térmicos. A propagação de calor foi estudada em uma seção de um pára-raios de transmissão de energia elétrica, através de simulações com o método de Diferenças Finitas utilizando coordenadas generalizadas e de experimentos. Os resultados mostram que a simulação computacional retrata o comportamento térmico de uma seção de pára-raios.

ABSTRACT

The zinc oxide (ZnO) surge arrester is largely used for power system protection against overvoltages. The arrester limits the voltage at the terminal of the power apparatus to be protected, transforming the electrical surge energy into thermal energy. In this work, a study of the thermal behavior of ZnO arresters under the influence of electrical and thermal stress, is carried out. A computer program based on the finite difference method with boundary fitted coordinate was developed to predict the heat transfer behavior of a test section. Laboratory measurements and computed results are in close agreement.

INTRODUÇÃO

O pára-raios de óxido de zinco é muito importante na proteção de equipamentos em sistemas elétricos de alta tensão. A proteção dos equipamentos se faz pela limitação da tensão nos sistemas, transformando parte da energia elétrica devida a surtos (descargas elétricas na linha de transmissão), em energia térmica.

Este trabalho se propõe a estudar o comportamento térmico dos pára-raios de ZnO quando submetidos a esforços elétricos e térmicos. A propagação será estudada em uma seção de pára-raios de transmissão de energia elétrica através da simulação com método de Diferenças Finitas utilizando coordenadas generalizadas e experimentos. Para tanto será utilizada uma seção de teste de pára-raios de transmissão de energia elétrica como objeto de estudo.

Para alcançar os objetivos, desenvolveu-se este trabalho em cinco capítulos, cujos conteúdos estão apresentados a seguir:

No capítulo I são apresentados os conceitos básicos sobre pára-raios de óxido de zinco, modelos matemáticos computacionais e importância do trabalho.

Os modos de transferência de calor são relatados no capítulo II, como também o modelo matemático para a seção de pára-raios de ZnO. Neste capítulo são descritos de forma simples e objetiva os mecanismos de transferência de calor por Condução, Convecção e Radiação.

Em seguida, no capítulo III, é exposto o embasamento teórico necessário à transformação de coordenadas e geração de malha. Ainda neste capítulo, com base nas

equações de transferência de calor no tempo, é apresentado o programa computacional em Diferenças Finitas baseado em coordenadas generalizadas.

No capítulo IV, são descritos e comentados as montagens experimentais em uma seção de teste de pára-raios de óxido de zinco, com o objetivo de validar o programa computacional.

A discussão dos resultados é realizada no capítulo V. Neste capítulo a simulação computacional é confrontada com resultados experimentais.

CAPÍTULO I

PÁRA-RAIOS DE ÓXIDO DE ZINCO E

MODELOS TÉRMICOS

1.1 - Varistores

Os sistemas elétricos de potência tem crescido em tamanho e em nível de tensão, para transmitir e distribuir energia elétrica para diversos consumidores. A necessidade do fornecimento contínuo de energia tem conduzido as pesquisas nas diversas áreas de conhecimento, D'AJUZ et al (1987) e FRANCO (1993).

As falhas nos sistemas elétricos sempre ocasionaram transtorno aos seus usuários ou consumidores. A proteção dos sistemas elétricos contra descargas atmosféricas, sobretensões e descargas oriundas do ligamento e desligamento de chaves, necessários a manobra do sistema elétrico, é feita por pára-raios. Os pára-raios absorvem parte da energia elétrica das descargas e convertem em energia térmica através do efeito joule.

Os pára-raios de óxido de zinco são constituídos por elementos varistores dispostos em uma ou mais colunas e são envolvidos por um invólucro de porcelana com formato cilíndrico e com aletas.

Os varistores são dispositivos eletro-cerâmicos com características corrente-tensão não-lineares. A palavra varistor é derivada do termo "variable resistor". No entanto, os

varistores também são conhecidos como: resistores não-lineares, resistores variáveis, supressores de surto e limitadores de tensão, COSTA (1994).

Até o final da década de 60, os varistores utilizados eram constituídos por carboneto de silício (SiC). Os varistores de Carboneto de Silício apresentavam várias deficiências, entre elas a baixa não-linearidade, baixo calor específico, alta tensão residual e lenta resposta aos surtos de corrente.

Com a evolução da ciência dos materiais, em 1968 a Matsushita Eletric, MATSUOKA (1971), descobriu as características não-lineares de um composto cerâmico à base de óxido de zinco. Os varistores à base de Óxido de Zinco (ZnO), apresentam uma alta não-linearidade e características térmicas melhores para a utilização em pára-raios. Os pára-raios de ZnO apresentam inúmeras vantagens sobre o seu antecessor, os pára-raios de carboneto de silício (SiC). Entre as vantagens podem ser citadas:

- alto poder de não-linearidade entre a tensão e a corrente;
- baixa tensão residual;
- baixa corrente de fuga na tensão de operação;
- rápida resposta frente aos surtos de corrente;
- capacidade de absorção de calor superior.

Atualmente, os pára-raios à base de óxido de zinco são os mais utilizados e possuem uma vasta aplicação na engenharia elétrica, sobretudo nos sistemas de alta tensão e extra alta tensão. A função precípua dos pára-raios de ZnO é limitar a tensão no sistema, a níveis compatíveis aos isolamentos dos outros equipamentos a serem protegidos. Usualmente o pára-raios de ZnO é conectado entre a linha elétrica e a terra, COSTA (1997). A Figura 1.1 mostra um esboço da aplicação do pára-raios em um sistema elétrico.

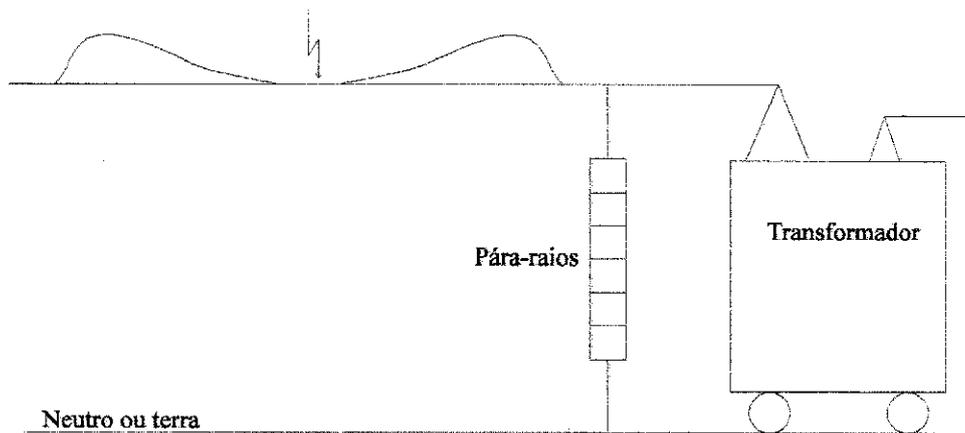


Figura 1.1 - Para-raios instalado em um sistema elétrico.

A Figura 1.2 mostra as características típicas de corrente versus tensão ($I \times V$) do para-raios de Óxido de Zinco (ZnO) e do para-raios de Carboneto de Silício (SiC), como também, os níveis de proteção para impulso atmosférico e de manobra além das tensões nominal e de operação contínua, onde a corrente é dada em ampere e a tensão é representada por unidade de tensão nominal (p. u).

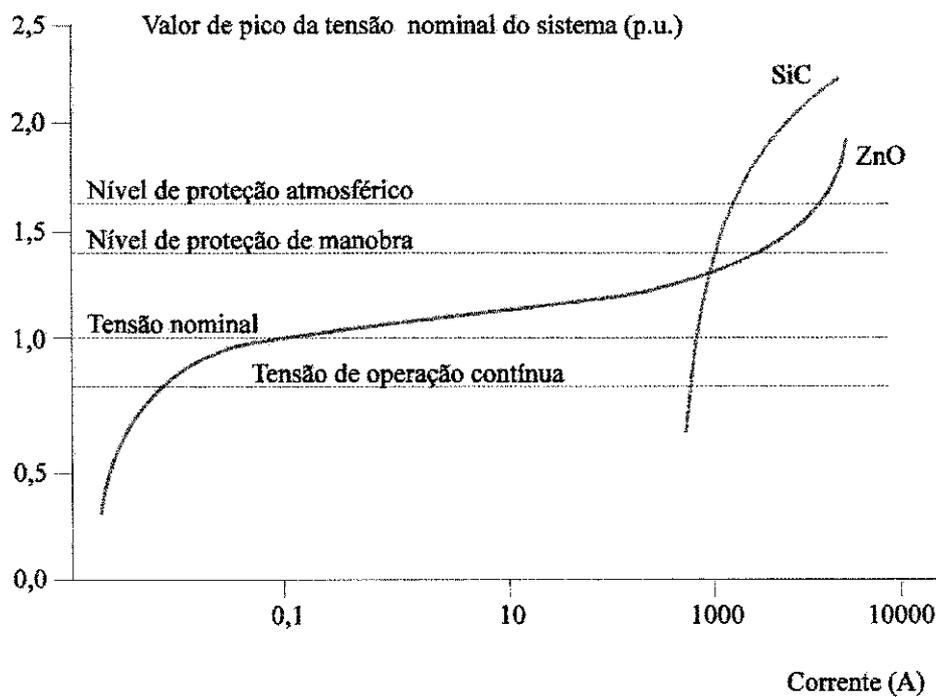


Figura 1.2 - Curva característica típica dos para-raios de ZnO e de SiC, ABB (1995).

1.2 - Propriedades Elétricas dos Varistores de Óxido de Zinco

1.2.1 - Característica: Corrente versus Tensão ($I \times V$) ou Densidade de Corrente versus Campo Elétrico ($J_c \times E$).

A mais importante propriedade dos varistores de óxido de zinco é a sua característica não-linear, Corrente versus Tensão ($I \times V$) ou Densidade de Corrente versus Campo Elétrico ($J_c \times E$), mostrada na Figura 1.3. GUPTA (1990) explica que funcionalmente, um varistor ou um pára-raios atua como um isolante (resistor com alta resistência) antes de atingir a tensão conhecida como tensão de ruptura (ao nível do “joelho” da curva) e atua como condutor ao ultrapassá-la.

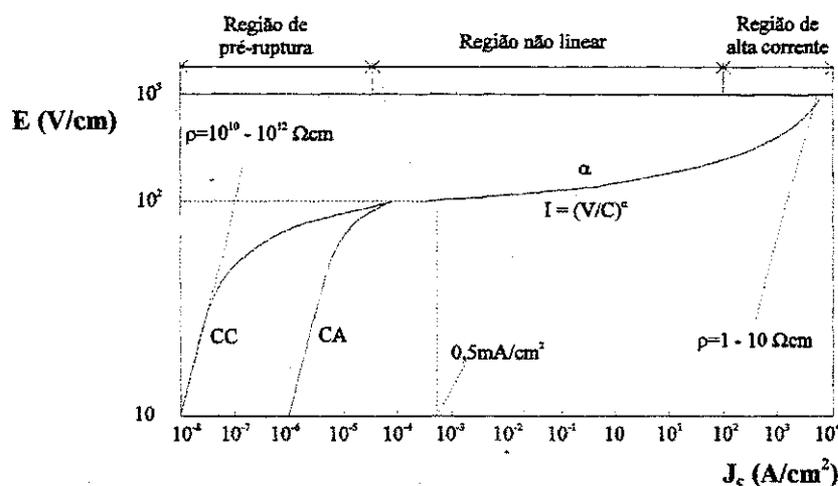


Figura 1.3 - Divisão da curva característica de varistores de ZnO em regiões, PHILIPP & LEVINSON (1977); GUPTA (1990).

A resistência a passagem de corrente elétrica nos varistores depende de sua microestrutura e possui duas componentes: a resistência dos grãos fixa e a resistência entre os grãos (muito variável). Quando os varistores estão submetidos a baixas tensões elétricas, a resistência entre os grãos é muito maior que a resistência dos grãos, de forma que, a

resistência total é alta e depende essencialmente da resistência entre grãos. Em consequência a passagem de corrente é baixa.

a) Região linear de baixa corrente ou pré-ruptura

Na região de baixa corrente, a resistência entre grãos decresce linearmente com o aumento da tensão. A característica ($I \times V$) é aproximadamente ôhmica (linear) na região cuja a densidade de corrente (J_c) não ultrapassa a 10^{-4} A/cm². É nesta região que os pára-raios de óxido de zinco operam em condições normais de trabalho.

b) Região não-linear

A resistência entre grãos, nesta região decresce de forma não-linear. A região não-linear de corrente intermediária é a essência do varistor de óxido de zinco, onde o dispositivo conduz uma grande quantidade de corrente, mesmo para um pequeno aumento da tensão aplicada. A densidade de corrente (J_c) na região não-linear apresenta uma variação de 10^{-4} A/cm² a 1000 A/cm². O grau de não-linearidade é determinado no patamar da região não-linear. Quanto menos inclinada for a curva $I \times V$ na região não-linear, melhor será o varistor.

c) Região de alta corrente

A região de alta corrente apresenta densidade de corrente superior a 10^3 A/cm². Na região de alta corrente, a resistência entre os grãos (muito variável) é muito menor que a resistência dos grãos (fixa), de forma que, a resistência total depende essencialmente da resistência dos grãos. Esta região volta a apresentar

comportamento aproximadamente linear, isto é, a corrente volta a crescer linearmente com o aumento de tensão.

Nas suas aplicações, o varistor utiliza todas as regiões da sua curva característica indicadas na Figura 1.3. A região de baixa corrente é importante porque define as perdas ativas, conseqüentemente a tensão de operação, para aplicações em regime de uso contínuo. A região não-linear determina a tensão residual na aplicação de um surto. A região de alta corrente apresenta a condição limite para a proteção contra surtos de alta corrente, tais como aquelas encontradas nas correntes de impulso atmosféricos.

1.2.2 - Tensão de Ruptura

O varistor é também caracterizado por uma tensão que faz a transição do módulo linear para o não-linear. A tensão de entrada da não-linearidade, justamente acima do “joelho” da curva ($I \times V$), Figura 1.3, é definida como a tensão de ruptura e, a partir do seu valor é possível determinar a tensão nominal do varistor. A tensão de ruptura é definida como a tensão que provoca uma densidade de corrente de 0.5 mA/cm^2 . Para a maioria das aplicações em sistemas de potência, a tensão de operação em regime permanente é colocada entre 0.7 e 0.8 da tensão de ruptura.

1.2.3 - Corrente de Fuga

O varistor de ZnO conduz continuamente uma corrente de fuga, visto que, o pára-raios é ligado entre a fase e a terra. A compreensão da corrente de fuga nos varistores é importante por duas razões: Primeiro, porque estando energizado com a tensão de

operação em regime permanente, a corrente determina a quantidade das perdas ativas que o varistor irá produzir, $P = I^2.R$, logo a intensidade da corrente de fuga determina o valor da tensão de operação em regime permanente que o dispositivo pode suportar sem gerar um excessivo calor. Segundo, porque se a intensidade de corrente for bastante reduzida para minimizar as perdas poderia acarretar desequilíbrio ou dificuldade de ajuste na coordenação da proteção.

1.2.4 - Tensão Residual

A tensão residual para um varistor é a tensão que permanece nos seus terminais quando da passagem de um surto. A tensão residual é importante na determinação dos níveis de coordenação de isolamento, pois os equipamentos a serem protegidos devem apresentar um nível básico de isolamento superior ao valor da tensão residual. Nível básico de isolamento é a tensão que poderá acarretar falha em 3% dos equipamentos.

Os varistores ou os pára-raios que apresentam alta não-linearidade, apresentam baixos valores da tensão residual.

1.3 - Modelos Matemáticos/Computacionais

A capacidade de absorção de energia de um pára-raios à base de ZnO é limitada pela temperatura de seus elementos. A avaliação experimental do desempenho térmico de um pára-raios de ZnO apresenta um custo muito elevado, quando possível. Para predizer essa temperatura, a modelagem computacional pode ser uma ferramenta valiosa, mas se torna necessário a determinação precisa dos parâmetros térmicos.

A energia térmica, liberada no interior dos elementos não-lineares, é transportada para o ambiente por meio da radiação, condução e convecção. A Figura 1.4a mostra os meios da transferência de calor em um pára-raios de distribuição típico, nas direções axial e radial.

Um dos primeiros modelos eletrotérmicos foi proposto por M. V. LAT (1983), podendo ser utilizado na simulação de vários ensaios elétricos. O modelo é uma analogia entre os parâmetros térmicos e elétricos, mostrado na Figura 1.4b; onde a corrente elétrica substitui o fluxo de calor, a tensão a temperatura, e das resistências e capacitâncias elétricas às resistências e capacitâncias térmicas dos elementos não-lineares, do gap de ar e do invólucro. O fluxo de calor dos elementos não-lineares foi considerado radialmente para fora.

LAT (1983) calculou analiticamente os valores das resistências térmicas para 6 configurações de pára-raios de distribuição, para tanto, utilizou as características dos materiais envolvidos, a configuração física e a equação do modo de transferência de calor correspondente, Figura 1.4a. Como as resistências térmicas envolvendo a propagação por radiação e convecção são dependentes diferença de temperatura, ele determinou as resistências térmicas equivalentes, R_{th} e R_{tho} , através: de um método iterativo, que calcula valores das resistências a cada nova temperatura. As capacitâncias térmicas foram calculadas através do produto calor específico pelo volume do componente do pára-raios. Assim, o circuito analógico mostrado na Figura 1.4b pode ser solucionado, determinando-se as temperaturas nos pontos preestabelecidos, no tempo.

LAT(1985) desenvolveu um programa computacional para prever o comportamento da temperatura dos pára-raios à base de ZnO em condições normais e anormais de operação e em simulações de ensaios. O programa está baseado no modelo

eletrotérmico descrito em LAT (1983). A base da modelagem computacional foi a divisão da característica $V \times I$ em duas regiões e a sua representação por equações empíricas para o cálculo da potência em função da tensão.

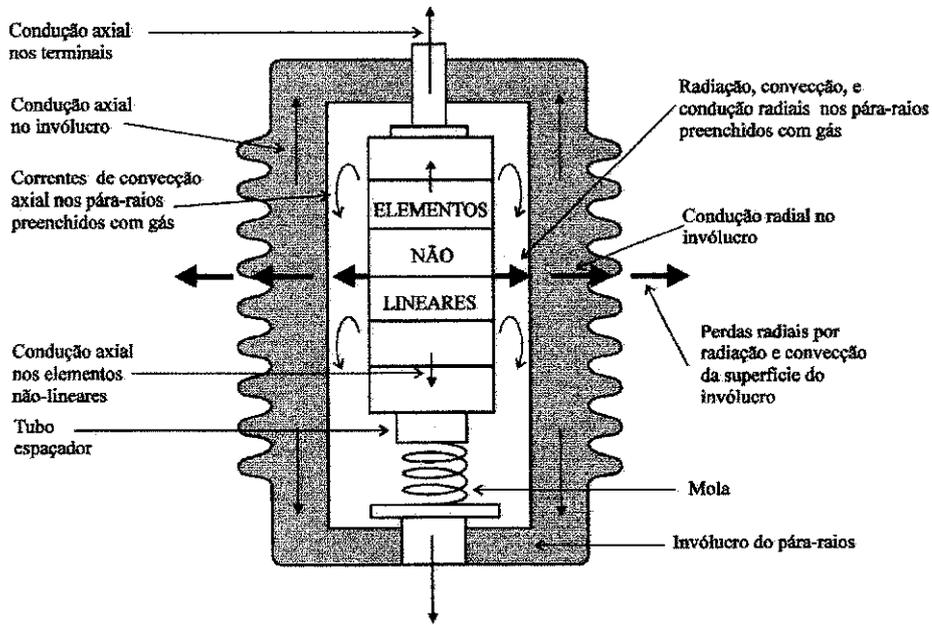


Figura 1.4a - Modos de transferência de calor em um pára-raios de distribuição típico, LAT (1983).

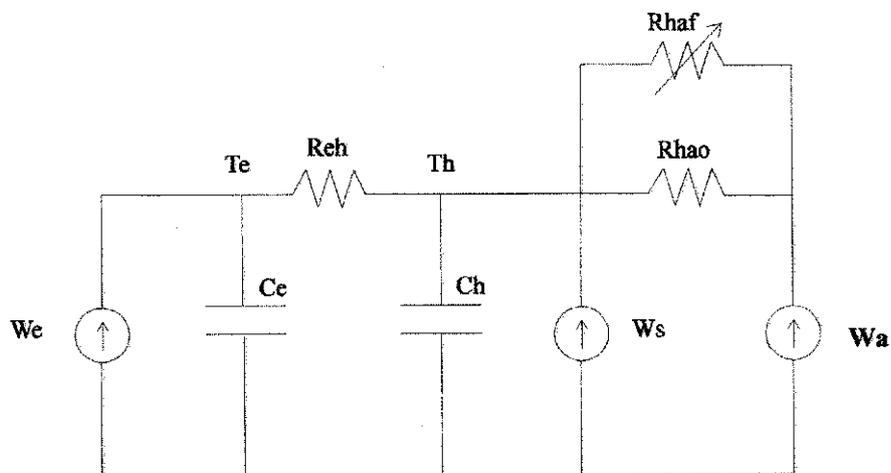


Figura 1.4b - Circuito elétrico representando os parâmetros térmicos de um pára-raios de ZnO, LAT (1983).

Sendo,

Ce e Ch são as capacitâncias térmicas dos varistores e do invólucro respectivamente em $W \cdot s/^\circ C$,

Reh é a resistência térmica do varistor para a superfície externa do invólucro em $^\circ C/W$,

Rhao é a resistência térmica do invólucro para o ambiente por radiação e convecção natural em $^\circ C/W$,

Rhaf é a resistência térmica do invólucro para o ambiente por convecção forçada somente em $^\circ C/W$,

Te é a temperatura do varistor $^\circ C$,

Th é a temperatura do invólucro em $^\circ C$,

Wa é a temperatura ambiente em $^\circ C$,

We é a entrada de potência elétrica pelo varistor em W, e

Ws é a entrada devido à radiação solar em W.

A validação do modelo eletrotérmico computacional foi realizada através de ensaios com sobretensões e ciclos de operação em pára-raios tipo distribuição.

HUANG (1993) propôs um modelo baseado na técnica das Diferenças Finitas para simular o comportamento térmico dos pára-raios ZnO. O modelo proposto é capaz de fornecer a variação da temperatura de modo radial e axial. Assim, o modelo pode ser usado para determinar a propagação de calor e a estabilidade térmica do pára-raios sob condições de operação diferentes, isto é, tensões aplicadas diferentes e sobretensões temporárias com durações e magnitudes diferentes. As equações de diferenças finitas foram mostradas para uma seção de teste.

O método apresentado por HUANG (1993) mostrou-se relativamente eficiente nos poucos ensaios realizados. Somente foram executados ensaios com tensão alternada. Um

ensaio de tensão aplicada com nível de tensão baixo, onde a temperatura de estabilização é um pouco mais alta do que a temperatura ambiente. No outro ensaio, após a aplicação da tensão de trabalho, uma sobretensão (1,4x tensão de trabalho) com duração de 90 segundos, e seguida pela tensão de trabalho. O tempo total do ensaio foi grande mas a temperatura máxima obtida no ensaio não ultrapassou a 40 °C.

Em recente trabalho, STOCKUM (1994), propôs um modelo de cálculo das temperaturas de um pára-raios utilizando o Método das Diferenças Finitas. Desse modo, ele estudou o comportamento térmico não-linear dos pára-raios de óxido de zinco através de simulações, como também, fez comprovações experimentais simples. Ele considerou o pára-raios composto de uma coluna de elementos não-lineares separada de um invólucro sem aletas por um espaço anelar de ar. Não foi considerada a transferência de calor de forma axial

STOCKUM apresentou uma metodologia adequada para a determinação das temperaturas em diversos pontos de um pára-raios. Entretanto, em seu estudo, ele fez comprovações experimentais muito simples, considerou o pára-raios sem aletas e a entrada de energia fixa.

Enfim, é possível transformar os modelos eletrotérmicos computacionais em ferramentas potentes para auxiliar:

- Os projetistas quando da concepção de novos modelos;
- Os engenheiros de campo, no maior conhecimento dos pára-raios em uso;
- Os engenheiros responsáveis pelas especificações e ensaios, na seleção dos pára-raios mais adequados no seu sistema.

Estes avanços devem ser feitos mas também devem ser preservadas e melhoradas a simplicidade de entrada de dados, a flexibilização quanto a mudanças na geometria dos pára-raios e implementada uma representação gráfica/computacional.

1.4 - Cálculo da Energia Absorvida nos Pára-Raios à ZnO

A capacidade de absorção e a magnitude da entrada de energia em um pára-raios estão intimamente relacionadas com a história do pára-raios. Os esforços elétricos e térmicos aplicados ao pára-raios, podem modificar o seu comportamento.

A velocidade de absorção de energia em um pára-raios à base de ZnO pode conduzi-lo a falhas ou mesmo a variações de suas características, sem o devido tempo para transferir partes dessa energia, em forma de calor, para outras partes do pára-raios ou mesmo para o meio ambiente. O processo se dá de modo adiabático. O processo adiabático pode acontecer quando o pára-raios é submetido a esforços elétricos de curta duração, correspondente a alguns segundos.

Um processo é não adiabático quando acontece perda de calor. Nos pára-raios, o processo de absorção de energia não adiabático ocorre em tempo superior a alguns minutos. Dessa forma, ainda no momento da absorção de energia ocorre também uma transferência de energia, quer seja por condução, convecção ou radiação. A transferência de energia também está associada à elevação da temperatura dos materiais vizinhos, isto é, a sua absorção de energia.

Em seu artigo, NIGOL (1992) descreve o desenvolvimento e uso de métodos práticos para analisar o comportamento de pára-raios à ZnO sobre várias condições de surtos e sobretensões na frequência industrial. Ele também mostra as equações para o

cálculo da energia absorvida para as condições analisadas. As equações do cálculo da potência, para os esforços elétricos são demonstradas por COSTA (1997).

1.5 - Importância do Trabalho

O pára-raios de óxido de zinco é muito importante na proteção de equipamentos em sistemas elétricos de alta tensão. A proteção dos equipamentos se faz pela limitação da tensão nos sistemas, transformando parte da energia elétrica devida a surtos em energia térmica.

O calor gerado precisa ser dissipado para o ambiente. Pois os varistores, além da necessidade de estarem aptos a receberem uma nova entrada de energia, apresentam o coeficiente de variação de resistividade com a temperatura negativo, isto é, quanto mais elevada a temperatura mais corrente circulará pelos varistores, proporcionando maior geração de calor e a conseqüente elevação de temperatura. Se o ciclo vicioso não for contido, o pára-raios entrará em desencadeamento térmico, produzindo sua destruição ou até mesmo a sua explosão, comprometendo a segurança de pessoas e dos outros equipamentos do sistema elétrico.

A necessidade de isolamento elétrico, impõe que o invólucro dos pára-raios, seja composto de material isolante elétrico e conseqüentemente isolante térmico. Normalmente os pára-raios apresentam um espaçamento de ar "gap" entre os varistores e o invólucro. No caso de uma descarga interna nos pára-raios (falha no funcionamento dos pára-raios, que provoca uma descarga elétrica de grande intensidade, originando um grande aumento de pressão no interior do pára-raios), os espaçamento serve de duto para a válvula de alívio de pressão. O dimensionamento correto do invólucro e a determinação ótima do "gap"

certamente reduziria os riscos e melhoraria o comportamento dos pára-raios em serviço, aumentando a taxa de transferência de calor para o ambiente.

A utilização de pára-raios completos de alta tensão para estudos do seu comportamento térmico em condições de operação possibilitaria as análises das condições de regime e sua associação com surtos e sobretensões. O estudo do comportamento térmico dos pára-raios completos de alta tensão é prejudicado devido à falta de condições de reprodutibilidade das condições de operação no campo. Para superar estas dificuldades são utilizados os modelos eletrotérmicos. Modelos eletrotérmicos são seções representativas do pára-raios ou são simulações por modelagem matemática (circuitos elétricos ou representações computacionais).

A utilização de modelos computacionais que retratem o comportamento térmico dos pára-raios, mostra-se ser imprescindível, devido sua flexibilidade, rapidez, segurança e custo reduzido. Procura-se apresentar neste trabalho, um modelo computacional para uma seção de pára-raios. O modelo é confrontado com experimentos realizados em uma seção de pára-raios de óxido de zinco. Uma vez, validado o modelo computacional, sua utilização para simular o comportamento de pára-raios com diversas dimensões e configurações fica bastante facilitada.

CAPÍTULO II

MODOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR

2.1 - Introdução

A Transmissão de calor pode ser definida como a transferência de energia de uma região para outra como resultado de uma diferença de temperatura entre as mesmas.

A transferência de calor não é governada por uma única relação, mas por uma combinação de várias leis. A literatura reconhece três modos distintos de transmissão de calor: Condução, Convecção e Radiação. A seguir, apresenta-se estes três modos de transferência de calor.

2.2 - Transferência de Calor por Condução

Condução é o processo pelo qual o calor flui de uma região de temperatura mais alta para outra de temperatura mais baixa, através do movimento cinético ou pelo impacto direto de moléculas, no caso de fluido em repouso, e pelo movimento de elétrons, no caso de metais, (OZISIK, 1985).

O cientista francês Joseph Fourier, propôs em 1822 a lei básica para a transmissão de calor por condução. A lei estabelece que a taxa do fluxo de calor por condução, em uma

dada direção, é proporcional a área normal a direção do fluxo e ao gradiente de temperatura naquela direção, isto é, com um fluxo de calor na direção n , a lei de Fourier estabelece que,

$$Q_n = -kA \frac{dT}{dn} \quad (2.1)$$

onde: Q_n é a taxa de fluxo de calor (em W) através da área A (em m^2) no sentido positivo da direção n e dT/dn , é o gradiente de temperatura na direção n , isto é, a variação da temperatura T com a distância. A constante de proporcionalidade “ k ” é chamada condutividade térmica do material (em $W/m \cdot ^\circ C$). Em geral a condutividade térmica varia com a temperatura, mas em muitos problemas de engenharia a variação é suficientemente pequena e pode ser desprezada. O sinal negativo da Equação (2.1), garante que o fluxo de calor seja positivo na direção do aumento da distância n .

A equação de condução de calor bidimensional variando no tempo em um sólido com geração interna de calor em coordenadas cartesianas é dada por:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{1}{k} g(t) = \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.2)$$

onde: T = Temperatura, $^\circ C$;

x, y = Coordenadas, m;

$g(t)$ = Taxa de geração de energia em função do tempo, por unidade de volume, W/m^3 ;

a = Difusividade térmica = $k/\rho c_p$, m^2/s ;

ρ = Massa específica do material, kg/m^3 ;

c_p = Calor específico do material, $J/(kg \cdot ^\circ C)$;

t = Tempo, s.

Em corpos com geometria cilíndrica, a equação bidimensional de condução de calor é:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{1}{k} g(t) = \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.3)$$

onde: r = Coordenada radial, m;

y = Coordenada vertical, m.

2.3 - Transferência de Calor por Convecção

A transferência de calor por convecção ocorre na interface entre um fluido e um corpo em contato, estando os mesmos a temperaturas diferentes. Esta transmissão de calor entre a superfície sólida e o fluido é consequência do movimento do fluido em relação a superfície.

A transferência de calor por convecção é classificada em convecção natural e convecção forçada. Quando o movimento do fluido resultar dos efeitos de ascensão ou queda provocada pela diferença de densidades causadas pelas diferenças de temperatura no fluido, a transmissão de calor se dá por convecção natural ou livre. Quando o movimento do fluido é induzido artificialmente, tal como uma bomba ou um ventilador, o processo é chamado de convecção forçada.

O calor transmitido por unidade de tempo por convecção entre uma superfície quente a T_q e um fluido a T_f que escoia sobre a mesma, é calculada pela relação:

$$Q_c = h_c A (T_q - T_f) \quad (2.4)$$

Onde: Q_c = calor transmitido por convecção, W;

A = área de transmissão de calor, m^2 .

$(T_q - T_f)$ = diferença de temperatura entre a superfície e o fluido, $^{\circ}C$;

h_c = coeficiente de transferência de calor por convecção, $W/m^2 \text{ } ^\circ C$.

O coeficiente de transmissão de calor " h_c ", varia com diversos fatores, tais como o tipo de fluxo (laminar ou turbulento), com a área de escoamento, com a temperatura média, do modo de como ocorre a convecção, isto é, natural ou forçada, etc. Portanto, o coeficiente de convecção é um fator, cuja determinação é complexa.

2.3.1 - Parâmetros Adimensionais

Devido à complexidade na determinação do coeficiente de transferência de calor por convecção, alguns parâmetros adimensionais tais como: Reynolds (Re), Prandtl (Pr), Rayleigh (Ra) e Grashof (Gr), são utilizados para a determinação de h_c sob diversas condições. Os parâmetros adimensionais, são amplamente discutidos na literatura (KREITH, 1977; HOLMAN, 1980; OZISIK 1985; etc.).

Na prática, o número adimensional de Nusselt, é uma medida conveniente do coeficiente de transmissão de calor por convecção, porque uma vez conhecida o seu valor, o coeficiente de transmissão de calor " h_c " é calculado por:

$$h_c = Nu \frac{k}{L} \quad (2.5)$$

onde : k = condutividade térmica do fluido, $W/m^\circ C$;

L = comprimento característico, m.

2.3.2 - Correlação de Convecção Livre Sobre uma Placa Vertical

OZISIK (1985), apresenta uma correlação proposta por CHURCHILL e CHU (1975) para convecção livre sobre uma placa vertical na condição de superfície isotérmica como:

$$Nu = 0.68 + \frac{0.67 Ra^{1/4}}{\left[1 + (0.492 / Pr)^{9/16}\right]^{4/9}} \quad p/ \quad 10^{-1} < Ra < 10^9 \quad (2.6)$$

O número de Nusselt, na convecção livre sobre um cilindro vertical, é o mesmo que para uma placa vertical, quando a camada limite térmica for muito menor que o raio do cilindro, ou seja, se o efeito das curvaturas forem desprezíveis.

2.3.3 - Correlação da Convecção Livre em Espaços Fechados

Como já foi comentado anteriormente, determinar o coeficiente de convecção é matéria bastante complexa. Na convecção livre em espaços fechados, ainda não são conhecidas correlações de transferência de calor, cobrindo todos os domínios dos parâmetros. Entretanto, há correlações empíricas para algumas situações específicas que podem ser usadas para o cálculo do número Nusselt e conseqüentemente o “ h_c ”.

OZISIK (1985), apresenta uma correlação empírica para uma camada vertical de fluido confinado entre duas placas paralelas de altura “ H ”, e separadas com ar pela distância “ δ ”, cobrindo o intervalo do número de $Ra = 10^2$ até 2×10^7 é dada por:

$$Nu = \left[Nu_1, Nu_2, Nu_3 \right]_{max} \quad (2.7)$$

onde deve ser satisfeita também a razão de aspecto “ a_s ” (razão entre altura das placas e distância entre as mesmas) na faixa:

$$a_S = H/\delta = 5 \text{ até } 110 \quad (2.8)$$

Na Equação (2.8) se deve selecionar o maior dos três números de Nusselt Nu_1 , Nu_2 e Nu_3 , definidos como:

$$Nu_1 = 0.0605 Ra^{1/3} \quad (2.9)$$

$$Nu_2 = \left\{ 1 + \left[\frac{0.104 Ra^{0.293}}{1 + (6310/Ra)^{1.36}} \right]^3 \right\}^{1/3} \quad (2.10)$$

$$Nu_3 = 0.242 \left(\frac{Ra}{a} \right)^{0.272} \quad (2.11)$$

onde:

$$Ra = Gr Pr = \frac{g \beta (T_g - T_f) \delta^3}{\nu^2} Pr \quad (2.12)$$

2.4 - Transferência de Calor por Radiação

Todo corpo com temperatura acima de 0 °K, emite radiação. Haverá troca líquida de calor por radiação entre dois corpos que estão a temperaturas diferentes e “vêm-se” um ao outro. Logo, a radiação é um processo pelo qual o calor é transmitido de um corpo para outro quando os mesmos estão a temperaturas diferentes e quando tais corpos estão separados no espaço, mesmo que exista vácuo entre eles. O termo “radiação”, é geralmente aplicado a todas as espécies de fenômenos de ondas eletromagnéticas, mas na transmissão de calor são de interesse apenas os fenômenos que resultam da diferença de temperatura e que podem transportar energia através de um meio transparente ou através do espaço (KREITH, 1977).

A quantidade de energia que deixa uma superfície como calor radiante, depende da temperatura absoluta e da natureza da superfície. A equação que retrata a perda líquida de

calor por radiação transmitida por unidade de tempo, do corpo a temperatura T_1 para um corpo a temperatura T_2 .

$$Q_r = \sigma A_1 \varepsilon_1 (T_1^4 - T_2^4) \quad (2.13)$$

onde: σ = Constante de Stefan Boltzmann, que vale: $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ (W/m}^2 \cdot \text{K}^4\text{)}$;

ε_1 = emissividade do material 1;

T_i^4 = Temperaturas absolutas dos corpos, elevadas a quarta potência.

Considerando duas superfícies A_1 e A_2 , mantidas às temperaturas absolutas T_1 e T_2 com emissividades ε_1 e ε_2 respectivamente, a situação física implica que parte da radiação que deixa a superfície A_1 atinja a superfície A_2 e o restante perder-se para as vizinhanças. De forma semelhante ocorre com a radiação deixando A_2 . Neste caso, a análise da troca de calor radiante entre duas superfícies deve incluir os efeitos da orientação das superfícies, a contribuição da radiação do meio envolvente e a reflexão da radiação nas superfícies. Admitindo que o fluxo de radiação do meio envolvente é desprezível, a transferência líquida de radiação Q_l na superfície A_1 pode ser expressa na forma:

$$Q_l = F A_1 \sigma (T_1^4 - T_2^4) \quad (2.14)$$

onde, o Fator F inclui os efeitos da orientação das superfícies e suas emissividades.

Para simplificar os cálculos da transferência de calor, é possível, definir um coeficiente de transferência de calor h_r , análogo ao coeficiente de calor por convecção, como:

$$Q_l = h_r A_1 (T_1 - T_2) \quad (2.15)$$

Este conceito é devido à linearização das diferenças de temperaturas absolutas elevadas à quarta potência, e para $|T_1 - T_2| \ll T_1$, pode-se escrever a Equação (2.13) como:

$$Q_1 = A_1 \varepsilon \sigma 4 T_1^3 (T_1 - T_2) \quad (2.16)$$

O coeficiente de transferência de calor radiante pode ser definido como:

$$h_r = 4 T_1^3 \varepsilon \sigma \quad (2.17)$$

Neste trabalho, utilizá-se-a a linearização da equação da transferência de calor, tanto na perda de calor por radiação para o meio externo, quanto na troca de radiação entre os varistores e o invólucro do pára-raios. O fator de forma também foi considerado igual a unidade, no interior do pára-raios, devido à proximidade entre as duas superfícies, e por não haver perdas para o meio envolvente, visto que, a radiação ocorreu num espaço fechado.

2.5 - Modelo Matemático para a Seção de Pára-raios

Apresenta-se a seguir o modelo matemático para a seção de pára-raios utilizada neste trabalho. Um esquema da seção de pára-raios é mostrado na Figura 2.1.

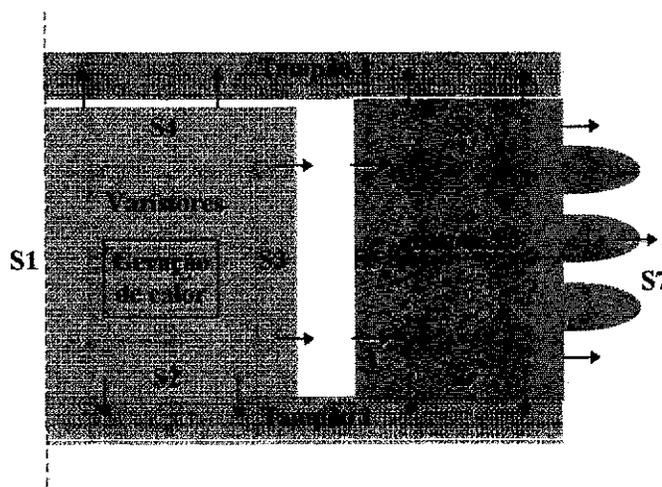


Figura 2.1 - Esquema de uma Seção de Pára-raios com a representação dos fluxos de calor.

No interior dos varistores, há geração de calor, devido a passagem de corrente elétrica. A equação bidimensional que retrata a transferência de calor transiente em coordenadas cilíndricas na região é idêntica a Equação 2.3, ou seja:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{1}{k_v} g(t) = \frac{1}{a_v} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.18)$$

onde a geração de calor varia com o tempo e é obtida da seguinte forma: um determinado valor de tensão é aplicado à seção de pára-raios, com uma determinada corrente inicial. A potência é igual ao produto tensão x corrente. No entanto, a corrente varia consideravelmente nos varistores, com isso a potência aplicada também varia. Para calcular corretamente o valor da potência aplicada ao longo do tempo na seção de pára-raios, são medidos os valores da tensão e da corrente instantâneas e daí calculado o valor da potência instantânea. O valor da potência aplicada em um determinado intervalo de tempo é obtido através da integração dos valores das potências instantâneas.

No interior do invólucro, não há geração de calor, portanto a equação bidimensional que retrata a transferência de calor transiente em coordenadas cilíndricas na região é:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = \frac{1}{a_l} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.19)$$

As fronteiras dos varistores são denominadas de S1, S2, S3 e S4, enquanto que as fronteiras do invólucro são denominadas de S5, S6, S7 e S8, conforme Figura 2.1. Os fluxos de calor nas fronteiras dos varistores e do invólucro são descritos a seguir.

Na linha de simetria (fronteira S1), não há fluxo de calor. A equação que representa esta condição é:

$$-k_v \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{S1} = 0 \quad (2.20)$$

O fluxo de calor que atravessa a fronteira S2, é estimado com base na resistência térmica entre a fronteira S2 e a superfície externa do tampão 1, Figura 2.1. A temperatura da superfície externa do tampão é considerada constante e igual a temperatura ambiente. A equação que representa a condição do fluxo de calor na fronteira S2 é:

$$-k_v \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{S2} = q_{S2} \quad (2.21)$$

onde:

$$q_{S2} = \frac{(T_{i,S2} - T_a)}{(L/k_t)} \quad (2.22)$$

sendo: q_{S2} = Fluxo de calor na fronteira S2;

$T_{i,S2}$ = Temperatura de um ponto i na fronteira S2 dos varistores;

T_a = Temperatura na superfície externa do tampão, igual a temperatura ambiente;

L/k_t = Resistência térmica por unidade de área entre a fronteira S2 e a superfície externa do tampão 1.

A condição de contorno na fronteira S3 dos varistores, está subordinada a transferência de calor por radiação e convecção entre a fronteira S3 dos varistores e a fronteira S5 do invólucro, conforme Figura 2.1. A equação que retrata esta condição é:

$$k_v \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{S3} = h_c (T_{i,S3} - T_{i,S5}) + h_r (T_{i,S3} - T_{i,S5}) \quad (2.23)$$

onde: h_c = Coeficiente de convecção;

$h_r = 4\varepsilon\sigma T_{i,S3}^3$, Coeficiente de radiação linearizado;

$T_{i,S3}$ = Temperatura de um ponto i sobre a fronteira S3;

$T_{i,S5}$ = Temperatura de um ponto i sobre a fronteira S5;

O fluxo de calor que atravessa a fronteira S4, é estimado com base na resistência térmica entre a fronteira S4 e a superfície externa do tampão 2, Figura 2.1. A temperatura da superfície externa do tampão é considerada constante e igual a temperatura ambiente. A equação que representa a condição do fluxo de calor na fronteira S4 é:

$$k_v \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{S4} = q_{S4} \quad (2.24)$$

onde:

$$q_{S4} = \frac{(T_{i,S4} - T_a)}{\left[\left(\frac{1}{h_c + h_r} \right) + (L/k_t) \right]} \quad (2.25)$$

sendo: q_{S4} = Fluxo de calor na fronteira S4;

$T_{i,S4}$ = Temperatura de um ponto i na fronteira S4 dos varistores;

T_a = Temperatura na superfície externa do tampão 2, igual a temperatura ambiente;

$\left(\frac{1}{h_c + h_r} \right) + (L/k_t)$ = Resistência térmica por unidade de área entre a fronteira S4

e a superfície externa do tampão 2.

A condição de contorno na fronteira S5 do invólucro, está subordinada a transferência de calor por radiação e convecção entre a fronteira S3 dos varistores e a fronteira S5 do invólucro, conforme Figura 2.1. A equação que retrata esta condição é:

$$-k_t \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{S5} = h_c (T_{i,S5} - T_{i,S3}) + h_r (T_{i,S5} - T_{i,S3}) \quad (2.26)$$

onde: h_c = Coeficiente de convecção;

$h_r = 4\varepsilon\sigma T_{i,S5}^3$, Coeficiente de radiação linearizado;

O fluxo de calor que atravessa a fronteira S6, é estimado com base na resistência térmica entre a fronteira S6 e a superfície externa do tampão 1, conforme Figura 2.1. A temperatura da superfície externa do tampão é considerada constante e igual a temperatura ambiente. A equação que representa a condição do fluxo de calor na fronteira S6 é:

$$-k_l \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{S6} = q_{S6} \quad (2.27)$$

onde:

$$q_{S6} = \frac{(T_{i,S6} - T_a)}{(L/k_l)} \quad (2.28)$$

sendo: q_{S6} = Fluxo de calor na fronteira S6;

$T_{i,S6}$ = Temperatura de um ponto i na fronteira S6 do invólucro;

T_a = Temperatura na superfície externa do tampão, igual a temperatura ambiente;

L/k_l = Resistência térmica por unidade de área entre a fronteira S6 e a superfície externa do tampão 1.

A condição de contorno na fronteira S7 do invólucro, está subordinada a transferência de calor por radiação e convecção entre a fronteira S7 do invólucro e o ambiente, Figura 2.1. A equação que retrata esta condição é:

$$k_i \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{75} = h_c (T_{i,S7} - T_a) + h_r (T_{i,S7} - T_a) \quad (2.29)$$

onde: h_c = Coeficiente de convecção;

$h_r = 4\varepsilon\sigma T_{i,S7}^3$, Coeficiente de radiação linearizado;

O fluxo de calor que atravessa a fronteira S8, é estimado com base na resistência térmica entre a fronteira S8 e a superfície externa do tampão 2, Figura 2.1. A temperatura

da superfície externa do tampão é considerada constante e igual a temperatura ambiente. A equação que representa a condição do fluxo de calor na fronteira S8 é:

$$k_1 \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{S8} = q_{S8} \quad (2.30)$$

onde:

$$q_{S8} = \frac{(T_{i,S8} - T_a)}{(L/k_1)} \quad (2.31)$$

sendo: q_{S8} = Fluxo de calor na fronteira S8;

$T_{i,S8}$ = Temperatura de um ponto i na fronteira S8 do invólucro;

T_a = Temperatura na superfície externa do tampão, igual a temperatura ambiente;

L/k_1 = Resistência térmica por unidade de área entre a fronteira S8 e a superfície externa do tampão 2.

CAPÍTULO III

TRANSFORMAÇÃO DE COORDENADAS, GERAÇÃO DE MALHA E PROGRAMA COMPUTACIONAL

3.1 - Introdução

A solução de problemas de transferência de calor pode ser obtida de expressões analíticas ou por métodos numéricos. Entretanto, há problemas de transferência de calor onde a resolução analítica é bastante difícil. A utilização de técnicas numéricas para a solução de problemas complexos, tornou-se uma realidade, sobretudo com o desenvolvimento de computadores de alta velocidade e grande capacidade de armazenamento.

A utilização do Método de Diferenças Finitas para resolver problemas de transferência de calor em geometrias regulares apresenta grande simplicidade computacional. No entanto, o método de diferenças finitas tradicional mostra-se inconveniente para solucionar problemas sobre formas geométricas complexas.

Os sistemas coordenados utilizados são geralmente os ortogonais convencionais, como o cartesiano, cilíndrico e o esférico, causando dificuldades para a interpolação das condições de contorno, conforme pode ser visto na Figura 3.1-a. Além da falta de precisão

na aplicação das condições de contorno, fica difícil produzir um programa computacional mais geral devido à irregularidade dos elementos nas fronteiras.

Os pára-raios ou as suas seções de teste são constituídos de uma ou mais colunas de varistores envolvidos por um invólucro de porcelana ou material polimérico. Os varistores são espaçados do invólucro por um anel cilíndrico de ar. O anel cilíndrico de ar serve de conduto para a válvula de alívio de pressão no caso de uma descarga interna. O invólucro dos equipamentos elétricos são normalmente aletados, pois os equipamentos geralmente são utilizados em campo aberto, sujeitos a intempéries. As aletas são necessárias para evitar um curto circuito devido a chuva, já que os pára-raios estão conectados entre a linha elétrica e a terra. Além de que as aletas aumentam o caminho de uma possível descarga externa. Assim a solução de problemas de transferência de calor em um pára-raios com o método tradicional de diferenças finitas torna-se deficiente. Tais dificuldades e imprecisões, para solucionar problemas com o tradicional Método de Diferenças Finitas em regiões de geometrias irregulares, podem ser evitadas com a utilização de transformação de coordenadas. Com a transformação de coordenadas pode-se mapear regiões irregulares no domínio físico (domínio real) em regiões com geometrias regulares sobre um domínio chamado computacional.

O uso de transformação de coordenadas e mapeamento de região irregular em uma região regular no domínio computacional não é novo. Muitas transformações estão disponíveis, nas quais coordenadas físicas e computacionais são relacionadas dentro de expressões algébricas. Mas, tais transformações são muito difíceis de construir, exceto para alguns casos relativamente simples; para muitos casos multi-dimensionais é impossível encontrar uma solução.

A técnica de transformação de coordenadas referenciada por OZISIK (1994) e desenvolvida por THOMPSON (1977) minimiza tais dificuldades porque a transformação é obtida automaticamente da solução de equações diferenciais parciais sobre o domínio computacional regular.

Uma malha curvilínea pode ser gerada sobre o domínio físico, através da utilização da técnica de transformação de coordenada. Cada família das linhas coordenadas curvilíneas (ξ ou η) é coincidente com o contorno da fronteira do domínio físico. A técnica também é chamada de Método de Coordenadas Ajustadas à Fronteira (“Boundary-Fitted Coordinates Method”). A Figura 3.1-b mostra um exemplo do método de coordenadas ajustadas à fronteira onde todos os volumes de controle nas fronteiras são inteiros.

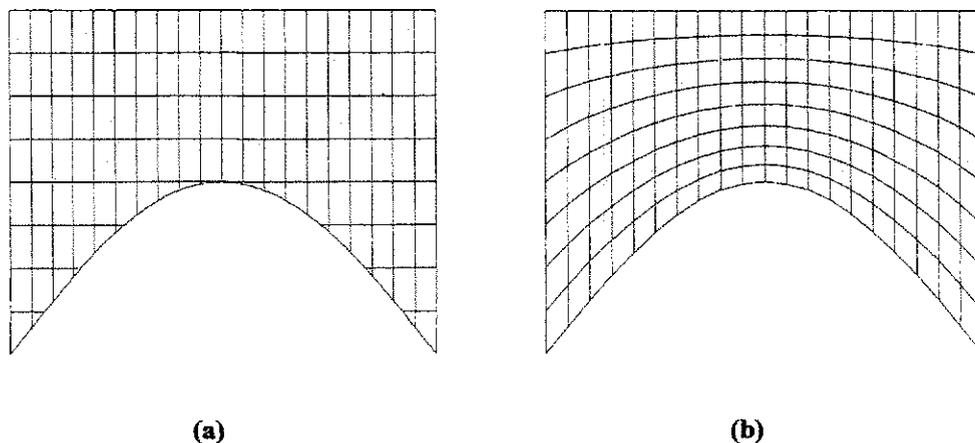


Figura 3.1 - Discretização cartesiana (a) e coincidente com a fronteira (b).

Para ilustrar os conceitos básicos na implementação desta técnica, considere uma região bidimensional com (x,y) sendo as coordenadas no domínio físico e (ξ,η) no plano computacional. Os passos básicos no método de Thompson podem ser resumidos como:

- 1- A relação de transformação para o mapeamento do domínio (x,y) para o domínio (ξ,η) (ou vice-versa) é determinada através da solução numérica de duas equações diferenciais elípticas de Laplace ou Poisson.
- 2- A região física irregular é mapeada do domínio físico (x,y) em uma região regular no domínio (ξ,η) . Qualquer sistema de coordenadas pode ser usado no domínio físico e computacional, respeitadas as peculiaridades de cada sistema coordenado e a conveniência de empregá-lo no problema em questão.
- 3- As equações diferenciais parciais que governam o fenômeno físico são transformadas das variáveis independentes (x,y) do domínio físico para as variáveis independentes (ξ,η) do domínio computacional.
- 4- Uma vez transformadas, as equações são resolvidas no domínio computacional, a solução é transformada do domínio computacional (ξ,η) para o domínio (x,y) pela relação de transformação previamente desenvolvida.

Fica claro, que a técnica baseia-se na construção de curvas das coordenadas curvilíneas ξ,η dentro do domínio físico, de tal maneira que um membro de cada família das linhas de coordenadas curvilínea é coincidente com a apropriada condição de contorno do domínio físico (forma irregular).

3.2 - Conceitos Básicos de Mapeamento e Geração Numérica de Malha

A compreensão dos conceitos básicos no mapeamento e desenvolvimento de coordenadas curvilíneas, é facilitada, considerando um domínio físico bidimensional nas coordenadas cartesianas (x,y) e um domínio computacional nas coordenadas generalizadas (ξ,η) . A transformação entre as coordenadas (x,y) e (ξ,η) deve ser tal que, as fronteiras do domínio físico coincidam com linhas de coordenadas curvilínea ξ ou η ; portanto, não precisam de interpolação nos pontos da fronteira.

As geometrias físicas a serem transformadas no domínio computacional, podem ser distinguidas basicamente em duas categorias: Geometrias Simplesmente Conexas e Geometrias Multiplamente Conexas.

3.2.1 - Geometrias Simplesmente Conexas

Seja uma geometria irregular ($ABCD$) no domínio físico nas coordenadas (x,y) , como mostra a Figura 3.2-a. A geometria é chamada simplesmente conexa porque não contém obstáculos em seu interior.

A geometria pode ser mapeada no domínio computacional nas coordenadas (ξ,η) , de modo que a geometria mapeada tenha uma forma retangular e permita a construção de uma malha uniforme, conforme pode ser visto na Figura 3.2-b. Uma maneira de executar o mapeamento é fixar valores de ξ,η ao longo das fronteiras da região física do seguinte modo:

Fixa-se η e varia ξ monotonamente ao longo das fronteiras dos segmentos AB e DC da região física; e fixa-se ξ e varia η monotonamente ao longo das fronteiras dos segmentos BC e AD da região física.

Desta forma, os segmentos AB e DC da região física são mapeados no domínio computacional como linhas horizontais, enquanto os segmentos BC e AD são mapeados no domínio computacional como linhas verticais. No entanto, o mapeamento precisa satisfazer os seguintes requisitos:

- As linhas de coordenadas da mesma família (isto é, ξ ou η) não podem de cruzar.
- As linhas de coordenadas de famílias diferentes não podem se cruzar mais do que uma vez.

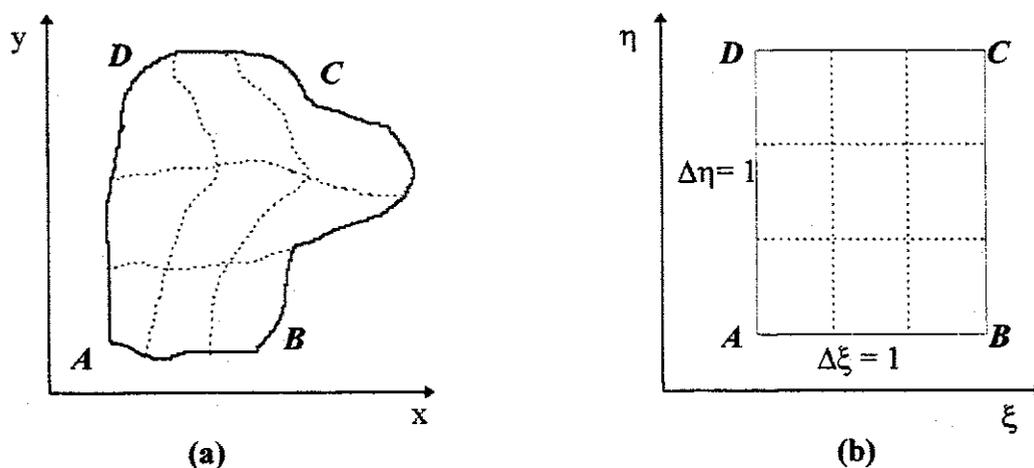


Figura 3.2 -Mapeamento de uma geometria simplesmente conexa irregular para uma geometria regular no domínio computacional.

No intuito de satisfazer estas exigências, uma organização conveniente dos pontos da malha ao longo da fronteira da região física é necessária. Isto é, se I pontos são colocados ao longo da fronteira inferior do domínio físico (segmento AB), I pontos devem também ser colocados ao longo da fronteira superior (segmento DC) do domínio físico. Analogamente, se J pontos de malha são colocados ao longo do segmento de fronteira direito BC do domínio físico, J pontos devem também ser colocados ao longo do segmento de fronteira esquerdo DA .

Os valores de ξ e η do domínio computacional são arbitrários. Logo, pode-se selecionar as coordenadas do nó A no domínio computacional como $\xi = \eta = 1$ e o tamanho da malha como $\Delta\xi = \Delta\eta = 1$. No domínio computacional pode-se construir uma malha uniforme sobre uma geometria retangular transformada.

Vale salientar que, no plano físico, as linhas coordenadas podem assumir espaçamentos arbitrários, enquanto no plano computacional $\Delta\xi$ e $\Delta\eta$ continuarão sendo unitários. As métricas de transformação encarregar-se-ão de fazer as devidas compensações para que, nas equações diferenciais, tenha-se sempre os comprimentos reais do plano físico.

Na ilustração anterior de mapeamento (Figura 3.2), uma região irregular no domínio físico é mapeada em uma região regular no plano computacional. Entretanto, uma mesma geometria pode ser mapeada de maneiras diferentes. Para ilustrar esta afirmativa, considera-se um triângulo sendo mapeado com dois sistemas de coordenadas generalizadas diferentes, conforme pode ser visto nas Figuras 3.3 e 3.4.

A escolha do sistema mais adequado a uma determinada geometria depende do problema físico, isto é, das suas peculiaridades.

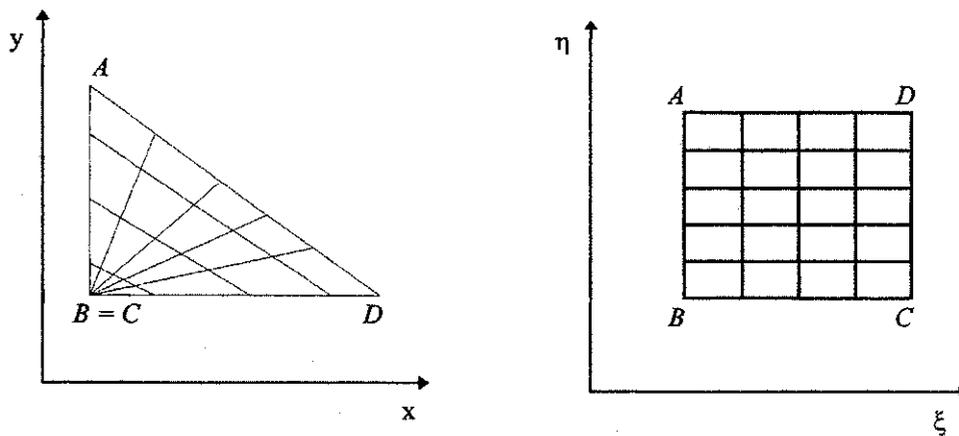


Figura 3.3 - Mapeamento de um triângulo no plano físico para um retângulo no plano computacional (MALISKA, 1995).

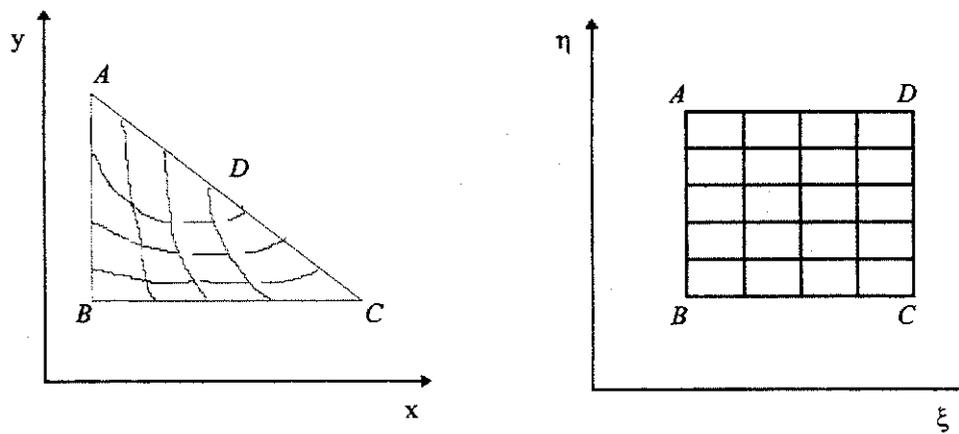


Figura 3.4 - Mapeamento de um triângulo no plano físico para um retângulo no plano computacional (MALISKA, 1995).

3.2.2 - Geometrias Multiplamente Conexas

Há geometrias que apresentam furos no seu interior. Tais geometrias são chamadas de Duplamente Conexas ou Multiplamente Conexas. A geometria irregular no plano físico com um obstáculo no interior, como ilustra a Figura 3.5-a, é uma exemplo de uma geometria duplamente conexa. Quando existe mais de um obstáculo dentro da geometria, a região é designada de Multiplamente Conexas. Geralmente há duas possibilidades para o mapeamento da geometria multiplamente conexa.

Na primeira configuração, a região física irregular duplamente conexa é mapeada no domínio computacional como uma geometria regular duplamente conexa, como uma janela retangular como mostra a Figura 3.5-b. Isto é conseguido fixando os valores de ξ, η ao longo da fronteira da região física da seguinte forma:

Fixa-se, η e varia ξ monotonamente ao longo dos segmentos de fronteira AB , DC , EF e HG da região física; e fixa-se ξ e varia η monotonamente ao longo dos segmentos de fronteira AD , BC , EH e FG da região física.

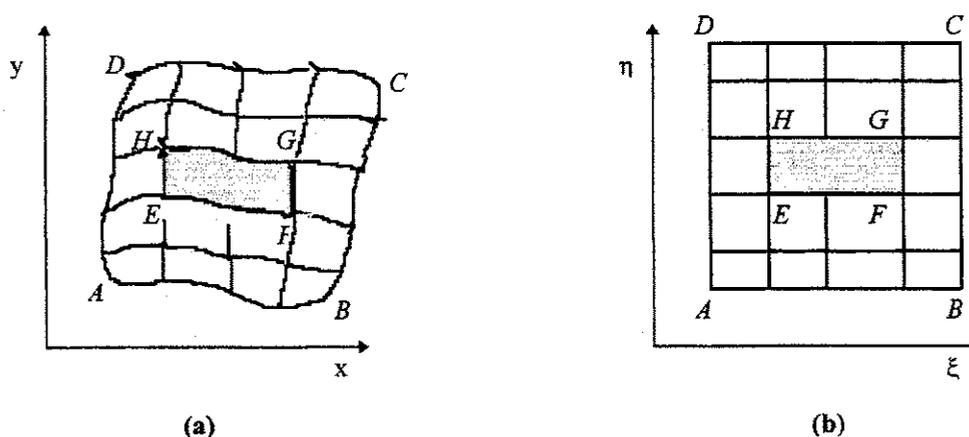


Figura 3.5 - Mapeamento de uma região irregular duplamente conexa em uma região regular duplamente conexa (MALISKA, 1995).

Na segunda configuração, a geometria irregular duplamente conexa é mapeada num plano computacional como uma região retangular simplesmente conexa, usando para isso um corte, como pode ser visto na Figura 3.6, OZISIK (1994).

O esquema no topo da Figura 3.6, mostra como duas pseudo fronteiras BC e AD são geradas pelo corte. O esquema central da figura mostra o processo de extensão e o esquema inferior mostra o mapeamento final na forma de uma região retangular simplesmente conexa.

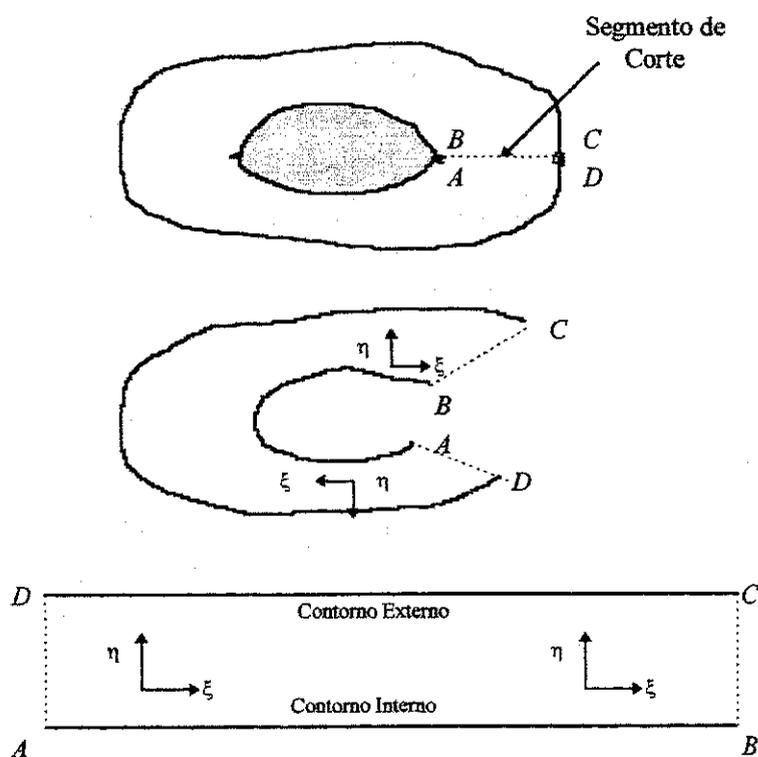


Figura 3.6 - Mapeamento de uma região duplamente conexa em uma região simplesmente conexa usando um corte, (OZISIK, 1994).

3.3 - Geração Numérica de Malha

3.3.1 - Malhas Estruturadas e Não-estruturadas

A geração numérica de malha pode ser feita com uma discretização através de sistemas de coordenadas ou através de subdivisão do domínio sem obedecer uma seqüência natural. A Figura 3.7-a mostra uma discretização estruturada, uma vez que cada volume interno tem sempre o mesmo número de volumes vizinhos e a numeração dos mesmos tem uma seqüência natural. Este tipo de discretização apresenta vantagens para a implementação do programa computacional, pois a regra de ordenação dos pontos simplifica todas as rotinas.

As malhas não-estruturadas, por outro lado são mais versáteis, com mais facilidade para adaptações. Apresentam entretanto, a dificuldade de ordenação. A Figura 3.7-b mostra uma malha não-estruturada onde pode-se perceber que é difícil, estabelecer uma regra de ordenação.

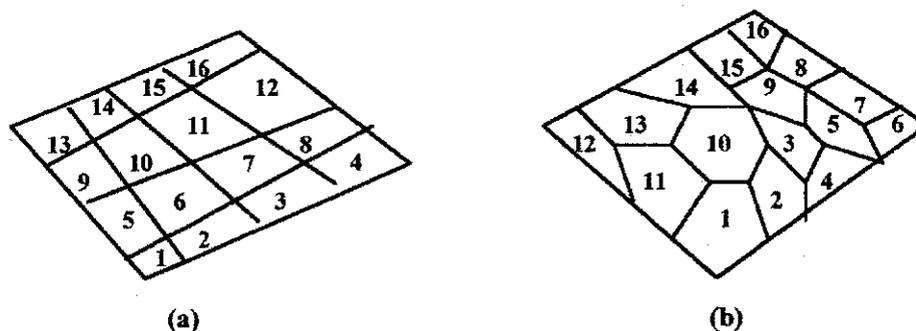


Figura 3.7 - Discretização estruturada (a) e não-estruturada (b), MALISKA (1995).

Existe, portanto, vantagens e desvantagens em cada uma das discretizações. Neste trabalho, utilizou-se malhas estruturadas com emprego da técnica de transformação e mapeamento desenvolvida por Thompson para diferenças finitas.

3.3.2 - Geração da Malha

A geração numérica de malha com a técnica desenvolvida por Thompson, diferem dos mapeamentos convencionais porque a transformação de coordenadas é determinada automaticamente pela solução por diferenças finitas de equações diferenciais parciais.

Geralmente, para obter as transformações de coordenadas utiliza-se as equações parciais elípticas de Poisson ou Laplace. As equações de Poisson e Laplace são usadas para as transformações por causa das suas propriedades de suavização, ou seja, a solução obtida da equação elíptica não propaga as descontinuidades da fronteira no campo de coordenadas. Vale salientar que todos os problemas de campo, como escoamento potencial, campos elétricos, condução de calor, etc., são governados por equações diferenciais parciais elípticas e, portanto, possuem com soluções, iso-superfícies que podem ser empregadas como superfícies coordenadas.

Uma região bidimensional irregular no plano físico, em coordenadas cilíndricas (r,y) , pode ser mapeada em uma região regular no plano computacional, em coordenadas generalizadas (ξ,η) , através da especificação dos valores das coordenadas ξ e η em todos os segmentos da fronteira da geometria física como: η constante e ξ variando monotonamente e vice-versa. Como resultado, a correspondência entre as coordenadas (r,y) e (ξ,η) são conhecidas em todos os segmentos da fronteira da região nos domínios físico e computacional.

O problema matemático da transformação de coordenadas consiste na determinação da correspondência entre as coordenadas (r,y) e (ξ,η) nos pontos internos das regiões física e computacional.

A base para estabelecer tal transformação, faz-se as coordenadas (ξ, η) satisfazerem às duas equações de Poisson sobre a região interna do plano físico:

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 \eta}{\partial y^2} = P(\xi, \eta) \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial^2 \eta}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 \xi}{\partial y^2} = Q(\xi, \eta). \quad (3.2)$$

Onde, os termos não-homogêneos $P(\xi, \eta)$ e $Q(\xi, \eta)$ são chamados de funções de controle.

As condições de contorno necessárias para resolver as Equações (3.1) e (3.2) são determinadas pelos segmentos da fronteira do plano físico, onde os valores de ξ, η são especificados.

A seleção apropriada das funções $P(\xi, \eta)$ e $Q(\xi, \eta)$, permite que as linhas de coordenadas de ξ e η possam ser concentradas. As funções podem ser utilizadas, por exemplo, para concentrar linhas em regiões onde o gradiente da variável física é grande. Na ausência das funções $P(\xi, \eta)$ e $Q(\xi, \eta)$, ou seja, $P = Q = 0$, as linhas de coordenadas tendem a ser igualmente espaçadas nas regiões longe das fronteiras, independente da concentração de pontos da malha ao longo da fronteira.

As Equações (3.1) e (3.2) no plano físico fornecem a transformação das coordenadas entre os sistemas (r, y) e (ξ, η) . No entanto, é conveniente que tais equações sejam resolvidas no plano computacional (ξ, η) , já que a região transformada tem uma geometria regular. Portanto, o problema é procurar os valores de (r, y) do domínio físico que correspondam as coordenadas (ξ, η) no domínio computacional.

Transformando as Equações (3.1) e (3.2) para o domínio computacional, obtêm-se:

$$\alpha \frac{\partial^2 r}{\partial \xi^2} - 2\beta \frac{\partial^2 r}{\partial \xi \partial \eta} + \gamma \frac{\partial^2 r}{\partial \eta^2} + J^2 \left(P \frac{\partial r}{\partial \xi} + Q \frac{\partial r}{\partial \eta} \right) = 0 \quad (3.3)$$

$$\alpha \frac{\partial^2 y}{\partial \xi^2} - 2\beta \frac{\partial^2 y}{\partial \xi \partial \eta} + \gamma \frac{\partial^2 y}{\partial \eta^2} + J^2 \left(P \frac{\partial y}{\partial \xi} + Q \frac{\partial y}{\partial \eta} \right) = 0 \quad (3.4)$$

onde os coeficientes geométricos α , β , γ e o jacobiano J são dados por:

$$\alpha = \left(\frac{\partial r}{\partial \eta} \right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial \eta} \right)^2 \quad (3.5)$$

$$\beta = \left(\frac{\partial r}{\partial \xi} \right) \left(\frac{\partial r}{\partial \eta} \right) + \left(\frac{\partial y}{\partial \xi} \right) \left(\frac{\partial y}{\partial \eta} \right) \quad (3.6)$$

$$\gamma = \left(\frac{\partial r}{\partial \xi} \right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial \xi} \right)^2 \quad (3.7)$$

$$J = \frac{\partial r}{\partial \xi} \frac{\partial y}{\partial \eta} - \frac{\partial r}{\partial \eta} \frac{\partial y}{\partial \xi} \quad (3.8)$$

Os coeficientes α , β , γ são responsáveis pelas relações geométricas entre os domínios computacional e físico.

Os coeficientes geométricos da transformação α , β , γ bem como o jacobiano tem significado físico importantíssimo e o seu conhecimento é necessário. De forma que, sabendo-se interpretar geometricamente a transformação, haverá uma grande facilidade em encontrar prováveis erros nos programas computacionais.

O coeficiente α , como definido, está relacionada com um comprimento ao longo do eixo coordenado η . O coeficiente γ , como definido, está relacionada com um comprimento ao longo do eixo coordenado ξ . O coeficiente β , mede o grau de não-ortogonalidade entre as linhas ξ e η , ou seja, quando ξ e η são ortogonais em um determinado ponto, tem-se $\beta = 0$. O Jacobiano J da transformação, como definido, representa a área do elemento (ponto nodal) plano físico.

Assim, o problema matemático definido pelas Equações Diferenciais Parciais (3.3) e (3.4) e sujeitas às condições de contorno apropriadas, constitui o Problema de Valor de Contorno da Geração Numérica de Malha. A solução do problema estabelece os valores das coordenadas (r,y) em cada ponto da malha (ξ,η) no plano computacional.

Os cálculos são geralmente realizados com o uso de diferenças finitas usando fórmulas de diferenças centradas, para produzir expressões algébricas associadas, que são resolvidas em r_{ij} e y_{ij} , em cada ponto da malha ξ,η .

A seguir apresenta-se o resumo das condições de contorno mais usadas para a solução de problema de geração de malha.

1- Condição de Contorno de Primeiro Tipo: Em muitas aplicações, os valores das coordenadas (r,y) da fronteira do domínio físico são especificados. Portanto, o problema de geração de malha resume-se na solução das equações (3.3) e (3.4) para os pontos internos, sujeitas aos valores prescritos de (r,y) na fronteira.

2- Condição de Contorno Homogênea de Segundo Tipo: A condição de contorno de segundo tipo é utilizada em situações em que as linhas ξ ou (η) da malha são requeridas a interceptar alguns pontos dos segmentos de fronteira no domínio físico em ângulo especificado. A condição de ortogonalidade impõe que as linhas de ξ ou (η) interceptem o segmento da fronteira física perpendicularmente. Neste caso, a expressão matemática para implementar tal exigência é:

$$\frac{\partial r}{\partial \xi} \frac{\partial r}{\partial \eta} + \frac{\partial y}{\partial \xi} \frac{\partial y}{\partial \eta} = 0 \quad (3.9)$$

A importância da condição de ortogonalidade reside no fato que, erros de truncamento são introduzidos em expressões com diferenças finitas, quando o ângulo de interseção das linhas ξ ou (η) se afastam da ortogonalidade. Mastin citado por OZISIK (1994) examinou as fontes de erros de truncamento em soluções numéricas de equações parciais com sistemas de coordenadas curvilíneas e concluiu que os erros de truncamento não dependem apenas da ordem das derivadas e do espaçamento da malha, mas também do afastamento da ortogonalidade. Um pequeno grau de não-ortogonalidade tem efeito desprezível no erro de truncamento, mas, o aumento do grau de não-ortogonalidade, aumenta o erro de truncamento.

3.4 - Funções de Controle

O uso de funções de controle $P(\xi, \eta)$ e $Q(\xi, \eta)$ é útil para concentrar linhas da malha em determinadas regiões de interesse. Thompson especifica as funções $P(\xi, \eta)$ e $Q(\xi, \eta)$ na forma:

$$P(\xi, \eta) = -\sum_{i=1}^n a_i \operatorname{sign}(\xi - \xi_i) \exp(-c_i |\xi - \xi_i|) - \sum_{i=1}^m b_i \operatorname{sign}(\xi - \xi_i) \exp\left(-d_i \sqrt{(\xi - \xi_i)^2 + (\eta - \eta_i)^2}\right) \quad (3.10)$$

$$Q(\xi, \eta) = -\sum_{i=1}^n a_i^* \operatorname{sign}(\eta - \eta_i) \exp(-c_i^* |\eta - \eta_i|) - \sum_{i=1}^m b_i^* \operatorname{sign}(\eta - \eta_i) \exp\left(-d_i^* \sqrt{(\xi - \xi_i)^2 + (\eta - \eta_i)^2}\right), \quad (3.11)$$

Os significados físicos dos vários termos nas equações acima são os seguintes: no primeiro somatório da Equação (3.10), a amplitude a_i é a atração de linhas de $\xi = \text{constante}$ na direção de $\xi = \xi_i$. No segundo somatório da Equação (3.10), a amplitude b_i é a atração de linhas $\xi = \text{constante}$ na direção do ponto (ξ_i, η_i) . A Figura 3.8 mostra os efeitos da função de controle sobre as linhas de $\xi = \text{constante}$ na direção das coordenadas da linha $\xi = \xi_i$ e do ponto (ξ_i, η_i) .

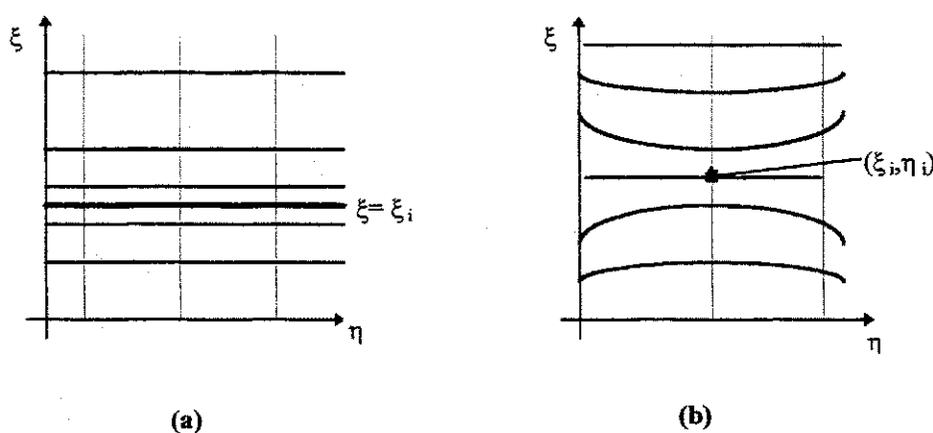


Figura 3.8 - Atração de linha $\xi = \text{constante}$: (a) linha de coordenada $\xi = \xi_i$, (b) ponto de coordenada (ξ_i, η_i) , OZISIK (1994).

Os índices dos somatórios n e m (ou n^* e m^*) indicam o número de linhas e de pontos de concentração, respectivamente. A função sinal “ $sign(\xi - \xi_i)$ ” garante que a atração de linhas de ξ ocorra dos dois lados da linha $\xi = \xi_i$, ou do ponto (ξ_i, η_i) . Sem a função sinal, a atração ocorreria apenas no lado em que ξ é maior que ξ_i , com repulsão ocorrendo do outro lado. Os coeficientes c_i , c_i^* e d_i , d_i^* , correspondem ao decaimento de atração, enquanto a_i , a_i^* e b_i , b_i^* são coeficientes de amplitude.

Analogamente, para a Equação (3.11), os somatórios e os coeficientes representam os mesmos significados físicos de atração, trocando-se apenas as linhas de coordenadas ξ pelas linhas de coordenadas η .

3.5 - Relações de Transformações

Existem diversas relações de transformação das equações diferenciais parciais entre as coordenadas do plano físico (r, y) e as coordenadas do plano computacional (ξ, η) . Entretanto, será apresentado um resumo das relações no sistema bidimensional utilizadas neste trabalho.

As relações partem da seguinte transformação:

$$r \equiv r(\xi, \eta) \quad \text{e} \quad y \equiv y(\xi, \eta) \quad (3.12)$$

a transformação inversa é dada por:

$$\xi \equiv \xi(r, y) \quad \text{e} \quad \eta \equiv \eta(r, y) \quad (3.13)$$

O jacobiano da transformação é dado por Curant citado por OZISIK (1994) como:

$$J = J\left(\begin{matrix} r, y \\ \xi, \eta \end{matrix}\right) = \begin{vmatrix} r_\xi & y_\xi \\ r_\eta & y_\eta \end{vmatrix} = r_\xi y_\eta - r_\eta y_\xi \neq 0 \quad (3.14)$$

onde os subscritos denotam a diferenciação com respeito as variáveis consideradas, ou seja:

$$r_\xi = \frac{\partial r}{\partial \xi}, \quad y_\eta = \frac{\partial y}{\partial \eta}, \quad r_\eta = \frac{\partial r}{\partial \eta} \quad \text{e} \quad y_\xi = \frac{\partial y}{\partial \xi} \quad (3.15)$$

as derivadas r_ξ , r_η , y_ξ e y_η são chamadas de derivadas computacionais.

As relações de transformação podem ser desenvolvidas pela aplicação da regra da cadeia de diferenciação. A primeira derivada, pela regra da cadeia de diferenciação pode se escrita como:

$$\frac{\partial T}{\partial r} = \xi_r \frac{\partial T}{\partial \xi} + \eta_r \frac{\partial T}{\partial \eta} \quad (3.16)$$

$$\frac{\partial T}{\partial y} = \xi_y \frac{\partial T}{\partial \xi} + \eta_y \frac{\partial T}{\partial \eta} \quad (3.17)$$

trocando r por ξ e y por η , obtem-se:

$$\frac{\partial T}{\partial \xi} = r_\xi \frac{\partial T}{\partial r} + y_\xi \frac{\partial T}{\partial y} \quad (3.18)$$

$$\frac{\partial T}{\partial \eta} = r_\eta \frac{\partial T}{\partial r} + y_\eta \frac{\partial T}{\partial y} \quad (3.19)$$

A solução das Equações (3.18) e (3.19) para $\partial T/\partial r$ e $\partial T/\partial y$, utilizando a regra de Cramer, fornece as seguintes relações de transformação:

$$\frac{\partial T}{\partial r} = \frac{1}{J} \left(y_\eta \frac{\partial T}{\partial \xi} - y_\xi \frac{\partial T}{\partial \eta} \right) \quad (3.20)$$

$$\frac{\partial T}{\partial y} = \frac{1}{J} \left(-r_\eta \frac{\partial T}{\partial \xi} + r_\xi \frac{\partial T}{\partial \eta} \right) \quad (3.21)$$

A comparação das Equações (3.16) e (3.17) com as Equações (3.20) e (3.21) respectivamente fornece:

$$\xi_r = \frac{1}{J} y_{\eta}, \quad \xi_y = -\frac{1}{J} r_{\eta}, \quad \eta_r = -\frac{1}{J} y_{\xi} \quad \text{e} \quad \eta_y = \frac{1}{J} r_{\xi} \quad (3.22)$$

As derivadas ξ_r , ξ_y , η_r e η_y são chamadas de métricas.

A transformação da segunda derivada pode ser obtida pela utilização das relações de transformação da primeira derivada e da regra da cadeia de diferenciação. OZISIK (1994), apresenta algumas relações de transformação das coordenadas (r,y) para (ξ,η) , para o Laplaciano e as derivadas normais na forma não-conservativa. Na forma não-conservativa, os termos que não representam a variável em questão, ficam fora do sinal da derivada.

Laplaciano, considerando o operador Laplaciano:

$$\nabla^2 \equiv \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \quad (3.23)$$

a relação de transformação, na forma não-conservativa para este operador na variável T é:

$$\nabla^2 T = \frac{1}{J^2} \left[\alpha T_{\xi\xi} - 2\beta T_{\xi\eta} + \gamma T_{\eta\eta} \right] + \left[(\nabla^2 \xi) T_{\xi} + (\nabla^2 \eta) T_{\eta} \right] \quad (3.24)$$

onde os coeficientes geométricos α , β , γ e o jacobiano J já foram definidos anteriormente.

Derivadas Normais à Superfície, a derivada normal de T, na forma não-conservativa

com relação a uma linha de ξ constante é:

$$\frac{\partial T}{\partial n^{(\xi)}} = \frac{1}{J\sqrt{\alpha}} \left(\alpha T_{\xi} - \beta T_{\eta} \right) \quad (3.25)$$

e ao longo de uma linha de η constante a derivada normal é:

$$\frac{\partial T}{\partial n^{(\eta)}} = \frac{1}{J\sqrt{\gamma}} \left(-\beta T_{\xi} + \gamma T_{\eta} \right) \quad (3.26)$$

3.6 - Representação das Derivadas em Diferenças Finitas

Apresenta-se a seguir várias discretizações das derivadas parciais, com erro de segunda ordem, em relação a uma propriedade qualquer e com $\Delta\xi = \Delta\eta = 1$.

3.6.1 - Discretizações Centradas

A Figura 3.9 mostra a localização dos pontos da propriedade f . As Equações (3.27 e 3.28) são as discretizações centradas da derivada primeira, enquanto que as Equações (3.29 a 3.31) são discretizações da derivada segunda.

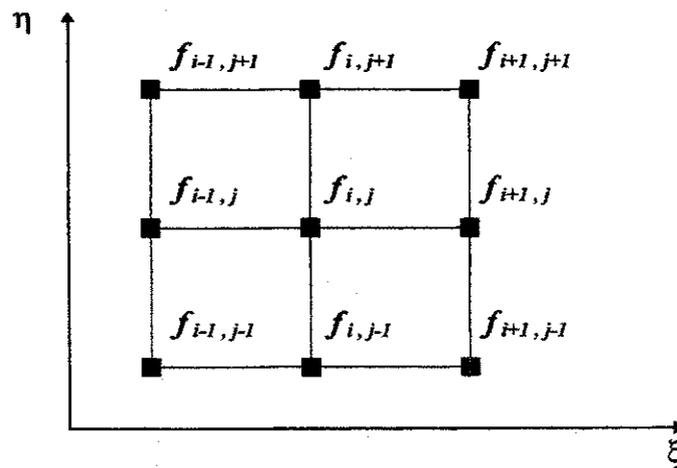


Figura 3.9 - Localização dos pontos para diferenciação da propriedade f , onde o índice i varia ao longo do eixo ξ e o índice j varia ao longo do eixo η .

$$\left. \frac{\partial f}{\partial \xi} \right|_{i,j} = (f_{\xi})_{i,j} = \frac{1}{2}(f_{i+1,j} - f_{i-1,j}) \quad (3.27)$$

$$\left. \frac{\partial f}{\partial \eta} \right|_{i,j} = (f_{\eta})_{i,j} = \frac{1}{2}(f_{i,j+1} - f_{i,j-1}) \quad (3.28)$$

$$\frac{\partial^2 f}{\partial \xi^2} \Big|_{i,j} = (f_{\xi\xi})_{i,j} = (f_{i+1,j} - 2f_{i,j} + f_{i-1,j}) \quad (3.29)$$

$$\frac{\partial^2 f}{\partial \eta^2} \Big|_{i,j} = (f_{\eta\eta})_{i,j} = (f_{i,j+1} - 2f_{i,j} + f_{i,j-1}) \quad (3.30)$$

$$\frac{\partial^2 f}{\partial \xi \partial \eta} \Big|_{i,j} = (f_{\xi\eta})_{i,j} = \frac{1}{4}(f_{i+1,j+1} - f_{i-1,j+1} - f_{i+1,j-1} + f_{i-1,j-1}) \quad (3.31)$$

3.6.2 - Discretizações Atrasadas

As Equações (3.32 e 3.33) são as discretizações atrasadas da derivada primeira.

$$\frac{\partial f}{\partial \xi} \Big|_{i,j} = (f_{\xi})_{i,j} = \frac{1}{2}(3f_{i,j} - 4f_{i-1,j} + f_{i-2,j}) \quad (3.32)$$

$$\frac{\partial f}{\partial \eta} \Big|_{i,j} = (f_{\eta})_{i,j} = \frac{1}{2}(3f_{i,j} - 4f_{i,j-1} + f_{i,j-2}) \quad (3.33)$$

3.6.4 - Discretizações Adiantadas

As Equações (3.34 e 3.35) são as discretizações adiantadas da derivada primeira.

$$\frac{\partial f}{\partial \xi} \Big|_{i,j} = (f_{\xi})_{i,j} = \frac{1}{2}(-3f_{i,j} + 4f_{i+1,j} - f_{i+2,j}) \quad (3.34)$$

$$\frac{\partial f}{\partial \eta} \Big|_{i,j} = (f_{\eta})_{i,j} = \frac{1}{2}(-3f_{i,j} + 4f_{i,j+1} - f_{i,j+2}) \quad (3.35)$$

3.7 - Transformação das Equações que Governam o Problema

A transformação das equações que governam o problema de transferência de calor é feita obedecendo os mesmos princípios das transformações das coordenadas, isto é, transformando-se as equações diferenciais parciais, do domínio físico para o domínio computacional.

Como já foi descrito no item 2.5, a transferência de calor por condução ocorre no interior dos varistores e do invólucro, Figuras 1.4a e 2.1.

A equação de transferência de calor por condução no interior dos varistores com geração de interna de calor é a Equação 2.18.

A transformação da Equação 2.18, para o domínio computacional, utilizando o Laplaciano, toma a forma:

$$\begin{aligned} \nabla^2 T = \frac{1}{J^2} [\alpha T_{\xi\xi} - 2\beta T_{\xi\eta} + \gamma T_{\eta\eta}] + [(\nabla^2 \xi) T_\xi + (\nabla^2 \eta) T_\eta] \\ + \frac{1}{Jr} [y_\eta T_\xi - y_\xi T_\eta] + \frac{1}{k_v} g(t) = \frac{1}{a_v} \frac{\partial T}{\partial t} \end{aligned} \quad (3.36)$$

A equação que governa a transmissão de calor por condução no invólucro de porcelana é a Equação 2.19, na qual, não há geração de calor.

A transformação da Equação 2.19, para o domínio computacional, utilizando o Laplaciano, toma a forma:

$$\begin{aligned} \nabla^2 T = \frac{1}{J^2} [\alpha T_{\xi\xi} - 2\beta T_{\xi\eta} + \gamma T_{\eta\eta}] + [(\nabla^2 \xi) T_\xi + (\nabla^2 \eta) T_\eta] \\ + \frac{1}{Jr} [y_\eta T_\xi - y_\xi T_\eta] = \frac{1}{a_i} \frac{\partial T}{\partial t} \end{aligned} \quad (3.37)$$

As condições de contorno também devem ser transformadas do domínio físico para o domínio computacional. As condições de contorno de problemas de transferência de calor, são divididas em três tipos: condição de contorno de primeira espécie, segunda espécie e terceira espécie. A seguir são descritos os tipos de condição de contorno, e indicado como é feita a transformação de coordenadas.

3.7.1 - Condição de Contorno de Primeira Espécie

Na condução de contorno de primeira espécie, a temperatura é conhecida na fronteira em qualquer instante de tempo. Neste caso, não há necessidade de nenhuma transformação com a temperatura, pois a temperatura prescrita no plano físico é a mesma na correspondente localização no plano computacional. Para uma superfície “n” qualquer, a condição de contorno de primeira espécie pode ser escrita:

$$T(n,t)|_{n=0} \equiv T(0,t) = T_1 \quad (3.38)$$

e

$$T(n,t)|_{n=R} \equiv T(R,t) = T_2 \quad (3.39)$$

3.7.2 - Condição de Contorno de Segunda Espécie

Quando o fluxo de calor em uma face é conhecida em qualquer instante de tempo, dá-se o nome de condição de contorno de segunda espécie. Tal situação requer, a derivada normal da variável em questão (temperatura) em relação ao contorno. A condição de

contorno de segunda espécie pode ser representada numa coordenada qualquer do plano físico como:

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{n=0} = q_0 \quad (3.40)$$

e

$$k \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{n=L} = q_L. \quad (3.41)$$

Em se tratando de transformação de coordenadas, a derivada normal $\partial T/\partial n$ do plano físico deve ser transformada para o plano computacional, pois as linhas das coordenadas ξ e η , não são necessariamente normais ao contorno físico. As Equações 3.25 e 3.26 representam as derivadas normais de T em relação as linhas ξ e η constantes.

No item 2.5, mostra a utilização desta condição de contorno para a seção de pára-raios.

3.7.3 - Condição de Contorno de Terceira Espécie

A condição de contorno de terceira espécie em problemas de transferência de contorno, representa a condição de convecção na fronteira. A forma geral da equação de contorno de terceira espécie, em uma coordenada “n” qualquer é:

$$h_1 [T_1 - T(n,t) \Big|_{n=0}] = -k \frac{\partial T(n,t)}{\partial n} \Big|_{n=0} \quad (3.42)$$

$$h_2 [T_2 - T(n,t) \Big|_{n=L}] = +k \frac{\partial T(n,t)}{\partial n} \Big|_{n=L}. \quad (3.43)$$

A transferência de calor por convecção nas seções de teste dos pára-raios acontece no espaçamento (gap) entre os varistores e o invólucro, como também na face externa do invólucro, Figuras 1.4.a e 2.1.

A transferência de calor por radiação será representada conjuntamente com a convecção, como condição de contorno de terceira espécie. A transferência de calor por radiação será implementada de forma linearizada. A radiação nas seções de teste acontece no "gap" e na face externa, Figuras 1.4.a e 2.1.

3.8 - Programa Computacional para Geração de Malha e Cálculo de Temperatura

A técnica de transformação de coordenadas por Thompson, foi utilizada para implementar um programa computacional em linguagem FORTRAN, com o objetivo de calcular o perfil de temperatura ao longo de uma seção de pára-raios de Óxido de Zinco (ZnO).

O pára-raios de ZnO apresenta geometria de um cilindro aletado. Portanto, devido à simetria, o problema é tratado de forma bidimensional, com variação na coordenada vertical "y" e coordenada radial "r".

O Projeto PRTEMP está dividido basicamente em dois programas principais, o "Malha.for" e o "Temperat.for", Figura 3.10. O primeiro, gera a malha bidimensional da seção do pára-raios e transfere os coeficientes de transformação de coordenadas como α , β , γ e J , ao segundo programa. O programa Temperat.for calcula as temperaturas da seção do pára-raios, através das transformações das equações que governam a transferência de calor, utilizando os mesmos princípios da geração de malha.

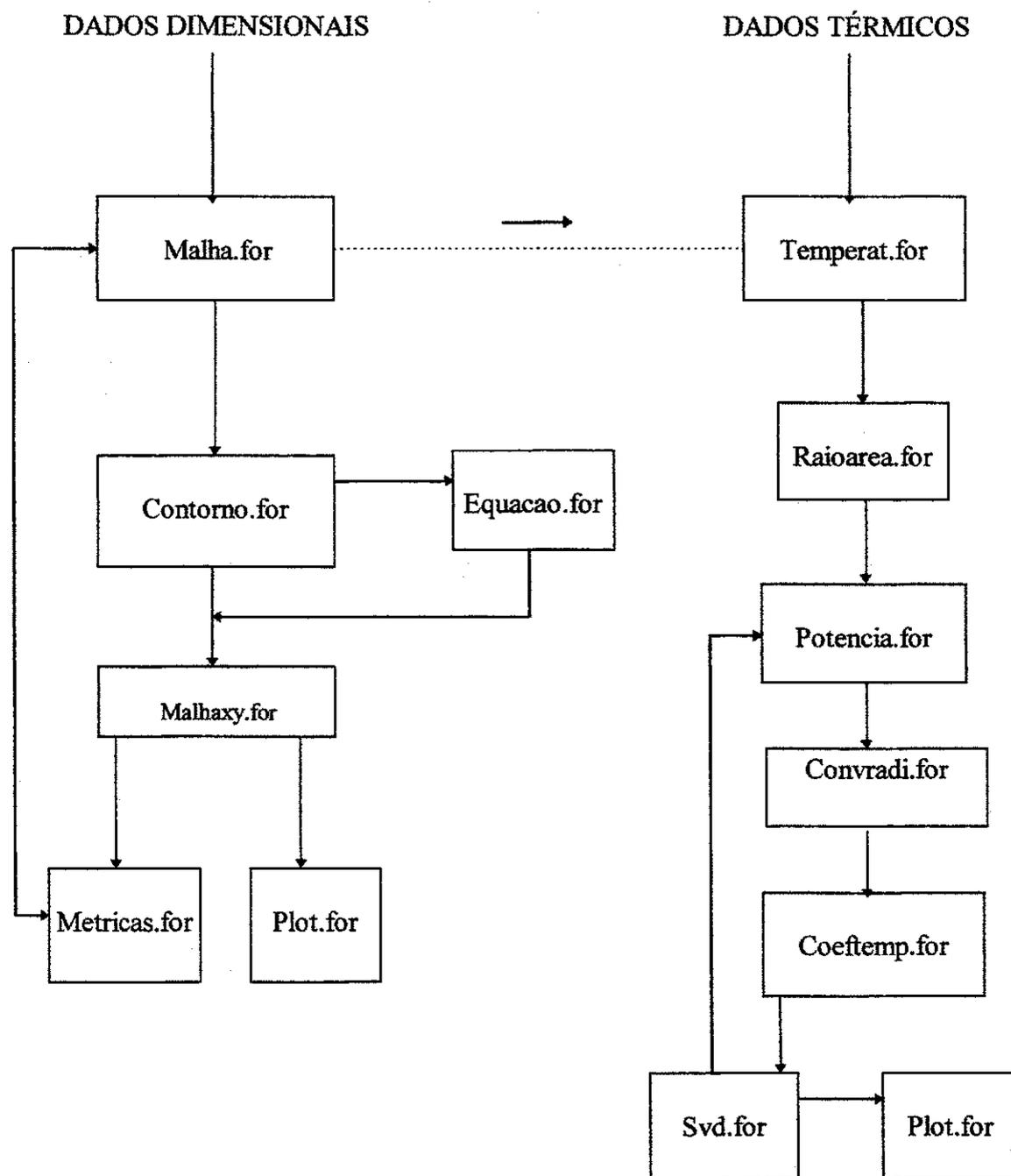


Figura 3.10 - Fluxograma do projeto PRTEMP.

3.8.1 - Programa Gerador de Malha

O programa gera duas malhas distintas. A primeira malha gerada, é a dos varistores. Esta malha no domínio físico já apresenta uma geometria regular (cilíndrica), portanto, a transformação de coordenadas do plano físico para o plano computacional não modifica a geometria original. A segunda malha gerada, é a do invólucro, onde a geometria é transformada de um cilindro aletado no domínio físico para um cilindro simples no domínio computacional. A Figura 3.11 mostra a malha gerada dos varistores juntamente com o invólucro.

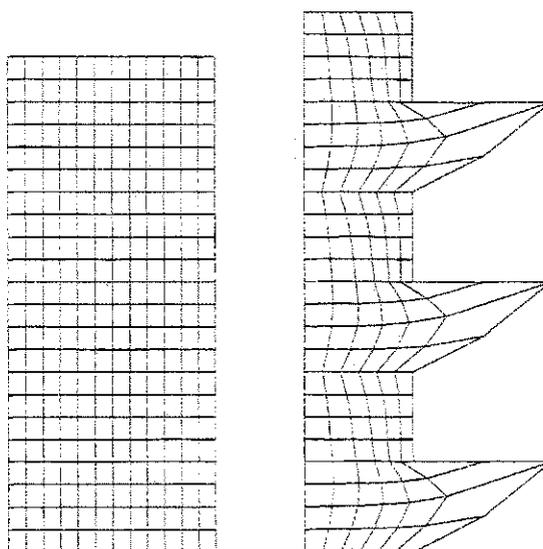


Figura 3.11 - Malha bidimensional gerada com os varistores e o invólucro de porcelana.

Inicialmente o Malha.for lê os valores dimensionais da seção de pára-raios, (Figura 3.10), tais como: altura da seção, raio do elemento varistor, distância entre o elemento e o invólucro, comprimento das aletas, número de pontos da malha.

A sub-rotina `Contorno.for` define o contorno da malha. O contorno da malha pode ser definido a partir do fornecimento das equações que representam cada superfície, ou pelo fornecimento de pontos (r,y) que pertencem ao contorno; Neste último caso utiliza-se a sub-rotina `"Equação.for"`, que determinará os coeficientes da equação polinomial que representa o contorno da superfície. Também na sub-rotina `Contorno.for` são atribuídos valores aos pontos internos da malha. Pode-se chamar este procedimento de "chute inicial" da malha.

A sub-rotina `"Malhaxy.for"` calculará os pontos internos da malha. O cálculo da malha é executado segundo a técnica de mapeamento e transformação de coordenadas do plano físico para o plano computacional, Equações (3.3 e 3.4).

A sub-rotina `Métricas.for` atualiza e calcula os valores dos coeficientes geométricos α , β , γ e J , Equações (3.5, 3.6, 3.7 e 3.8), que serão fornecidos aos programas `Plot.for` e `Temperat.for`.

3.8.2 - Programa para Cálculo de Temperaturas

Os procedimentos para calcular as temperaturas, inicia-se após a conclusão da geração da malha. O programa `Malha.for` fornece os dados geométricos da transformação, ao programa de cálculo de temperaturas.

O programa `"Temperat.for"` é composto de diversas sub-rotinas, as quais são acionadas ao longo da execução do programa, Figura 3.10.

O primeiro passo na execução do programa é ler os valores dos programas de entrada de dados. Os dados de entrada compreendem as propriedades térmicas dos

materiais que estão envolvidos no problema, como também o tipo de simulação a ser executada, o tempo de duração da simulação e temperatura ambiente. O tamanho da malha utilizada é definido no início do processo de geração de malha. Neste trabalho foram utilizadas malhas de tamanho 15x25, 17x25 e 20x25.

A sub-rotina `Raioarea.for` calcula parâmetros dimensionais tais como, as áreas da convecção e radiação.

Com o conhecimento do tipo de simulação a ser executada, aciona-se a sub-rotina “`Potencia.for`”, a qual lê a potência total (variável no tempo) a ser fornecida aos varistores, o passo de tempo adequado durante a aplicação de potência, e também calcula a potência específica empregada no pára-raios.

A sub-rotina `Convradi.for` calcula os coeficientes de convecção e radiação. A `Convradi.for` calcula os coeficientes de convecção natural, convecção em espaços fechado e o coeficiente de radiação linearizado. A Equação 2.17 é utilizada para calcular o coeficiente de transferência de calor por radiação. A convecção natural externa é calculada através da Equação 2.6. O coeficiente de convecção no espaço entre os varistores e o invólucro de porcelana foi a princípio calculado através da Equação 2.7. O anel cilíndrico é tratado como uma camada vertical plana. A razão de aspecto do problema, $a_s = H/\delta = 69 / 11,5 = 6$, que está praticamente sobre o limite inferior exigido pela equação. Portanto, não se pode garantir que a Equação 2.7, represente a real convecção que ocorre no interior do pára-raios.

A sub-rotina `CoefTemp.for` calcula os coeficientes da variável T (Temperatura). Os coeficientes foram calculados a partir das equações transformadas que governam a transmissão de calor por condução, Equações 3.36 e 3.37, como também a partir diversas condições de contorno existentes no problema. Para o cálculo das temperaturas utilizou-se

a formulação implícita, visto que a estabilidade da formulação explícita é limitada pelo passo de tempo.

O quarto passo é solucionar o sistema de equações. Para encontrar a solução do sistema de equações resultante, utilizou-se a sub-rotina “SVD.for” (Singular Value Decoposition) da biblioteca de sub-rotinas do Numerical Recipies Fortran 77, versão 2.07.

Após a convergência da solução do sistema de equação, para um determinado tempo, retorna-se aos passos iniciais. Novamente a potência a ser fornecida, os coeficientes de transferência de calor por convecção e radiação são calculados para o novo passo de tempo.

Apresenta-se a seguir, um resumo do algoritmo computacional.

Passo 1: Ler os dados dimensionais da seção de pára-raios, (Malha.for).

Passo 2: Definir o contorno da malha dos varistores, e atribuir valores aos pontos internos da malha (Chute inicial), (Contorno.for).

Passo 3: Calcular os pontos internos da malha, (Malhaxy.for).

Passo 4: Atualizar e calcular os coeficientes geométricos α , β , γ e J , (Metricas.for).

Passo 5: Plotar a Malha, (Plot.for).

Passo 6: Retornar ao passo 2, para gerar a malha do invólucro.

Passo 7: Após gerar as malhas (varistores e invólucro), chamar o “Temperat.for” e transmitir os dados geométricos (α , β , γ e J) para o cálculo das temperaturas.

Passo 8: Ler os dados térmicos.

Passo9: Calcular parâmetros dimensionais, como as áreas de convecção e radiação, (Raioarea.for).

Passo 10: Ler a potência aplicada para o intervalo de tempo, (Potencia.for).

Passo 11: Calcular os coeficientes de convecção e radiação, (Convrad.for).

Passo 12: Calcular os coeficientes do sistema de equações para o cálculo de todas as temperaturas, (Coeftemp.for).

Passo 13: Solucionar o sistema de equações, (Svd.for); Plotar os valores das temperaturas, (Plot.for).

Passo 14: Retornar ao passo 10, para calcular as temperaturas do novo passo de tempo.

CAPÍTULO IV

METODOLOGIA EXPERIMENTAL

O trabalho está dividido em duas etapas, a primeira consiste de montagem e realização de ensaios em uma seção de pára-raios de ZnO (Óxido de Zinco), a segunda etapa consiste na elaboração de um programa computacional para simular os ensaios realizados, discutido no Capítulo III.

4.1 - Materiais

A seção do pára-raios é constituída de:

- Um invólucro de porcelana com comprimento axial de 75 mm, diâmetro interno de 76 mm, diâmetro externo da parte não aletada de 104 mm e diâmetro externo com aletas de 140 mm, Figura 4.1.
- Três elementos varistores cilíndricos com espessura de 23 mm e diâmetro de 53 mm.
- Uma mola de aço com diâmetro externo de 35 mm e comprimento axial de 15 mm. A mola ao ser comprimida dentro da seção reduz seu comprimento axial de tal forma que torna-se semelhante a um cilindro.

A Figura 4.2 mostra os três itens básicos que constituem a seção do pára-raios.

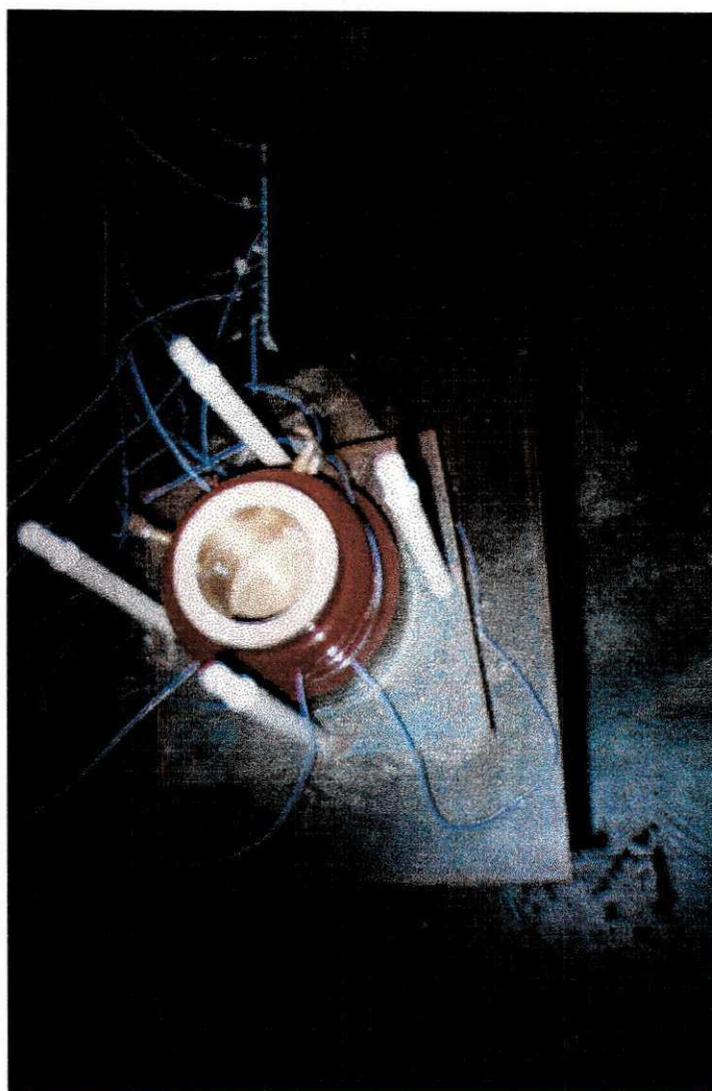


Figura 4.1 - Vista de um invólucro de porcelana utilizado na secção de teste.

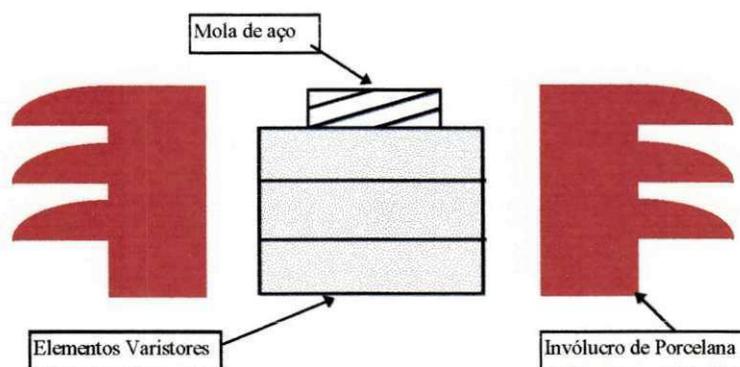


Figura 4.2 - Representação dos componentes básicos de uma seção de pára-raios.

Com o objetivo de reproduzir as condições de uso do pára-raios no campo ou em laboratório, foi necessário a confecção de algumas peças complementares, proporcionando medições das temperaturas mais realísticas ao longo do tempo.

Foram confeccionados:

- Duas lâminas de latão muito finas, responsáveis por fazer o contato elétrico uniforme com os elementos varistores, onde a cada uma é soldada um eletrodo bastante fino, o qual é responsável pela aplicação de tensão alternada ou impulsos de alta corrente à seção do pára-raios.
- Dois tampões constituídos de um invólucro formado por um tubo de PVC, fechado por duas tampas de fenolite e preenchido internamente com arbesto. Os tampões têm furo axial no centro, por onde passa o eletrodo, conforme Figura 4.3.

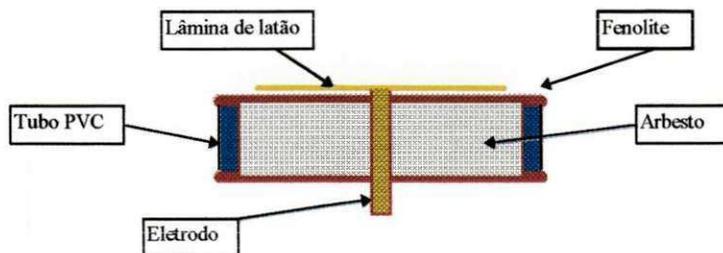


Figura 4.3 - Representação do tampão de PVC e do eletrodo com a lâmina de latão.

Quatro parafusos de teflon com comprimento de 240 mm e diâmetro de 12,7 mm e tampa de acrílico foram confeccionados para fechar a seção de pára-raios com os tampões, de forma que todo o arranjo ficou firme e com um ótimo contato mecânico, conforme pode ser visto nas Figuras 4.4 e 4.5.

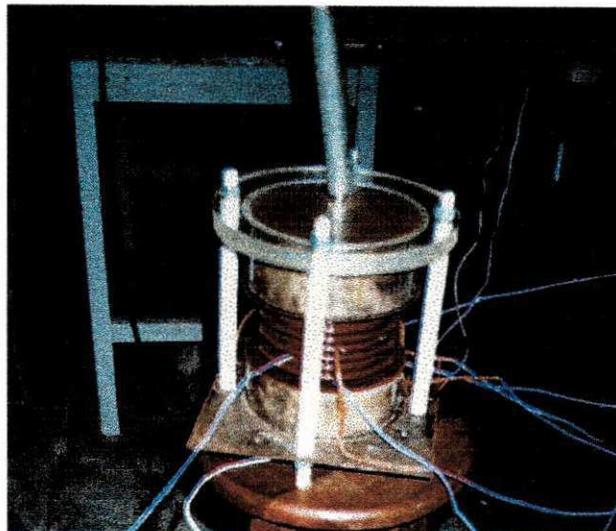


Figura 4.4 - Seção de teste de um pára-raios.

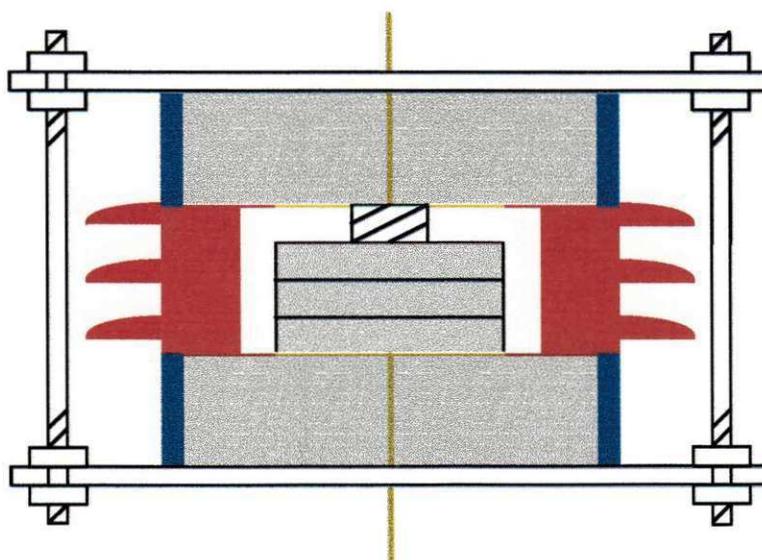


Figura 4.5 - Seção de Pára-raios.

Para as medições de temperaturas foram utilizados quatro termômetros digitais com precisão de $\pm 1^{\circ}\text{C}$, utilizando como sensores, termopares do tipo K. A Figura 4.6 mostra

dois termômetros utilizados na medição das temperaturas. Os termômetros estão isolados, pois estão submetidos a alta tensão.

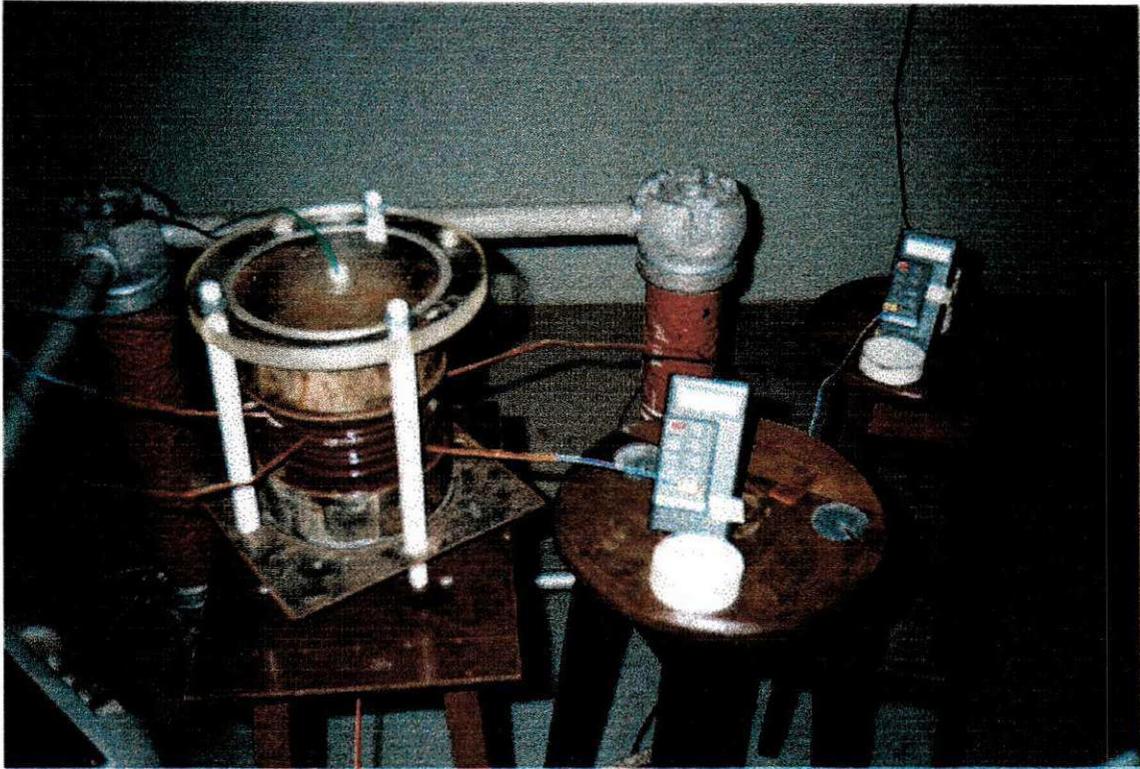


Figura 4.6 - Vista da seção de teste com os termômetros.

4.2 - Métodos

Com o objetivo de reproduzir as condições de uso do pára-raios no campo ou em laboratório, foram aplicados esforços elétricos à seção do pára-raios.

Os esforços elétricos foram constituídos de ensaios com tensão alternada e ensaios de impulsos de alta corrente.

4.2.1- Tensão Alternada

O objetivo de aplicação da tensão alternada é gerar calor eletricamente nos varistores de óxido de zinco, através do efeito joule, condição que ocorre naturalmente nas suas aplicações.

Na condição normal de operação o pára-raios fica submetido na maior parte do tempo a uma tensão conhecida como tensão de trabalho. Nesta situação os varistores geram pouco calor internamente. Entretanto, se a tensão se eleva um pouco mais, a quantidade de calor gerado pode ser alta, devido a sua condição de alta não linearidade, explicado anteriormente.

Tentando reproduzir as condições de trabalho do pára-raios, idealizou-se um ciclo de tensão-sobretensão que propositadamente produza uma quantidade considerável de calor. A transferência de calor gerado internamente é analisada pelo monitoramento do perfil de temperatura na seção do pára-raios, através de termômetros.

Na realização dos ensaios com tensão alternada, utilizou-se diversos equipamentos responsáveis pelo fornecimento e medição da tensão desejada, tais como: transformador, autotransformador, filtro de linha, mesa de comando, voltímetro, divisores de tensão e banco de resistência. A Figura 4.7 mostra a bancada de medição e controle para aplicação de tensão alternada. Acima da bancada pode ser visto os três bancos de resistência utilizados como divisores de tensão ou como resistência Shunt. A Figura 4.7 também mostra um osciloscópio digitalizador HP e o computador, utilizados na obtenção da potência.



Figura 4.7 - Vista da bancada de controle e medição.

Os ensaios consistiram em fornecer ciclos de tensão-sobretensão ao longo do tempo, como por exemplo tensão de 9,0 kV e sobretensão de 10,0 kV, conforme pode ser visto Figura 4.8.

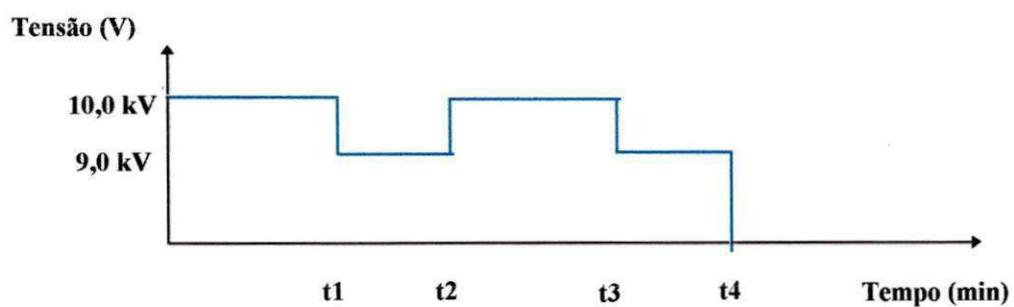


Figura 4.8 - Ciclo de tensão-sobretensão versus tempo nos ensaios de tensão alternada.

O registro de temperaturas é realizado durante todo o ensaio, ou seja, desde o início dos esforços elétricos quando a seção está a temperatura ambiente, durante a aplicação de tensão e também durante o esfriamento da seção.

Um outro ensaio com tensão alternada foi realizado. O ensaio consistiu de aplicação de uma sobretensão por 90 minutos, seguida de 30 minutos de resfriamento natural. Após o resfriamento, novamente a sobretensão foi aplicada por 90 minutos. Em seguida o resfriamento foi monitorado até a temperatura próxima à ambiente.

A tensão e a corrente resistiva foram obtidas através de um osciloscópio, digitalizados e repassado para um microcomputador. A potência foi calculada através da integração do produto (tensão x corrente), por meio de um programa computacional em Fortran, utilizando as técnicas de integração numérica de Simpson.

A montagem experimental pode ser vista nas Figuras 4.7, 4.9 e 4.10.

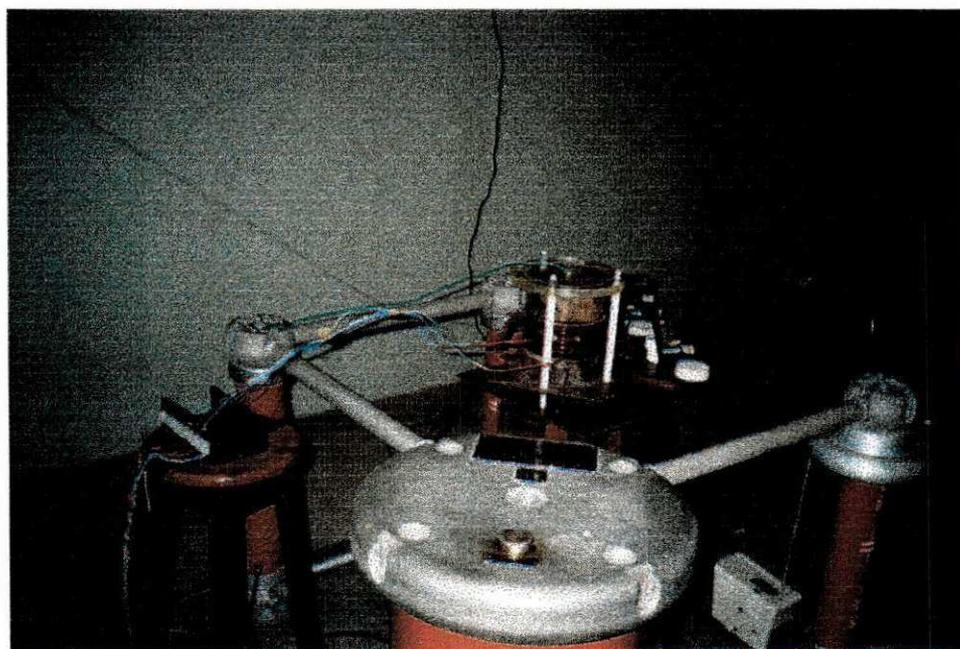


Figura 4.9 - Vista da montagem experimental.

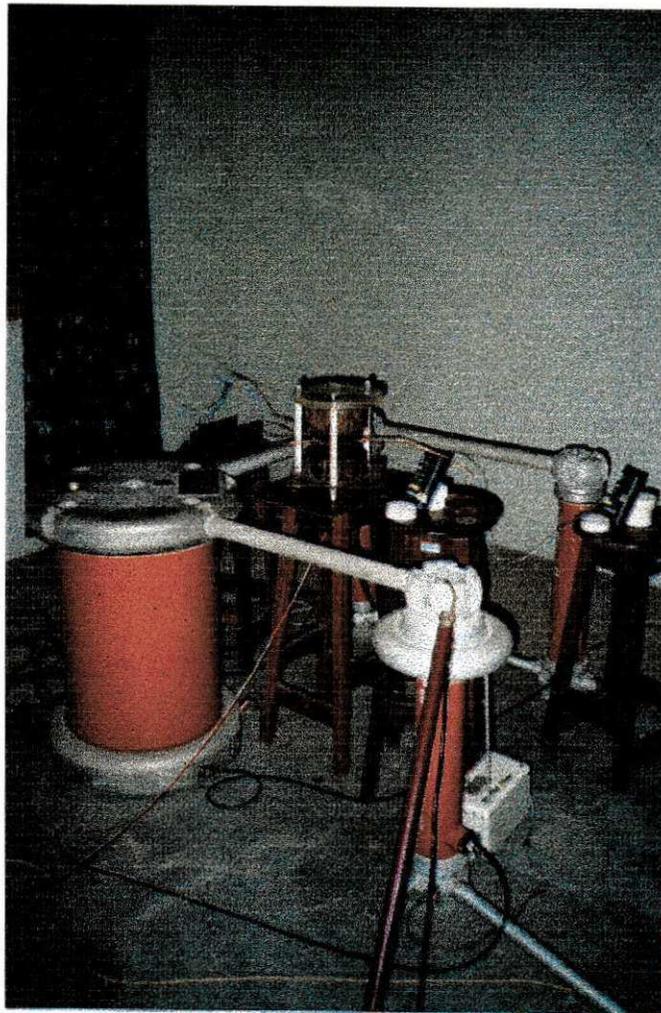


Figura 4.10 - Vista da montagem experimental.

4.2.2 - Impulsos

Os ensaios com aplicação de impulsos de alta corrente utilizaram o gerador de impulsos HAEFFELY com cinco capacitores de $2 \mu\text{F}$. O arranjo proporciona uma forma de onda de $8 \times 20 \mu\text{s}$ e amplitude de 10 kA com polaridade positiva. A Figura 4.11 mostra o gerador de impulsos de corrente do DEE/UFPb.

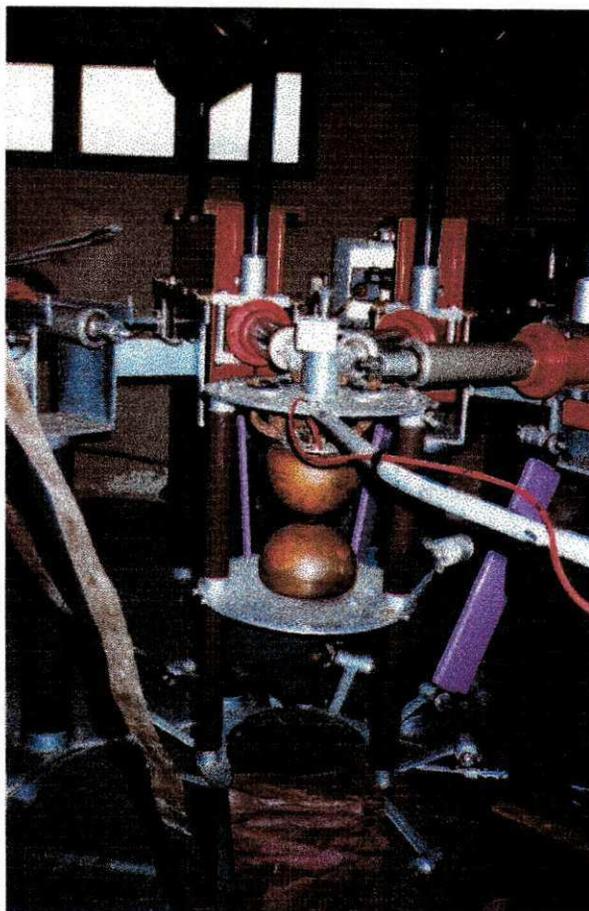


Figura 4.11 - Vista do gerador de impulsos de corrente da UFPb.

Os ensaios consistem na aplicação de um número pré-determinado de impulsos de alta corrente com um pequeno intervalo de tempo (dois minutos) entre eles, de acordo com a Figura 4.12.

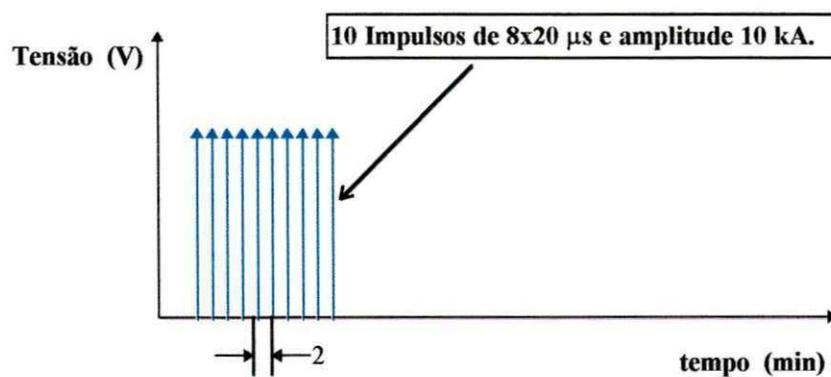


Figura 4.12 - Ciclo de impulsos versus tempo.

A obtenção das temperaturas nos ensaios com impulsos foi realizada entre aplicações dos impulsos. Ao término da aplicação de todos os esforços elétricos o monitoramento da temperatura é contínuo. Nas temperaturas mais elevadas a frequência de medições das temperaturas foi maior, sempre obedecendo a mesma seqüência de medição.

4.3 - Obtenção das Temperaturas

O registro das temperaturas na seção de pára-raios de óxido de zinco foi feito através de termômetros digitais com precisão de $\pm 1^\circ\text{C}$ que utilizam termopares do tipo K. Os termômetros apresentam dígitos de grandes dimensões, o que possibilita fácil leitura, a distância de 1,5 a 2,0 m. A condição de leitura à distância deveu-se a segurança, pois os esforços elétricos eram em alta tensão e alta corrente, Figura 4.6.

Com o objetivo de obter temperaturas de diversos pontos ao longo da seção de pára-raios, foi necessário furar o invólucro de porcelana com furos de 2 mm de diâmetro, nos quais se insere os termopares.

Para registrar as temperaturas da superfície lateral dos elementos varistores e da superfície interna da porcelana foram feitos furos passantes no invólucro de porcelana. Para obter dados de temperatura entre as superfícies interna e externa da porcelana foi feito um furo com profundidade de 6 mm. O registro de temperatura dos dois pontos sobre a superfície inferior dos varistores foram feitos na lâmina de latão. As localizações desses pontos podem ser visualizadas através da Figura 4.13.

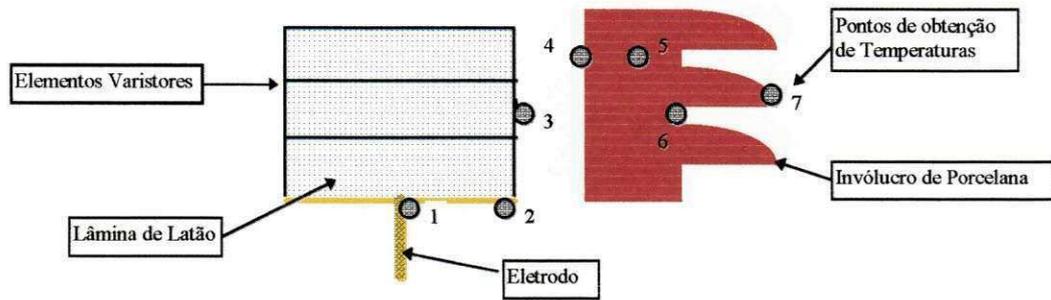


Figura 4.13 - Localização dos pontos de medição de temperaturas.

CAPÍTULO V

DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

5.1 - Introdução

O pára-raios de óxido de zinco é muito importante na proteção de equipamentos em sistemas elétricos de alta tensão. A proteção dos equipamentos se faz pela limitação da tensão nos sistemas, transformando parte da energia elétrica devida a surtos em energia térmica. O estudo do comportamento térmico dos pára-raios completos de alta tensão é prejudicado devido à falta de condições de reprodutibilidade das condições de operação no campo. Para superar essas dificuldades são utilizados os modelos eletrotérmicos. A utilização de modelos computacionais que retratem o comportamento térmico dos pára-raios, mostra-se ser imprescindível devido a sua flexibilidade, rapidez, segurança e custo reduzido.

O estudo do comportamento térmico dos pára-raios de óxido de zinco quando submetidos a esforços elétricos e térmicos, visando determinar os pontos críticos da transferência de calor e propor as devidas melhorias foi o objetivo deste trabalho. Para tanto, escolheu-se uma seção de teste de um pára-raios de transmissão de energia elétrica como objeto do estudo. Para alcançar os objetivos propostos, o trabalho foi dividido em duas partes: Simulação Numérica e Experimentos.

5.2 - Simulação Numérica

A simulação numérica constou do desenvolvimento de um programa computacional em linguagem Fortran, baseado no método de Diferenças Finitas utilizando coordenadas generalizadas. O programa computacional calcula o perfil térmico de uma seção de teste de um pára-raios de óxido de zinco, utilizado em sistema de transmissão de energia elétrica.

O programa simulou as seguintes situações:

a) Propagação de calor com ciclo de aplicação de sobretensões na frequência industrial seguido de resfriamento, conforme pode ser visto na Figura 5.1

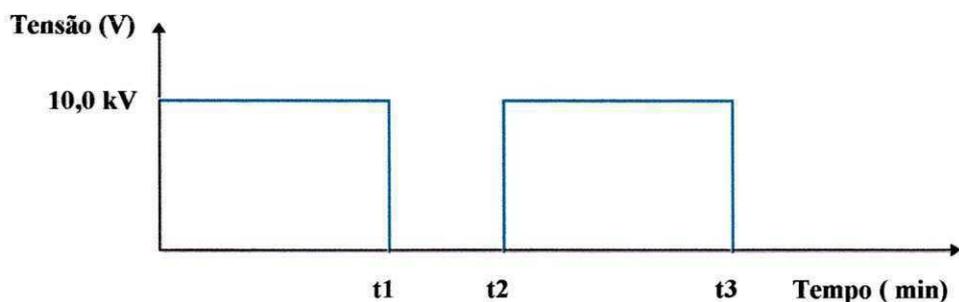


Figura 5.1 - Ciclo de sobretensão-resfriamento versus tempo.

b) Propagação de calor com ciclos de aplicação de tensões alternada na frequência industrial (tensão de trabalho e sobretensão) nos terminais de um pára-raios, conforme pode ser visto na Figura 5.2.

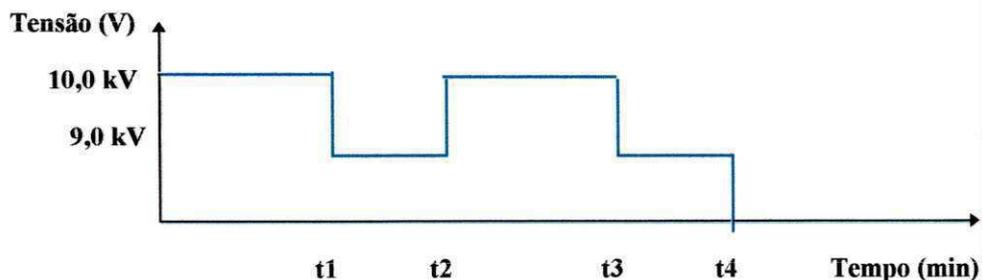


Figura 5.2 - Ciclo de tensão-sobretensão versus tempo nos ensaios de tensão alternada.

c) Propagação de calor com a aplicação de impulsos de alta corrente (entrada de energia instantânea) com intervalos de 2 minutos entre impulsos. Os impulsos simulados apresentaram uma forma de onda $8/20 \mu\text{s}$ e aproximadamente 11,0 kA. O número de impulsos simulados foi de 10, Figura 5.3.

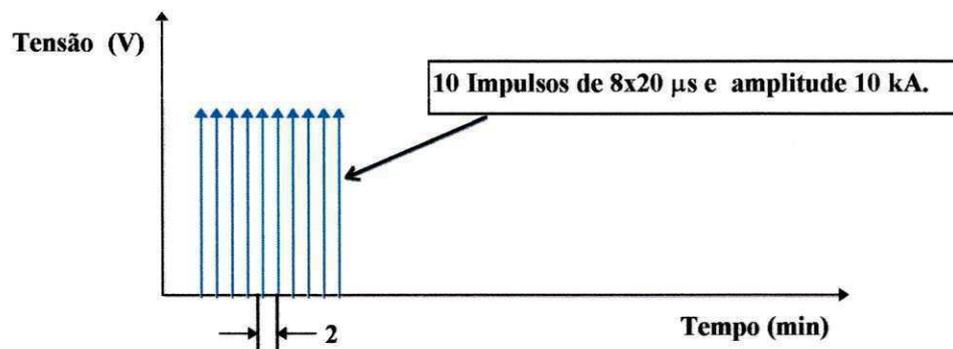


Figura 5.3 - Ciclo de impulsos versus tempo.

5.3 - Ensaio Experimentais

Os ensaios experimentais foram realizados nas dependências do Laboratório de Alta Tensão do DEE. Os ensaios experimentais foram desenvolvidos em uma seção de pára-raios, cuja dimensões, configuração e montagem estão descritos no Capítulo IV (Metodologia Experimental). Os experimentos foram realizados em uma seção de teste visando confrontar os resultados obtidos nas simulações. Portanto, foram realizados os seguintes ensaios:

a) Propagação de calor com ciclo de aplicação de sobretensões na frequência industrial seguido de resfriamento, conforme pode ser visto na Figura 5.1. As temperaturas foram medidas nos pontos descritos e indicados no item 4.3.

b) Propagação de calor com ciclos de aplicação de tensões alternada na frequência industrial (tensão de trabalho e sobretensões) nos terminais de um pára-raios, conforme pode ser visto na Figura 5.2. As temperaturas foram medidas nos pontos descritos e indicados no item 4.3.

c) Propagação de calor com a aplicação de impulsos de corrente (entrada de energia instantânea) como intervalos de 2 minutos entre impulsos. Os impulsos simulados apresentaram uma forma de onda $8 \times 20 \mu\text{s}$ e aproximadamente 11,0 kA. O número de impulsos simulados foi de 10, Figura 5.3. A medição de temperatura foi realizada antes, após aplicação dos 10 impulsos e durante o resfriamento.

5.4 - Análise dos Resultados

Para melhor compreensão das análises a seguir, utilizou-se a seguinte simbologia:

hc_1 = coeficiente de convecção (de referência) calculado para o “gap” de ar entre os varistores e o invólucro, a partir do número de Nusselt obtido da correlação 2.7;

hc = coeficiente de convecção **utilizado** no “gap” de ar entre os varistores e o invólucro. Para a primeira comparação entre simulação e experimento, $hc = hc_1$.

• Estudo 1

A análise dos resultados obtidos da simulação x experimento, da propagação de calor com ciclo de aplicação de sobretensão na frequência industrial seguido por resfriamento, é feita observando a Figura 5.4.

A Figura 5.4 mostra a evolução das temperaturas ao longo do tempo, tanto com valores obtidos experimentalmente, como através da simulação. Comparando os valores das temperaturas na superfície do varistor (Ponto 3), observa-se uma grande diferença entre as temperaturas obtidas experimentalmente e aquelas obtidas através da simulação numérica. As temperaturas da simulação numérica foram obtidas a partir das equações que regem a transferência de calor no tempo. Assim, as temperaturas na superfície do varistor foram calculadas baseadas na condição de contorno entre os pontos da superfície dos varistores e os pontos da superfície interna do invólucro.

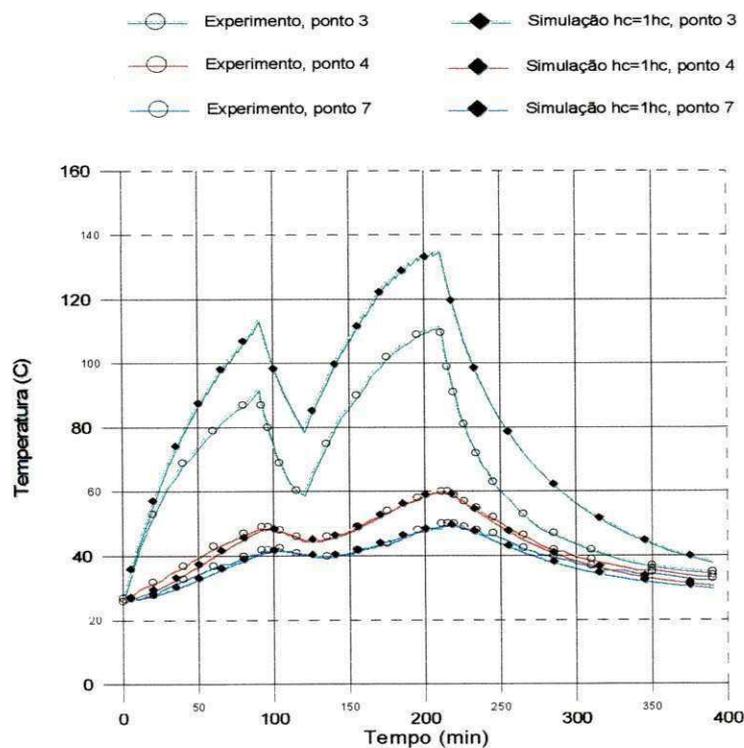


Figura 5.4 - Simulação x Experimento, na aplicação de ciclo sobretensão, resfriamento com $hc = 1hc_1$.

A transferência de calor entre a superfície dos varistores e a superfície interna do invólucro foi calculada através das equações de convecção e radiação. O número de Nusselt

para o cálculo do coeficiente de convecção, hc_1 , foi obtido através da correlação de convecção livre em espaços fechados descritos no item 2.3.3. e sumarizada na Equação 2.7. O valor de hc utilizado foi igual ao hc_1 para esta primeira comparação entre simulação e experimento.

A razão de aspecto utilizada ($75 / 11.5 = 6.5$), Equação 2.8, para o anel cilíndrico vertical (gap), está próxima do limite inferior. Pesquisou-se na bibliografia disponível e, por ser um caso típico não foi possível encontrar uma correlação mais adequada. STOCKUM (1994) descreve um modelo matemático computacional com característica de configuração bastante aproximada da utilizada neste trabalho. Stockum mostra através de tabelas, as temperaturas nas superfícies e o fluxo de calor, em questão. Comparando-se os valores dos coeficientes de transferência de calor, observa-se que o coeficiente utilizado por Stockum é aproximadamente duas vezes àquele obtido através do número de Nusselt, calculado através da Equação 2.7. Como o modelo de Stockum apresenta resultados bastante consistentes, adotou-se o valor do número de Nusselt equivalente a duas vezes àquele calculado através da correlação 2.7.

A Figura 5.5 mostra a evolução das temperaturas ao longo do tempo. Os pontos para análise estão mostrados na Figura 4.13. As temperaturas da superfície do varistor (experimento e simulação), no tempo, apresentaram resultados satisfatórios, quando utilizou-se $hc = 2hc_1$, ou seja, o dobro do número de Nusselt obtido na Equação 2.7. As temperaturas no invólucro, simuladas e obtidas experimentalmente, apresentaram valores bastante próximos.

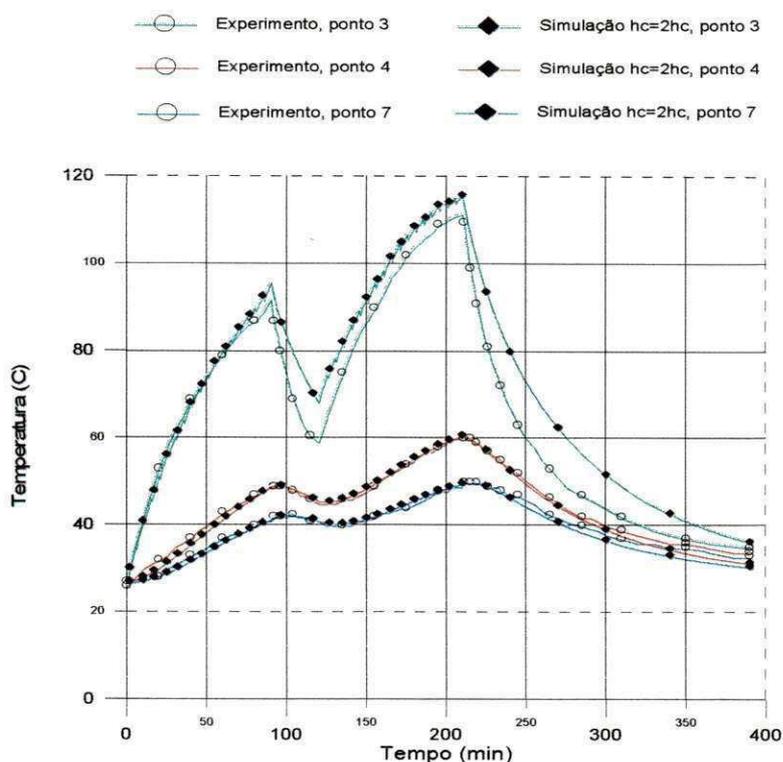


Figura 5.5 - Simulação x Experimento, na aplicação de ciclo sobretensão, resfriamento com $hc = 2hc_1$.

• Estudo 2

A análise dos resultados obtidos, com a simulação x experimento, da propagação de calor com ciclos de aplicação de tensões alternada na frequência industrial (tensão de trabalho e sobretensões), pode ser feita observando-se a Figura 5.6.

A Figura 5.6 mostra a evolução das temperaturas ao longo tempo. Os pontos para análise são mostrados na Figura 4.13. As temperaturas da superfície do varistor (experimento e simulação), no tempo, também apresentam resultados satisfatórios. Utilizou-se $hc = 2hc_1$. As temperaturas no invólucro, simuladas e obtidas experimentalmente, apresentaram valores bastante próximos.

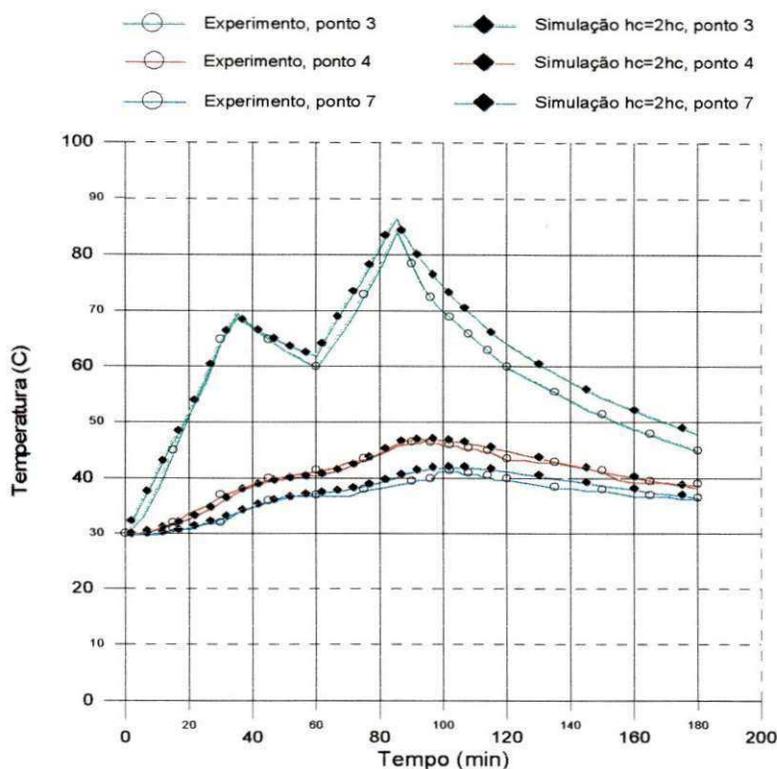


Figura 5.6 - Simulação x Experimento, na aplicação de ciclo tensão, sobretensão com $hc=2hc_1$.

• Estudo 3

A análise dos resultados obtidos, da simulação x experimento, da propagação de calor com a aplicação de impulsos de corrente com intervalo de 2 minutos entre impulsos pode ser feita observando-se a Figura 5.7. Só foi possível obter as temperaturas antes e após a aplicação do grupo de impulsos.

A Figura 5.7 mostra a evolução das temperaturas ao longo do tempo. Os pontos de análise são os mesmos. A energia imposta aos varistores na seção de teste não foi grande. A temperatura máxima do experimento atingiu 42 °C. Comparando-se as temperaturas obtidas experimentalmente, observa-se que os valores se apresentam bastante próximos.

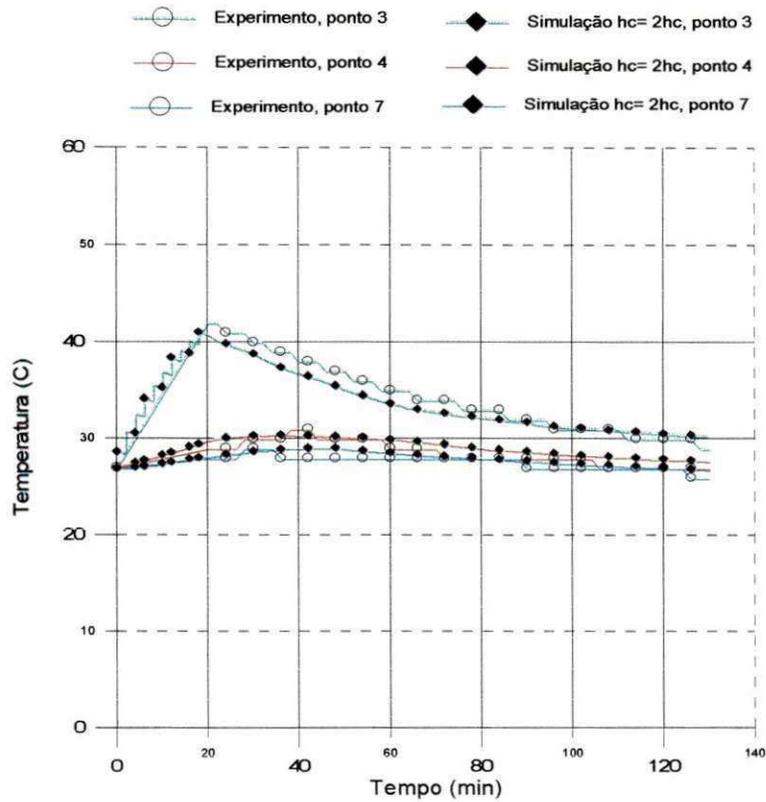


Figura 5.7 - Simulação x Experimento, na aplicação de Impulsos com $hc = 2hc_1$.

Analisando globalmente, os três estudos, observa-se que a simulação representa satisfatoriamente o comportamento térmico de uma seção de pára-raios, submetido a diversos tipos de esforços elétricos, quando se utiliza o valor de $hc = 2hc_1$.

CONCLUSÕES E SUGESTÕES

CONCLUSÕES

Este trabalho estudou o comportamento térmico dos pára-raios de ZnO quando submetidos a esforços elétricos e térmicos. A propagação de calor foi estudada em uma seção de um pára-raios de transmissão de energia elétrica, através de simulações com o método de Diferenças Finitas utilizando coordenadas generalizadas e de medições experimentais. Para tanto escolheu-se uma seção de teste de um pára-raios de transmissão de energia elétrica como objeto do estudo.

O programa computacional se mostra efetivo para o cálculo das temperaturas e versátil nas modificações dos dados físicos e das características dos materiais.

O programa é capaz de simular a presença de aletas nos pára-raios.

A simulação e os resultados demonstraram que a maior dificuldade, na dissipação do calor da seção de pára-raios para o ambiente está na existência de um "gap" de ar entre os varistores e o invólucro. Portanto, uma alternativa para acelerar a perda de calor dos pára-raios é otimizar este "gap". Não esquecendo que o "gap" serve como duto de ar para uma possível descarga interna.

As dificuldades encontrados nos experimentos, ressalta a importância da utilização de simulações que retratam o perfil térmico de um pára-raios.

Modelos térmicos computacionais é uma ferramenta muito potente no auxílio aos projetistas quando da concepção de novos modelos (designs); aos engenheiros de campo, no maior conhecimento dos pára-raios em uso e aos engenheiros responsáveis pelas especificação e ensaios, na seleção dos pára-raios.

Enfim, observa-se que a simulação numérica através de diferenças finitas utilizando coordenadas generalizadas, representa satisfatoriamente o perfil térmico de uma seção de pára-raios, quando submetida a diversos tipos de esforços elétricos.

SUGESTÕES

O trabalho desenvolvido, deve ser considerado como inicial, sob o ponto de vista de um estudo completo sobre o comportamento térmico de um pára-raios exposto a diversos tipos de esforços.

Um estudo sobre a influência das aletas nos pára-raios deve ser realizada. A substituição da porcelana por outros materiais com as mesmas características elétricas e com melhores características térmicas deve ser estudado.

A determinação do número de Nulsset mais preciso, para configurações físicas dos pára-raios e de suas seções é necessário.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABB SWITCHGEAR, Selection Guide for ABB HV Surge Arresters, Technical Information, Publ. SESWG/A 2300 E, Edition 3, 1995-02.
- COSTA, E. G., Estudo da Degradação nos Varistores, Relatório de Projeto de Pesquisa, Maio, 1994.
- COSTA, E. G., GURGEL, J. M., LIMA, A. G. Estudo da Propagação de Calor em Pára-raios de ZnO, V SEMEL -95, Curitiba, Agosto, 1996.
- COSTA, E. G., LIMA, N. A., NOBREGA, N. A. Jr. Cálculo de Temperatura em Pára-raios de ZnO - Simulações de Testes Exigidos Pelas Normas, V SEMEL -95, Curitiba, Agosto, 1996.
- COSTA, E. G., Análise do Desempenho de Pára-raios de Óxido de Zinco, Exame de Qualificação, Coordenação de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Março, 1997.
- D'AJUZ, A., FONSECA, C. S., CARVALHO, F. M. C., AMON, J. F., DIAS, L. E. N., PEREIRA, M. P., ESMERALDO, P. C. V., VAISMAN, R., FRONTIN, S. O. Equipamentos Elétricos - Especificação e Aplicação em Substação de Alta Tensão, Rio de Janeiro, Furnas, Universidade Federal Fluminense, 1987.
- FRANCO, J. L., Estudo das Propriedades Elétricas dos Varistores de ZnO na Região de Baixas Tensões Aplicadas, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal da Paraíba, 1993.
- GUPTA, T. K., Application of Zinc Oxide Varistors, J. Am. Ceram. Soc., vol. 73, n. 7, p. 1817-1840, 1990.

- HEHL, Maximilian Emil, Linguagem Estruturada: Fortran 77, São Paulo, Mc Graw-Hill do Brasil, 1987.
- HOLMAN, J. P., Transferência de Calor, São Paulo, Mc Graw-Hill do Brasil, 1983.
- 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.
- KREIT, F., Princípios da Transmissão de Calor, São Paulo, 1977.
- LAT, M. V., Thermal Properties of Metal Oxide Surge Arresters, IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, vol. 102, n. 7, p. 2194-2202, July 1983.
- LAT, M. V., Analytical Method for Performance Prediction of Metal Oxide Surge Arresters, IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, vol. 104, n. 10, p. 2665-2674, October, 1985.
- MALISKA, R. CLOVIS, Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional e Coordenadas Generalizadas, Florianópolis, 1992.
- MALISKA, R. CLOVIS, Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional, Rio de Janeiro, 1995.
- MATSUOKA, M., Nonohmic Properties of Zinc Oxide Ceramics, Japanese Journal of Applied Physics, vol. 10, n. 6, June, 1971.
- NIGOL, O., Methods for Analyzing the Performance of Gapless Metal Oxide Surge Arresters, IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 7, n. 3, p. 1656-1665, July, 1992.
- OZISIK, M. N., Finite Diference Methods in Heat Transfer, Boca Ratom, CRC Press, 1994.
- OZISIK, M. N., Transferência de Calor - Um Texto Básico, Rio de Janeiro, Editora Guanabara, 1990.

PHILIPP, H. R. & LEVINSON, L., M., Low-Temperature electrical Studies on Metal-Oxide Varistors - A Clue to Conduction Mechanisms, Journal Applied Physics, vol. 48, n. 4, p. 1621-1627, April, 1977.

PHILIPP, H. R. & LEVINSON, L., M., High-Temperature Behavior of ZnO-Based Ceramic Varistors, Journal Applied Physics, vol. 50, n. 1, p. 383-389, April, 1979

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.