

# IMPLEMENTAÇÃO DE UM MODELO ELETROTÉRMICO PARA UM PÁRA-RAIOS DE ÓXIDO DE ZINCO

## Rodrigo Santos da Nóbrega

Universidade Federal de Campina Grande, Departamento de Engenharia Elétrica, Av. Aprígio Veloso, 882, 58.109-970, Campina Grande – PB, e-mail: [rodrigo@dee.ufcg.edu.br](mailto:rodrigo@dee.ufcg.edu.br)

## Edson Guedes da Costa

Universidade Federal de Campina Grande, Departamento de Engenharia Elétrica, Av. Aprígio Veloso, 882, 58.109-970, Campina Grande – PB, e-mail: [edson@dee.ufcg.edu.br](mailto:edson@dee.ufcg.edu.br)

## Tarso Vilela Ferreira

Universidade Federal de Campina Grande, Departamento de Engenharia Elétrica, Av. Aprígio Veloso, 882, 58.109-970, Campina Grande – PB, e-mail: [tarso@sergipe.com.br](mailto:tarso@sergipe.com.br)

## Antonio Gilson Barbosa de Lima

Universidade Federal de Campina Grande, Departamento de Engenharia Mecânica, Av. Aprígio Veloso, 882, 58.109-970, Campina Grande – PB, e-mail: [gilson@dem.ufcg.edu.br](mailto:gilson@dem.ufcg.edu.br)

## Marcelo José Albuquerque Maia

CHESF - Companhia Hidrelétrica do São Francisco, R. Delmiro Gouveia, 333. - Bongi. Recife – PE – Brasil. CEP 50.761-901, e-mail: [mjamaia@chesf.gov.br](mailto:mjamaia@chesf.gov.br)

**Resumo.** Os pára-raios de óxido de zinco são equipamentos de proteção largamente utilizados em sistemas de distribuição e transmissão de energia elétrica. Os pára-raios degradam quando são submetidos a esforços elétricos e térmicos. Atualmente ainda não há uma técnica de avaliação da degradação dos pára-raios que seja totalmente conclusiva. Uma das técnicas amplamente utilizadas é a medição da temperatura externa dos pára-raios através da termovisão. Este trabalho tem por objetivo implementar uma ferramenta computacional que seja auxiliar nas medições de temperatura por termovisão de modo a se obter a temperatura da parte ativa do pára-raios. Foi realizada a implementação da uma rotina computacional utilizando linguagem C++, volumes finitos e a técnica multiblocos, tendo como dados de entrada a temperatura ambiente, a temperatura externa e a corrente de fuga.

**Palavras-chave:** Condução de calor, volumes finitos, pára-raios de óxido de zinco.

## 1. INTRODUÇÃO

Os pára-raios de óxido de zinco são equipamentos de proteção largamente utilizados nas subestações elétricas. Normalmente os pára-raios são instalados nas entradas e saídas das linhas de transmissão, dentro da subestação. Eles são ligados entre a fase e o neutro de modo a impedir que sobretensões de chaveamento ou atmosféricas danifiquem os equipamentos, conforme mostrado na Fig. (1).

Um pára-raios ideal funciona da seguinte maneira: para o nível de tensão nominal do sistema o pára-raios age como uma chave aberta, não havendo corrente de fuga; para níveis de tensão acima da nominal o pára-raios se comporta como uma chave fechada, causando um curto circuito e fazendo com que a descarga não danifique os outros equipamentos elétricos. No pára-raios real, apesar da sua característica altamente não linear, sempre há uma pequena corrente de fuga. A característica não linear é proveniente das propriedades semicondutivas dos varistores, elementos ativos do pára-raios.

Quando energizado o pára-raios fica submetido à circulação continua de uma corrente de fuga e a possíveis sobretensões de manobra, atmosféricas e temporárias. Esses esforços elétricos promovem a degradação ou envelhecimento dos pára-raios. As empresas de transmissão e distribuição usam diversas técnicas para avaliar a sua degradação do pára-raios. Uma das técnicas que é amplamente utilizada na CHESF (Companhia Hidrelétrica do São Francisco) é o uso da medição da temperatura externa do pára-raios através de termovisão. Apesar da técnica mostrar resultados satisfatórios não existe um limite de temperatura que determine se um pára-raios está apto ou não ao uso. Devido às diversas configurações dos pára-raios, os mesmos podem apresentar temperaturas externas diferentes apesar de seus varistores estarem na mesma temperatura.

Este trabalho tem por finalidade implementar uma rotina computacional em C++, baseada no método dos volumes finitos. A rotina deve ser capaz de determinar a temperatura dos varistores utilizando como dados de entrada a temperatura externa, a corrente de fuga resistiva e a geometria do pára-raios.

## 2. O PÁRA-RAIOS DE ÓXIDO DE ZINCO

O pára-raios é um equipamento indispensável para a coordenação de isolamento. Em um sistema podem ocorrer sobretensões de até cinco vezes a tensão nominal do sistema. Caso não fossem instalados os pára-raios, os equipamentos necessitariam de isolamento suficiente para suportar as sobretensões sem se danificar (Hinrichsen, 2001).

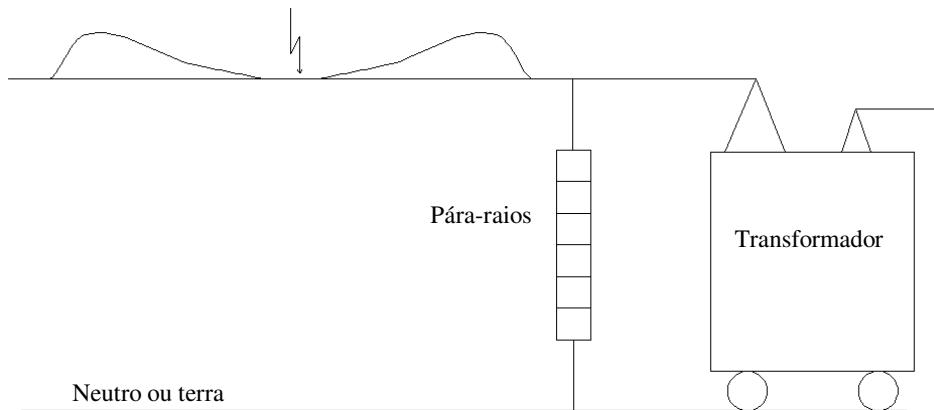


Figura 1 – Posição de montagem do pára-raios de óxido de zinco (Costa, 1999)

A pastilha de óxido de zinco (varistor) apresenta uma característica V-I extremamente não-linear. Quando o pára-raios de óxido de zinco está submetido às tensões nominais do sistema, a sua corrente é muito pequena. Mas em um surto, tanto de manobra quanto atmosférico, a resistência entre os terminais se torna muito pequena, fazendo com que a corrente aumente de modo que o nível de tensão sob os equipamentos da instalação não exceda os valores permitidos.

Existem muitas maneiras diferentes de se construir um pára-raios. Na Fig. (2) pode ser visto uma das configurações mais básicas. No centro do pára-raios fica a sua parte ativa. Nela estão

localizadas as pastilhas de óxido de zinco. Elas são quase sempre cilíndricas. O diâmetro varia geralmente de 30 mm até cerca de 100 mm, quanto maior o diâmetro maior a capacidade de absorção de energia. A altura varia de 20 mm a 45 mm, sendo dependente do sistema de produção. Quanto maior a altura e o diâmetro mais difícil é para se produzir um varistor homogêneo.

Na coluna central ainda existem alguns espaçadores metálicos. Geralmente são tubos de alumínio com um disco nas terminações para que haja um contato homogêneo com as pastilhas, mas também podem ser empregados cilindros sólidos. Eles servem para que a parte ativa do pára-raios tenha a altura necessária que garanta a distância de escoamento da parte externa do invólucro, melhorar a distribuição de campo elétrico e para ajudar na dissipação do calor.

Uma mola e bastões de FRP (da sigla em inglês para plástico reforçado com fibra de vidro) são usados para manter a coluna na pressão necessária, para que não haja modificação da posição durante o transporte, ou quando o pára-raios for instalado em posições diferentes da vertical. A mola também é responsável pela melhoria dos contatos elétricos entre os diversos componentes do pára-raios. Um componente importante é o encapsulamento. Hoje em dia, já são usados pára-raios com encapsulamento polimérico, mas para níveis de tensão mais elevados ainda são usados pára-raios com encapsulamento em porcelana.

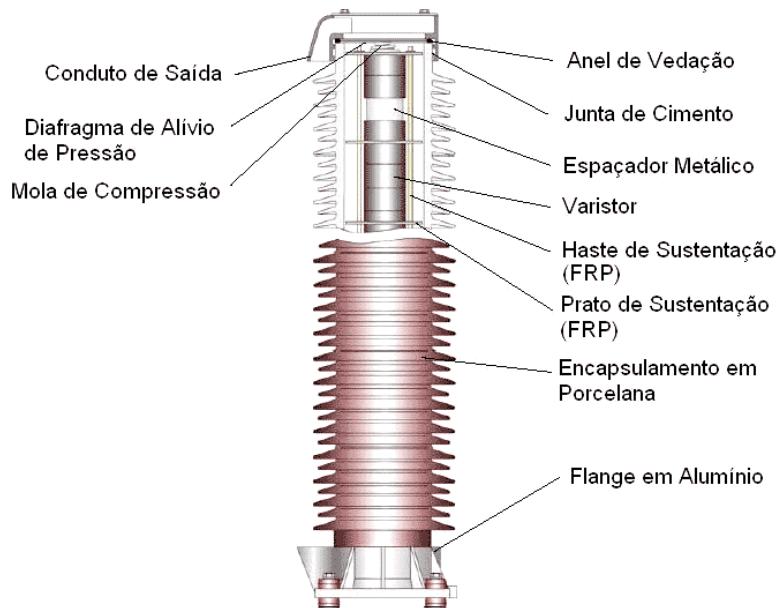


Figura 2 – Vista de um pára-raios mostrando os seus detalhes (Hinrichsen, 2001)

### 3. MÉTODO DOS VOLUMES FINITOS

No método dos volumes finitos, o volume é dividido em vários volumes de controle não sobrepostos, de modo que haja um nó da malha em cada volume de controle. Na Fig. (3) pode ser visto o balanço de energia para um volume elementar, onde a energia de entrada mais a energia gerada internamente menos a energia de saída é igual a energia acumulada.

A partir da equação tridimensional da condução de calor dada na Eq. (1), a mesma foi integrada no volume e no tempo.

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{k}{c_p} r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \frac{k}{c_p} \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{k}{c_p} \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q}, \quad (1)$$

sendo  $T$  a temperatura,  $t$  o tempo,  $k$  a condutividade térmica,  $cp$  o calor específico,  $\rho$  a densidade,  $q$  a geração de calor,  $r$  o raio,  $\partial\theta$  o incremento angular,  $\partial z$  o incremento axial e  $\partial r$  o incremento radial.

Devido à simetria do pária-raios de óxido de zinco a implementação foi feita em coordenadas cilíndricas e considerando uma simetria axial. Desse modo, a malha pode ser implementada como uma malha bidimensional conforme mostrado na Fig. (4), onde os índices em maiúsculo fazem referência ao centro do volume e os índices em minúsculo fazem referência a face do volume de controle. Levando em consideração a simetria, a variação da temperatura na coordenada  $\theta$  foi igualada a zero, e o  $\Delta\theta$  foi igualado a uma unidade, de modo que a Eq. (1), depois de integrada pode ser escrita na forma:

$$A_p T_p = A_e T_E + A_w T_W + A_n T_N + A_s T_S + A_p^o T_p^o + S_c r \Delta r \Delta z, \quad (2)$$

em que:

$$A_e = \frac{k}{cp} \frac{r_e \Delta z}{\Delta r}$$

$$A_w = \frac{k}{cp} \frac{r_w \Delta z}{\Delta r}$$

$$A_n = \frac{k}{cp} \frac{r \Delta r}{\Delta z}$$

$$A_s = \frac{k}{cp} \frac{r \Delta r}{\Delta z}$$

$$A_p^o = \frac{r \Delta r \Delta z}{\Delta t}$$

$$A_p = A_e + A_w + A_n + A_s + A_p^o$$

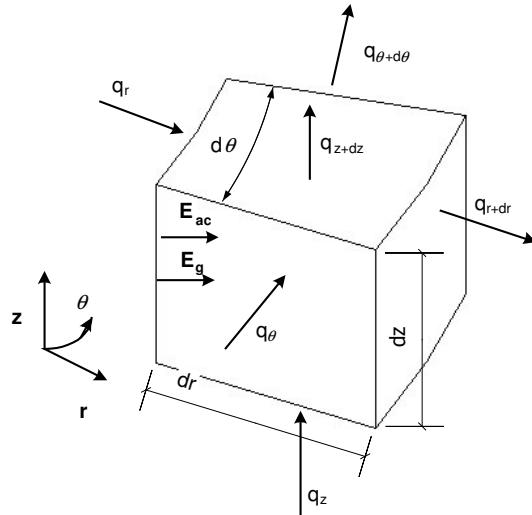


Figura 3 – Volume de controle mostrando o balanço de energia

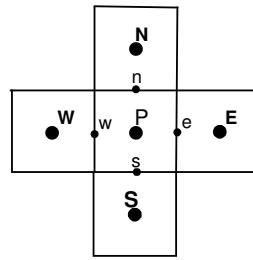


Figura 4 – Perfil de um volume de controle na malha simplificada

#### 4. IMPLEMENTAÇÃO

O processo de implementação das rotinas foi feito levando em consideração a simetria axial e as equações obtidas no item anterior. Nas Fig. (5) e (6) podem ser vistas as configurações externa e interna do pára-raios real e do pára-raios simplificado.

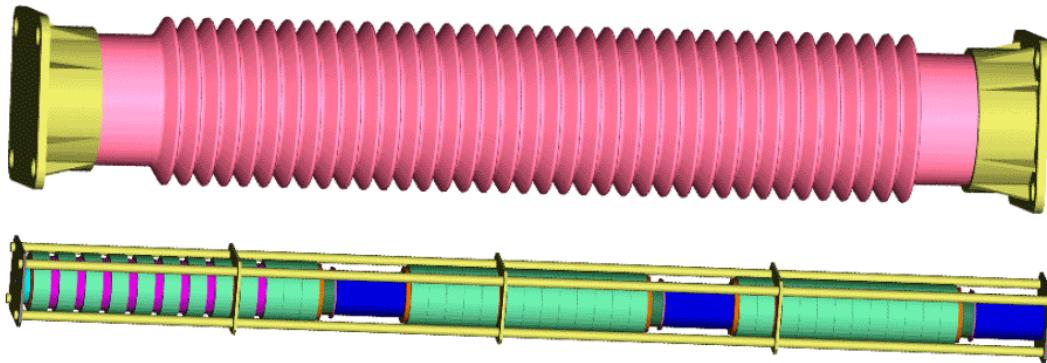


Figura 5 – Configuração do pára-raios real

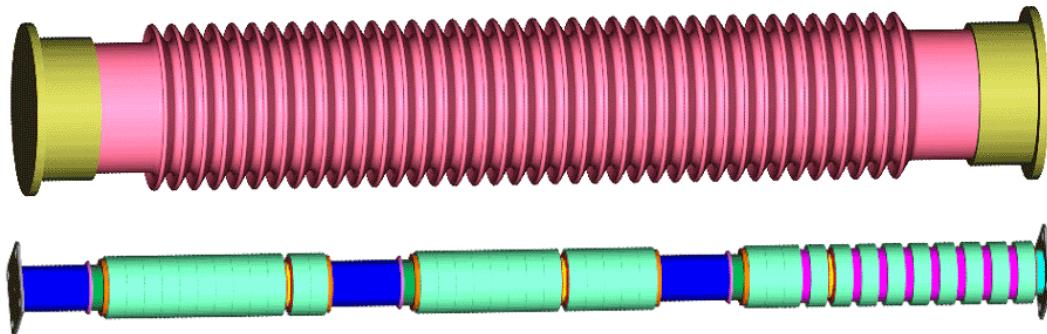


Figura 6 – Configuração simplificada do pára-raios

##### 4.1. Multiblocos

Nem sempre é possível fazer um sistema coordenado cujo mapeamento se dê em um único bloco. O caso do pára-raios é um deles. O pára-raios possui aletas que dificultam o desenho de sua malha. Mesmo considerando o perfil da aleta como um retângulo, a geração da malha não é muito eficiente. Devido a este fator e a possibilidade de facilitar a entrada de dados se optou por fazer uma

abordagem do problema através da técnica de multiblocos. Segundo Maliska (1995), existem duas maneiras de se aplicar a técnica de multiblocos: volumes coincidentes e volumes não-coincidentes.

Na técnica dos volumes coincidentes, é necessário que as malhas geradas sejam muito semelhantes de modo que os volumes na interface tenham dimensões coincidentes, conforme pode ser visto na Fig. (7). O emprego da técnica seria semelhante à resolução normal do problema em um único bloco, já que os blocos teriam volumes semelhantes. Esta técnica tornaria muito difícil a entrada de dados para o usuário, fazendo com que fosse escolhida a técnica de volumes não-coincidentes.

A técnica de volumes não coincidentes é bastante semelhante à de volumes coincidentes. Na técnica de volumes não-coincidentes cria-se um volume de controle fictício no outro bloco e a temperatura usada no cálculo é uma interpolação da temperatura dos volumes da fronteira. Uma simplificação que confere bons resultados é atribuir ao ponto fictício o valor da variável existente no ponto mais próximo de P. A aproximação vai se tornando menos grave quanto mais refinada for a malha. Como em soluções de problemas reais, em geral, a malha é razoavelmente bem refinada, o procedimento não apresenta contra-indicações (Maliska, 1995).

A abordagem utilizada no trabalho foi a dos volumes não-coincidentes simplificada. Um exemplo da técnica dos volumes não-coincidentes simplificada pode ser visto na Fig. (8).

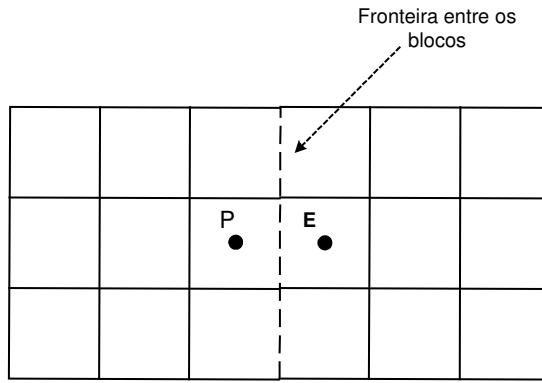


Figura 7 – Interface com volumes coincidentes

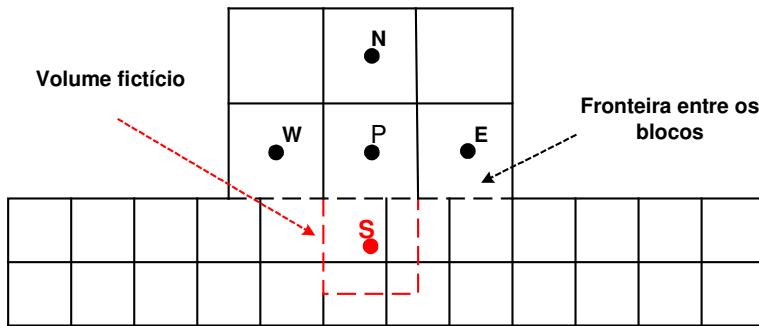


Figura 8 – Interface com volumes não-coincidentes

## 5. EXPERIMENTO E SIMULAÇÃO

De modo a validar a rotina computacional foram realizados experimentos no Laboratório de Alta Tensão da Universidade Federal de Campina Grande. Foi utilizado o circuito mostrado na Fig. (9). O pára-raios tem uma corrente com uma componente resistiva e outra componente capacitiva. Como apenas a componente resistiva é responsável pelo aquecimento do pára-raios, é necessário usar o circuito para se obter apenas a corrente resistiva. Com posse da corrente resistiva

e da tensão aplicada ao pára-raios é possível determinar a potência em watts responsável pelo aquecimento interno.

As temperaturas do pára-raios foram medidas em diversos pontos. As medições foram feitas utilizando-se termômetros digitais, e as sondas foram inseridas nos pára-raios através de furos de aproximadamente 4 mm feitos na porcelana. Foram feitas medições das temperaturas nos flanges, na parte interna da porcelana, na face de alguns varistores, na parte externa da porcelana, além de medições da temperatura ambiente. A montagem pode ser visto da Fig. (10).

Na Tab. (1) são mostrados os valores das características térmicas dos materiais utilizados nas simulações. O passo de tempo utilizado nas iterações da simulação foi de 1 segundo e a temperatura ambiente foi de 26,1°C. O coeficiente de conversão (h) utilizado na simulação foi igual a 5, conforme sugerido por Ozisik (1990).

O número de total de pontos é função da configuração do pára-raios simulado. O pára-raios é montado virtualmente a partir de blocos. Eles são definidos através do agrupamento partes do corpo do pára-raios que se apresentam com as mesmas características físicas e geometria retangular. Na Fig. (11) é mostrado um esboço de um pára-raios típico a base de ZnO, indicando os respectivos blocos.

Tabela 1. Constantes usadas no modelo eletrotérmico

Material	Valores		
	Conduvidade W/(m K)	Calor específico W/(kg K)	Densidade Kg/m <sup>3</sup>
Óxido de zinco	23,0	456,3	5258,0
Alumínio	204,0	896,0	2707,0
Ferro	43,0	473,0	7801,0
Porcelana	1,6	776,0	2400,0
Ar	0,02624	1,0057	1,177

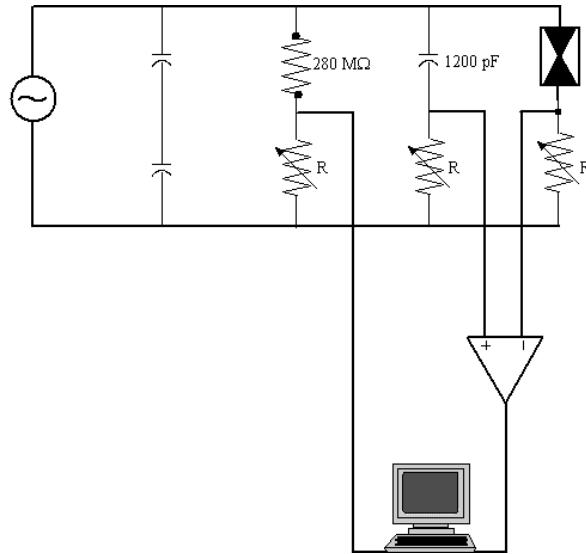


Figura 9 – Circuito utilizado nas montagens de laboratório



Figura 10 – Foto do arranjo experimental

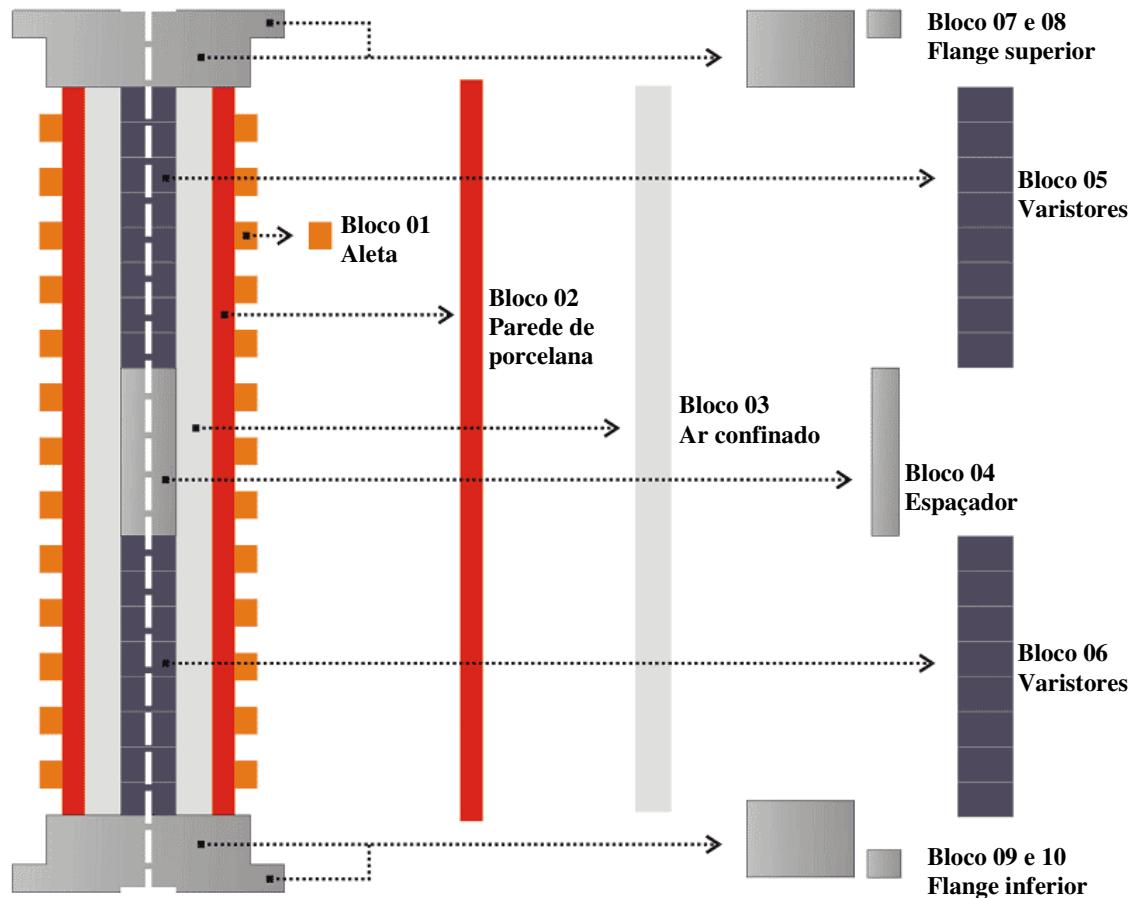


Figura 11 – Esboço de um pára-raios típico e os respectivos blocos

## 6. RESULTADOS

Uma montagem com um pára-raios de óxido de zinco com tensão nominal de 52 kV de um fabricante mundial foi realizada. O pára-raios foi submetido a sua tensão de operação por um período de aproximadamente 4 horas até que o mesmo estivesse em regime permanente. Ao final do período de aquecimento foram medidas as temperaturas na lateral de dois varistores, em três pontos internos da porcelana e em um espaçador metálico, além da temperatura ambiente.

Com base nas temperaturas medidas e com as formas de onda obtidas da tensão aplicada e da corrente resistiva, foi implementado o modelo computacional do pára-raios para realizar as simulações de transferência de calor. Os resultados obtidos nas experiências e com a rotina computacional podem ser vistos na Tab. (2).

Tabela 2. Resultados obtidos com a simulação e com o experimento.

	Varistor na parte superior da coluna	Varistor no meio da coluna	Parte superior interna da porcelana	Parte média interna da porcelana	Parte inferior interna da porcelana	Espaçador de alumínio
Experimento	28,5°C	27,0°C	24,7°C	27,6°C	25,9°C	25,7°C
Simulação	27,178°C	27,646°C	26,115°C	26,144°C	26,133°C	26,11°C

## 7. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos, apesar de apresentarem algumas diferenças de valores foram muito animadores. A principal diferença na temperatura dos varistores se deve ao fato de na simulação ser usada a mesma densidade de potência para todos os varistores. Entretanto, no pára-raios real, devido a não uniformidade de distribuição da tensão, os varistores que se localizam na parte superior da coluna apresentam uma tensão mais. Esse fato faz com que os varistores localizados na parte superior do pára-raios aqueçam um pouco mais, como pode ser visto na Tab. (1). Apesar das diferenças os valores médios das temperaturas dos varistores foram muito próximos.

A porcelana do pára-raios no experimento apresentou um comportamento diferente do esperado. A possibilidade da influência do campo elétrico na precisão dos termômetros deve ser levada em consideração nos próximos estudos. Vale lembrar que o pára-raios usado no experimento é um pára-raios antigo e alguns varistores podem não estar mais funcionando corretamente, aquecendo em demasia.

Nos trabalhos futuros, será implementada a transferência de calor por radiação, a implementação de uma entrada de dados com coordenadas generalizadas, além de levar em consideração a não uniformidade da tensão no pára-raios. Dessa forma espera-se que o modelo fique mais fiel. Também será implementada uma interface para facilitar a entrada e saída de dados. Além disso, estão marcados novos ensaios, dessa vez com pára-raios novos, e utilizando termovisão.

## 8. AGRADECIMENTOS

Os autores desejam externar seus agradecimentos a CAPES e a CHESF pelo apoio a realização do trabalho. Também devemos lembrar de Ronimack Trajano de Souza e a Max Gleison Gonçalves Neri, que foram indispensáveis para a realização dos experimentos.

## 9. REFERÊNCIAS

- Costa, E. G., “Análise do Desempenho de Pára-Raios de Óxido de Zinco”, Tese de doutorado, Departamento de Engenharia Elétrica, UFCG, Campina Grande, PB, 1999.  
Hinrichsen, V., Metal-Oxide surge arresters fundamentals. Berlim, 2001.

- Maliska, R. C., 1995, "Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional", LCT, Rio de Janeiro, Brasil.
- Ozisik, M. N., 1990, Transferência de calor - um texto básico. Rio de Janeiro, Editora Guanabara, Brasil.

## 10. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

## IMPLEMENTATION OF A ZINC OXIDE SURGE ARRESTER THERMO-ELECTRIC MODEL

### **Rodrigo Santos da Nóbrega**

Federal University of Campina Grande, Department of Electric Engineering, Av. Aprígio Veloso, 882, 58.109-970, Campina Grande – PB, e-mail: [rodrigo@dee.ufcg.edu.br](mailto:rodrigo@dee.ufcg.edu.br)

### **Edson Guedes da Costa**

Federal University of Campina Grande, Department of Electric Engineering, Av. Aprígio Veloso, 882, 58.109-970, Campina Grande – PB, e-mail: [edson@dee.ufcg.edu.br](mailto:edson@dee.ufcg.edu.br)

### **Tarso Vilela Ferreira**

Federal University of Campina Grande, Department of Electric Engineering, Av. Aprígio Veloso, 882, 58.109-970, Campina Grande – PB, e-mail: [tarso@sergipe.com.br](mailto:tarso@sergipe.com.br)

### **Antonio Gilson Barbosa de Lima**

Federal University of Campina Grande, Department of Mechanical Engineering, Av. Aprígio Veloso, 882, 58.109-970, Campina Grande – PB, e-mail: [gilson@dem.ufcg.edu.br](mailto:gilson@dem.ufcg.edu.br)

### **Marcelo José Albuquerque Maia**

CHESF - Companhia Hidrelétrica do São Francisco, R. Delmiro Gouveia, 333. - Bongi. Recife – PE – Brasil. CEP 50.761-901, e-mail: [mjamaia@chesf.gov.br](mailto:mjamaia@chesf.gov.br)

**Abstract.** Zinc oxide surge arresters are protection equipments widely used in transmission and distribution systems. When submitted to thermal or electrical stress the surge arrester characteristics degenerates. Up to today there is no really conclusive surge arrester evaluation method. One of the most used techniques is the infrared thermography. This goal of this paper is to implement a computational tool to help the measurements made by infrared thermography, in a way to obtain the temperature of the surge arrester active part. It was implemented a computational routine using C++ programming language, finite volumes e the "multiblock" technique, which uses as input data the room temperature and the electrical current through the surge arrester.