

Análise Térmica de Para-raios Poliméricos de ZnO Utilizando Simulações Computacionais e Termografia

A. F. Andrade¹, H. M. M. Alves¹, E. G. da Costa^{2*}, J. F. de Araujo³

¹Graduando em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Rua Aprígio Veloso 882, Brasil

²Professor, Departamento de Engenharia Elétrica, UFCG, Rua Aprígio Veloso 882, Brasil

³Doutorando em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Rua Aprígio Veloso 882, Brasil

*E-mail: <edson@dee.ufcg.edu.br>

Resumo — Neste trabalho é realizada uma análise do comportamento térmico, de um para-raios polimérico de ZnO, utilizando simulações computacionais e termografia. As simulações computacionais foram desenvolvidas no ambiente computacional COMSOL Multiphysics® e as termografias foram feitas mediante o uso de um termovisor. Os resultados foram obtidos por meio da aplicação e simulação de diferentes níveis de tensão no para-raios. A partir dos resultados, verificou-se que os valores de temperatura, obtidos na superfície do para-raios, podem ser usados para classificar as condições operativas do equipamento e auxiliar as equipes de manutenção do processo da sua substituição ou não. Isto é, com a realização de simulações prévias, para os vários modelos ou configurações de para-raios, torna-se possível definir com segurança critérios precisos e amigáveis, quanto à criticidade do estado operacional dos para-raios em campo.

Palavras-chave — Para-raios poliméricos de ZnO; termovisão; simulações computacionais, temperatura, método dos elementos finitos.

I. INTRODUÇÃO

Os para-raios à base de óxido de zinco (ZnO) são equipamentos utilizados na proteção dos sistemas elétricos contra surtos atmosféricos e de manobra. Devido à grande quantidade de energia envolvida, os para-raios não devem ser utilizados como equipamentos de proteção contra as sobretensões temporárias. Para prover a suportabilidade, os equipamentos devem ser construídos com capacidade de suportar as sobretensões temporárias, ou dispositivos redutores de sobretensão devem ser inseridos no sistema [1, 2]. Quando aplicado na proteção contra surtos, o uso de para-raios de ZnO contribui decisivamente para o aumento da confiabilidade, economia e continuidade de operação dos sistemas que protegem [2].

Quando comparado a outros equipamentos de uma subestação, o para-raios é um dos que possui mais baixo custo. Por isso, pode-se pensar, a princípio, em deixar a inspeção e manutenção destes equipamentos em segundo plano, substituindo-os quando necessário. Entretanto, a grande quantidade de para-raios no sistema elétrico torna proibitiva essa política de substituição. Isso faz com que seja indispensável o acompanhamento criterioso de seu estado operacional, buscando prolongar a vida útil do para-raios o máximo possível. Para isso, é necessário projetá-lo para suportar o aumento de temperatura durante sobretensões temporárias ou na ocorrência de surtos isolados. Caso o para-

raios seja submetido a elevados esforços elétricos, a quantidade de energia térmica absorvida pelos varistores pode ser maior que a sua capacidade de dissipação térmica. Neste caso, o para-raios entra em um processo contínuo de elevação de temperatura e de corrente de fuga, chamado de avalanche térmica, o qual pode causar a sua deterioração total [3].

Como o comportamento térmico do para-raios é um fator significativo no seu funcionamento adequado, é necessário o desenvolvimento de ferramentas de monitoramento para identificar e prevenir as falhas que podem acontecer. As falhas podem ocasionar desligamentos não programados, danos a outros equipamentos e, principalmente, risco de morte aos profissionais que trabalham nos sistemas elétricos [4].

Dentre as principais ferramentas para o monitoramento dos para-raios, a termografia é uma das que se destaca. Contudo, os valores de temperatura externa obtidos com o uso dessa técnica podem ser diferentes em relação à temperatura interna, a depender do modelo de para-raios.

Quando se analisa os para-raios com invólucro de porcelana, a maioria das concessionárias tem critérios térmicos definidos para a definição da sua condição operacional. Entretanto, devido ao uso de para-raios com invólucro polimérico datar de décadas recentes, as concessionárias possuem uma experiência limitada em relação a eles, não podendo os critérios térmicos aplicados aos para-raios de porcelana ser aplicados aos poliméricos [5].

Como alternativa, a utilização de simulações computacionais, para o estudo térmico de para-raios, tem sido cada vez mais empregada nos últimos anos. As simulações computacionais oferecem diversas vantagens, tais como: a redução de custo; possibilidade de visualização e estudo dos resultados de diversas formas gráficas; definição dos critérios da condição operacional.

Sabendo das informações apresentadas, acredita-se que uma análise térmica realizada por meio da termovisão e de simulações computacionais pode oferecer resultados completos, e confiáveis, para os estudos relacionados aos para-raios poliméricos de ZnO [6].

Assim sendo, o objetivo deste trabalho é utilizar simulações computacionais, e medições em laboratório com um termovisor, para avaliar o comportamento térmico de um para-raios polimérico de ZnO empregado em sistemas de distribuição. Espera-se que as técnicas apresentadas neste trabalho possam ser utilizadas como ferramentas

complementares ao monitoramento dos para-raios poliméricos de ZnO.

II. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A. Aspectos Construtivos

Um avanço tecnológico significativo nos aspectos construtivos dos para-raios ou supressores de surto ocorreu em meados da década de 1970 quando surgiram os varistores de ZnO, capazes de suportar as elevadas tensões nominais dos sistemas elétricos sem a necessidade do uso de centelhadores.

Este novo material, empregado inicialmente na proteção de dispositivos eletrônicos, passou a ser utilizado na composição de supressores de surtos, representando um grande avanço na proteção dos sistemas elétricos. Com eles, foi possível obter dispositivos mais confiáveis, com uma característica $V \times I$ mais não linear, e com capacidade de dissipação de energia duas vezes maior que a promovida pelos supressores de carboneto de silício [3], [4].

Os para-raios de ZnO são equipamentos de estrutura simples. Basicamente são constituídos de uma coluna de varistores envolvida por uma coluna de porcelana, ou material polimérico, havendo ainda alguns outros componentes estruturais.

A coluna de porcelana ou polimérica apresenta, externamente, aletas ao longo de todo o seu comprimento, que aumentam a distância de escoamento entre os terminais, com o objetivo de reduzir as correntes superficiais externas. A configuração física do para-raios depende do sistema ao qual será aplicado. A representação gráfica, com um corte da estrutura física, de um para-raios pode ser vista na Fig. 1 e mais informações sobre os aspectos construtivos dos supressores de surtos podem ser encontradas em [3], [4], [6] e [7].



Figura 1. Representação gráfica do para-raios de ZnO.

B. Comportamento Elétrico

EM [8] é realizado um estudo de um modelo experimental para o comportamento elétrico dos varistores de ZnO. No estudo é apresentada a Equação 1, na qual são relacionados a densidade de corrente J (em A/cm²) e a magnitude do campo elétrico E (em kV/cm).

$$J = C \cdot E^B \quad (1)$$

As constantes C e B , apresentadas em (1), são definidas para três diferentes regiões, conforme apresentado na Tabela I:

TABELA I. CARACTERÍSTICA $J \times E$ PARA UM VARISTOR DE ZnO TÍPICO

E (kV/cm)	C	B
$E < 2,15$	$1,2 \cdot 10^{-5}$	1,74
$2,15 < E < 3,24$	$3,1 \cdot 10^{-16}$	33,6
$3,24 < E < 4,89$	$2,36 \cdot 10^{-5}$	10,33

A característica de alta não linearidade presente na relação $V \times I$ do varistor, confere ao para-raios a capacidade de se comportar aproximadamente como um circuito aberto na tensão normal de operação. Portanto, a interferência no sistema em que está instalado é mínima em condições normais. Se o para-raios, porém, for submetido a uma sobretensão, ele permite a passagem de correntes da ordem de kA, protegendo os equipamentos em cuja linha ele está conectado. Essa propriedade permitiu que para-raios fossem ligados diretamente ao sistema elétrico, pois em condições normais de operação existe apenas uma corrente de fuga, em geral da ordem de microampères e, portanto, as perdas de energia são praticamente desprezíveis. Na Fig. 2 é possível ver um gráfico da curva característica típica de um para-raios [10].

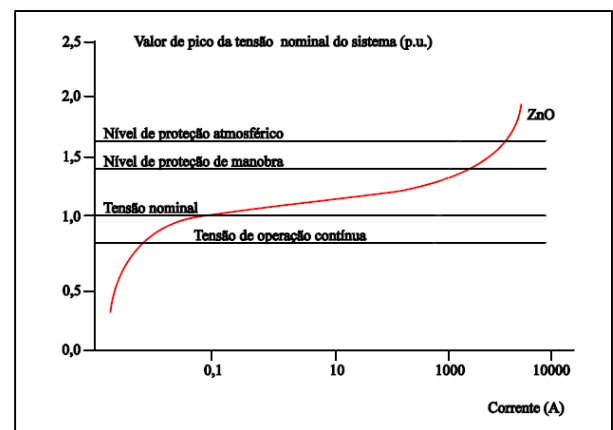


Figura 2 – Curva característica $V \times I$ de um para-raios de ZnO.
Fonte: (ABB, 2005 - Adaptado) [10]

B. Método dos Elementos Finitos

O Método dos Elementos Finitos (MEF) foi inicialmente desenvolvido em 1943, por Richard Courant, que usou como base o Método de Ritz. O método é utilizado para resolução de problemas que envolvem equações diferenciais parciais. Nos últimos anos, o MEF tem sido bastante aplicado, devido, principalmente, à precisão dos seus resultados e versatilidade. Por causa destas características, o MEF é utilizado para resolver problemas contidos em, praticamente, todas as áreas da física [11].

A análise de problemas por meio do MEF ocorre a partir de quatro passos básicos:

- Discretização: consiste na representação abstrata da região que se deseja analisar. Isto é feito subdividindo-se a região em um número finito de elementos, os quais geralmente têm a forma de polígonos simples;
- Equacionamento dos elementos: um modelo equacional é determinado, com o intuito de reger fisicamente os elementos. Dessa forma, são montadas as matrizes de coeficientes para cada elemento do problema;
- Junção dos elementos: nesta etapa a matriz global de elementos é montada. Todavia, o sistema resultante ainda não é solucionável, pois tem mais incógnitas do que equações. Para diminuir o número de incógnitas, aplicam-se as condições de contorno;
- Solução do sistema: O sistema finalmente é solucionado mediante a aplicação de métodos tradicionais de cálculo numérico.

C. COMSOL Multiphysics®¹

O COMSOL Multiphysics® é um *software* capaz de solucionar diversos problemas que possam ser modelados por meio de equações diferenciais parciais. Os resultados são encontrados a partir da aplicação do MEF. As etapas de solução dos problemas podem ser divididas em três fases:

- Pré-processamento: são definidas pelo usuário as entradas do problema – geometria, as constantes dos materiais e as condições de contorno;
- Processamento: é criada uma malha e o método dos elementos finitos é aplicado;
- Pós-processamento: é o tratamento dos dados para a visualização dos resultados, seja em forma de gráficos ou mapas 3D.

As soluções podem ser vistas por meio de mapas de cores em uma, duas e três dimensões; gráficos de linhas e de superfícies; animações; entre outras. Além disso, o *software* também possui módulos que servem para que as equações sejam organizadas de acordo com a física necessária, facilitando o manuseio por parte do usuário [12]. Apesar de toda a facilidade proporcionada pelo COMSOL, deve-se deixar claro que é necessário ter sólido embasamento teórico acerca do problema em estudo, ou erros graves de modelagem e interpretação de resultados poderão ocorrer.

III. METODOLOGIA

A. Testes em laboratório (Termografia)

Para realizar as medições de temperatura no para-raios, foi necessário utilizar um termovisor FLIR P60. Para aplicar os diferentes níveis de tensão no para-raios, foi desenvolvida a plataforma experimental apresentada na Fig. 3.



Figura 3. Fotografia da montagem experimental utilizada nas medições de temperatura.

Ainda para aplicar os diversos níveis de tensões, foi necessário utilizar o esquema mostrado na Fig. 4. Nele, um valor de tensão deve ser aplicado durante 15 minutos, seguido por 30 minutos de resfriamento. As temperaturas medidas pelo termovisor devem ser anotadas durante as aplicações das tensões. As anotações devem ser feitas a cada 3 minutos no aquecimento e a cada 5 minutos durante o resfriamento.



1- Aplicação de 13,8 kV por 15 minutos;

2- Resfriamento por 30 minutos;

3- Aplicação de 13,7 kV por 15 minutos;

4- Aplicação de 14 kV por 15 minutos;

Figura 4. Esquema gráfico do ensaio realizado para as medições de temperatura.

O esquema apresentado na Fig. 4 deve ser reproduzido no COMSOL, e os resultados devem ser avaliados e comparados com os obtidos experimentalmente.

Para energizar a plataforma experimental, foi necessário utilizar uma bancada de medição, a qual permite medir a tensão aplicada. O diagrama do circuito utilizado pode ser visto na Fig. 5. Além disso, medindo a tensão com um resistor *shunt* de 1 k Ω em série com o para-raios, foi obtida a forma de onda de corrente elétrica (forma de onda com coloração azul), conforme pode ser visto na Fig. 6. A característica capacitiva e não linear dos elementos varistores que compõem o para-raios pode ser visualizada.

¹COMSOL Multiphysics é marca registrada Comsol AB.

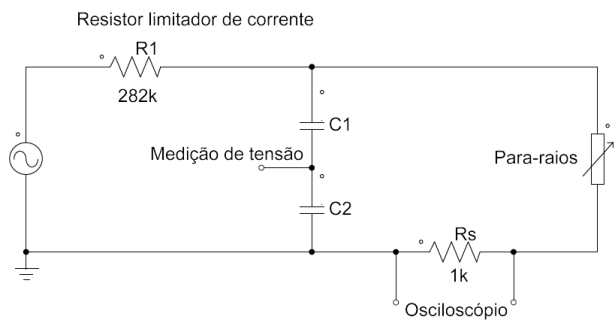


Figura 5. Diagrama do circuito utilizado para injeção de potência nos para-raios e medições de tensão e corrente.

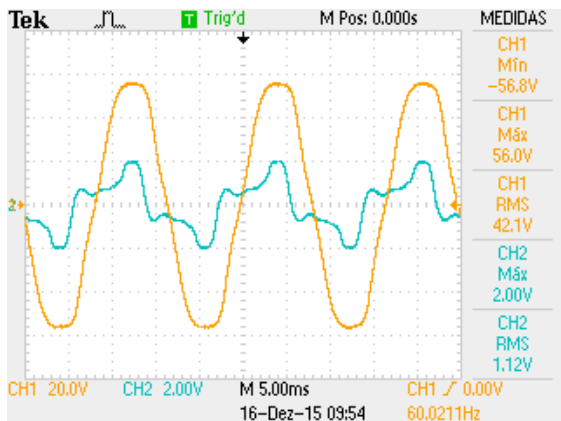


Figura 6. Formas de onda obtidas no osciloscópio

Para calcular a potência absorvida pelo para-raios, foi necessário importar os dados no computador, onde uma rotina para cálculo da potência média em cada teste foi desenvolvida no ambiente Matlab®. Os valores de potência podem ser vistos na Tabela II. As potências médias absorvidas foram usadas como variáveis de entrada na simulação.

TABELA II. VALORES DE POTÊNCIA ATIVA OBTIDOS

Ensaio	1	2	3
Tensão (kV)	13,8	13,7	14,0
Potência média absorvida (W)	11,83	11,15	16,61

Na Fig. 7 pode ser vista a forma de onda de potência no para-raios, correspondente ao primeiro teste.

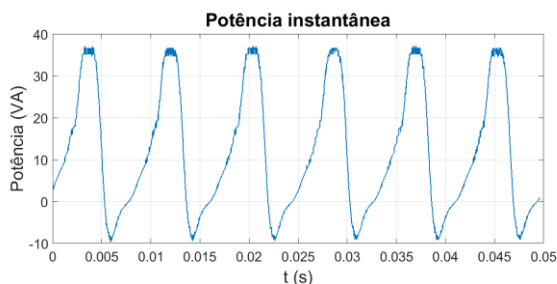


Figura 7. Forma de onda da potência elétrica fornecida aos para-raios.

C. Simulações Computacionais

Para a realização da simulação computacional, foi necessário construir a representação gráfica mostrada na Fig. 8, na qual pode ser visto um exemplo da modelagem do para-raios polimérico, com tensão nominal de 12 kV.

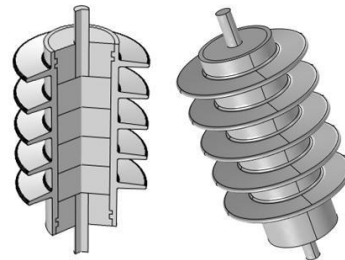


Figura 8. Para-raios de ZnO classe distribuição com tensão nominal 12 kV.

Depois de modelada a geometria do para-raios, no COMSOL foi necessário fazer a atribuição de materiais com suas respectivas características físicas aos diferentes domínios da peça estudada.

Em seguida, devem-se utilizar os comandos do software para gerar uma malha que irá dividir todo o ambiente em pequenos elementos em formas geométricas simples, na maioria das vezes, triângulos. Por fim, a simulação é realizada, e o software utiliza o MEF para encontrar soluções aproximadas para o problema que, no caso, consiste em aquecimento por efeito Joule e propagação de calor.

IV. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com o intuito de facilitar a visualização dos resultados obtidos com a termografia e a comparação com as simulações computacionais, foram definidos 4 pontos específicos no para-raios de teste, que tiveram suas temperaturas monitoradas, e 2 pontos no para-raios simulado. Os pontos escolhidos estão representados nas Figs. 9a e 9b.

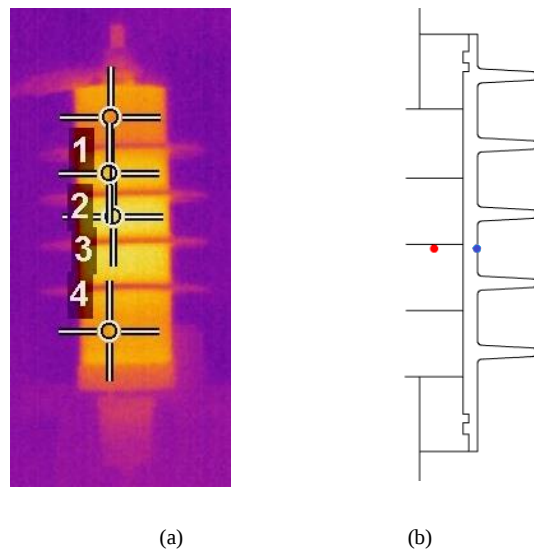


Figura 9. Pontos de medição e de análise na simulação. a) Pontos definidos na superfície do para-raios de teste. b) Pontos definidos na superfície e no interior do para-raios simulado.

Na Fig. 10 é mostrada a evolução da temperatura no tempo, no ponto 3. A curva cheia, em azul, representa os valores das temperaturas obtidas na simulação quando foram injetadas as potências indicadas na Tabela II, obedecendo o esquema da Fig. 4. A curva pontilhada, em azul, representa os valores de temperatura medidos na superfície do para-raios. A curva foi obtida por ajustes dos valores medidos e indicados por asteriscos.

A partir dos resultados apresentados no gráfico, constatou-se que os valores de temperatura obtidos na superfície do para-raios simulado (curva azul cheia) estão bastante próximos dos valores medidos na superfície do para-raios de teste (curva azul pontilhada). Isto valida os parâmetros e as condições de contorno utilizados na simulação, como também, corrobora que as simulações computacionais podem ser aplicadas como ferramenta de análise térmica. Discrepâncias em alguns trechos podem ser atribuídas a erros no sincronismo da medição.

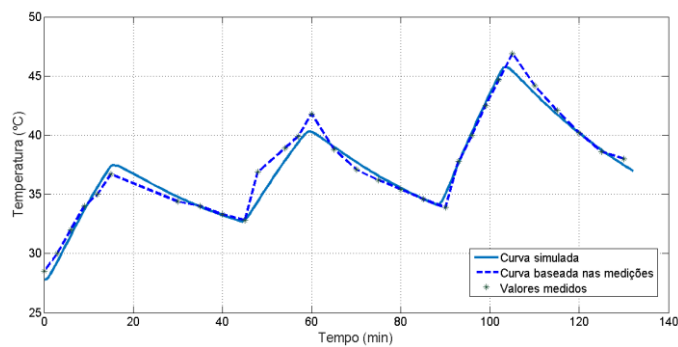


Figura 10. Evolução da temperatura no para-raios.

Também foram traçados gráficos da simulação das evoluções da temperatura no tempo para os pontos indicados na Fig. 9 (a), e o ponto central da coluna de varistores da Fig. 9 (b). As curvas de temperatura podem ser observadas na Fig. 11.

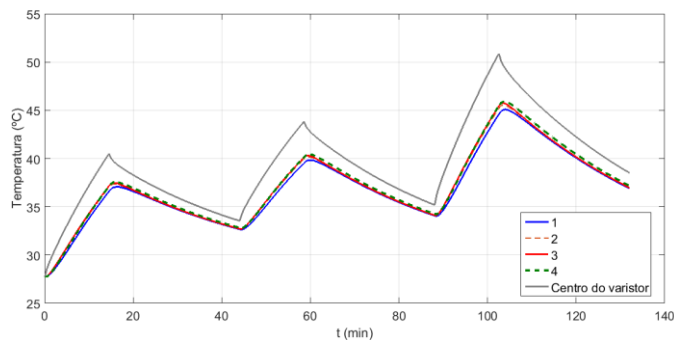


Figura 11. Evolução da temperatura nos pontos da Fig. 9.

Foram observadas diferenças de temperatura de até 3°C entre os varistores e o invólucro.

No início da simulação de cada etapa de aquecimento, a temperatura obtida no ponto 3 foi maior que nos demais. Isso indica um fluxo de calor no sentido axial.

A fim de comparar os resultados das medições obtidas por simulações e termografias, foram selecionadas algumas

imagens do termovisor em determinados instantes do ensaio. Na Fig. 12, é possível ver no mapa térmico do para-raios alguns instantes antes do final da segunda aplicação de tensão (13,7 kV). Na Fig. 13, está representada a configuração térmica 30 minutos após a segunda aplicação de tensão (13,7 kV). Já na Fig. 14, podem ser vistos os níveis de temperatura após a aplicação da última tensão considerada (14 kV); e por fim, na Fig. 15 são mostradas as temperaturas no fim do último resfriamento.

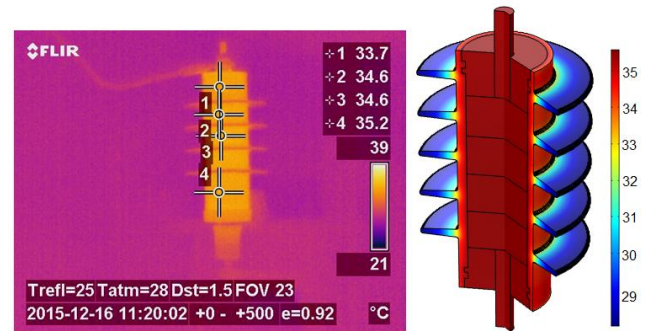


Figura 12. Comparação entre as temperaturas do para-raios de teste e simulado alguns instantes antes do final da aplicação de 13,7 kV.

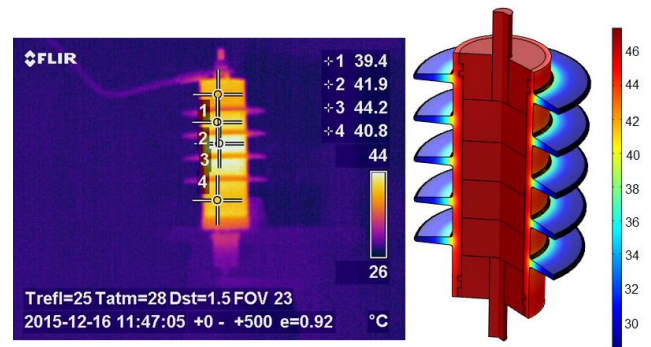


Figura 13. Comparação entre as temperaturas do para-raios de teste e simulado 30 minutos após a aplicação de 13,7 kV.

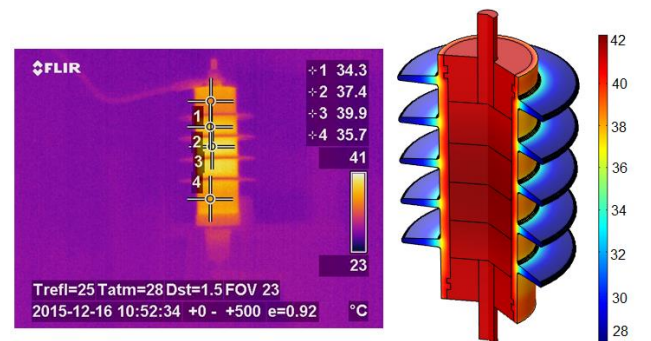


Figura 14. Comparação entre as temperaturas do para-raios de teste e simulado após a aplicação de 14 kV.

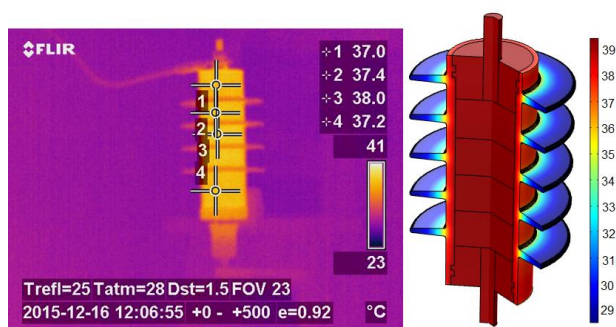


Figura. 15. Comparação entre as temperaturas do para-raios de teste e simulado 30 minutos após a aplicação de 14 kV.

Como é possível visualizar nas imagens, os valores de temperatura na superfície do para-raios em teste foram semelhantes aos valores apresentados na superfície do para-raios simulado, em todos os instantes considerados. Esta constatação ratifica as condições de contorno, os valores dos parâmetros elétricos e térmicos utilizados na simulação, além da física selecionada (Comsol).

Com a validação da simulação, os valores de temperatura no interior de um para-raios podem ser estimados com acurácia. Isto é, conhecendo-se a temperatura externa de um para-raios, pode-se estimar a temperatura do varistor e assim, deliberar sobre a remoção ou não de um para-raios em campo.

Com a realização de simulações prévias, para os vários modelos ou configurações de para-raios, torna-se possível definir, com segurança, critérios precisos e adequados, quanto à criticidade, em três níveis ou estados de degradação: (1) Para-raios em bom estado, (2) apresentando condições operacionais de desgaste médio para o sistema, (3) apresentando condições operacionais críticas para o sistema, com indicação de remoção urgente.

V. CONCLUSÃO

No artigo foi descrito um experimento capaz de gerar calor nos varistores de um para-raios com tensão nominal de 12 kV e as medições das temperaturas (imagens termográficas) na sua superfície, no tempo. Também foram descritas as simulações, em 3D, utilizando-se o Comsol para as condições impostas no experimento.

Os valores de temperatura obtidos por meio das simulações foram consistentes com valores obtidos via termografia, validando a metodologia aplicada na simulação.

Com a validação da simulação, os valores de temperatura no interior de um para-raios podem ser estimados com acurácia. Isto é, conhecendo-se a temperatura externa a um para-raios pode-se estimar a temperatura do varistor e assim, deliberar sobre a remoção ou não de um para-raios, em campo.

Assim, é evidenciada a aplicabilidade do uso das simulações computacionais aliado à termografia como uma ferramenta de monitoramento do estado de conservação de para-raios de ZnO com revestimento polimérico. Isto é, com a realização de simulações prévias, para os vários modelos ou configurações de para-raios, torna-se possível definir com segurança critérios precisos e amigáveis, quanto à criticidade,

em três níveis ou estados de degradação: (1) Para-raios em bom estado, (2) apresentando condições operacionais de desgaste médio para o sistema, (3) apresentando condições operacionais críticas para o sistema, com indicação de remoção urgente.

VI. AGRADECIMENTOS

Ao CNPq pela concessão da bolsa de Iniciação Científica PIBIC-CNPq/UFCG e dos recursos financeiros - Chamada Universal – MCTI/CNPq Nº 14/2013.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] D'AJUZ, ARY, e outros - Equipamentos Elétricos; especificação e aplicação em subestações de alta tensão, FURNAS, 1985.
- [2] FRONTIN, S. O. e outros - Equipamentos de Alta Tensão; Prospecção e Hierarquização de Inovações Tecnológicas, 1a. Edição, Brasília, 2013.
- [3] COSTA, E. G. Análise do Desempenho de Para-raios de Óxido de Zinco. Tese de Doutorado - Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, Abril 1999.
- [4] LIRA, G. R. S. Monitoramento de Para-raios de Óxido de Zinco com Base na Medição da Corrente de Fuga Total. Tese de Doutorado - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Junho 2012.
- [5] COSTA, E. G., ANDRADE, A. F., ALVES, H. M. M., BASTOS, M. A. Thermal Behavior Analysis of a Polimeric Arrester by Computer Simulations. 19th International Symposium on High Voltage Engineering, Pilsen, Czech Republic, August, 2015.
- [6] SILVA, M. A. B. Estudo de Distribuição de Temperatura em Para-Raios de Óxido de Zinco com Invólucro Polimérico. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Fevereiro 2014.
- [7] HINRICHSEN, V. Metal-Oxide Surge Arresters Fundamentals. in Siemens – Power Transmission and Distribution Power Voltage Division, Berlin, 2001.
- [8] NIGOL, O. Methods for Analyzing the Performance of Gapless Metal Oxide Surge Arrester. IEEE Transactions on Power Delivery. Vol. 7, No. 3, July 1992.
- [9] ANDRADE, A. F. Estudos dos tipos de Entrada de Energia Absorvida por Para-raios Poliméricos. Relatório Final do Pibic UFCG-CNPq - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Agosto 2015.
- [10] ABB. Surge Arresters–Buyer's Guide, Edition 8, 2010-12, Ludvika, Sweden, 2009.
- [11] SADIKU, M. (May de 1989). A simple Introduction to Finit Element Analysis of Electromagnetic Problems. IEEE Transactions on Education, 32.
- [12] COMSOL AB. Introduction to COMSOL Multiphysics Version 4.4. December, 2013.