

# Monitoramento da Degradação de Pára-raios de Óxido de Zinco (ZnO)

Marcelo J. A. Maia  
Chesf

Edson G. da Costa  
UFCG

Estácio T. W. Neto  
UFCG

Ronimack T. de Souza  
UFCG

**Resumo** — A medição e a análise harmônica da componente resistiva da corrente de fuga apresenta-se como um dos parâmetros eficientes na determinação do nível de degradação do pára-raios de ZnO. Neste artigo são descritos a metodologia e resultados do aperfeiçoamento de um circuito utilizado para medição de corrente de fuga resistiva em pára-raios de ZnO. Na implementação do circuito utiliza-se um sistema de aquisição de dados para obtenção das formas de onda e rotinas computacionais para calcular o espectro harmônico dos sinais medidos e, com isso, gerar novos sinais necessários para se determinar o sinal da corrente de fuga resistiva. A implementação sugerida neste trabalho, resultado do projeto de P&D Chesf, ciclo 2000/2001 “Aplicação de Modelo Eletrotérmico para Validação de Medições Termográficas em Pára-Raios de Óxido de Zinco”, apresenta resultados confiáveis, além de simplificar significativamente o circuito e as medições em laboratório e no campo.

**Palavras-chave** — análise harmônica, diagnóstico, monitoramento, óxido de zinco, pára-raios

## I. INTRODUÇÃO

Os pára-raios são equipamentos largamente utilizados em sistemas elétricos de potência. Os pára-raios têm como principal função limitar sobretensões provenientes de ocorrências no sistema elétrico (ex. manobras, curtos-circuitos ou descargas atmosféricas), atuando de forma a impedir que valores de tensão acima de determinado nível preestabelecido possam atingir outros equipamentos da subestação [1]. Um pára-raios é formado principalmente por elementos resistivos não lineares, conhecidos como varistores, associado ou não a um centelhador em série. O pára-raios possui um invólucro (polimérico ou porcelana) que garante a estanqueidade (não permitindo principalmente a entrada de umidade e poluentes). A configuração do invólucro proporciona uma maior isolamento externa, corrente de fuga pequena e a sua utilização ao tempo. Atualmente, os invólucros produzidos com materiais poliméricos garantem uma maior estanqueidade [2].

Os autores agradecem à Chesf pelo aporte financeiro ao projeto.

Edson Guedes da Costa, coordenador do projeto, é professor da Universidade Federal de Campina Grande e membro do IEEE e do Cigrê (e-mail: [edson@dee.ufcg.edu.br](mailto:edson@dee.ufcg.edu.br)).

Estácio Tavares Wanderley Neto é aluno de doutorado da Universidade Federal de Campina Grande (e-mail: [estacio@dee.ufcg.edu.br](mailto:estacio@dee.ufcg.edu.br)).

Ronimack Trajano de Souza trabalho na Companhia de água e esgoto de Paraíba (e-mail: [ronimack@dee.ufcg.edu.br](mailto:ronimack@dee.ufcg.edu.br)).

Marcelo José Albuquerque Maia, gerente do projeto, trabalha na Companhia Hidro Elétrica do São Francisco (e-mail: [mjamaia@chesf.gov.br](mailto:mjamaia@chesf.gov.br)).

Nos sistemas de transmissão, os pára-raios de ZnO são diretamente instalados entre a fase e terra. Desse modo, uma pequena corrente de fuga para terra circula continuamente pelos varistores de ZnO. Na Figura 1 é mostrada a curva característica de um pára-raios típico explicitando as suas características principais.

Os principais fatores que contribuem para a degradação dos pára-raios são: influência da tensão de operação; descargas de longa duração ou de alta intensidade com curta duração; reação química com a atmosfera envolvida [3], degradação do circuito de equalização; descargas internas (corona); circulação permanente da corrente de fuga pelos varistores, esforços térmicos, etc.

Embora os pára-raios venham sendo utilizados a alguns decênios, ainda não existem técnicas de diagnóstico consensual capaz de indicar quando um pára-raios deva ser retirado de serviço [4]. Um dos principais problemas ao diagnosticar um pára-raios é a dificuldade de inspeção interna dos componentes, principalmente dos varistores e juntas de vedação. As principais técnicas de monitoração e diagnóstico utilizadas atualmente são: medição da resistência de isolamento; medição das perdas dielétricas; medição da corrente de fuga; tensão disruptiva a frequência industrial; medições termográficas (termovisão) e decomposição harmônica da corrente de fuga.

A deterioração dos varistores provoca, entre outros, o aumento da corrente de fuga resistiva, causando o aumento principalmente da componente de 3º harmônico. Assim, através da análise do sinal da componente resistiva da corrente de fuga pode-se monitorar o estado do pára-raios [5].

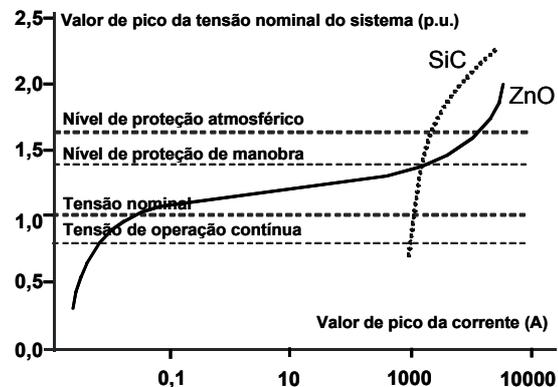


Figura 1. Característica  $v \times i$  de para-raios de ZnO e SiC, [6].

A medição e análise espectral da componente resistiva da corrente de fuga têm se consolidado como um parâmetro eficaz no monitoramento nos pára-raios de óxido de zinco (ZnO). Contudo, a obtenção precisa do sinal da corrente

resistiva é dificultada pelo método de compensação diferencial, atualmente empregado.

A corrente de fuga resistiva e seus harmônicos são responsáveis direto pelo aumento da temperatura do pára-raios. A análise de imagens térmicas é uma técnica não invasiva de monitoramento que vem sendo difundida há bastante tempo para linhas de transmissão e equipamentos de subestação em geral, inclusive pára-raios. Entretanto, no caso do pára-raios, não existe uma metodologia específica. Cada empresa determina os seus próprios parâmetros de análise com base em observações e experiência dos engenheiros de manutenção. Além disso, quando um pára-raios é retirado do serviço por indicação da análise termográfica, nenhum estudo é feito para se detectar as causas do problema com o equipamento. Dessa forma, não há como analisar quais são as maiores causas de falhas de pára-raios, ou mesmo se há alguma alternativa para a substituição do equipamento, caso a falha não seja intrínseca do mesmo. Assim, a simples obtenção da imagem térmica não leva a um diagnóstico preciso. Seria necessário fazer o processamento desta imagem e das possíveis condições em que se encontra o pára-raios.

Este trabalho apresenta uma alternativa de obtenção da componente resistiva da corrente dos pára-raios de ZnO. Na implementação utilizam-se os sinais da tensão de entrada e da corrente total do pára-raios e uma simulação computacional calcula o sinal da corrente resistiva do pára-raios. Também será apresentado um estudo de defeitos nos pára-raios de óxido de zinco e seus efeitos sobre o perfil térmico dos mesmos. Para isso, foram realizados ensaios com a simulação de defeitos, possibilitando a análise de suas influências no comportamento do pára-raios. Estes defeitos correspondem aos principais tipos de problemas que ocorrem com os pára-raios em campo - sua análise possibilitará um diagnóstico mais preciso para a retirada de um pára-raios de serviço, além de levar ao conhecimento de fabricantes e usuários quais os principais problemas que atingem os pára-raios a ZnO.

## II. ANÁLISE HARMÔNICA DA CORRENTE DE FUGA

A corrente de fuga que flui pelo varistor apresenta duas componentes (capacitiva e resistiva). Na Figura 2 é apresentado o circuito elétrico equivalente de um varistor de ZnO, em que  $R_s$  representa a resistência dos grãos de ZnO;  $R_p$ , a resistência não linear da região intergranular e  $C_p$ , a capacitância formada pelos grãos de ZnO e a camada intergranular.

A corrente resistiva com característica não linear é responsável pelas perdas elétricas e um dos fatores do envelhecimento dos blocos de ZnO. Ela apresenta, em condições normais de operação do pára-raios, um valor baixo quando comparado a componente capacitiva. Observou-se que o envelhecimento dos varistores provoca o aumento gradual da corrente de fuga e a sua componente resistiva é mais susceptível. O aumento sem controle da componente resistiva da corrente provoca o aquecimento do pára-raios com possibilidade de provocar uma avalanche e a sua falha completa.

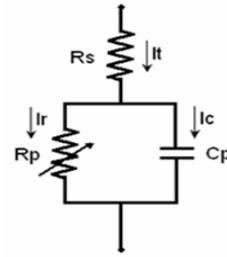


Figura 2. Circuito equivalente de um pára-raios de ZnO.

### A. Medição da componente resistiva da corrente de fuga

Para a análise do espectro harmônico da corrente de fuga resistiva, e conseqüentemente o estado do pára-raios, é necessário inicialmente separar as componentes capacitiva e resistiva que compõem a corrente de fuga total do pára-raios. Devido à impossibilidade de se medir isoladamente apenas a componente resistiva da corrente de fuga, faz-se necessária a implementação de um circuito para obtenção da componente resistiva. Na Figura 3 é mostrado um circuito baseado no método de compensação diferencial, sendo utilizado um capacitor de alta tensão para compensação da componente capacitiva do sinal de corrente  $it$ .

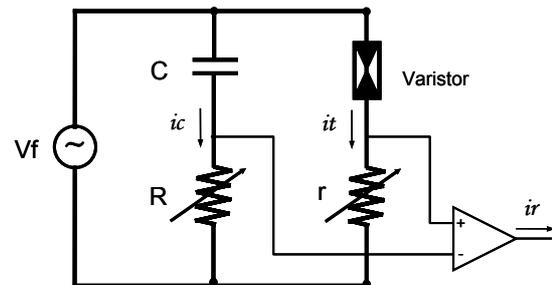


Figura 3. Circuito para medição da corrente resistiva de um varistor de ZnO.

A filosofia do circuito é obter a corrente de fuga do pára-raios sem a componente capacitiva. Assim, necessita-se gerar uma corrente capacitiva no ramo do capacitor de compensação  $C$  de mesma intensidade da componente capacitiva  $ic$  no ramo do varistor e subtrair da corrente total que circula pelo varistor. Para se obter a corrente capacitiva do capacitor igual a do varistor se faz necessário ajustar os resistores de baixa tensão  $R$  e  $r$ , de modo que o sinal de saída do amplificador diferencial esteja em fase com a tensão da fonte, e assim garantir o cancelamento da componente  $ic$  do varistor. Utilizando-se um capacitor de compensação  $C$  de alta tensão, de modo que  $1/\omega C \gg R$ , a corrente resistiva no ramo do capacitor pode ser desprezada. O capacitor de compensação  $C$  deve apresentar baixa tangente de perdas.

Embora o circuito mostrado na Figura 3 apresente resultados satisfatórios nas medições, há alguns inconvenientes. O resistor  $R_p$  da Figura 2 comporta-se como um resistor não linear, que depende da temperatura, sendo assim, para se obter valores confiáveis na medição é necessário que as resistências  $R$  e  $r$  (Figura 3) sejam ajustadas a cada aquisição dos sinais. Este procedimento torna o circuito inadequado para medições durante um período de tempo relativamente longo ou sua automatização. Outros inconvenientes são: a colocação da corrente resistiva em fase com a tensão de entrada através da análise visual e a suposição de que a corrente resistiva que circula pelo ramo do capacitor de com-

pensação C e do resistor R é nula.

Neste trabalho, apresentam-se aspectos práticos observados durante o desenvolvimento de ensaios elétricos em pára-raios de ZnO. A implementação sugerida propõe a eliminação do capacitor de compensação do circuito apresentado na Figura 3. Na implementação sugerida, a compensação capacitiva será feita através de rotinas computacionais, sendo necessário medir apenas o sinal Vf (forma de onda da tensão aplicada ao varistor ou pára-raios) e o sinal de corrente total no varistor. O método proposto corrige os inconvenientes citados, simplificando o circuito e as medições.

### B. Implementação para medição da componente resistiva da corrente de fuga

O método alternativo sugerido propõe a supressão do capacitor de compensação C e do resistor R. O sinal (forma de onda) será obtido com o auxílio de rotinas computacionais. A implementação do circuito torna-se possível utilizando-se Transformada de Fourier e técnicas de análise de circuitos de primeira ordem.

O princípio de funcionamento do circuito para medição da corrente resistiva (Figura 4) está apresentado nas equações de (1) a (4), onde são realizadas operações com os sinais V2 e V3 para se obter o sinal de corrente resistiva do varistor. Considerando-se que os sinais V2 e V3 apresentam componentes resistiva e capacitiva, eles podem ser expressos conforme a (1) e (2).

$$V2 = V2r + jV2c \quad (1)$$

$$V3 = V3r + jV3c \quad (2)$$

Obtendo-se V2 de modo que  $V2c = V3c$  e realizando uma subtração entre a (2) e a (4), tem-se:

$$V23 = V2 - V3 = V2r - V3r \quad (3)$$

Sendo os valores de R2 e C conhecidos, pode-se determinar a componente V2r do sinal de tensão V2. Isolando V2r, pode-se determinar V3r conforme a (4).

$$V2r - V23 = V2r - (V2r - V3r) = V3r \quad (4)$$

O V3r apresenta a mesma forma de onda do sinal de corrente de fuga resistiva, assim, a corrente resistiva pode ser expressa conforme a (5).

$$ir = \frac{V3r}{R1} \quad (5)$$

Na Figura 4, o ramo 2 do circuito apresenta-se em linha pontilhada, indicando que não é necessária a sua utilização para a obtenção da corrente resistiva no varistor.

Para o cálculo do sinal V2 através de simulação computacional é necessário conhecer previamente a forma de onda do sinal da fonte (Vf). Sendo a forma de onda de Vf periódico, ela pode ser mostrada como a superposição de uma componente senoidal fundamental pura e outras senóides puras, as harmônicas [7]. Assim, Vf pode ser expresso conforme a equação (6), em que Vo é o valor instantâneo em qualquer tempo t, Vn é o valor máximo da componente de n-ésimo harmônico e  $\theta$  define o ângulo de defasagem de cada harmônico em relação ao sinal transformado.

$$Vf = V_0 + V_1 \text{sen}(wt + \theta_1) + V_2 \text{sen}(2wt + \theta_2) + \dots + V_n \text{sen}(nwt + \theta_n). \quad (6)$$

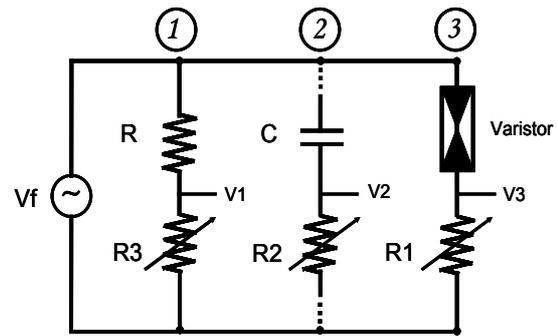


Figura 4. Circuito medição da corrente de fuga total.

Conhecendo-se as amplitudes e fase dos harmônicos do sinal Vf, o sinal V2 pode ser expresso conforme a (7).

$$V2 = \frac{V_1}{|Z_1|} \text{sen}(wt + \theta_1 + \phi_1) + \frac{V_2}{|Z_2|} \text{sen}(2wt + \theta_2 + \phi_2) + \dots + \frac{V_n}{|Z_n|} \text{sen}(nwt + \theta_n + \phi_n). \quad (7)$$

Em que  $Z_n = R2 - j \cdot (1/nwC)$ ,  $|Z_n|$  é o valor absoluto de  $Z_n$  e  $\Phi_n$  é o ângulo de  $Z_n$ .

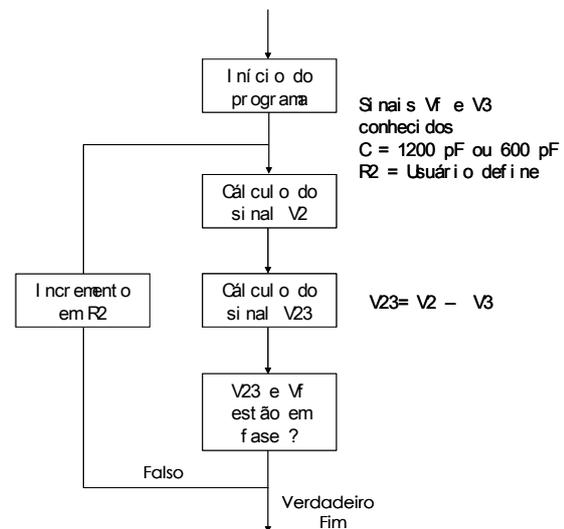


Figura 5. Fluxograma da rotina computacional para a obtenção da corrente de fuga resistiva.

Na Figura 5 é apresentado o fluxograma com a seqüência dos passos da rotina computacional para a obtenção da corrente de fuga resistiva. Para o cálculo da forma de onda de V2, o valor da capacitância do capacitor de compensação C pode ser considerando constante. Nos ensaios em laboratório e nas simulações implementadas utilizou-se uma capacitância de 1200 pF. O valor da resistência do resistor R2 é calculado através de iterações.

### III. ANÁLISE DE DEFEITOS NOS PÁRA-RAIOS A ZNO

Os pára-raios a ZnO são equipamentos de uso relativamente recente nos sistemas elétricos havendo poucos dados relacionados a falhas e ao seu envelhecimento natural. Isto porque a vida útil estimada para os pára-raios a ZnO é de 30 anos, de forma que esse é o tempo de instalação aproximado dos primeiros equipamentos nos sistemas elétricos.

Um fato curioso é o procedimento tomado pela maioria

das companhias de transmissão de energia quando alguma anormalidade é detectada por meio do termovisor. Normalmente, quando não se trata de um caso crítico, executa-se a limpeza do equipamento seguida de sua reenergização. No caso do comportamento anormal voltar a ocorrer, ou em casos críticos, o pára-raios simplesmente é substituído. Nenhum estudo posterior é feito no sentido de se avaliar o problema causador da anormalidade detectada, seja ela proveniente do sistema, seja ela no próprio equipamento.

#### A. Defeitos comuns

De modo geral, quando se disponibiliza alguns equipamentos para análise após sua retirada do sistema, ou quando são realizados ensaios de degradação e envelhecimento, há uma série de defeitos cuja ocorrência é observada com mais frequência. Os mais comuns seriam a perda de estanqueidade, a degradação dos varistores, a poluição externa, a presença de umidade interna e o desalinhamento da coluna de varistores. Além disso, o aquecimento anormal do pára-raios muitas vezes é também detectado como resultado da distribuição irregular de tensão ao longo do seu comprimento.

#### B. Metodologia

Com a finalidade de se analisar a influência dos defeitos mais comuns em pára-raios a ZnO sobre o seu perfil térmico, foram realizados alguns ensaios em laboratório. Os defeitos simulados foram:

- Poluição: Neste caso, será analisada a poluição seca e a poluição úmida, analisando-se a variação nos padrões de imagem térmica de acordo com o grau de poluição. O ensaio de poluição úmida poderá ser realizado com a utilização de uma mistura salina a ser vaporizada sobre a coluna do pára-raios.

- Distribuição de potencial: Neste ensaio será analisado o comportamento do pára-raios diante da distribuição irregular de tensão ao longo de sua coluna de varistores. Para isto serão utilizadas diferentes configurações de montagem com e sem anéis equalizadores. Em outra parte do ensaio, anéis metálicos serão utilizados para provocar o curto circuito em seções internas e externas do pára-raios a fim de se provocar uma alteração no campo elétrico que o envolve.

- Perda de estanqueidade: Serão criados canais de comunicação abertos entre o meio interno e o meio externo possibilitando a saída de gases e troca de calor através do mesmo.

- Umidade interna: O pára-raios será aberto e será borrifada água limpa sobre a coluna de varistores.

- Varistor defeituoso: Um ou mais varistores de uma coluna serão submetidos a estresses elétricos através da aplicação de impulsos de corrente provocando a sua degradação de forma acelerada. Estes varistores serão repostos na coluna em posições pré-determinadas para a realização dos ensaios.

- Deslocamento da coluna ativa: Este ensaio visa simular o deslocamento de elementos da coluna de varistores que pode acontecer devido a trepidações durante o transporte, ou a acomodação da coluna completa devido ao armazenamento inadequado do equipamento na horizontal.

Para cada um dos pára-raios utilizados, foi feita uma análise do seu estado e comportamento elétrico antes de sua abertura, ou seja, no estado em que foram entregues ao labo-

ratório. Para cada um deles foi feito o levantamento da curva característica, a análise térmica e a análise do estado da coluna de varistores. Dessa forma foi possível fazer avaliar as mudanças apresentadas durante os experimentos.

## IV. RESULTADOS

### A. Análise Harmônica

A eficiência da rotina computacional foi validada através de comparação entre os sinais medidos e gerados utilizando-se um varistor. O circuito foi ajustado para permitir a obtenção da corrente resistiva no varistor. Medições experimentais foram realizadas e os sinais de tensão V1, V2 e V3 do circuito da Figura 4 foram adquiridos. Foi aplicado um sinal de tensão de pico de 3 kV ao varistor, utilizando-se um capacitor de compensação de 1200 pF.

O espectro harmônico do sinal de tensão aplicado ao varistor, com amplitude e fase de cada componente harmônico, foi calculado. Com os valores de amplitude e fase do espectro harmônico do sinal de tensão no varistor foi determinado o sinal de tensão V2. Com os sinais V2 e V3 foi determinado o sinal de corrente resistiva no varistor.

Os sinais medidos, de tensão no ramo do capacitor e de corrente resistiva no varistor, foram comparados com os sinais gerados pela rotina computacional e estão apresentados nas Figuras 6 e 7.

A medição e análise da corrente de fuga resistiva apresentam-se como parâmetros promissores no diagnóstico e monitoramento da degradação dos pára-raios de ZnO. A implementação sugerida neste trabalho apresenta resultados confiáveis, além de simplificar o circuito e as medições em laboratório e no campo. Como também, torna o circuito adequado para medições durante um período tempo relativamente longo, em tempo real e com possibilidade de monitoramento dos sinais da tensão aplicada e da corrente resistiva no pára-raios à distância.

### B. Análise de defeitos

Por limitação de espaço no texto, escolhe-se o defeito – poluição externa para ser analisada.

Uma mistura salina foi borrifada sobre os pára-raios PR4 e PR5, simulando assim a presença de poluição mais severa sobre a porcelana dos equipamentos. A Figura 8 mostra uma foto dos dois pára-raios cobertos por poluição salina. A Figura 9 mostra uma descarga superficial a partir do terminal de alta-tensão do pára-raios PR2. Esta descarga provavelmente é resultante da presença de gotículas de solução salina nas proximidades do terminal. As imagens térmicas para os dois pára-raios defeituosos podem ser vistas na Figura 10 e na Figura 11.

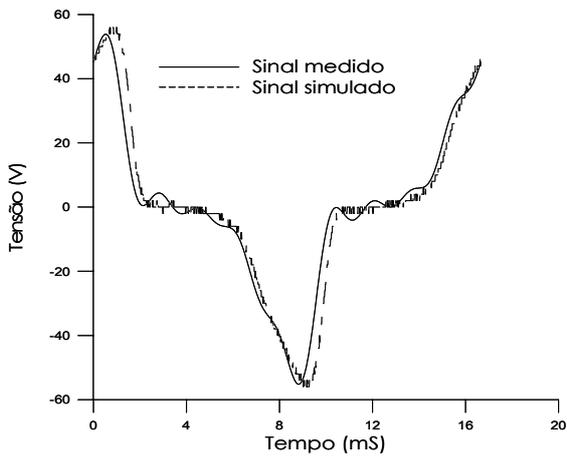


Figura 6. Sinal de tensão no resistor R2.

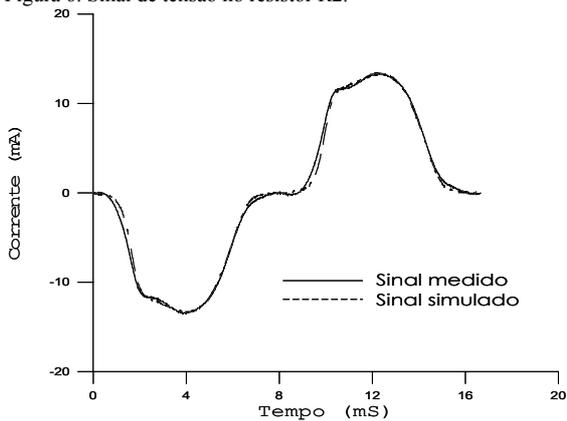


Figura 7. Sinal de corrente resistiva no varistor.



Figura 8 - Pára-raios PR4 e PR5 cobertos por poluição salina.



Figura 9 - Descarga superficial em pára-raios coberto com poluição salina

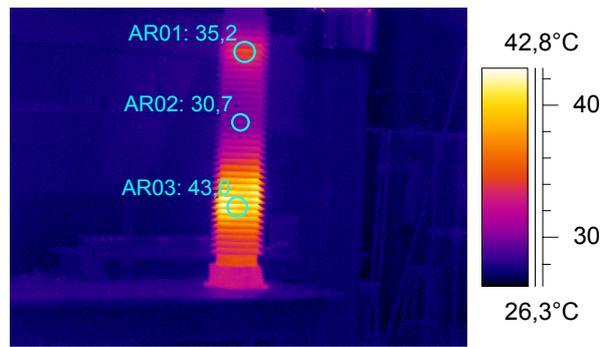


Figura 10 - Imagem térmica para PR4 com defeito.

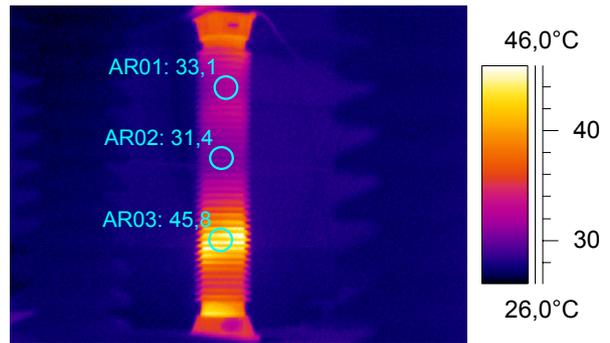


Figura 112 - Imagem térmica para PR5 com defeito.

Conforme se pode observar nas imagens térmicas obtidas, ocorre um aquecimento maior nos terminais do pára-raios e na sua porção inferior. Havendo ainda um baixo aquecimento na metade superior da coluna de porcelana, quando comparada a sua metade inferior.

Os perfis de temperatura analisados comprovam as observações feitas visualmente através das imagens térmicas. É possível que a poluição tenha se concentrado na parte inferior do pára-raios provocando descargas parciais nesta região. Tal fato pode ser observado nos gráficos de perfil de temperatura mostrados nas Figuras 12 e 13. Uma outra possibilidade é a ocorrência de uma corrente superficial elevada na parte superior do pára-raios a qual, a partir de uma determinada altura do equipamento, migra através do invólucro para a coluna de varistores.

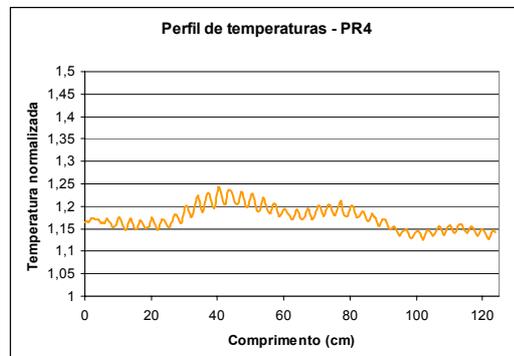


Figura 12 - Perfil térmico antes do defeito.

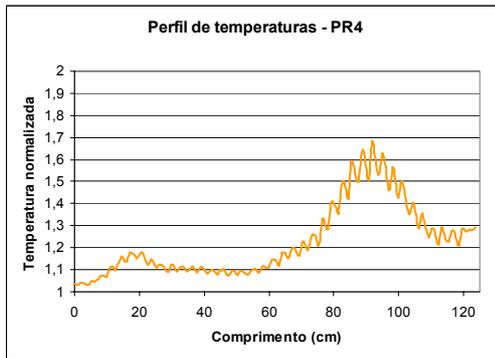


Figura 13 - Perfil térmico com o defeito.

## V. CONCLUSÕES

### A. Análise Harmônica

As condições internas de um pára-raios de ZnO não podem ser precisamente definidas, por possuir um grande número de variáveis e dificuldades de implementação de ensaios elucidativos, tornando o diagnóstico do equipamento uma tarefa mais difícil.

Neste trabalho foi apresentado os aspectos práticos observados durante o desenvolvimento de ensaios elétricos em pára-raios de ZnO e as suas dificuldades. Um método alternativo corrigindo as dificuldades na realização das medições foi também descrito.

### B. Análise de defeitos

Partindo dos resultados obtidos com a realização dos ensaios, concluiu-se que através da análise das imagens térmicas e dos perfis de temperatura na superfície de um pára-raios, é possível detectar irregularidades que geralmente estão associadas a defeitos ou falhas provocadas por meios externos, como a poluição.

Os resultados obtidos representam a confirmação de que a inspeção térmica através da termovisão é um método adequado para prevenção e detecção de falhas que, apesar de não ser utilizado em todo o seu potencial, pode ser aprimorado de modo a se tornar mais eficiente e preciso.

### C. Trabalhos futuros

A pesquisa desenvolvida aponta para uma necessidade de unir as duas ferramentas. Assim, buscar-se-á a utilização de ferramentas de apoio à decisão como redes neurais para auxiliar na identificação de defeitos. Além, disso pretende-se desenvolver um dispositivo para monitoramento e análise da corrente de fuga em tempo real.

## VI. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Pereira, M. P., e outros. "Equipamentos elétricos - especificação e aplicação em subestação de alta tensão. Furnas, Rio de Janeiro", 1985.
- [2] Lahti, K., Kannus, K. e Nousiainen, K. "Diagnostic methods in revealing internal moisture in polymer housed metal oxide surge arresters", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 17, No. 4, pp. 951-956, 2002.
- [3] Heinrich, C. e Hinrichsen, V., "Diagnostics and monitoring of metal oxide surge arresters in high-voltage networks- comparison of existing and newly developed procedures", *IEEE Transactions Power Delivery*, vol. 16, nº 1, pp. 138 – 143, 2001.
- [4] Sobrinho, P. F. P. e outros "Avaliação do estado e do comportamento de pára-raios de média e alta tensão, dos tipos de carboneto de silício (SiC) e de óxido metálico de zinco (ZnO)", *Seminário interno de manutenção de subestações CTEEP e EPTE*, 2001.
- [5] Shirakawa, S., et al. (1988). "Maintenance of surge arrester by a portable arrester leakage current detector", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 3, No. 3, pp. 998-1003.
- [6] ABB – Catálogo Técnico – Pára-raios de ZnO, 1985
- [7] Moreno, H. Harmônicas nas instalações elétricas, *Procobre Brasil*, São Paulo, (2001).