



**XX SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

Versão 1.0
22 a 25 Novembro de 2009
Recife - PE

GRUPO VIII

GRUPO DE ESTUDO DE SUBESTAÇÕES E EQUIPAMENTOS DE ALTA TENSÃO - GSE

TÉCNICA DE IDENTIFICAÇÃO DO PROCESSO DE DEGRADAÇÃO DE PÁRA-RAIOS DE ZNO EM CAMPO

Wilson R. Bacega(*)
COMPANHIA DE TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA PAULISTA – CTEEP

Hélio Tatizawa **Arnaldo G. Kanashiro**
INSTITUTO DE ELETROTÉCNICA E ENERGIA
DA USP – IEE-USP

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi determinar uma técnica aplicável em campo, nos pára-raios de ZnO, em operação normal, que pudesse identificar os equipamentos que já se encontram em processo de degradação, priorizando a retirada de operação antes de sua queima, evitando assim desligamentos emergenciais, riscos materiais e de segurança pessoal. Após a ocorrência da queima sucessiva de 03 pára-raios de ZnO de 345 kV, suspeitava-se que as causas dessas queimas eram idênticas às causas das queimas ocorridas no passado, ou seja suspeitava-se que o revestimento utilizado na lateral do bloco de ZnO sob os efeitos dos campos eletromagnéticos estava sofrendo um processo de carbonização causado por descargas parciais internas, criando caminhos de condução de corrente, por fora dos blocos, curto-circuitando-os e levando a queima do pára-raios em operação normal.

Essa suspeita motivou o desenvolvimento de um ensaio que fosse realizado em campo com os pára-raios operando em condições normais e que conseguisse avaliar o estado dos pára-raios, identificando esse processo de degradação. A metodologia foi aplicada com bons resultados em campo, em subestação de 345kV, permitindo identificar pára-raios instalados em campo que apresentavam atividade de descargas parciais. Nos ensaios os pára-raios permaneceram energizados, e em funcionamento normal.

PALAVRAS-CHAVE

pára-raios de ZnO, descargas parciais, ensaios em campo, corrente de fuga, manutenção preditiva

1.0 - INTRODUÇÃO

Os pára-raios, essenciais na proteção dos sistemas elétricos de potência frente às sobretensões, pertencem à classe de equipamentos de subestação que não apresentam, normalmente, dispositivos indicativos de sua condição operativa, pouco se podendo concluir quanto ao estado do equipamento, uma vez estando este energizado. A avaliação do estado operativo de todo o parque instalado é dificultada também pela grande quantidade desse tipo de equipamento presentes nas subestações, encarecendo a instalação em larga escala de equipamentos de monitoramento contínuo dedicado a esse equipamento. Esta pesquisa, em particular, focou a avaliação dos pára-raios de óxido de zinco (ZnO) tendo em vista o histórico de falhas de uma determinada família em operação na Empresa. Nessa particular família de pára-raios de ZnO, ocorreram 03 falhas em serviço, em pára-raios de ZnO da classe de 345 kV. Durante as avaliações em campo foram utilizadas duas técnicas de avaliação da corrente de fuga dos pára-raios de ZnO. A primeira visava a identificação de descargas parciais pelo método do espectro eletromagnético emitido que é feita através de um transformador de alta frequência, associado a um osciloscópio ou a um analisador de espectro. Nesse tipo de medição, a corrente de fuga é medida considerando-se frequências superiores a 9 kHz, tendo por objetivo a detecção de campos eletromagnéticos conduzidos emitidos por eventuais descargas elétricas presentes no equipamento sob ensaio, como, por exemplo, aquelas originadas por descargas parciais ou descargas superficiais porventura existentes. A segunda visava avaliar o conteúdo de

(*) Rua Casa do Ator, n° 1155 – 4º Andar – CEP 04546-004 – Vila Olímpia - São Paulo, SP – Brasil
Tel: (+55 11) 3138-7090 – Fax: (+55 11) 3138-7011 – Email: wbacega@ctee.com.br

harmônicos da corrente de fuga e foi feita com aparelho dedicado, disponível comercialmente. Nesse tipo de medição, a corrente de fuga é medida considerando-se a faixa de frequências até 500 Hz. Nesse aparelho, as condições de operação dos pára-raios são analisadas através da avaliação do conteúdo harmônico da corrente de fuga.

2.0 - TÉCNICA DE MEDIÇÃO DO CAMPO ELETROMAGNÉTICO CONDUZIDO

Descargas elétricas parciais consistem na aceleração de cargas elétricas, principalmente elétrons, pelo campo elétrico aplicado, causando a geração de ondas eletromagnéticas em todas as direções, a partir do local onde ocorre essa descarga, e apresentam energia espectral desde frequências muito baixas, atingindo frequências da ordem de alguns GHz [2]. A Figura 1 mostra exemplo de montagem laboratorial, para a geração de descargas parciais em cavidade produzida artificialmente, em amostra tipo placa isolante com 6 mm de espessura submetida a um potencial de 20kV. Foram realizadas medições com um transformador de corrente para altas frequências instalado no condutor de aterramento, através de um analisador de espectro. A Figura 2 mostra resultado de medição do espectro produzido pela descarga parcial. A Figura 3 mostra a medição desse mesmo sinal, no domínio do tempo, realizada com osciloscópio. Com a utilização desse procedimento, foram realizadas com sucesso medições de descargas parciais em transformadores de corrente de classe 230kV e 345kV, em laboratório e em campo, no ambiente de subestação, com o equipamento energizado e em funcionamento normal [1].



Figura 1. Placa de poliéster imersa em óleo isolante, contendo uma cavidade, posicionada entre dois eletrodos de latão.

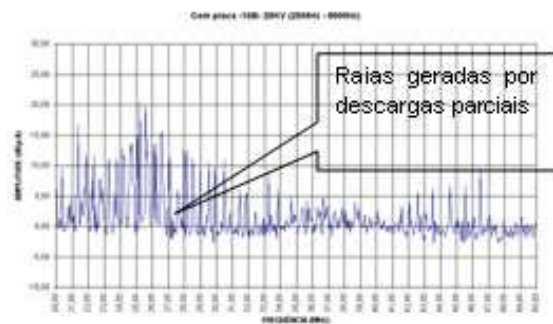


Figura 2. Espectro gerado (conduzido) por descarga parcial em amostra tipo placa isolante, com aplicação de tensão de 20kV – medição com o TC clamp instalado no cabo de aterramento, faixa de frequências 20MHz a 50MHz.

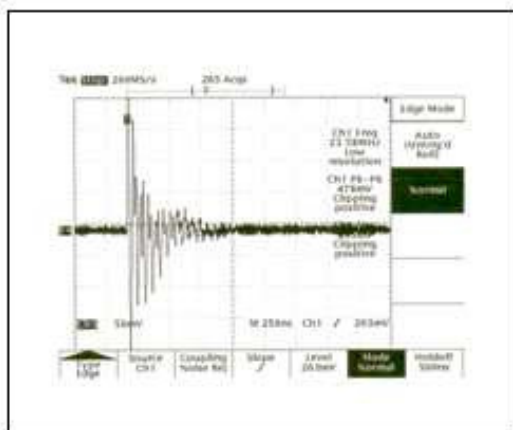


Figura 3. Pulso de corrente associado à descarga parcial – amostra em placa – tensão aplicada 20kV (escalas 250ns/divisão, 50mV/divisão)

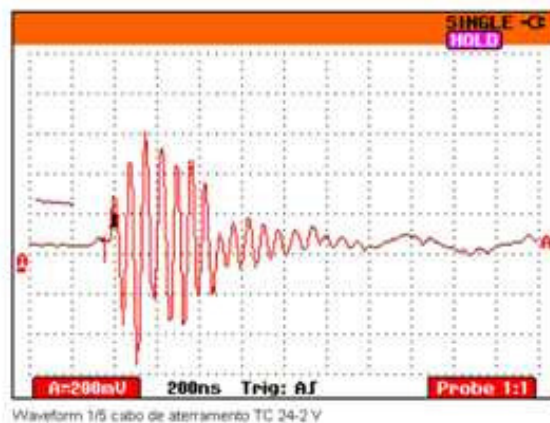


Figura 4. Medição das descargas parciais no domínio do tempo, utilizando-se osciloscópio. Medições com o TC clamp instalado no condutor de aterramento do transformador de corrente. (Escalas 200ns/div e 200mV/div).

A Figura 4 mostra resultado obtido em campo, utilizando-se o TC de alta frequência aplicado ao condutor de aterramento, da medição de um transformador de corrente classe 345kV apresentando descargas parciais [1].

Oscilogramas semelhantes aos das Figuras 2, 3 e 4 foram utilizados como referência, para a caracterização de descargas parciais em equipamentos em campo [1].

3.0 TÉCNICA DE MEDIÇÃO DOS VALORES DE PICO E EFICAZ DA CORRENTE DE FUGA

O aparelho é composto do clamp de corrente e do instrumento de medição. As leituras foram realizadas, em todos os pára-raios, com o clamp de corrente aplicado ao condutor de aterramento, e posicionado antes do contador de descarga,

Nas medições com o aparelho, foram anotados os valores da corrente de fuga, nas seguintes opções do instrumento de medição mostradas abaixo:

- a) $f < 500$ Hz (eficaz e pico);
- b) 180 Hz (eficaz).

Nesse tipo de medição, a corrente de fuga é medida considerando-se a faixa de frequências até 500Hz, sendo possível através dessas medições estimar as condições de operação dos pára-raios, através da avaliação do conteúdo harmônico da corrente de fuga.

4.0 MEDIÇÕES EM CAMPO EM PÁRA-RAIOS DE ZNO CLASSE 345KV

4.1 - Pela Técnica de Medição do Campo Eletromagnético Conduzido

A técnica da medição da emissão espectral do campo eletromagnético conduzido, produzido por descargas parciais, foi utilizada nesta avaliação em campo dos pára-raios do tipo ZnO, classe 345kV. A adoção dessa técnica, já empregada com sucesso na detecção de descargas parciais em TCs [1], deveu-se as suspeitas de histórico de falhas ocorridas no passado e na avaliação dos destroços dos pára-raios falhados. Na avaliação dos blocos internos dos pára-raios falhados, suspeitou-se que as causas dessas falhas, a exemplo de outras ocorrências já verificadas no passado nessa mesma família de pára-raios, eram devidas ao revestimento utilizado na lateral do bloco de ZnO, o qual sob efeito dos gradientes elétricos em serviço sofre um processo de carbonização causado por descargas parciais internas, criando caminhos de condução de corrente, por fora dos blocos, curto-circuitando-os e levando à queima do pára-raios em operação normal.

Nessas medições, os pulsos de corrente de alta frequência, produzidos pelas descargas, foram medidos com um osciloscópio no domínio do tempo, utilizando-se como transdutor, um transformador de corrente para alta frequência instalado no condutor de aterramento dos pára-raios sob ensaio, considerando-se frequências superiores a 9 kHz. Os oscilogramas foram analisados por comparação com assinaturas de descargas em equipamentos, as quais foram obtidas e caracterizadas previamente em outros ensaios laboratoriais e em campo [1]. A técnica permitiu a avaliação dos pára-raios de ZnO, em operação normal, identificando os equipamentos suspeitos da presença de processos de degradação, priorizando a retirada de operação antes de sua queima, evitando-se assim desligamentos emergenciais, riscos materiais e de segurança pessoal.

As Figuras 5 e 6 mostram os pára-raios de ZnO avaliados com a técnica, e a instalação do TC de alta frequência no cabo de aterramento do pára-raios, respectivamente.



Figura 5. Vista, em segundo plano, de três pára-raios de ZnO avaliados.



Figura 6. TC de alta frequência aplicado ao condutor de aterramento do pára-raios da fase AZUL

As Figuras 7 a 9 mostram oscilogramas obtidos com o TC de alta frequência aplicado ao condutor de aterramento, apresentando características semelhantes àquelas produzidas por pulsos gerados por descargas parciais, tomando-se como referência resultados de ensaios em laboratório e em campo previamente realizados [1].



Figura 7. Corrente medida com TC de alta frequência aplicado ao condutor de aterramento do pára-raios da fase BRANCA (escalas 100mV/div e 400ns/div).

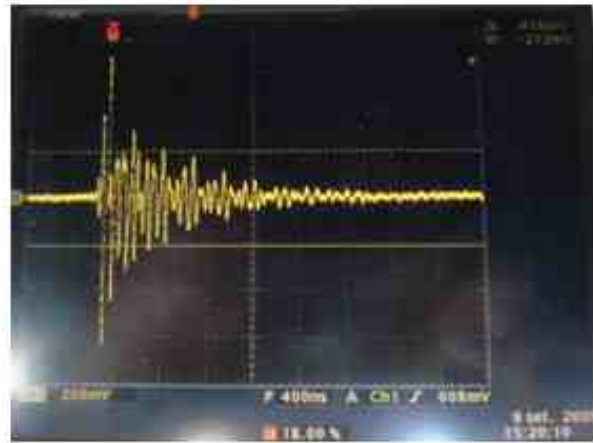


Figura 8. Corrente medida com TC de alta frequência aplicado ao condutor de aterramento do pára-raios da fase AZUL (escalas 200mV/div e 400ns/div).

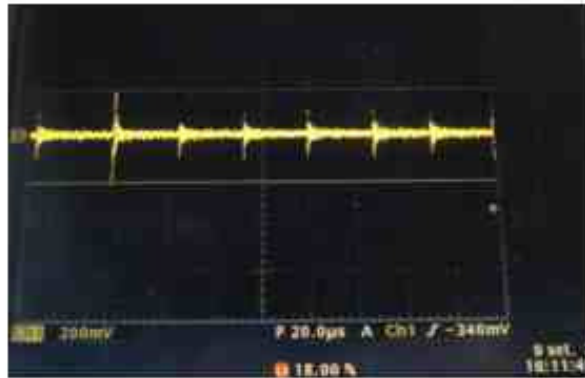


Figura 9. Corrente medida com TC de alta frequência aplicado ao condutor de aterramento do pára-raios da fase AZUL (escalas 200mV/div e 20µs/div).

Para efeito comparativo, as Figuras 10 e 11 mostram exemplos de oscilogramas que não apresentaram semelhança com aqueles atribuídos a descargas parciais, considerando-se os aspectos visual e taxa de repetição, tendo sido verificada uma ocorrência esporádica, com intervalos da ordem de 10 segundos entre as ocorrências. Possivelmente, essas formas de onda foram originadas por algum outro tipo de fenômeno.

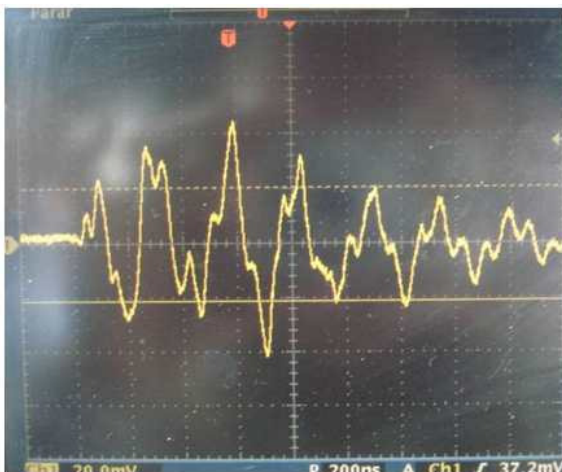


Figura 10. Corrente medida com TC de alta frequência aplicado ao condutor de aterramento do pára-raios da fase VERMELHA (escalas 20mV/div e 200ns/div). Oscilograma não característico de descargas parciais.

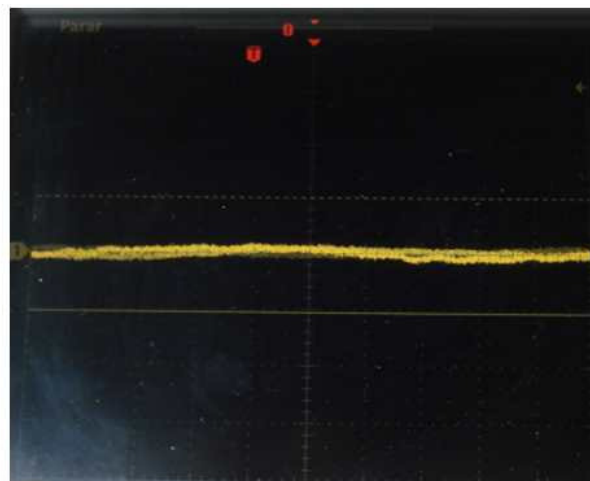
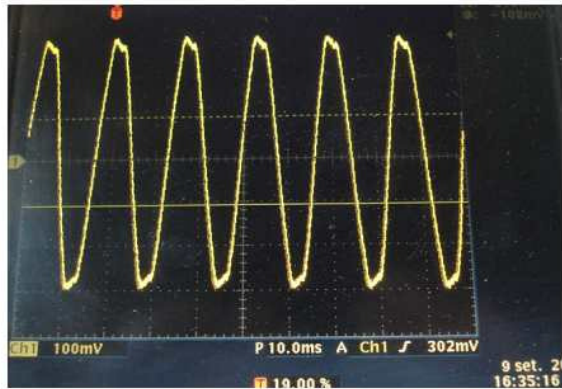


Figura 11. Medição com TC de alta frequência aplicado ao condutor de aterramento do pára-raios (escalas 50mV/div e 200ns/div). Oscilograma não característico de descargas parciais.

Através das medições foram analisados 13 pára-raios de 345 kV. Foram substituídos os 13 pára-raios e enviados para o laboratório para os ensaios.

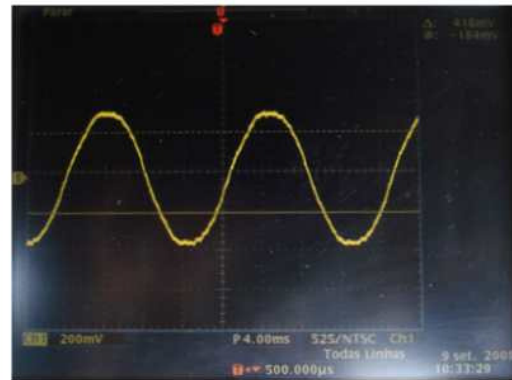
4.1 - Pela Técnica de Medição dos Valores de Pico e Eficaz da Corrente de Fuga

A Figura 12 mostra a forma de onda da corrente de fuga medida com o aparelho, onde observa-se corrente senoidal com distorção harmônica, apresentando deformação nos picos da senoide.



a)

Figura 12a. Forma de onda da corrente de fuga com deformações nos picos da senoide (escalas 100mV/div e 10ms/div).



b)

Figura 12b. Forma de onda da corrente de fuga sem deformações nos picos da senoide—(escalas 200mV/div e 4ms/div).

5 ENSAIOS LABORATORIAIS REALIZADOS NOS PÁRA-RAIOS RETIRADOS DE CAMPO

A Figura 13 mostra a montagem laboratorial utilizada para a medição de descargas parciais, utilizando-se o método convencional de medição da carga aparente, conforme a norma IEC 60270[3].



Figura 13. Montagem utilizada em laboratório para a medição de descargas parciais no pára-raios (em primeiro plano), utilizando-se o procedimento convencional de medição da carga aparente conforme a norma IEC 60270[3].

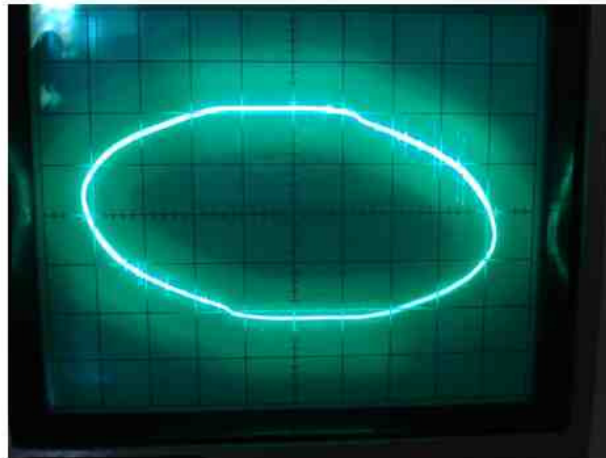


Figura 14. Medição de descargas parciais no pára-raios, utilizando-se o procedimento da norma IEC 60270. Tela do detector de descargas parciais apresentando nível de descargas parciais de 100pC.

Nas medições de descargas parciais (método convencional da norma IEC 60270), foram detectados níveis elevados de descargas parciais na tensão de 200 kV (tensão de serviço do pára-raios) e na tensão de ensaio (MCOV x 1,05 por 60 s) antes e após o pré-stress. De acordo com a norma IEC 60099-4[4], o nível máximo de descargas parciais admissível é de 10pC, medida na tensão nominal do pára-raios, que é de 280kV. A Figura 13 mostra a tela do detector de descargas parciais, utilizado nas medições.

Paralelamente, foi realizada medição do campo eletromagnético conduzido, utilizando-se o TC de alta frequência instalado no condutor de aterramento do pára-raios conforme Figura 14.



Figura 15. TC de alta frequência instalado no condutor de aterramento do pára-raios da fase AZUL.

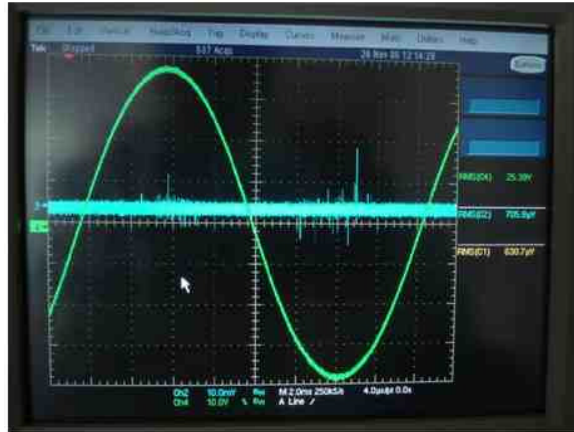


Figura 16. Tela de osciloscópio apresentando os pulsos produzidos pelas descargas parciais medidas com o TC de alta frequência aplicado ao condutor de aterramento, juntamente com o sinal da tensão senoidal de 200kV aplicada ao pára-raios (escala de tempo 2ms por divisão).

A Figura 16 mostra oscilograma obtido com osciloscópio, onde podem ser observados os pulsos produzidos pelas descargas parciais medidas com o TC de alta frequência aplicado ao condutor de aterramento, juntamente com o sinal da tensão senoidal de 200kV aplicada ao pára-raios.

Portanto, através dos ensaios em laboratório foi possível verificar a presença de descargas internas no pára-raios, confirmando o resultado obtido nas medições realizadas em campo.

Para um comparativo dos ensaios realizados em campo, também foram medidos em laboratório os valores de pico e eficaz da corrente de fuga dos pára-raios

6 COMPARATIVO ENTRE OS VALORES OBTIDOS EM CAMPO COM OS VALORES OBTIDOS EM LABORATÓRIO

Na Tabela 1 abaixo são apresentados os valores de Descargas Parciais obtidos em campo e em laboratório

Tabela 1. Valores obtidos em campo e no laboratório

Nº da Amostra	Valor p-p em mV obtidos em Campo	Valores em pC obtidos no Laboratório	
		Tensão do Sistema	1,05 x MCOV
1	360	890	970
2	200	220	360
3	1160	1002	1510
4	260	350	900
5	1800	1650	2450
6	40 (*)	< 5	1500
7	90 (*)	< 5	2120
8	100 (*)	< 5	3600
9	360	620	980
10	20 (*)	< 5	700
11	620	100	Não medido
12	1280	< 5	Não medido
13	82 (*)	Novo	Novo

(*) Formas de ondas diferentes comparar Figuras 7 e 8 com 10 e 11

O valor pico a pico considerado foi a soma do maior pico no ciclo positivo com o maior pico do ciclo negativo (ver Figura 8). Ao analisarmos os valores obtidos em campo com os valores obtidos em laboratório, na tensão do sistema, podemos verificar que os valores são próximos, o que pode indicar em uma relação direta entre os valores obtidos em campo em mV e os valores obtidos em laboratório em pC, exigindo um maior estudo nesta área. O que podemos afirmar observando os valores de campo e laboratório é que os valores altos obtidos em campo também foram valores altos obtidos no laboratório.

Na Tabela 2 abaixo são apresentados os valores de pico e eficaz das correntes de fuga dos pára-raios obtidos em campo e em laboratório

Tabela 2. Valores de pico e eficaz das Correntes de Fuga obtidos em campo e no laboratório

Nº da Amostra	f<500 Hz (mA)		Cor. de fuga com V do Sistema em Laboratório	
	Valor de pico	Valor eficaz	Valor de pico	Valor eficaz
1	2,45	1,98	2,12	1,55
2	2,23	1,70	2,06	1,50
3	2,29	1,74	2,08	1,48
4	2,23	1,78	2,12	1,55
5	2,43	2,01	2,20	1,58
6	1,30	0,99	1,06	0,78
7	1,23	0,96	1,00	0,78
8	1,24	0,97	1,09	0,78
9	2,27	1,70	2,06	1,46
10	1,40	1,09	1,14	0,81
11	2,42	1,93	Não medido	Não medido
12	2,77	2,24	Não medido	Não medido
13	1,37	1,02	Novo	Novo

Observando os valores das correntes de fuga tanto em campo como no laboratório os valores estão próximos, indicando que o aparelho utilizado apresenta uma boa performance em campo. Com relação aos valores obtidos verifica-se um acréscimo no valor da corrente de fuga nos pára-raios mais antigos, porém não é possível afirmar que esta evolução é crítica ou não. A análise da deformação da forma de onda da corrente de fuga parece ser um melhor indicativo do estado do pára-raios. Na Figura 12a, verifica-se uma deformação nos picos da forma de onda senoidal já indicando uma possível anormalidade no pára-raios.

7 INSPEÇÃO INTERNA DOS PÁRA-RAIOS

No início das pesquisas suspeitava-se que o revestimento utilizado na lateral do bloco de ZnO sob os efeitos dos campos eletromagnéticos estava sofrendo um processo de carbonização causado por descargas parciais internas, criando caminhos de condução de corrente, por fora dos blocos, curto-circuitando-os e levando a queima do pára-raios em operação normal, problema este enfrentado no passado e que levou a substituição da parte interna de todos os pára-raios pelo fabricante, porém após a abertura de alguns pára-raios ficou constatado que a verdadeira causa das explosões foi a perda da estanqueidade e a penetração de unidade. Problema este já enfrentado no passado com os pára-raios de SiC e que começou a se manifestar nos pára-raios de ZnO desta família de equipamentos.



Figura 17. Estado interno do pára-raios, onde aparece a corrosão branca nas partes metálicas



Figura 18. Estado dos capacitores internos prováveis fontes de descargas parciais

8 CONCLUSÕES

Apesar das duas técnicas se mostrarem aplicáveis em campo a identificação de descargas parciais mostrou ser mais conclusiva, sendo indicada para este caso de defeito. Das 8 amostras que apresentaram descargas parciais no laboratório na tensão do sistema, todas foram identificadas também por esta técnica em campo, apesar do tempo de ensaio em campo ter sido de apenas alguns minutos e terem sido realizados em um ambiente com grande influência de campos eletromagnéticos, principalmente os efeitos corona gerados por um sistema de 345 kV. Esta identificação, em campo, foi possível pela geração contínua de descargas parciais pelos pára-raios simplificando os resultados obtidos. As principais vantagens desta técnica de medição são: a realização do ensaio com o equipamento energizado e em funcionamento normal, a não necessidade de intervenções nos equipamentos

e nem no sistema e a rápida avaliação dos pára-raios em operação. Os ensaios laboratoriais realizados após a retirada dos pára-raios suspeitos confirmaram a ocorrência de descargas parciais, atestando os resultados obtidos em campo. A abertura de algumas unidades de pára-raios comprovou o comprometimento interno do pára-raios, atestando também o diagnóstico obtido em campo com os ensaios de medição espectral do campo eletromagnético conduzido e alertando, para uma possível volta de um problema antigo vivido pelos pára-raios de SiC, a perda de estanqueidade com a conseqüente penetração de umidade e que agora começa a se manifestar também nos pára-raios de ZnO.

9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Bacega W.R., Tatizawa H., Soletto K.T., Silva G.R. - Metodologia de Medição de Descargas Parciais em Equipamentos de Alta Tensão em Campo através do Levantamento do Espectro Emitido. XIX SNPTEE, Rio de Janeiro, 2007.
- [2] Judd MD, Yang L, Hunter IBB, Partial discharge monitoring for power transformers using UHF sensors Part I: Sensors and Signal interpretation. IEEE Electrical Insulation Magazine, vol 21, n2, 2005.
- [3] International Electrotechnical Commission, IEC 60270 Standard, High-voltage test techniques – Partial discharge measurements, 2000.
- [4] International Electrotechnical Commission, IEC 60099-4 Standard. Surge arresters part 4 – Metal oxide surge arresters without gap for AC systems, 2001.

10 DADOS BIOGRÁFICOS

Wilson R. Bacega é engenheiro da Divisão de Gestão da Manutenção da CTEEP - Companhia de Transmissão de Energia Elétrica Paulista (wbacega@ctEEP.com.br).

Hédio Tatizawa e Arnaldo G. Kanashiro são pesquisadores do Instituto de Eletrotécnica e Energia da USP - IEE-USP e concluíram doutorado em Sistemas de Potência pela EPUSP (hedio@iee.usp.br, arnaldo@iee.usp.br).