

Diagnóstico do Estado dos Pára-raios em Operação no Sistema de Transmissão

Wilson R. Bacega, Arnaldo G. Kanashiro, Hédio Tatizawa, Milton Zanotti Junior e Paulo F. Obase

Resumo – Este trabalho tem por objetivo apresentar as investigações realizadas tendo em vista o diagnóstico dos pára-raios de carboneto de silício (SiC) e de óxido de zinco (ZnO) do sistema de transmissão da concessionária. Os pára-raios de SiC têm sido gradativamente substituídos pelos de ZnO, entretanto, é necessário priorizar a retirada dos pára-raios mais degradados. Neste trabalho, os resultados mostram que a medição da corrente de fuga dos pára-raios de SiC, em termos de amplitude e distorção harmônica, apresenta importantes informações sobre o estado desses pára-raios. Com relação aos pára-raios de ZnO, a utilização de transformador de corrente de alta frequência, para a detecção do campo eletromagnético conduzido, tem permitido a identificação de descargas elétricas internas. São mostrados neste trabalho, os resultados dos ensaios de laboratório e as medições realizadas em subestações. Os resultados têm se mostrado promissores, devendo propiciar um melhor gerenciamento dos pára-raios na concessionária.

Palavras-chave—carboneto de silício, corrente de fuga, descargas elétricas, óxido de zinco, pára-raios.

I. INTRODUÇÃO

Os pára-raios de carboneto de silício (SiC) estão sendo gradativamente substituídos pelos de óxido de zinco (ZnO) [1]-[4], mas um número ainda elevado permanece instalado no sistema elétrico da concessionária. Em função dos custos, essa substituição não ocorre a curto-prazo, obrigando a empresa a conviver com os pára-raios de SiC por um período ainda maior, lembrando que muitos estão em operação por mais de 20 a 25 anos. O estabelecimento de um programa de substituição dos pára-raios de SiC requer o conhecimento prévio do seu estado atual, resultando na necessidade de investigações laboratoriais. Por outro lado, os pára-raios mais críticos devem ser priorizados e retirados a curto prazo, procurando-se evitar falhas desses equipamentos no campo.

Dentro deste contexto, foi desenvolvido o projeto de P&D – 0068 – 040/2004 “Desenvolvimento de sistema para o apoio à manutenção e auxílio no diagnóstico do estado dos pára-raios, tipo SiC, em operação no sistema de transmissão”, no

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Setor de Energia Elétrica regulado pela ANEEL e consta dos Anais do V Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica (V CITENEL), realizado em Belém/PA, no período de 22 a 24 de junho de 2009.

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

A. G. Kanashiro, H. Tatizawa, M. Zanotti Junior e P. F. Obase são pesquisadores do Instituto de Eletrotécnica e Energia da USP (IEE/USP) (arnaldo@iee.usp.br, hedio@iee.usp.br, zanotti@iee.usp.br, pfobase@iee.usp.br).

âmbito do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Setor de Energia Elétrica, regulado pela ANEEL, ciclo 2004/2005. O projeto contou com o suporte financeiro da empresa de energia CTEEP – Companhia de Transmissão de Energia Elétrica Paulista, tendo como entidade executora o Instituto de Eletrotécnica e Energia da Universidade São Paulo (IEE/USP).

Em uma etapa inicial, foi realizada uma pesquisa exaustiva no sistema MANTEC, onde os dados dos equipamentos da concessionária são normalmente cadastrados. O IEE/USP desenvolveu ferramentas que, juntamente com os dados do MANTEC, permitiu a realização de várias correlações no banco de dados, considerando-se a idade dos pára-raios, fabricante, classe de tensão, etc. Com base nessas correlações, foram estabelecidos os pára-raios que deveriam ser investigados mais detalhadamente no laboratório. A metodologia de investigação dos pára-raios de SiC baseou-se na realização de ensaios e de inspeção visual dos seus componentes internos. Trinta e cinco pára-raios, classes de tensão 88 kV, 138 kV, 230 kV, 345 kV e 440 kV, de cinco fabricantes, foram considerados dentre aqueles disponibilizados no IEE/USP pela CTEEP.

A avaliação desses pára-raios foi realizada no Laboratório de Alta Tensão do IEE/USP e os seguintes ensaios foram realizados: tensão disruptiva em frequência industrial, tensão disruptiva de impulso atmosférico e medição da corrente de fuga total. Medições de termovisão, tensão de radio-interferência (RIV), resistência de isolamento e de perdas Watts foram também realizadas, procurando-se obter informações que pudessem resultar em um melhor diagnóstico dos pára-raios. Os resultados obtidos nos ensaios de tensão disruptiva em frequência industrial e de tensão disruptiva de impulso atmosférico foram comparados com os requisitos dos fabricantes ou de normas técnicas. Alguns pára-raios atenderam os requisitos, entretanto, as medições da corrente de fuga, RIV e termovisão indicaram que algum processo de deterioração estava presente. Posteriormente, a inspeção visual nos componentes internos dos pára-raios confirmou a hipótese acima.

A metodologia utilizada na pesquisa permitiu a identificação de técnicas que resultaram em um diagnóstico mais adequado dos pára-raios de SiC. Deve ser ressaltado que a medição da corrente de fuga, técnica geralmente utilizada nos pára-raios de ZnO [5]-[6], resultou em importantes informações sobre o estado atual do pára-raios de SiC, possibilitando a identificação de amostras que estariam sofrendo algum pro-

cesso de envelhecimento mais acentuado. Com o objetivo de detectar a existência de possíveis descargas elétricas internas nos pára-raios, foram realizadas investigações utilizando-se um transformador de corrente para altas frequências, de modo a registrar o campo eletromagnético emitido conduzido, proveniente dos pára-raios de SiC e de ZnO. Essa técnica foi desenvolvida para a detecção de descargas parciais em transformadores de potencial e transformadores de corrente [7], sendo investigada neste trabalho a sua aplicação nos pára-raios de SiC e de ZnO.

É importante salientar que as técnicas de diagnóstico investigadas no laboratório tiveram como premissa a consideração de que o pára-raios não poderia ser desenergizado na subestação.

Neste trabalho, são mostrados os principais resultados obtidos com os pára-raios de SiC e de ZnO. No laboratório, os resultados referem-se, basicamente, aos pára-raios de SiC, classes de tensão 88 kV e 138 kV. A mesma metodologia foi utilizada nos pára-raios de classes de tensão 230 kV, 345 kV e 440 kV. As medições na subestação de Paraibuna referem-se aos pára-raios de SiC, classe de tensão 88 kV, e na subestação Nordeste, aos pára-raios de ZnO, classe de tensão 345 kV.

II. ENSAIOS DE LABORATÓRIO

Os pára-raios de SiC disponibilizados no IEE estavam no almoxarifado da CTEEP e, de modo geral, foram retirados de operação em função da programação de substituição gradativa dos pára-raios de SiC pelos de ZnO, reformas na subestação ou, ainda, devido ao aquecimento anormal detectado durante as medições de termovisão. Os pára-raios de SiC apresentavam, em maior ou menor grau, corrosão nas partes metálicas. Em alguns dos pára-raios de 88 kV foram observados sinais de descargas na porcelana e no flange, indicando a ocorrência de alguma falha no campo. Portanto, antes da realização dos ensaios, várias amostras foram submetidas às medições de resistência de isolamento e de perdas Watts, tendo-se por objetivo verificar, preliminarmente, a sua integridade.

Os pára-raios provenientes da concessionária estiveram em operação por vários anos, entretanto, não foi possível obter um histórico de medições que pudesse indicar alguma tendência ou mudança de comportamento desses equipamentos ao longo do tempo. Deste modo, os únicos parâmetros que poderiam ser utilizados para indicar possíveis variações em relação às suas características originais, eram os valores de tensão disruptiva de frequência industrial e de tensão disruptiva de impulso atmosférico. Esses parâmetros foram utilizados, inicialmente, como referência. Posteriormente, foram realizadas medições da corrente de fuga, termovisão e tensão de radio-interferência, as quais possibilitaram um melhor conhecimento do estado dos pára-raios, obtendo-se, assim, um diagnóstico mais correto. As tabelas I e II mostram a relação dos pára-raios investigados e os resultados dos ensaios de tensão disruptiva em frequência industrial e de tensão disruptiva de impulso atmosférico.

Tabela I. Pára-raios de classe de tensão 88 kV.

Fabricante A (identificação da amostra)	Tensão disruptiva em frequência industrial (kV)	Tensão disruptiva de impulso atmosférico (kV)	
		Polaridade positiva	Polaridade negativa
A1	134	182	181
A2	105	171	168
A3	85	178	178
A4	102	172	167
A5	-----	173	172
A6	-----	173	188

Tabela II. Pára-raios de classe de tensão 138 kV.

Fabricantes A/B/C/D (identificação da amostra)	Tensão disruptiva em frequência industrial (kV)	Tensão disruptiva de impulso atmosférico (kV)	
		Polaridade positiva	Polaridade negativa
A7	193	227	227
A8	170	222	228
A9	178	225	224
B1	244	284	272
B2	246	279	272
B3	242	287	294
B4	233	234	225
B5	237	234	229
B6	241	271	269
B7	232	272	272
C1	226	382	354
C2	219	374	363
C3	224	364	359
C4	218	340	322
C5	188	349	344
C6	233	355	344
D1	274	374	367
D2	273	376	372
D3	268	376	366
D4	271	372	369
D5	262	378	369

Em seguida, esses pára-raios foram submetidos às medições da corrente de fuga total, visando a obtenção da amplitude da corrente (valor de pico) e da componente de terceira harmônica (3ª H). Foi também determinada a defasagem entre a corrente de fuga total e a tensão aplicada ao pára-raios. Após essas medições, foram realizados ensaios de tensão de radio-interferência (RIV) com frequência de medição 500 kHz e impedância de 300 ohms [8], e de termovisão (em alguns pára-raios). Nesses ensaios, as medições foram realizadas nas tensões de 51 kV e 80 kV (tensão de operação), considerando-se os pára-raios de 88 kV e 138 kV, respectivamente. As leituras de termovisão foram realizadas após as amostras estarem energizadas por um período de 5 a 7,5 horas, dependendo do fabricante.

O pára-raios foi dividido em 4 lados, sendo realizada uma medição em cada lado. Uma medição corresponde à imagem

térmica obtida ao longo do pára-raios, do topo até a sua base. Em cada lado, foram determinadas as temperaturas máxima e mínima, sendo posteriormente obtida a diferença (Δt) entre essas temperaturas. O Δt máximo refere-se à maior

diferença encontrada. A temperatura máxima refere-se à maior temperatura obtida no pára-raios. A tabela III mostra os resultados.

Tabela III. Medição da corrente de fuga total, RIV e termovisão.

Fabricantes A/B/C/D (identificação da amostra)	Tensão disruptiva em frequência industrial (kV)	Corrente de fuga		Defasagem (graus)	Tensão de radio-inter- ferência RIV (μV)	Termovisão ($^{\circ}C$)	
		Valor pico (mA)	3 ^a H (%)			temperatura máxima	Δt máx- imo
A1	134 (R)	0,172	6,7	89	*	20,8	2,0
A2	105 (R)	0,192	10,1	65	**	21,6	2,0
A3	85 (R)	0,412	24,9	54	11	**	**
A4	102 (R)	0,696	32,9	47	29	**	**
A5	---- (R)	0,363	5,7	39	143	24,2	5,1
A6	---- (R)	0,384	5,0	67	8033	**	**
A7	193 (R)	0,278	2,6	85	*	29,3	7,0
A8	170 (R)	0,268	5,6	70	*	28,8	6,2
A9	178 (R)	0,246	6,8	71	36	**	**
B1	244	0,226	4,8	72	11	**	**
B2	246	0,252	5,7	70	25	28,0	4,6
B3	242	0,370	6,0	77	**	28,3	4,3
B4	233	0,234	6,4	68	25	**	**
B5	237	0,251	6,8	68	10	**	**
B6	241	0,230	8,5	63	25	27,9	4,4
B7	232	0,261	9,4	53	23	**	**
C1	226	0,363	5,6	73	23	**	**
C2	219	0,456	5,8	75	80	**	**
C3	224	0,346	6,8	79	*	19,9	2,6
C4	218	0,332	6,9	68	*	**	**
C5	188 (R)	0,430	7,5	83	4518	19,3	2,8
C6	233	0,726	18	51	6381	32,6	17,6
D1	274	0,364	1,9	89	*	18,1	1,7
D2	273	0,357	2,1	89	*	**	**
D3	268 (R)	0,357	2,1	82	64	18,2	1,9
D4	271	0,330	2,5	84	*	**	**
D5	262 (R)	0,331	3,8	78	90	**	**

(R) amostra reprovada no ensaio de tensão disruptiva em frequência industrial

(*) não há RIV proveniente do pára-raios

(**) ensaio não realizado

Os valores obtidos de tensão disruptiva em frequência industrial, dos pára-raios A1, A2, A3, A4, mostrados na tabela I, não atenderam os requisitos do fabricante. Os pára-raios A5 e A6 apresentaram comportamento instável a partir de aproximadamente 80 kV e, conseqüentemente, não foi possível determinar os seus respectivos valores de tensão disruptiva em frequência industrial.

Os valores obtidos no ensaio de tensão disruptiva em frequência industrial, mostrados na tabela II, dos pára-raios A7, A8 e A9 (fabricante A), C5 (fabricante C) e D3, D5 (fabricante D), não atenderam os requisitos do fabricante. Todos os pára-raios apresentaram resultados satisfatórios no ensaio de tensão disruptiva de impulso.

Com relação aos resultados apresentados na tabela III, os seguintes comentários são apresentados:

- pára-raios A1 a A9:

- os pára-raios A1, A2, A3 e A4 apresentaram aumento gradativo da distorção da corrente de fuga e respectiva diminuição da defasagem;
- os pára-raios A5 e A6, os quais não tiveram determinados os valores de tensão disruptiva em frequência industrial, apresentaram menor distorção da corrente de fuga, entretanto, a corrente apresentou maior característica resistiva (defasagem menor em relação à tensão aplicada);
- os pára-raios A1, A2 e A5 foram submetidos às medições de termovisão, sendo observado aquecimento no pára-raios A5. Os pára-raios A7 e A8, classe de tensão 138 kV, apresentaram comportamento térmico similar;
- foi encontrado valor elevado de RIV no pára-raios A6;

- pára-raios B1 a B7:

- todos os pára-raios foram aprovados nos ensaios de tensão disruptiva de impulso e de tensão disruptiva em frequência industrial, indicando um funcionamento satisfatório de seus centelhadores;
- os pára-raios B6 e B7 apresentaram maior distorção da corrente de fuga em comparação com os demais pára-raios do mesmo fabricante;
- os pára-raios B2, B3 e B6 foram submetidos às medições de termovisão e apresentaram comportamento térmico similar nesse ensaio;
- os valores encontrados nas medições de RIV foram baixos, resultando em um bom desempenho dos pára-raios;

- pára-raios C1 a C6:

- todos os pára-raios foram aprovados no ensaio de tensão disruptiva de impulso atmosférico, entretanto, o pára-raios C5 foi reprovado no ensaio de tensão disruptiva em frequência industrial;
- a medição da corrente de fuga registrou componente de 3ª H ligeiramente maior no pára-raios C5 e valores elevados de amplitude e da componente de 3ª H na amostra C6, sugerindo alguma anormalidade nesse pára-raios;
- os pára-raios C3, C5 e C6 foram submetidos às medições de termovisão, sendo observado aquecimento excessivo no pára-raios C6;
- os valores encontrados nas medições de RIV foram muito elevados nos pára-raios C5 e C6, indicando a existência de descargas internas;

- pára-raios D1 a D5:

- todos os pára-raios foram aprovados no ensaio

de tensão disruptiva de impulso atmosférico, porém, no ensaio de tensão disruptiva em frequência industrial, foi observada a reprovação dos pára-raios D3 e D5;

- a medição da corrente de fuga registrou componente de 3ª H ligeiramente maior no pára-raios D5;
- os pára-raios D1 e D3 foram submetidos às medições de termovisão, onde foi observado comportamento térmico similar nesses pára-raios;
- os valores encontrados nas medições de RIV foram ligeiramente maiores nos pára-raios D3 e D5 em comparação com outros pára-raios do mesmo fabricante.

III. CAMPO ELETROMAGNÉTICO EMITIDO

A análise do campo eletromagnético emitido foi realizada considerando-se duas etapas de medição, sendo a primeira com a utilização de um transformador de corrente de alta frequência (TC, tipo clamp) colocado no condutor de aterramento do pára-raios e, a segunda, com a utilização de antena. Deste modo, a existência de descargas elétricas internas poderia ser detectada através da medição de um sinal de alta frequência conduzido (TC) ou irradiado (antena). O pára-raios de SiC foi energizado na tensão de operação (80 kV), sendo o sinal medido através do transdutor (TC ou antena), o qual envia o sinal para um analisador de espectro.

A medição foi realizada em várias faixas de frequências do analisador de espectro. A título de ilustração é mostrado na figuras 1 e 2 o resultado referente à amostra C5, para as faixas de frequência 300 kHz a 800 kHz e 1 MHz a 3 MHz, respectivamente. Nas figuras, podem ser visualizados, distintamente, o sinal proveniente das descargas elétricas na parte interna do pára-raios (maior amplitude) e o sinal proveniente do ambiente (menor amplitude).

A amostra C5 é aquela que apresentou RIV elevado, conforme mostrado na tabela III. As descargas internas provenientes do pára-raios emitem sinais que podem ser verificadas em uma faixa ampla do espectro (de centenas de kHz até dezenas de MHz), o que poderia viabilizar a utilização dessa técnica no campo, uma vez que a medição normalizada de RIV é realizada em frequência fixa (500 kHz ou 1 MHz), estando sujeito à ocorrência de interferências e ruídos.

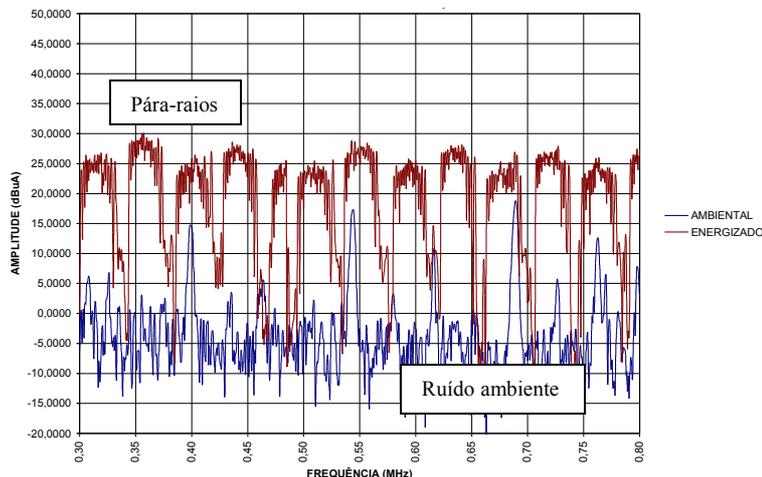


Figura 1. Espectro gerado pelo pára-raios e pelo ambiente (300 kHz – 800 kHz).

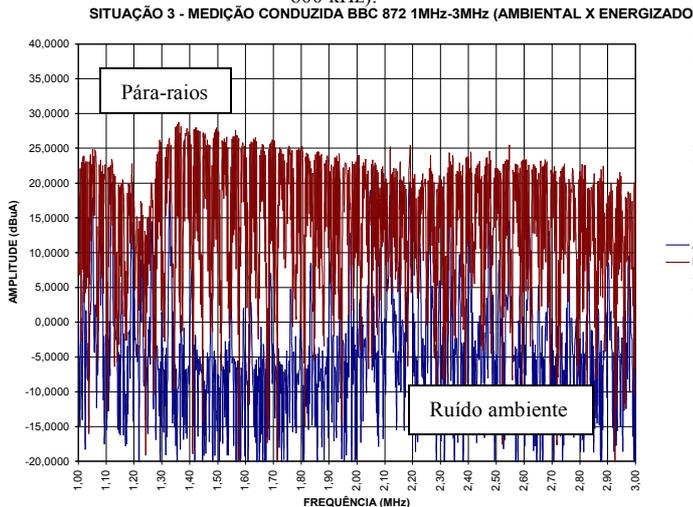


Figura 2. Espectro gerado pelo pára-raios e pelo ambiente (1 MHz – 3 MHz).

O próximo passo seria então a aplicação dessa metodologia na subestação, procurando-se investigar a existência de eventuais descargas elétricas internas nos pára-raios.

IV. DESMONTAGEM DOS PÁRA-RAIOS DE SiC

Vários pára-raios foram desmontados, entretanto, serão mostradas somente algumas ilustrações. Durante a desmontagem de alguns pára-raios foi verificada a presença de gases e de bolor, presença de umidade nos módulos inferiores e alguns blocos carbonizados, conforme mostra a figura 3.



Figura 3. Blocos carbonizados.



Figura 4. Sinais de ocorrência de descargas no centelhador.

Alguns pára-raios apresentaram centelhadores com sinais de descargas, conforme mostra a figura 4. Notou-se também na inspeção interna dos pára-raios que alguns resistores de equalização estavam danificados.

Foi possível constatar também que determinados pára-raios apresentaram componentes internos em melhores condições, indicando que poderiam ainda operar satisfatoriamente, apesar da sua idade. De modo geral, os aspectos verificados durante a desmontagem dos pára-raios forneceram subsídios importantes para a análise dos resultados encontrados nos ensaios de laboratório.

V. MEDIÇÕES NAS SUBESTAÇÕES DE PARAIBUNA E NORDESTE

A. Subestação Paraibuna

As medições realizadas na subestação de Paraibuna consideraram pára-raios de SiC, classe de tensão 88 kV. Essas medições tiveram por objetivo verificar a viabilidade de medição nos pára-raios instalados na subestação. A figura 5 mostra o esquema utilizado na medição.

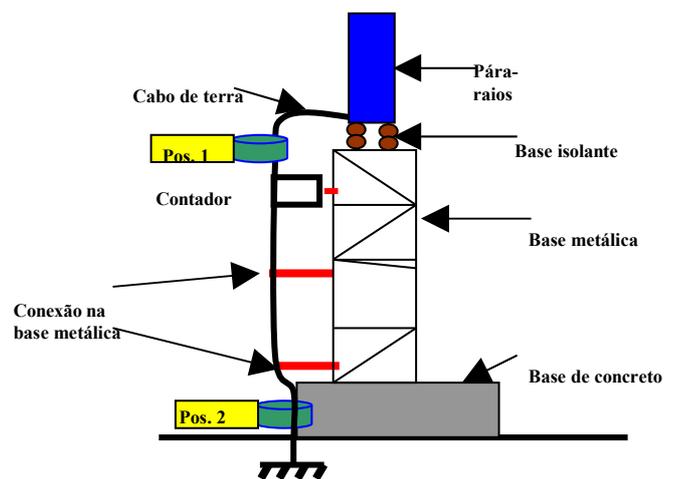


Figura 5. Esquema de medição dos pára-raios de SiC.

Nas medições foi utilizado um aparelho disponível comercialmente, sendo composto de um clamp de corrente (TC) e do instrumento de medição, onde era possível efetuar as leituras da corrente de fuga total (valores de pico e eficaz) e da corrente de fuga na frequência de 180 Hz (valor eficaz). As medições foram realizadas com o TC colocado na posição 1. Quando o TC era colocado na posição 2, havia também o registro das correntes que circulavam nos “loops” formados entre o cabo de terra e as conexões da base metálica. Essas correntes são induzidas pela tensão do sistema e não são provenientes dos pára-raios.

Ressalta-se que antes da realização das medições, o instrumento de medição e o TC foram posicionados em alguns pontos ao longo da base do pára-raios, não sendo observado nenhum efeito de indução na aparelhagem. Durante as medições da corrente de fuga dos pára-raios, foi também registrada a forma de onda da corrente dos pára-raios, através do

TC, que possui saída para osciloscópio, e da tensão do sistema através de um sensor de campo.

A figura 6 mostra detalhes da base do pára-raios de SiC na subestação de Paraibuna e a figura 7 mostra as formas de onda da corrente de fuga total do pára-raios e da tensão do sistema.

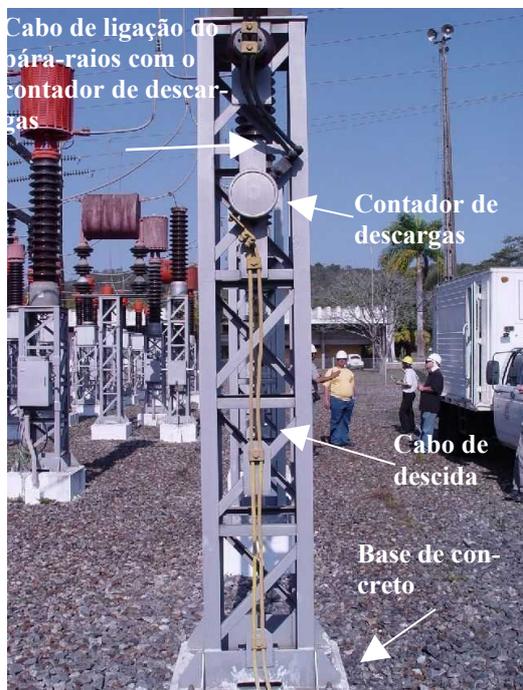


Figura 6. Detalhe da base do pára-raios de SiC.

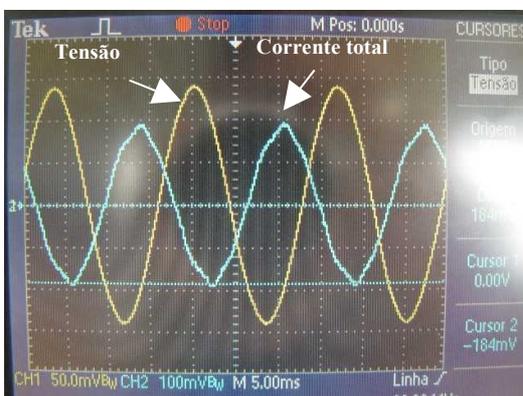


Figura 7. Formas de onda da corrente de fuga total do pára-raios de SiC e da tensão do sistema.

Com o registro das formas de onda da corrente de fuga do pára-raios e da tensão do sistema foi possível consolidar as medições realizadas com o instrumento de medição e com o TC.

A tabela IV mostra os valores eficazes da corrente de fuga total e a respectiva corrente na frequência de 180 Hz, obtidos nas medições dos pára-raios de SiC dos circuitos TAU-01, JAG-01 e JAG-02.

Tabela IV. Valores de corrente de fuga em Paraibuna.

Pára-raios	Corrente de fuga total	Corrente de fuga 180 Hz
------------	------------------------	-------------------------

	Valor eficaz (mA)	Valor eficaz (mA)
TAU-01a	0,132	0,005
TAU-01b	0,128	0,004
TAU-01c	0,112	0,004
JAG-01a	0,170	0,004
JAG-01b	0,078	0,002
JAG-01c	0,163	0,005
JAG-02a	0,122	0,003
JAG-02b	0,088	0,002
JAG-02c	0,070	0,002

Os valores de corrente de fuga dos pára-raios mostram correspondência com aqueles encontrados no laboratório. A realização de medições periódicas para acompanhar a evolução da corrente de fuga, em termos de amplitude e distorção harmônica, poderá indicar a existência de algum processo de degradação mais acentuado nos pára-raios.

B. Subestação Nordeste

A técnica da medição da emissão espectral do campo eletromagnético conduzido, produzido por descargas parciais, foi utilizado em medições em campo, na avaliação de pára-raios do tipo ZnO, classe 345kV, instalados na subestação Nordeste. A opção pela adoção dessa técnica, já empregada com sucesso na detecção de descargas parciais em TCs [7], deveu-se ao histórico de falhas ocorridas verificadas nessa subestação. Após a ocorrência da queima sucessiva de 03 pára-raios de ZnO de 345 kV, foi constatado 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 a queima do pára-raios em operação normal.

Nessas medições, os pulsos de corrente de alta frequência, produzidos pelas descargas, foram medidos no domínio do tempo com um osciloscópio, utilizando-se como transdutor um transformador de corrente para alta frequência, considerando-se frequências superiores a 9 kHz, instalado no condutor de aterramento dos pára-raios sob ensaio. 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, no âmbito do P&D 0068-034/2004 [7]. A técnica permitiu a avaliação dos pára-raios de ZnO, em operação normal, identificando os equipamentos que já se encontravam em processo de degradação, priorizando a retirada de operação antes de sua queima, evitando-se assim desligamentos emergenciais, riscos materiais e de segurança pessoal.

As figuras 8 e 9 mostram os pára-raios de ZnO do circuito Mogi-Nordeste, avaliados com a técnica, e a instalação do TC de alta frequência no cabo de aterramento do pára-raios, respectivamente.



Figura 8. Vista, em segundo plano, dos três pára-raios de ZnO da LTA MO-NOD.



Figura 9. TC de alta frequência aplicado ao condutor de aterramento do pára-raios da fase AZ - LTA GUA-NOD.

As figuras 10 a 12 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 os resultados do P&D 0068-033/2004 [7].

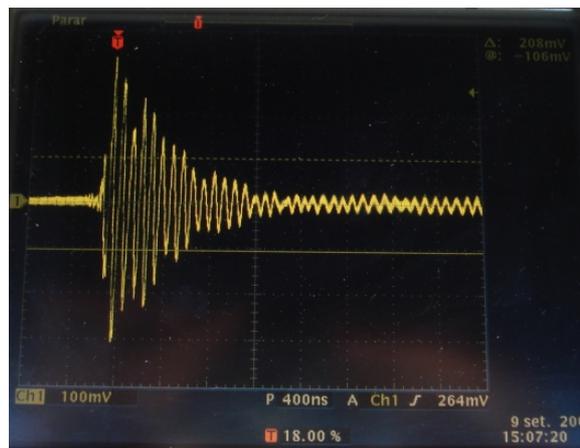


Figura 10. Corrente medida com TC de alta frequência aplicado ao condutor de aterramento do pára-raios da fase BR - LTA GUA-NOD (escalas 100mV/div e 400ns/div).

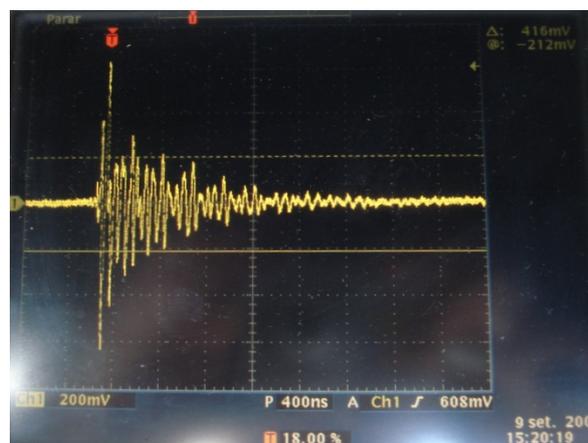


Figura 11. Corrente medida com TC de alta frequência aplicado ao condutor de aterramento do pára-raios da fase AZ - LTA GUA-NOD (escalas 200mV/div e 400ns/div).

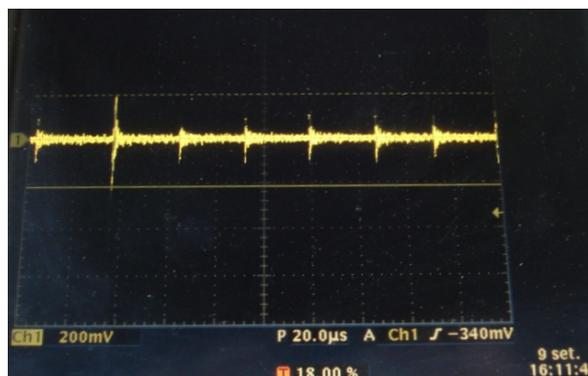


Figura 12. Corrente medida com TC de alta frequência aplicado ao condutor de aterramento do pára-raios da fase AZ - LTA GUA-NOD (escalas 200mV/div e 400ns/div).

Para efeito comparativo, as figuras 13 e 14 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.

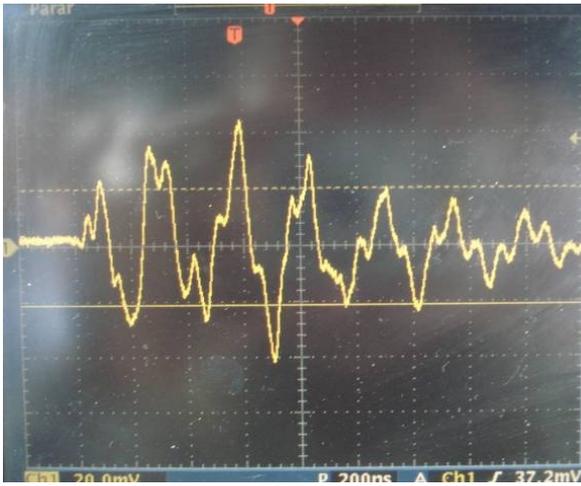


Figura 13. Corrente medida com TC de alta frequência aplicado ao condutor de aterramento do pára-raios da fase VM – TR3 da SE Nordeste (escalas 20mV/div e 200ns/div). Oscilograma não característico de descargas parciais.

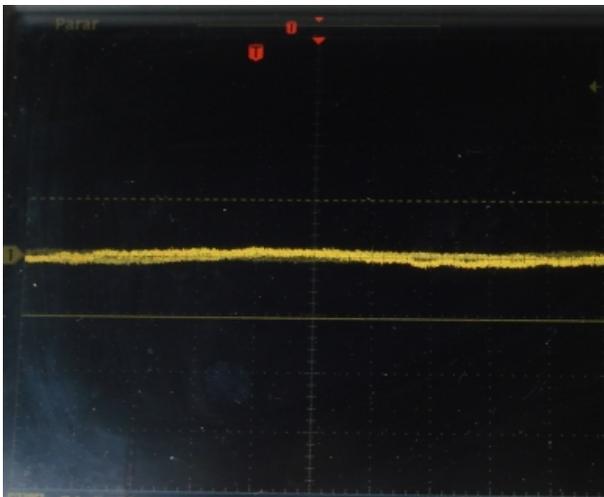


Figura 14. Medição com TC de alta frequência aplicado ao condutor de aterramento do pára-raios da fase AZ do TR3 – SE Nordeste (escalas 50mV/div e 200ns/div). Oscilograma não característico de descargas parciais.

Através das medições foram analisados 13 pára-raios de 345 kV. Considerando-se os resultados das medições, foram identificados 5 pára-raios suspeitos, os quais apresentaram sinais característicos de descargas parciais. Os pára-raios suspeitos foram priorizados para efeito de substituição dos equipamentos.

Após a retirada dos pára-raios suspeitos quanto a presença de descargas internas, foram realizadas medições em laboratório no pára-raios da fase AZ– LTA GUA-NOD. A figura 15 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 [9].

Nessa medição de descargas parciais (método convencional da norma IEC 60270), foi detectado um nível de descargas parciais na tensão de 200kV (tensão de serviço do pára-raios) de 100 pC.

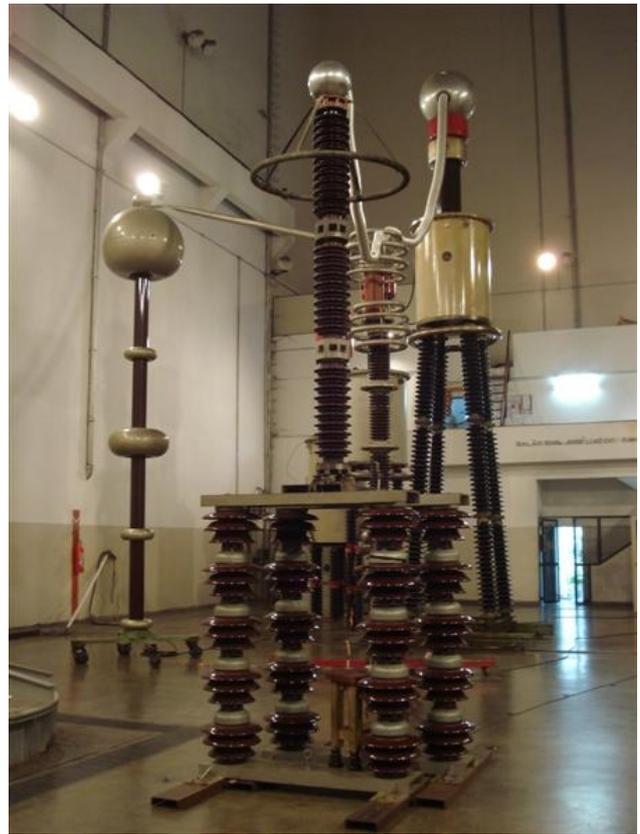


Figura 15. Montagem utilizada em laboratório para a medição de descargas parciais no pára-raios da fase AZ LTA GUA-NOD (em primeiro plano), utilizando-se o procedimento convencional de medição da carga aparente conforme a norma IEC 61270[9].

De acordo com a norma IEC 60099-4 [10], o nível máximo de descargas parciais admissível é de 10 pC na tensão de ensaio de 241 kV. A figura 16 mostra a tela do detector de descargas parciais Robinson Instruments, utilizado nas medições.

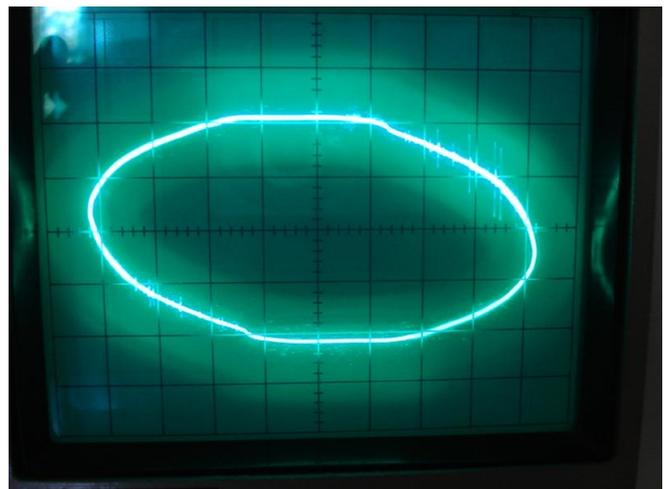


Figura 16. Medição de descargas parciais no pára-raios da fase AZ LTA GUA-NOD, utilizando-se o procedimento da norma IEC 60270. Tela do detector de descargas parciais Robinson Instruments apresentando nível de descargas parciais de 100pC.

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 17.

VI. DISCUSSÃO

O procedimento normalmente utilizado para avaliação dos pára-raios de SiC no campo tem sido a medição da termovisão, onde através da imagem térmica, é analisada a existência de alguma anormalidade nos pára-raios. A corrente de fuga, técnica geralmente utilizada nos pára-raios de ZnO, pode ser também aplicada aos pára-raios de SiC, trazendo informações valiosas sobre o seu estado atual.

Os seguintes aspectos devem ser ressaltados:

- corrente de fuga x degradação do pára-raios:

Os valores mais elevados da corrente de fuga, em termos de amplitude e, principalmente, da distorção harmônica (3ª H), indicam algum processo de degradação dos pára-raios. Essa afirmação pode ser exemplificada através dos resultados obtidos no pára-raios C6, o qual apresentou aquecimento na medição de termovisão e níveis elevados de RIV, indicando a existência de degradação acentuada nesse pára-raios. A medição da corrente de fuga acusou valores elevados de amplitude e de distorção harmônica, mostrando que a degradação nesse pára-raios seria também identificada através dessa técnica;

- utilização de somente uma técnica para o diagnóstico do pára-raios:

A utilização de uma técnica de diagnóstico pode não ser suficiente para uma avaliação correta do pára-raios. O pára-raios C5 foi aprovado no ensaio de termovisão e apresentou valor elevado de RIV, indicando a presença de descargas internas. A componente de 3ª H da corrente de fuga foi ligeiramente maior em comparação com as medições dos demais pára-raios do mesmo fabricante;

- classificação dos pára-raios de SiC:

A informação obtida com a corrente de fuga pode ser utilizada para priorizar a retirada de determinados pára-raios de SiC. No laboratório foi verificado que todos os pára-raios do fabricante B foram aprovados nos ensaios de tensão disruptiva em frequência industrial. Os ensaios de termovisão e de RIV não acusaram problemas, entretanto, os pára-raios B6 e B7 apresentaram maior distorção da corrente de fuga e poderiam ser retirados como parte de um programa de substituição gradativa dos pára-raios de SiC pelos de ZnO.

Com relação à medição da emissão espectral do campo eletromagnético conduzido, os resultados obtidos até o momento têm mostrado que essa técnica é muito promissora no que diz respeito à detecção de descargas elétricas internas no pára-raios.

As medições realizadas na subestação Nordeste nos pára-raios de ZnO, forneceram subsídios importantes para a tomada de decisão quanto à retirada dos pára-raios suspeitos. Ressalta-se que foram observados sinais característicos da existência de descargas internas, o que explicaria a ocorrência de falhas em pára-raios de mesma família.



Figura 17 – TC de alta frequência instalado no condutor de aterramento do pára-raios da fase AZ LTA GUA-NOD.

A figura 18 mostra oscilograma obtido com osciloscópio, onde podem ser observados os pulsos produzidos pelas descargas parciais medidos com o TC de alta frequência aplicado ao condutor de aterramento, juntamente com o sinal da tensão senoidal de 200kV aplicada ao pára-raios.

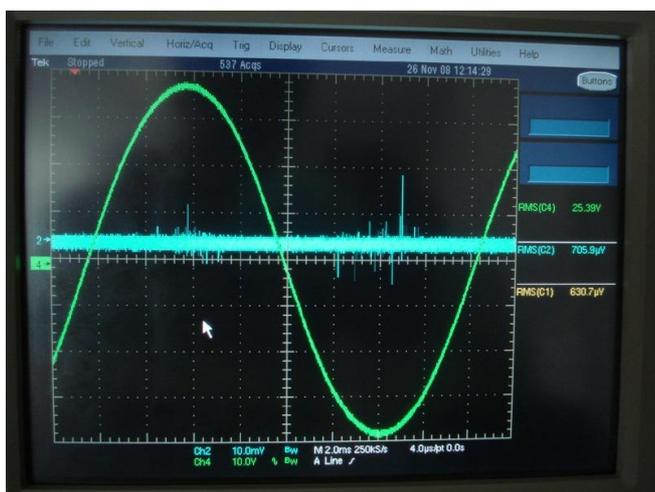


Figura 18 – Tela de osciloscópio apresentando os pulsos produzidos pelas descargas parciais medidos com o TC de alta frequência aplicado ao condutor de aterramento, juntamente com o sinal da tensão senoidal de 200kV aplicada ao pára-raios AZ LTA GUA-NOD (escala de tempo 2ms por divisão).

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 esse pára-raios.

VII. CONCLUSÃO

Este trabalho mostrou que a medição da corrente de fuga pode auxiliar significativamente no diagnóstico dos pára-raios de SiC. Um pára-raios que apresente valores mais elevados de amplitude e/ou da distorção harmônica da corrente de fuga poderia ter o seu comportamento observado mais freqüentemente, podendo resultar na sua retirada de serviço. A implementação de procedimentos para a medição da corrente de fuga, juntamente com a medição de termovisão, a qual é normalmente realizada pela concessionária, resultará em informações mais consistentes sobre o estado atual dos pára-raios de SiC.

A medição da emissão espectral do campo eletromagnético conduzido, produzido por descargas internas no pára-raios, tem indicado resultados importantes no diagnóstico dos pára-raios de ZnO. As medições realizadas na subestação Nordeste em pára-raios de ZnO, classe 345kV, classificou alguns pára-raios como suspeitos, sendo recomendada a sua substituição. No ensaio realizado no laboratório, em um dos pára-raios retirados da subestação, foi detectada a presença de descargas internas, confirmando o resultado obtido nas medições realizadas em campo. Ressalta-se que, anteriormente, foram observadas falhas em alguns pára-raios de mesma família na concessionária.

VIII. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem aos pesquisadores Clóvis Y. Kodaira, Celso Pereira Braz e Welson Bassi, pelas importantes sugestões feitas durante as atividades no laboratório de alta tensão, aos pesquisadores Kleiber T. Solleto, pela valiosa contribuição no ensaio de análise espectral, e Eruchim Waldemar Citron pela participação na fase inicial do projeto.

IX. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] S. Grzybowski and G. Gao, "Evaluation of 15-420 kV substation lightning arresters after 25 years of service", in *Proc. Southeastcon '99*, pp.333 – 336, Mar., 1999.
- [2] W. McDermid, "Reliability of station class surge arresters", in *Proc. IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, pp. 320-322, Apr., 2002.
- [3] M. Darveniza, R. Mercer and R. M. Watson, "An assessment of the reliability of in-service gapped silicon-carbide distribution surge arresters", *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 11, n° 4, pp. 1789-1797, Oct. 1996.
- [4] F. B. Barbosa and J. C. Carneiro, "Evaluation of lightning arresters from the CPFL technical reserve by means of laboratory tests: an experience of success", in *Proc. XIV International Symposium on High Voltage Engineering*, (B51) pp.1-8, Aug. 2005.
- [5] C. Heinrich, and V. Hinrichsen, "Diagnostics and monitoring of metal-oxide surge arresters in high-voltage – comparison of existing and newly developed procedures", *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 16, n° 1, pp. 138-143, Jan. 2001.
- [6] A. Schei, "Diagnostic techniques for surge arresters with main reference to on-line measurement of a resistive leakage current of metal-oxide arresters", in *Proc. CIGRE, Session 2000*, (P1-05) pp.1 – 10, 2000.
- [7] W. R. Bacega, H. Tatizawa, K. T. Soletto, G. Silva, "Desenvolvimento de técnica de descargas parciais em TIs, no campo", in *Proc. IV Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica – IV CITENEL*, Araxá, 2007.
- [8] *CISPR-16 Specification for Radio Disturbances and Immunity Measuring Apparatus and Methods*, 1999.
- [9] *International Electrotechnical Commission, IEC 60270 Standard, High-voltage test techniques – Partial discharge measurements, 2000.*
- [10] *International Electrotechnical Commission, IEC 60099-4 Standard, Surge arresters part 4 – Metal oxide surge arresters without gap for AC systems, 2001.*