



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

Versão 1.0
XXX.YY
22 a 25 Novembro de 2009
Recife - PE

GRUPO –VIII

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

AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE PÁRA-RAIOS DE ZnO APÓS 20 ANOS EM SERVIÇO

**Orsino Oliveira Filho(*), Flávio B. Barbosa, Rogério M. Azevedo
CEPEL**

**Waldenir A. S. Cruz, Sylvia G. Carvalho
FURNAS**

RESUMO

Nesse trabalho são apresentados os resultados de ensaios feitos em pára-raios de ZnO após 20 anos de operação, bem como em unidade reserva.

Apenas um pára-raios de um grupo de três retirados de operação após 20 anos de serviço apresentou bom desempenho. Os outros apresentaram falha interna no ensaio de tensão residual sob impulso de corrente 8/20 μ s. As seções de pára-raios que falharam nos ensaios de tensão residual apresentaram resultados considerados satisfatórios no ensaio de corrente de fuga. O pára-raios reserva, armazenado por cerca de 20 anos, apresentou resultados compatíveis com um pára-raios novo.

PALAVRAS-CHAVE

Pára-raios de ZnO, Ensaios em Pára-raios, Avaliação de Pára-raios, Desempenho de Pára-raios Usados

1.0 - INTRODUÇÃO

Há muitos casos de pára-raios (PR) de ZnO e SiC operando no sistema elétrico brasileiro por períodos de cerca de 20 anos. Há também casos de unidades reserva de PR armazenadas por períodos de tempo dessa ordem, sem serem eletricamente solicitadas ao longo desse tempo. Por um lado, após esse tempo em operação, os PR podem ter sofrido efeitos de umidade e envelhecimento de seus componentes de tal forma a comprometer o desempenho esperado de proteção contra sobretensões. Por outro lado, no caso de necessidade de substituir um PR danificado por um reserva armazenado por cerca de 20 anos, não se tem garantias do bom estado operacional da unidade reserva, por causa da possibilidade de danos por exposição a condições ambientais nem sempre controladas.

A falha de operação de um PR na sua função de proteção contra sobretensões pode acarretar danos em estruturas e sistemas isolantes de importantes componentes da subestação, como por exemplo, danos em isolamento de transformadores e reatores de potência. Muitas vezes, somente há suspeitas sobre a operação inadequada de um PR quando danos maiores já foram causados, tais como: curto-circuito em barramento, perdas de equipamentos, interrupção no fornecimento de energia e todos os seus conseqüentes prejuízos.

A avaliação do estado operacional dos PR instalados no sistema elétrico, bem como os armazenados por longo período de tempo, torna-se, portanto, importante para garantir desempenho adequado na proteção dos equipamentos contra sobretensão. As técnicas hoje existentes para avaliação de desempenho de PR em serviço podem dar uma indicação das condições operacionais, mas ensaios em laboratórios ainda são indispensáveis para se ter certeza sobre os suspeitos. Um dos ensaios, por exemplo, que é muito difícil de ser realizado no campo e que deve, portanto, ser realizado em laboratório para o fim de avaliar o desempenho operacional de PR é

(*) CEPEL Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, DLE – Departamento. de Linhas e Estações
Av. Horácio de Macedo, 354, CEP 21941-911, Cidade Universitária – RJ, Brasil
Tel.: (+55 21) 2598-6020, Fax: (+55 21) 2270-4189, orsino@cepel.br

o ensaio de tensão residual com impulso de corrente. Esse ensaio solicita o PR na sua condição de operação contra sobretensão, ou seja, quando ele é solicitado a operar com a descarga de corrente associada à sobretensão e não na condição de operação normal do sistema, na qual o PR permanece continuamente.

No início de 2007, durante uma chuva muito intensa, que se estima tenha sido de intensidade da ordem de 5 mm/min, acompanhada de visível atividade de descargas atmosféricas, ocorreu uma falha de isolamento em uma subestação classe 800 kV do sistema de FURNAS, causando curtos-circuitos e desligamentos da subestação. Inicialmente, essa falha levantou suspeitas sobre o funcionamento adequado dos pára-raios de ZnO da subestação, já que uma sobretensão acima dos limites suportáveis supostamente atingiu os isoladores de suporte dos barramentos.

Como parte da investigação sobre as possíveis causas da falha, pára-raios de ZnO com cerca de 20 anos de operação, bem como uma unidade reserva que nunca foi colocada em serviço, foram ensaiadas em laboratório. Os ensaios realizados em cada seção dos PR, nos laboratórios de alta tensão do CEPEL, foram: medição da corrente de fuga na tensão de referência, medição de descargas parciais com tensão nominal em 60Hz e tensão residual com a máxima corrente de impulso possível de ser conseguida em laboratório para uma seção de pára-raios classe 800 kV, além de desmontagem para inspeção visual interna dos blocos de ZnO em algumas unidades que falharam nos ensaios.

Nesse trabalho, são apresentados os resultados obtidos com a investigação baseada nos ensaios feitos em laboratório, mostrando a importância dos ensaios de descargas parciais e impulso de corrente para detectar condições internas que não são evidenciadas na medição de corrente de fuga e podem afetar o desempenho dos pára-raios quando eles forem solicitados a operar sob corrente de descarga. Os ensaios foram realizados em seções dos PR por causa do nível de tensão necessário para o caso de PR classe 800 kV, sobretudo para o ensaio de impulso de corrente para medição de tensão residual, para o qual foi estabelecido um procedimento próprio também apresentado nesse trabalho (ANEXO).

2.0 - PÁRA-RAIOS SOB INVESTIGAÇÃO

Quatro seções de PR tipo estação para sistemas 800 kV foram investigados. As características principais desses PR são apresentadas na Tabela 1, complementadas por: Tensão nominal = 588 kV_{ef}; Máxima tensão contínua de operação (MCOV) = 462 kV_{ef}; Corrente de descarga nominal = 20 kA; Classe de descarga de linhas = 5; Classe de alívio de sobrepressão = 40 kA. Cinco seções compõem um dos pára-raios que nunca foi energizado no campo e quatro seções compõem os outros três que estiveram em serviço por cerca de 20 anos.

A investigação foi baseada em ensaios de corrente de fuga, descargas parciais e tensão residual sob impulso de corrente 8/20 µs. Os ensaios foram feitos em cada seção de pára-raios nos laboratórios de alta tensão do CEPEL, Unidade de Adrianópolis, Nova Iguaçu, Rio de Janeiro.

Tabela 1 – Características dos Pára-raios investigados

Fabricante/Número	Seção	Tensão Nominal(kV)	MCOV (kV)	Condição
A/75044	1	124	97	Unidade reserva armazenada desde 1999
	2			
	3			
	4	108	85	
	5			
B/45083	814-1	152	123	Após 20 anos em operação - Instalada em uma subestação 800 kV desde 1988.
	814-2			
	601	132	107	
B/45239	311	152	123	
B/45691	814-1	152	123	
	814-2			
B/45690	601	132	107	
B/45691	311	152	123	
B/45714	814-1	152	123	
	814-2			
	601	132	107	
B/45078	311	152	123	

3.0 - ENSAIOS REALIZADOS

3.1 Medição de Corrente de Fuga

A corrente de fuga que flui através dos componentes internos de cada seção de pára-raios sob investigação foi medida utilizando-se um resistor “shunt” conectado em série com a seção. Possíveis correntes fluindo pela da superfície externa do invólucro de porcelana também foram medidas e seus níveis foram considerados desprezíveis. Um exemplo de arranjo utilizado para medição de corrente de fuga é apresentado na FIGURA 1.

3.2 Ensaio de Descargas Parciais

Ensaio de Descargas Parciais (DP) foram realizados de acordo com a norma IEC 60270, medindo-se carga aparente [1]. Um exemplo de arranjo de ensaio de DP utilizado é apresentado na FIGURA 1.

3.3 Tensão Residual

A tensão residual entre os terminais de cada seção de PR investigado foi medida, quando possível, nas mesmas condições de impulso de corrente para todas as seções, ou seja, mesma forma de onda 8/20 μ s e mesmo valor de crista. A máxima tensão de carga do gerador de impulso disponível, 300 kV_{cc}, foi um fator limitador do máximo valor de crista possível para os impulsos de corrente. Esse limite de tensão de carga não foi suficiente para estabelecer o nível de corrente de descarga nominal, 20 kA, através das seções de pára-raios. Um exemplo de arranjo para o ensaio de tensão residual é mostrado na FIGURA 1 e o procedimento utilizado está descrito no ANEXO.

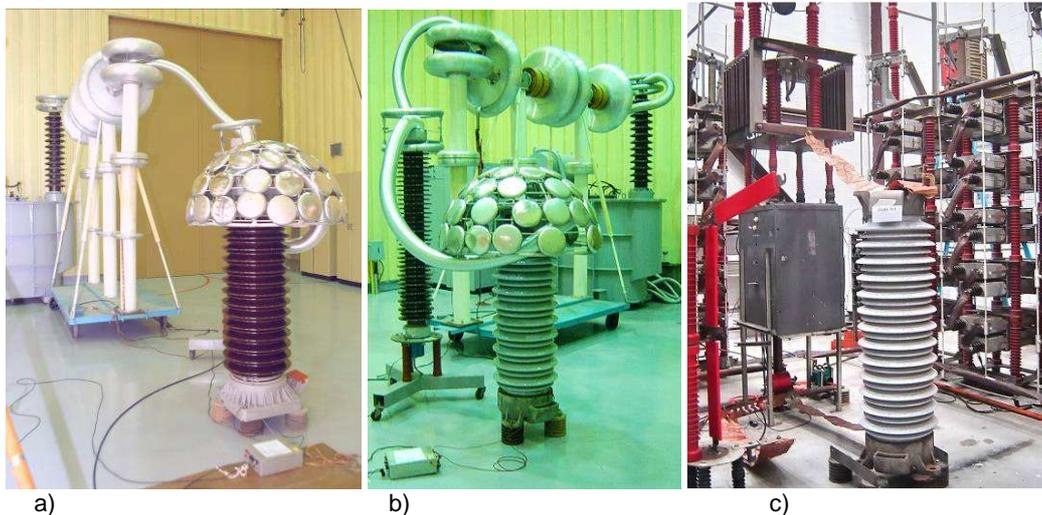


FIGURA 1 – Arranjos para: a) e b) medição de corrente de fuga e descargas parciais c) tensão residual

4.0 - RESULTADOS

4.1 Pára-raios A/75044

As curvas V_{xl} baseadas nos resultados para as cinco seções do PR A/75044 são mostradas na FIGURA 2. A região de baixas correntes foi obtida com as medições de corrente de fuga em 60 Hz e apenas um ponto comum foi obtido para a região de altas correntes, com impulso 8/20 μ s, 5 kA. A tensão residual para o PR completo foi obtida pela soma dos resultados de cada seção em 5 kA, que resultou em 1206 kV (Ver procedimento no ANEXO). Considerando uma incerteza de medição de 5%, esse valor é compatível com a tensão residual informada pelo fabricante para o PR completo em 5 kA, que é de 1261 kV.

Os níveis de DP medidos para as cinco seções do pára-raios A/75044 foram menores do que 7 pC.

Os resultados indicaram que o PR A/75044 apresenta condições de um pára-raios novo.

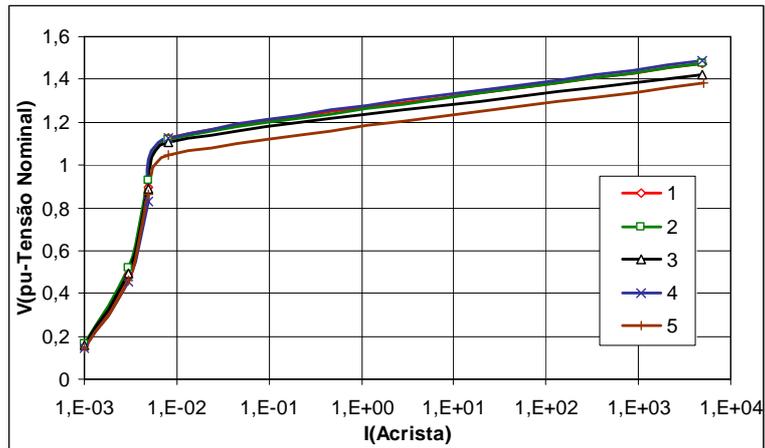


FIGURA 2 – Características V_{xI} obtidas para as seções do PR A/75044

4.2 Pára-raios B/45083-45239, B/45690-45691 e B/45714-45078

As regiões de baixas correntes das curvas V_{xI} para os PR B/45083-45239, B/45690-45691 e B/45714-45078 estão mostradas nas FIGURAS de 3 a 5, respectivamente. Não foi possível obter as regiões de altas correntes para as seções desses PR ou por causa do limite de tensão de carga do gerador de impulso de corrente (GIC) ou por falha da seção durante a injeção do impulso de corrente, conforme indicado na Tabela 2.

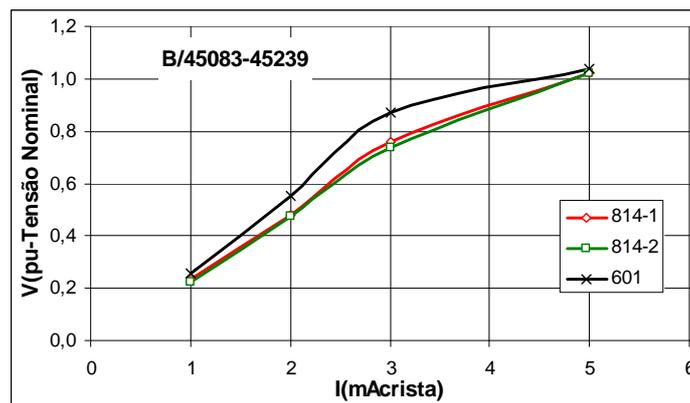


FIGURA 3 – Características V_{xI} obtidas para as seções do PR B/45083-45239

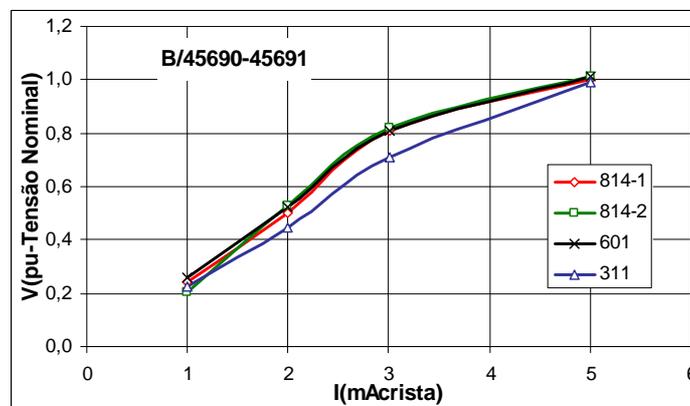


FIGURA 4 – Características V_{xI} obtidas para as seções do PR B/45690-45691

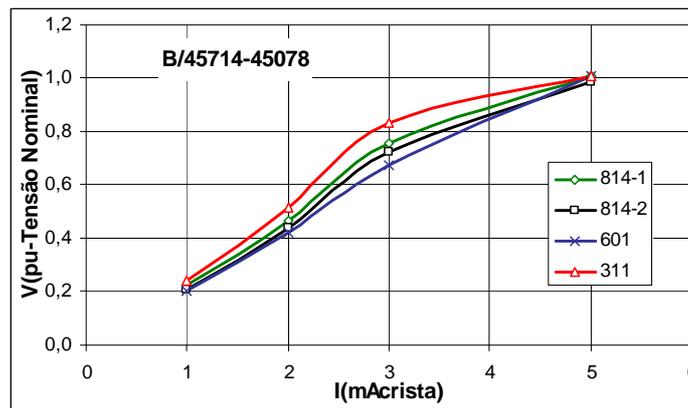


FIGURA 5 – Características VxI obtidas para as seções do PR B/45714-45078

Tabela 2 – Tensão Residual para as seções dos PR B/45083-45239, B/45690-45691 e B/45714-45078

Fabricante/Número.	Seção	Impulso(kAcrista)	Vresidual(kVcrista)
B/45083	814-1	Limite do GIC atingido sem provocar condução de corrente na seção do PR	
	814-2		
	601	1,8	255
B/45239	311	Falha total com a injeção do impulso. Tensão de carga do GIC de 240 kVcc. (Ver FIGURA 6)	
B/45691	814-1	Falha interna I ≈ 36 kAcrista com tensão de carga do GIC de 220 kVcc.	
	814-2		
B/45690	601	1,3	247
B/45691	311	Limite do GIC atingido sem provocar condução de corrente na seção do PR	
B/45714	814-1	Limite do GIC atingido sem provocar condução de corrente na seção do PR	
	814-2		
	601	1,8	253
B/45078	311	Limite do GIC atingido sem provocar condução de corrente na seção do PR	

O invólucro de porcelana da seção B/45239-311 quebrou-se em muitos pedaços com a injeção do impulso de corrente, na tentativa de se medir a tensão residual em 5 kA. Esse fato é inesperado considerando-se o nível de corrente de impulso e a espessura da porcelana, que é de cerca de 60 mm, conforme pode ser visto na FIGURA 6. A dinâmica de atuação da válvula de alívio de sobrepressão interna não foi suficiente para evitar a quebra do invólucro de porcelana da forma mostrada na FIGURA 6. Na mesma tentativa de se fazer ensaios de tensão residual em 5 kA, as seções B/45691-814-1 e 814-2 conduziram um impulso de corrente imprevisivelmente oscilante, com valor de crista de 36 kA, indicando falha interna. Simulações de um circuito RLC série, utilizando-se um modelo do gerador de impulso de corrente, mostraram que uma corrente com a forma e amplitude obtidas no ensaio somente ocorreria se o pára-raios fosse curto-circuitado.



FIGURA 6 – Seções do PR B/45239-311 depois da tentativa de ensaio de tensão residual com 5 kA

Inspeções visuais na seção cujo invólucro de porcelana se quebrou durante o ensaio de tensão residual indicaram que o impulso de corrente muito provavelmente não fluiu, em grande parte, pelos blocos de ZnO. Caminhos de circulação de corrente, indicados por sinais de carbonização, ficaram visíveis ao longo da interface formada pela superfície lateral da coluna de blocos de ZnO e uma tira de material polimérico, utilizada pelo fabricante do PR como espaçador longitudinal entre a coluna de blocos e a superfície interna da porcelana, conforme mostrado na FIGURA 6. A tira isolante que participou do caminho da corrente dividiu-se longitudinalmente ao meio, além de ficar marcada por carbonização (Ver FIGURA 6). Somente uma região concentrada na lateral dos blocos ficou marcada com sinais de circulação de corrente.

Sabe-se que processos de degradação podem afetar o material utilizado no colar que forma a lateral dos blocos de ZnO e podem prevalecer ao envelhecimento do corpo de ZnO [2]. No caso ocorrido aqui, foi observado que tanto o material dos colares dos blocos de ZnO como o material da tira isolante-espaçador se envolveram na falha, sem ser possível identificar a causa real. Pode ter também ocorrido incompatibilidade dielétrica, já que os blocos de ZnO são continuamente aquecidos pela circulação da corrente de fuga em serviço e ficam o tempo todo em contato físico com a tira isolante-espaçador utilizada nesse tipo particular de construção de PR.

Como pode ser observado na FIGURA 7, não há alteração significativa nas formas de onda da corrente de fuga total (I_T) em relação ao esperado para pára-raios de ZnO sadios, quando a tensão aplicada está em torno da região de joelho de condução [2].

Quando comparadas as correntes de fuga (I_T) para todas as seções de PR ensaiadas, somente pequenas diferenças são observadas na região de amplitudes associadas as suas componentes capacitivas: região correspondente ao zero das componentes resistivas (I_R) mostradas na FIGURA 7. Não há diferenças significativas na componente resistiva da corrente (I_R), indicando que a dissipação de potência que ocorreu continuamente durante os cerca de 20 anos de solicitação de tensão 60 Hz do sistema não foi suficiente para afetar, de forma significativa, a região de baixas correntes dos blocos de ZnO e foi igual para todas as seções de um mesmo PR.

A região de baixas correntes das características V_{xl} , incluindo a análise das componentes resistivas, não foi útil para prever a condição que fez a seção de PR falhar durante o ensaio de tensão residual.

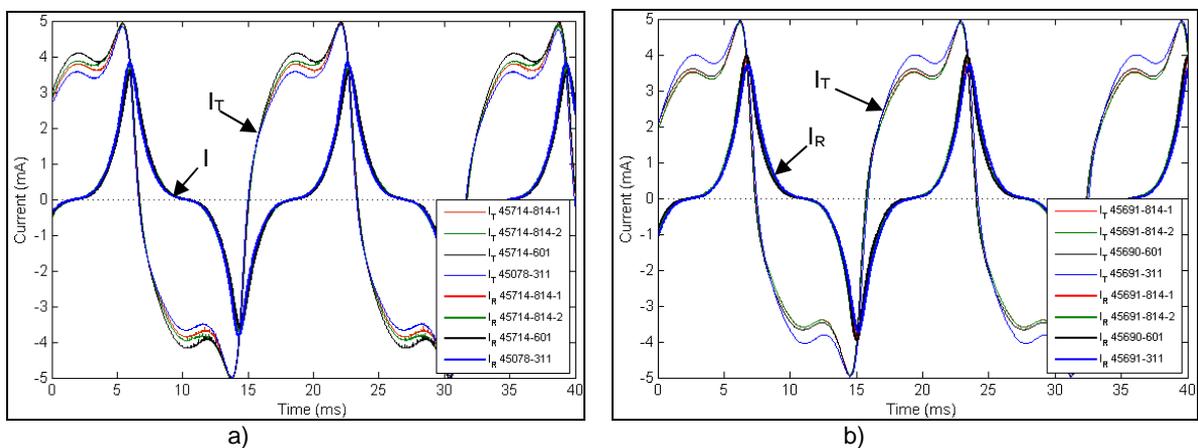


FIGURA 7 – Correntes de fuga ($I_T=5\text{mA}_{\text{peak}}$): a) PR B/45714 e B/45078; b) PR B/45691 e B/45690

Os resultados dos ensaios de Descargas Parciais (DP) para os PR B/45083-45239, B/45690-45691 e B/45714-45078 estão mostrados na Tabela 3. Os ensaios de DP deveriam todos ser realizados antes dos ensaios de tensão residual. No entanto, infelizmente, por causa de condições de disponibilidade de vaga no laboratório, exatamente para a seção cujo invólucro de porcelana se quebrou com o ensaio de tensão residual, o ensaio de DP não foi realizado antes. Porém, com base nos outros resultados, foi possível concluir que o ensaio de DP é muito útil para a avaliação do estado operacional de pára-raios de ZnO. Considerando, por exemplo, as duas seções de PR B/45691-814-1 e B/45691-814-2, que tiveram falha interna no ensaio de tensão residual (Ver Tabela 2), uma delas apresentou o mais alto nível de DP de 100 pC e a outra apresentou um nível significativo de 25 pC, conforme mostrado na Tabela 3. Diante desses resultados, é recomendável que ensaios de DP para essa

finalidade sejam realizados com sistemas digitais de medição, que possibilitam obter mais informações úteis para análises, por meio de mapas de DP, tais como: fase, densidade e níveis dos sinais de DP.

Tabela 3 – Descargas Parciais para as seções dos PR B/45083-45239, B/45690-45691 e B/45714-45078

Fabricante/Número.	Seção	Vef(kV)	DP(pC)
B/45083	814-1	152	2.5
	814-2		
	601	132	12
B/45239	311	Danificada antes do ensaio de DP (Ver Tabela 2 e FIGURA 7)	
B/45691	814-1	152	25
	814-2	152	100
B/45690	601	132	6
B/45691	311	152	24
B/45714	814-1	152	35
	814-2	152	3.5
	601	132	3.5
B/45078	311	152	7

5.0 - COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES

Considerando a experiência obtida com os ensaios realizados em seções de PR tipo estação e os resultados apresentados nesse trabalho, as seguintes conclusões e comentários podem ser feitos:

- A metodologia recomendável para avaliação de desempenho operacional de PR em laboratório é composta por ensaios de corrente de fuga, descargas parciais e tensão residual, preferencialmente nessa ordem, e avaliação dos resultados por meio de comparação com os resultados informados pelos fabricantes. Todos os ensaios podem ser realizados separadamente em cada seção do PR. O ensaio de corrente de fuga é o mais simples, porém, requer uma fonte capaz de suprir corrente para uma carga tão não-linear como são os blocos de ZnO, sem que o conteúdo harmônico da tensão ultrapasse 1%. Nesse ensaio, é recomendável também avaliar a corrente de fuga que flui pela superfície externa do PR.
- Os ensaios de Descargas Parciais (DP) demonstraram ser muito úteis para a avaliação do estado operacional de pára-raios de ZnO, sendo recomendável que outras informações além da carga aparente sejam consideradas, tais como: fase e densidade dos sinais de DP. Essas informações podem ser obtidas de mapas de DP gerados por instrumentos digitais de medição de DP disponíveis atualmente no mercado.
- Por limitações físicas de equipamentos em qualquer laboratório do mundo, não é possível realizar o ensaio de tensão residual em pára-raios de ZnO para extra e ultra-alta tensão na sua montagem completa. Por isso, foi elaborado um procedimento próprio, descrito no ANEXO, que possibilita realizar esse ensaio em seções do PR e obter a tensão residual para o PR completo.
- Um pára-raios de ZnO armazenado por cerca de 20 anos, sem ter sido colocado em operação, apresentou características compatíveis com um pára-raios novo.
- Para um dos PR removidos de serviço após 20 anos de operação contínua, a análise da região de baixas correntes da sua curva característica V_{xl} , obtida durante os ensaios de corrente de fuga, incluindo a análise das componentes resistivas, não foi suficiente para prever a falha sob solicitações com impulso de corrente de descarga, mesmo sendo o impulso de corrente presumido durante o ensaio da ordem de 25% da sua corrente de descarga nominal.
- Normalmente, sempre que se fala em estimativa de vida de pára-raios de ZnO, o foco é a possível degradação dos blocos de ZnO, por causa do fluxo contínuo de corrente sob tensão normal do sistema onde o PR está instalado durante sua vida [2]. Contudo, outros componentes internos, além dos blocos de ZnO, tais como as tiras isolantes de material polimérico utilizadas como espaçador encontradas nos pára-raios que falharam durante os ensaios de tensão residual, podem influenciar a vida útil do PR.
- É recomendável que todos os pára-raios que utilizam espaçadores internos do tipo tira longitudinal isolante, e que estejam em serviço por longo tempo, sejam cuidadosamente avaliados, preferencialmente por meio de ensaios de corrente de fuga, descargas parciais e tensão residual em laboratório.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] IEC 60270 – High Voltage Tests Techniques – Partial Discharges Measurements, 2000.
- [2] A. Haddad and D. Warne, Advances in High Voltage Engineering, IEE Power & Energy Series 40, 2004, pp. 191-255

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Jonir Rangel, José A. P. Rodrigues, Cristiano S. Xavier, Márcio M. de Castro e Fernando Dias da Silva por seus trabalhos durante a realização dos ensaios laboratoriais e Paulo Fernando M. Araujo e Carlos Eduardo R. Pereira por seus trabalhos de processamentos dos dados e simulações.

DADOS BIOGRÁFICOS

Orsino Oliveira Filho

M.Sc. em Engenharia Elétrica pela COPPE/UFRJ, 1991; Pesquisador do CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica desde 1984.

CEPEL Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, DLE – Departamento de Linhas e Estações.

Principais áreas de conhecimento: Técnicas de ensaio e medição em alta tensão; Ensaio em Pára-raios, Gestão de projetos de pesquisa e desenvolvimento e de serviços tecnológicos em temas relacionados com alta tensão; Gestão de conhecimento.

ANEXO – PROCEDIMENTO PARA ENSAIOS DE TENSÃO RESIDUAL EM PÁRA RAIOS COMPLETO

Por questões de projeto associadas à distribuição de tensão, as seções de um pára-raios de classe de tensão mais elevada (800 kV, por exemplo) podem ter tensões nominais diferentes entre si. Com isso, cada seção pode apresentar uma corrente de descarga máxima diferente para a mesma tensão de carga do gerador de impulsos. Para que seja possível obter resultados comparáveis e para que se tenha uma base técnica para somar as tensões residuais obtidas para cada seção e associar o resultado à tensão residual total do pára-raios completo, sugere-se o seguinte procedimento de ensaio de tensão residual, para fins de avaliação do estado operativo de um pára-raios:

Ponto de partida: Elevando-se a tensão de carga gradativamente em aplicações prévias, chega-se a uma aplicação de partida para o ensaio, que deve ser aquela cuja tensão de carga do gerador é minimamente suficiente para gerar corrente de impulso da ordem de kA no pára-raios.

Nota 1: Principalmente quando se trata de pára-raios retirados de serviço sob suspeita, deve-se ter cuidado durante essa e nas demais fases de ensaios por causa da possibilidade de explosão do pára-raios com quebra da porcelana. Recomenda-se que haja alguma barreira adequada para proteção contra estilhaços de porcelana e outros componentes entre o pára-raios sob ensaio e a sala de controle.

A seguir, aplica-se, registra-se, mede-se e grava-se corrente e tensão nos seguintes casos:

1. Aplicação 1 – Aplicação com tensão de carga definida como ponto de partida;
2. Aplicação 2 - Estima-se uma tensão de carga do gerador para que seja obtida uma corrente de impulso de 5,0 kA. Inicialmente utiliza-se regra de três com a tensão de carga e a corrente obtida na aplicação de partida e a tensão de carga incógnita junto com a corrente desejada de 5 kA;
3. Repetir 2, se necessário, no máximo três vezes, com o objetivo de obter a tensão residual para o valor mais próximo de 5 kA possível.

O valor de 5 kA pode ser substituído por um outro valor desejado na avaliação. O objetivo é poder comparar a característica V_{xl} das seções para uma mesma amplitude de corrente de impulso.

Nota 2: Deve ser medida também a tensão com os terminais da seção de PR curto-circuitados, com impulso de corrente igual à máxima amplitude utilizada nos ensaios. A tensão medida com a seção de PR em curto deveria ser próxima de zero. Porém, como há um laço inevitável susceptível a indução na conexão do divisor de tensão aos terminais da seção de PR sob ensaio, é aceitável que a tensão medida em curto seja inferior a 5% da tensão residual medida para a seção de PR presente no circuito em condições nomais.