

RELATÓRIO TÉCNICO

Nº: DLE - 6626 / 2010

Nº. DE PÁGINAS: 36

Nº. DE ANEXOS -----

TÍTULO: Ensaio s normatizados e Pesquisa Experimental em componentes da SE Itaberá 765 kV de FURNAS

ÁREA: Departamento de Linhas e Estações

Nº. DA ÁREA DE RESPONSABILIDADE: B 300

Nº. DA CONTA DE APROPRIAÇÃO: 3212

DESTINATÁRIO: FURNAS Centrais Elétricas S.A.
Rua Real Grandeza, 219 – Botafogo
22283-900 - Rio de Janeiro, RJ

A/C: Cesar Ribeiro Zani
Diretor de Operação do Sistema e Comercialização de Energia

RESUMO: Este relatório apresenta os resultados de atividades de ensaios normatizados e Pesquisa Experimental relativas ao sistema de transmissão de 765 kV de FURNAS (SE Itaberá), além de indicações e recomendações para FURNAS. Principais resultados, indicações e recomendações:

- 1) Nos ensaios normatizados de suportabilidade elétrica (a seco, sob chuva de 1 mm/min e sob poluição natural) e de arco de potência (60 Hz), os isoladores pedestal (IP) suporte de barramento e da estrutura isolante dos filtros de onda apresentaram desempenho adequado, incluindo amostras com trincas, retiradas de serviço.
- 2) Quanto à análise da malha de aterramento da SE Itaberá e medição da resistência de pé de torres: apresentaram desempenho (continuidade e integridade das conexões da malha) e valores de resistência adequados à classe de tensão.
- 3) Na Pesquisa Experimental, constatou-se a eficácia de defletores de chuva ("Booster Sheds") como medida mitigadora, em instalação plena ou parcial, para fazer frente à redução da suportabilidade elétrica dos isoladores pedestal, sob condições de chuva artificial intensa, com precipitação (5 mm/min) superior à normatizada (1 mm/min). Indicou-se para FURNAS o número de "Booster Sheds" a serem utilizados e seu posicionamento.
- 4) Ainda na Pesquisa Experimental, a estrutura isolante dos filtros de onda, sob chuva artificial intensa (5 mm/min) superior à normatizada (1 mm/min), apresentou comportamento instável, susceptível a descargas, mesmo com a utilização de "Booster Sheds". Recomendou-se a FURNAS que passe a não utilizar a estrutura isolante composta por três colunas de isoladores.
- 5) Frente à experiência adquirida, o CEPEL irá propor aperfeiçoamentos na Norma Brasileira NBR 6936, com relação à classe de tensão 800 kV (inclusão do valor de 5 mm/min para chuva artificial; uso de câmera ultravioleta nos ensaios).

AUTORES:

Orsino Oliveira Filho - DP
Antônio Ricardo C. D. Carvalho - DRE
Glória Suzana G. de Oliveira - DLE
José Antonio Cardoso - DPL
Darcy Ramalho de Mello - DLE
Fernando Chaves Dart - DLE

PALAVRAS-CHAVE:

Isolador pedestal, Ensaio s dielétricos, Desempenho dielétrico sob chuva, Pesquisa Experimental
CLASSIFICAÇÃO: Controlado

GERENTE

Nome: Orsino Oliveira Filho
TEL: (21) 2598-6020
EMAIL: orsino@cepel.br

CHEFE DE DEPARTAMENTO

Nome: Glória S. G. Oliveira - DLE
TEL: (21) 2598-6219
EMAIL: gloria@cepel.br

APROVAÇÃO

DIRETOR DE PESQUISA, DESENVOLVIMENTO E INOVAÇÃO

Roberto Pereira Caldas

CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELÉTRICA – <http://www.cepel.br>

Sede: Av. Horácio Macedo 354 - Cidade Universitária - Rio de Janeiro - RJ - Brasil - CEP 21941-911 - Tel.: 21 2598-6000 Fax: 21 2260-1340

Unidade Adrianópolis: Av. Olinda s/nº - Adrianópolis - CEP 26053-121 - Nova Iguaçu - RJ - Brasil - Tel.: 21 2666-2111 - Fax: 21 2667-3518

Endereço Postal: CEPEL - Caixa Postal 68007 - CEP 21944-970 - Rio de Janeiro - RJ - Brasil **Endereço Eletrônico:** cepel@cepel.br

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	4
2	AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DOS ISOLADORES DE PEDESTAL (IP) SUPORTE DE BARRAMENTO TIPO MULTICORPO	5
2.1	ENSAIOS NORMATIZADOS PARA AVALIAÇÃO DO EFEITO DAS TRINCAS NOS IPs	5
2.1.1	<i>ENSAIOS DE TENSÃO SUPORTÁVEL EM FREQUÊNCIA INDUSTRIAL (60 HZ), A SECO E SOB CHUVA [2]</i>	6
2.1.2	<i>ENSAIOS DE TENSÃO SUPORTÁVEL E CORRENTE DE FUGA EM 60 HZ, SOB NÉVOA LIMPA [2]</i>	7
2.1.3	<i>ENSAIO DE ARCO DE POTÊNCIA EM 60 HZ [2]</i>	8
2.1.4	<i>SÍNTESE DA AVALIAÇÃO DO EFEITO DAS TRINCAS NOS IP</i>	8
2.2	PESQUISA EXPERIMENTAL COM OS IPs.....	9
2.2.1	<i>PESQUISA EXPERIMENTAL EM SEÇÕES DE IP [2]</i>	9
2.2.2	<i>PESQUISA EXPERIMENTAL EM COLUNAS DE IP</i>	11
2.2.3	<i>PESQUISA EXPERIMENTAL EM IP COM SEÇÃO INFERIOR MODIFICADA</i>	11
2.2.4	<i>PESQUISA EXPERIMENTAL PARA AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DOS IP COM “BOOSTER SHED”</i>	13
2.2.4.1	Verificação da suportabilidade em 60 Hz do IP, sob chuva de 5 mm/min, com e sem BS:	16
2.2.4.2	Verificação da suportabilidade em 60 Hz do IP, sob chuva de 5 mm/min, com BS de dimensões conforme novo detalhamento do fabricante:	17
2.2.4.3	Verificação da Tensão Suportável a Impulso Atmosférico do IP, a seco e sob chuva de 5 mm/min, sem e com BS:	18
2.2.4.4	Verificação da suportabilidade do IP do Fabricante A, em 60 Hz, com seção inferior modificada e com BS:	20
2.2.5	<i>COMPARAÇÃO ENTRE INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO DA INTENSIDADE DE CHUVA (SE ITABERÁ E LABORATÓRIO ATI/CEPEL)</i>	20
3	AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DA ESTRUTURA ISOLANTE DE SUPORTE DO FILTRO DE ONDA	21
3.1	ENSAIOS NORMATIZADOS NA ESTRUTURA ISOLANTE DO FILTRO DE ONDA	22
3.2	PESQUISA EXPERIMENTAL COM A ESTRUTURA ISOLANTE DO FILTRO DE ONDA	22
4	AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE ISOLADORES COM INSTALAÇÃO PARCIAL DE BOOSTER SHEDS (SEÇÃO SUPERIOR)	24
5	SUGESTÕES DO CEPEL QUANTO À INDICAÇÃO DE ITENS PARA APERFEIÇOAMENTO DA NORMA BRASILEIRA NBR 6936, COM RELAÇÃO À CLASSE DE TENSÃO 800 KV	26
6	LEVANTAMENTO DO ESTADO DA ARTE DE ISOLADORES TIPO SUPORTE PARA SISTEMAS CLASSE 800 KV EM CORRENTE ALTERNADA	27
7	ESTUDOS E ANÁLISES DA MALHA DE ATERRAMENTO DA SE ITABERÁ	28
8	MEDIÇÕES DE RESISTÊNCIA DE ATERRAMENTO DAS TORRES PRÓXIMAS À SE DE ITABERÁ, REALIZADAS POR EQUIPE DE FURNAS	29
9	PRINCIPAIS CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	29
9.1	AVALIAÇÃO DE ISOLADORES DE PEDESTAL TIPO MULTICORPO	29
9.2	SUGESTÕES DO CEPEL QUANTO À INDICAÇÃO DE ITENS PARA APERFEIÇOAMENTO DA NORMA BRASILEIRA NBR 6936, COM RELAÇÃO À CLASSE DE TENSÃO 800 kV	34
9.3	LEVANTAMENTO DO ESTADO DA ARTE DE ISOLADORES TIPO SUPORTE PARA SISTEMAS CLASSE 800 kV EM CORRENTE ALTERNADA	34
9.4	ESTUDOS E ANÁLISES DA MALHA DE ATERRAMENTO E MEDIÇÕES DE RESISTÊNCIA DE ATERRAMENTO DAS TORRES PRÓXIMAS À SE DE ITABERÁ	35
10	REFERÊNCIAS	36

Ensaio normalizados e Pesquisa Experimental em componentes da SE Itaberá 765 kV de Furnas

RELATÓRIO TÉCNICO DP 6626 / 2010

Equipe Técnica

DP – Diretoria de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação
Orsino Oliveira Filho

DLE – Departamento de Linhas e Estações

Athanasio Mpalantinos Neto
Carlos Frederico Trota Matt
Carlos Kleber Arruda
Darcy Ramalho de Mello
Fernando Chaves Dart
João Batista da Silva Borges
João Clavio Salari Filho
João Ignácio da Silva Filho
João Saad Junior
Luis Adriano de M. Cabral Domingues

DPL – Departamento de Laboratórios

Alain F. S. Levy
Fernando Dias da Silva
Francisco Eduardo Rodrigues de Araujo
Frederico Domingos da Cruz
Henrique Burd
Jorge Ribeiro de Mendonça
José Antonio Cardoso
José Francisco Moreira
Luciano Leonardo do Nascimento
Marcelo Guimarães Rodrigues
Márcio Ferreira da Costa e Silva
Ozeas Moreno Lima
Sergio Abreu Caixão
Wagner Ferreira Lima
Wagner Telles da Silva

DRE – Departamento de Redes Elétricas

Antônio Ricardo C. D. Carvalho

DTE – Departamento de Tecnologias Especiais

Fernanda Figueiredo Martins dos Santos
Mauricio Barreto Lisboa

Ensaio normatizados e Pesquisa Experimental em componentes da SE Itaberá 765 kV de Furnas

1 INTRODUÇÃO

Este relatório apresenta os principais resultados de atividades de ensaios normatizados e Pesquisa Experimental, realizadas pelo CEPEL, com acompanhamento de equipes de FURNAS, relativas ao seu sistema de transmissão de 765 kV (SE Itaberá).

O CEPEL realizou ensaios de avaliação de desempenho elétrico e avaliação, do ponto de vista mecânico, de isoladores pedestal (IP) suporte de barramento e da estrutura isolante dos filtros de onda; análise da malha de aterramento da SE Itaberá e medição da resistência de pé de torres de linhas de transmissão próximas à SE.

A Pesquisa Experimental conduzida pelo CEPEL foi motivada por relatos de chuvas intensas na região de Itaberá e por indicações da literatura técnico-científica de redução da suportabilidade elétrica de isoladores em condições de chuvas intensas. O foco da Pesquisa Experimental foi a avaliação de medidas mitigadoras, no caso, defletores de chuva (“Booster Sheds”), para fazer frente a esta redução da suportabilidade dielétrica, mediante ensaios em laboratório sob chuva artificial com precipitação superior (5 mm/min) à normatizada (1 mm/min), de modo a buscar representar as condições de campo na região de Itaberá. Foi avaliado também o desempenho dielétrico do IP sob chuva intensa, quanto à instalação parcial dos defletores de chuva (apenas no isolador da seção superior do IP).

Com base na experiência acumulada pelo CEPEL, são feitas propostas quanto à indicação de itens para aperfeiçoamento da norma brasileira pertinente.

Foi realizado um levantamento do estado da arte em termos da aplicação de isoladores tipo suporte sob condições de chuva intensa.

O presente relatório técnico reúne os resultados das atividades realizadas no período de novembro/2009 a fevereiro/2010, incluindo informações de trabalhos realizados anteriormente.

2 AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DOS ISOLADORES DE PEDESTAL (IP) SUPORTE DE BARRAMENTO TIPO MULTICORPO

As amostras, para ensaios, de isoladores pedestal suporte de barramento, tipo multicorpo, corresponderam a unidades retiradas de operação, incluindo as que, em inspeções rotineiras da equipe de manutenção de FURNAS, apresentaram trincas na sua parte inferior e também unidades que estavam armazenadas em almoxarifado. Foram realizados ensaios normatizados de desempenho dielétrico (tensão suportável em frequência industrial 60 Hz, a seco e sob chuva; tensão suportável e corrente de fuga em 60 Hz, sob névoa limpa; arco de potência em 60Hz) e iniciadas pesquisas experimentais adicionais, motivadas por indicações da literatura técnico-científica e relatos sobre a intensidade de chuvas na região de Itaberá. Adicionalmente, foram realizadas avaliações de novo modelo de isolador e de medidas voltadas a aumentar o desempenho dielétrico, tais como a utilização de “Booster Shed”.

2.1 ENSAIOS NORMATIZADOS PARA AVALIAÇÃO DO EFEITO DAS TRINCAS NOS IPs

Para esta avaliação, FURNAS disponibilizou amostras de dois diferentes fabricantes, do modelo pedestal suporte de barramento, tipo multicorpo, composto por duas seções (superior e inferior), conforme existente na subestação de Itaberá. Foram retiradas amostras de isoladores em operação, com e sem trincas, assim como amostras provenientes de almoxarifado (do mesmo modelo dos isoladores em operação na subestação).

Na Figura 1 podem ser observadas trincas na última saia de porcelana, na base da seção inferior da coluna de isoladores, oxidação longitudinal no flange e perda de material na interface porcelana-flange imediatamente abaixo das trincas.

Foram realizados ensaios em laboratório do CEPEL, nas condições de ensaios normatizadas [1], separadamente para cada uma das duas seções de isolador que compõem a coluna, bem como para a coluna inteira, a saber: ensaios de tensão suportável em frequência industrial (60 Hz), a seco e sob chuva; ensaio de tensão suportável e corrente de fuga em 60 Hz, sob névoa limpa; ensaio de arco de potência em 60 Hz.

Na Figura 2 estão apresentados alguns arranjos utilizados nos ensaios dielétricos.



a) vista de cima

b) vista frontal

c) detalhe

Figura 1 – Isoladores com trincas enviados ao CEPEL.



(a) Uma seção em ensaio a seco

(b) Coluna completa em ensaio sob chuva

Figura 2 –Arranjo de ensaio, a seco e sob chuva, no laboratório de alta tensão do CEPEL, na sua unidade de Adrianópolis, composto por transformador de alta tensão em cascata, divisor de tensão capacitivo, estrutura para chuva artificial e isolador sob ensaio

2.1.1 ENSAIOS DE TENSÃO SUPORTÁVEL EM FREQUÊNCIA INDUSTRIAL (60 HZ), A SECO E SOB CHUVA [2]

Os resultados dos ensaios normatizados de verificação da tensão suportável para as seções de isoladores estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Resultado da verificação da tensão suportável a 60 Hz nas seções, sob condições normatizadas

Isolador	Condição de ensaio	Vcn (Kv)	Vatm (kV)	Resultado
Seção superior do isolador multicorpo (Fabricante A)	A seco	540	544	Suportou
	Sob chuva	460	460	Suportou
Seção inferior do isolador multicorpo (Fabricante B)	A seco	540	549	Suportou
	Sob chuva	460	460	Suportou
Seção inferior do isolador multicorpo (Fabricante A)	A seco	540	541	Suportou
	Sob chuva	460	460	Suportou

Vcn: tensão nas condições atmosféricas normatizadas

Vatm: tensão nas condições atmosféricas durante o ensaio, aplicando-se os fatores de correção normatizados

Sob chuva: Chuva artificial normatizada de 1 mm/min, por 1 minuto

Quanto aos ensaios sob condições normatizadas das colunas inteiras, foram obtidos os seguintes resultados:

A seco

As colunas de isoladores de ambos os fabricantes foram submetidas ao valor da tensão máxima possível com a fonte de alta tensão do laboratório, 900 kV, por 1 minuto, a seco, e suportaram, não havendo ocorrência de descargas.

Sob chuva de 1 mm/min \pm 0,5 mm/min

As colunas de isoladores foram submetidas ao nível especificado de tensão suportável sob chuva, que é 885 kV, por 1 minuto, e não houve ocorrência de descarga.

2.1.2 ENSAIOS DE TENSÃO SUPORTÁVEL E CORRENTE DE FUGA EM 60 HZ, SOB NÉVOA LIMPA [2]

A Tabela 2 sumariza os resultados encontrados durante os ensaios sob névoa limpa. Esses ensaios foram realizados em uma coluna de isoladores retirada de operação com todos os cuidados requeridos para manter a superfície das saias de porcelana que a compõem em condições de poluição natural.

Por meio de filmagens realizadas durante os ensaios sob névoa limpa, nenhuma atividade de descarga foi observada na superfície das seções dos isoladores.

Tabela 2 – Corrente de fuga medida sob névoa limpa, com tensão aplicada de 462 kV

Tempo (min)	Ifuga interna (mAcr)	Ifuga externa (mAcr)
0	1,2	2,3
5	3,0	0,6
10	1,6	0,8
15	1,6	0,8
20	1,2	0,7
25	1,2	0,8
30	1,3	0,8

2.1.3 ENSAIO DE ARCO DE POTÊNCIA EM 60 HZ [2]

Foram feitas três aplicações de corrente de curto circuito, com valor de 15 kA, durante 0,1 s, gerando um arco representativo das características de potência no barramento da SE Itaberá.

Constatou-se uma elevação de temperatura na superfície dos isoladores, e foi observado que algumas partes do cimento utilizado para unir os cones de porcelana que compõem a coluna de isoladores transformaram-se em pó, depositando-se na superfície das saias.

As trincas existentes na saia da base da coluna de isoladores não foram afetadas com o ensaio (Figura 3).

2.1.4 SÍNTESE DA AVALIAÇÃO DO EFEITO DAS TRINCAS NOS IP

A partir destes ensaios para avaliação dos efeitos das trincas na base dos isoladores, nas amostras que foram retiradas de campo, verificou-se o atendimento dos requisitos de aprovação previstos em Norma, do ponto de vista do desempenho elétrico.

Quanto ao aspecto mecânico, a avaliação dos isoladores com a primeira saia trincada indica que estes devem ser retirados de operação, pois a erosão logo abaixo da região das trincas, entre a porcelana e o flange da base, pode progredir com o tempo e comprometer o desempenho da coluna de isoladores, pelo menos mecanicamente. Neste sentido, recomenda-se que fabricantes sejam contactados para o desenvolvimento de isoladores com maior resistência mecânica.



Figura 3 – Coluna de isolador no ensaio de arco de potência - Detalhe da trinca

2.2 PESQUISA EXPERIMENTAL COM OS IPs

Em função de relatos sobre a ocorrência de chuvas intensas na região de Itaberá, o CEPEL buscou informações mais detalhadas sobre os índices de precipitação nas suas proximidades.

Encontrou-se um trabalho sobre chuvas intensas no estado de São Paulo (Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo), realizado em 1999, com objetivo de subsidiar obras pluviais, mostrando equações que relacionam intensidade, duração e período de retorno em região próxima a Itaberá. Este trabalho relata a possibilidade de chuvas com intensidade acima de 3 mm/min para um período de retorno a partir de 10 anos [3].

O CEPEL identificou ainda na literatura técnico-científica a existência de trabalhos que relatam o efeito da redução da suportabilidade dielétrica de isoladores com valores altos de precipitação de chuva, como observado no Projeto UHV EPRI – 1000 kV [4].

Face a estas informações, o CEPEL iniciou uma Pesquisa Experimental para a avaliação da suportabilidade dielétrica de isoladores a 60 Hz, em condições de chuva intensa.

2.2.1 PESQUISA EXPERIMENTAL EM SEÇÕES DE IP [2]

Ensaio normalizados e Pesquisa Experimental em componentes da SE Itaberá 765 kV de Furnas

Os ensaios da Pesquisa Experimental foram realizados com o objetivo de avaliar o desempenho dielétrico das seções dos isoladores em outras condições sob chuva, mais severas do que as previstas em norma, com valores de precipitação de 3 mm/min e 5 mm/min

Semelhantemente aos ensaios normatizados, foram realizadas investigações com as seções de isoladores, bem como com a coluna completa.

A Tabela 3 a seguir apresenta os resultados dos ensaios.

Tabela 3 – Tensões Suportável e Disruptiva (incluindo o instante de interrupção) para as seções de isoladores, a seco e sob chuva por 1 minuto

	Precipitação	V suportável (kV)	V disruptiva (kV)	Tempo (seg)
Seção superior (Fabricante A)				
Seco	-	594	662	4
	1 mm/min	506	529	18
Chuva	3 mm/min*	483	506	3
	5 mm/min*	460	483	6
Seção inferior (Fabricante A)				
Seco	-	621	649	38
	1 mm/min	552	575	26
Chuva	3 mm/min*	460	483	3
	5 mm/min*	437	460	60
Seção inferior (Fabricante B)				
Seco	-	621	659	37
	1 mm/min	483	506	31
Chuva	3 mm/min*	437	460	17
	5 mm/min*	414**	437	38

(*) Valores acima dos normatizados, referentes à Pesquisa Experimental.

(**) Queda de 33% em relação ao valor a seco.

Na Tabela 3, os valores destacados em vermelho correspondem àqueles que foram registrados abaixo do valor esperado de tensão suportável a 60 Hz, sob condições normatizadas de chuva (1mm/min por 1 minuto), ou seja, 460 kV. Esses resultados indicaram que a suportabilidade dielétrica das seções das colunas das amostras de isoladores tipo pedestal ensaiadas é reduzida pela ocorrência de chuvas intensas, confirmando as informações disponíveis na literatura.

Segundo as medições realizadas, esta redução sob chuva intensa, chegou a 33% em relação à tensão suportável a 60 Hz, a seco.

2.2.2 PESQUISA EXPERIMENTAL EM COLUNAS DE IP

Os ensaios realizados com o propósito de Pesquisa Experimental, em condições de chuva com valores de precipitação acima daqueles normatizados, estão resumidos na Tabela 4, considerando neste caso, a coluna completa de isoladores.

Esses resultados indicaram que a suportabilidade dielétrica, das colunas das amostras de isoladores tipo pedestal ensaiadas, também é reduzida pela ocorrência de chuvas intensas. Os valores medidos encontram-se, como esperado, abaixo da tensão suportável a 60 Hz sob chuva (1mm/min), que corresponde a 885 kV.

Segundo as medições realizadas, esta redução sob chuva mais intensa chegou a 26% em relação à tensão suportável a 60 Hz, a seco (960 kV).

Tabela 4 – Tensões Suportáveis para coluna de isoladores sob chuva por 1 minuto

	Precipitação	V suportável (kV)
Amostra do Fabricante A		
	1 mm/min	-***
Chuva	3 mm/min*	800
	5 mm/min*	750**
Amostra do Fabricante B		
	1 mm/min	-***
Chuva	3 mm/min*	850
	5 mm/min*	850

(*) Valores acima dos normatizados, referentes à Pesquisa Experimental.

(**) Queda de 26% em relação ao valor a seco.

(***) Tensão não determinada, devido à limitação da fonte de alta tensão do laboratório (900 kV)

Em função do caráter probabilístico dos fenômenos envolvidos no ensaio de verificação de tensão suportável, sobretudo em condições de chuvas mais severas em coluna de isoladores classe 800 kV, não se pode categoricamente afirmar que um modelo de isolador de um fabricante tem desempenho superior ao outro, tendo como base apenas os resultados resumidos nas Tabelas 3 e 4.

2.2.3 PESQUISA EXPERIMENTAL EM IP COM SEÇÃO INFERIOR MODIFICADA

Foi avaliado modelo de isolador apresentado pelo fabricante A, com seção inferior modificada de forma significativa, com perfil das saias alterado para uma configuração

uniforme com 406 mm de diâmetro, visando maior robustez mecânica. O desenho original não possui configuração uniforme de diâmetro na seção inferior (primeiro trecho com 380 mm de diâmetro; segundo trecho com 406 mm de diâmetro). A seção superior tem pequenas alterações de distância entre saias, sendo semelhante a modelo existente. A coluna de isoladores também foi submetida a ensaios de verificação de tensão suportável no laboratório de alta tensão do CEPEL.

Realizaram-se ensaios para verificação da tensão suportável a 60 Hz, sob chuva de 5 mm/min, durante 1 minuto, condições estas mais severas do que as previstas em norma [1], e com resistividade da água de 100 ohms.m. Estes ensaios foram feitos nas seções superior e inferior, separadamente, bem como na coluna completa, com tensão suportável a ser aplicada por 1 minuto durante o ensaio de verificação é de 455 kV, para cada seção, e de 885 kV, para a coluna completa.

A seção inferior suportou a tensão aplicada de 455 kV por 1 minuto.

Quanto ao ensaio da seção superior, em três tentativas, esta não suportou a tensão aplicada de 455 kV por 1 minuto.

Nota: O resultado obtido com o ensaio da seção superior não corresponde ao obtido anteriormente e resumido na Tabela 3. Observa-se, porém, que o resultado anterior indicou tensão suportável de 460 kV, nível que está próximo do valor aqui utilizado no ensaio (455 kV). Como prováveis causas da diferença observada, devem ser consideradas as incertezas presentes nos resultados desse ensaio, devido o caráter probabilístico do fenômeno de descarga e o efeito das variáveis envolvidas, e o fato do ensaio anterior ter sido realizado em outra seção superior de projeto semelhante, mas não na mesma peça.

Com relação à coluna de isoladores completa, quando submetida à tensão de 885 kV, ocorreu a disrupção em 30 segundos.

Assim, o perfil uniforme de saias, em lugar do perfil original que tem dois conjuntos de saias de diâmetros diferentes, pode ter levado a uma menor suportabilidade dielétrica sob chuvas intensas.

2.2.4 PESQUISA EXPERIMENTAL PARA AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DOS IP COM “BOOSTER SHED”

Foi avaliada uma medida voltada ao aumento do desempenho dielétrico sob chuva, que corresponde a um defletor de chuva denominado “Booster Shed” (BS). Esse dispositivo compreende um anteparo de material isolante a ser sobreposto a uma ou mais saias de porcelana ao longo da coluna de isoladores, em intervalos pré-definidos. Por ter diâmetro maior do que as saias de porcelana dos isoladores, este dispositivo dificulta a formação de cascata de água ao longo da coluna, fator este que facilita a formação da descarga disruptiva. Deve-se destacar que no exterior, a sua utilização tem sido feita em sistemas de até 500 kV, sob condições climáticas que podem ser distintas das brasileiras.

Com base nas características geométricas de BS indicadas em catálogo do fabricante Tyco [5], e em informações conceituais de referências bibliográficas sobre o assunto [6], o CEPEL, por meio da oficina mecânica de sua Unidade de Adrianópolis, construiu, inicialmente, um protótipo de BS em material laminado a base de resina sintética (Celeron) e, mais recentemente, 5 unidades feitas a partir de placas de Cloreto de Polivinila (PVC), conforme ilustrado na Figura 4. O PVC foi escolhido preferencialmente por possuir características mais adequadas do que o Celeron para aplicações sob chuva e ser um bom isolante elétrico. O BS construído pelo CEPEL tem diâmetro de 770 mm e a placa de PVC utilizada para sua confecção tem espessura de 3 mm.

Essas unidades de BS em PVC, para o único propósito da Pesquisa Experimental, foram utilizadas em ensaios adicionais de verificação da tensão suportável a 60 Hz, sob chuva de 5 mm/min, por um minuto, com diferentes quantidades e posicionamento ao longo da coluna completa de isoladores. A análise dos resultados dos ensaios para Pesquisa Experimental sobre o efeito de BS no desempenho dielétrico da coluna de isoladores, sob chuva severa, foi feita, sobretudo, com base em imagens obtidas com câmera de filmagem em espectro de ultravioleta (UV).

Um resumo dos resultados da Pesquisa Experimental sobre a utilização de BS nos IPs, sob chuva de 5 mm/min, por um minuto, é apresentado a seguir:

- Para a condição sem BS, no caso do fabricante A, as atividades associadas à descarga mostraram-se muito mais intensas do que no caso do fabricante B. Conseqüentemente, os melhores resultados, em termos de quantidade e

posicionamento de BS foram diferentes em cada caso, como mostrado nas Figuras 5 e 6.

- No caso da coluna de isoladores do Fabricante A, ocorreu descarga na verificação de tensão suportável de 885 kV, por 1 minuto, na condição com dois BS espaçados de cinco saias e posicionados na região do topo da coluna. A condição mostrada na Figura 5-d, com cinco BS, foi uma que apresentou bom desempenho, com base nas imagens da câmera UV.
- A coluna de isoladores do Fabricante B suportou todas as aplicações em todas as condições avaliadas nos ensaios. Para esse fabricante, todos os casos com BS apresentaram resultados melhores do que sem BS. A condição mostrada na Figura 6-c, com quatro BS, foi uma que apresentou bom desempenho, com base na câmera UV.

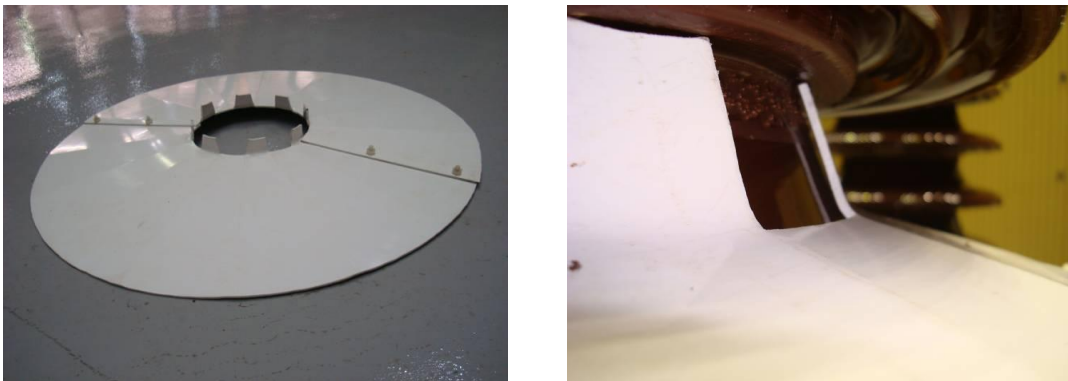
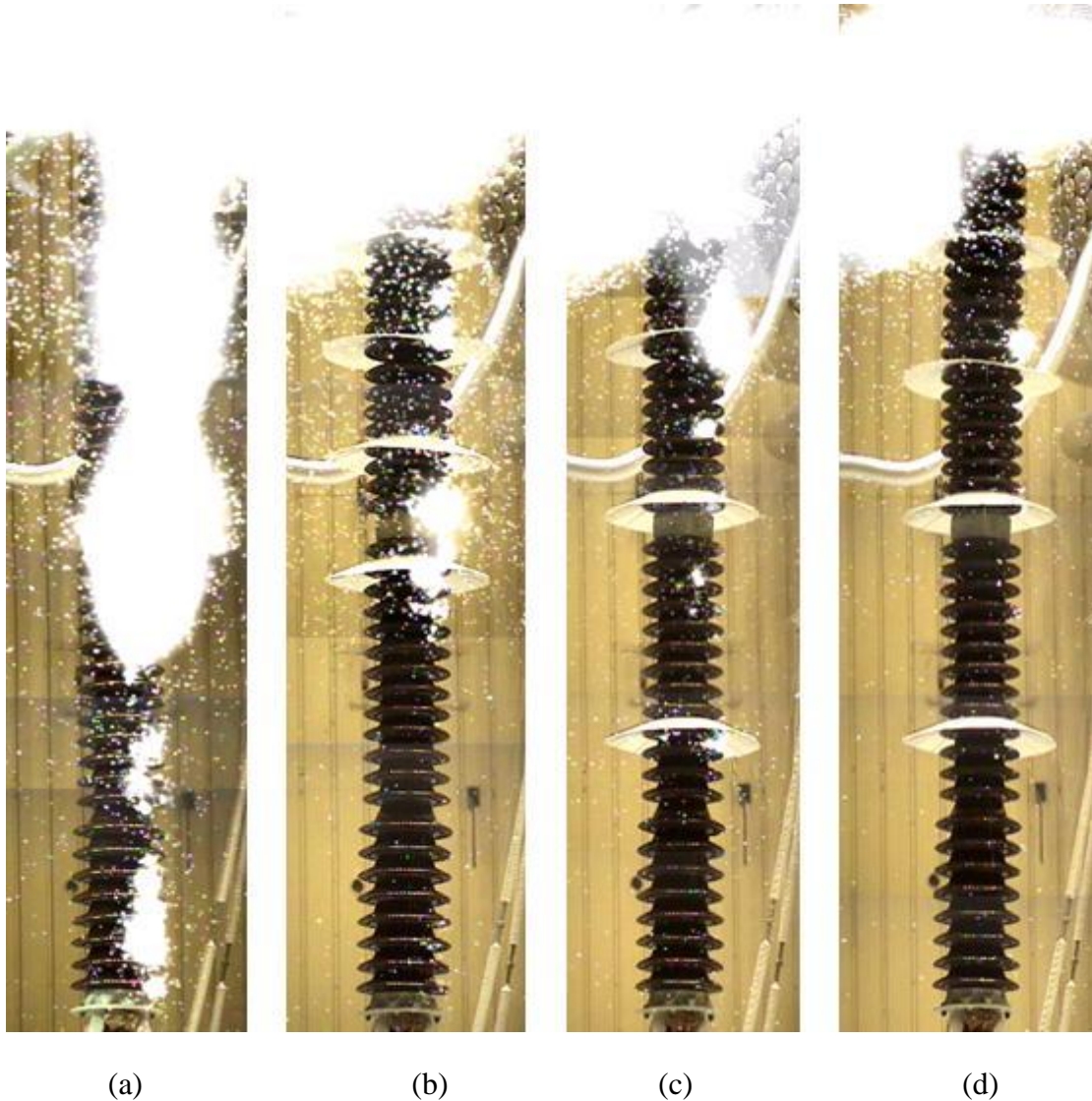
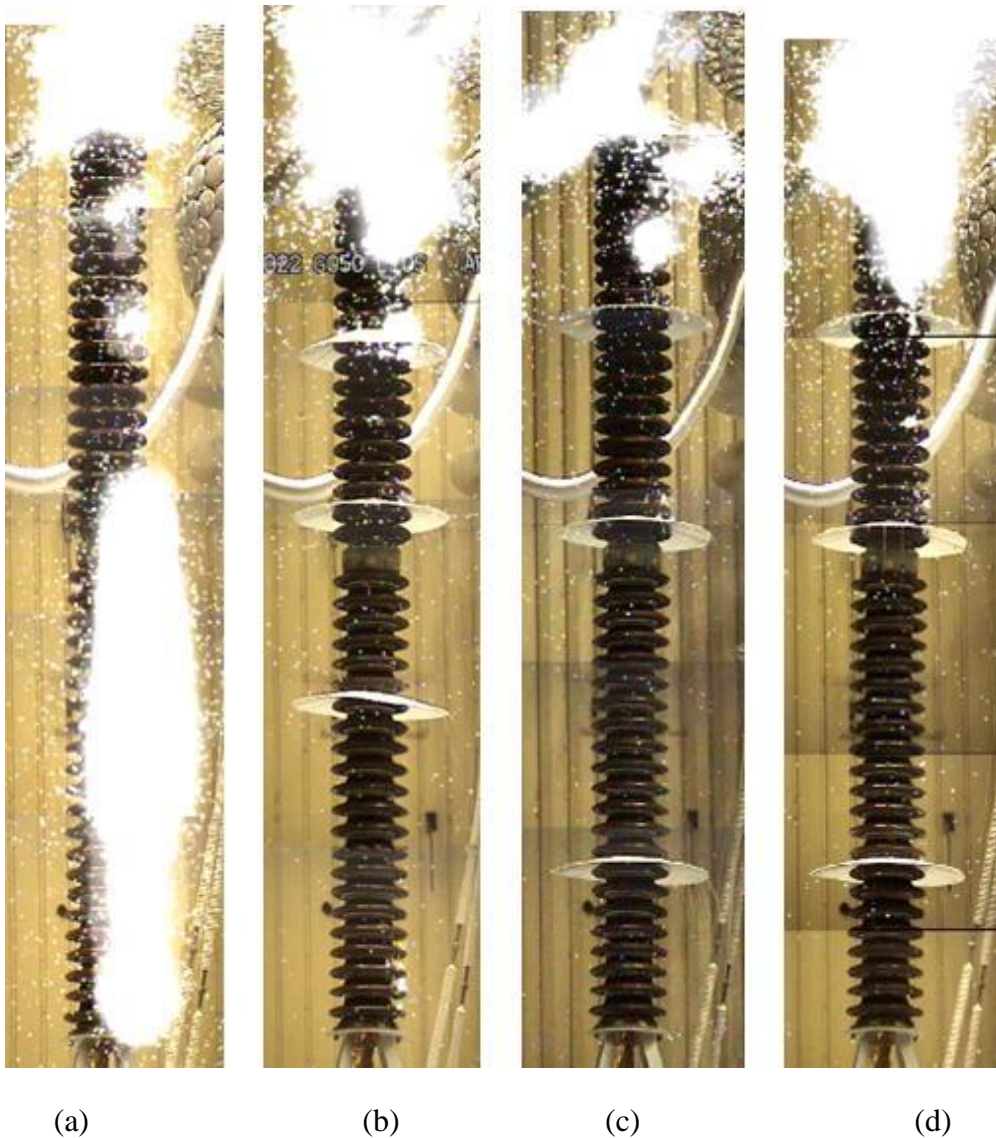


Figura 4 – Modelo de “Booster Shed” confeccionado pelo CEPEL, em PVC, para os primeiros ensaios de verificação de desempenho e detalhe da sua instalação



**Figura 5 – Quadros das filmagens feitas com câmera UV para a coluna de isoladores do Fabricante A.
Ensaio de tensão suportável, 885 kV, sob chuva de 5 mm/min**

- (a) Sem BS;
- (b) com cinco BS de 5 em 5 saias;
- (c) com cinco BS (um na saia 3 do topo + quatro distribuídos conforme foto);
- (d) cinco BS distribuídos conforme foto.



**Figura 6 – Quadros das filmagens feitas com câmera UV para a coluna de isoladores do Fabricante B.
Ensaio de tensão suportável, 885 kV, sob chuva de 5 mm/min**

- (a) Sem BS;
- (b) com quatro BS de 7 em 7 saias;
- (c) com quatro BS (um na saia do topo + três distribuídos conforme foto)
- (d) três BS distribuídos conforme foto.

2.2.4.1 Verificação da suportabilidade em 60 Hz do IP, sob chuva de 5 mm/min, com e sem BS:

Sem a instalação de BS, para o fabricante A, houve disrupção para uma tensão aplicada de 750 kV após 36 segundos. Para o fabricante B, a disrupção ocorreu para uma tensão aplicada de 850 kV após 456 segundos.

Com a instalação de BS nas quantidades e nas posições mostradas nas Figuras 5-d e 6-c, não se observou evolução das atividades associadas a descargas ao longo das colunas de isoladores, tanto do fabricante A como do fabricante B, quando a tensão de 885 kV foi mantida por 3 minutos. Não se manteve a tensão aplicada por mais tempo, por esse motivo e também para preservar a integridade dos transformadores de ensaio do laboratório, considerando as solicitações severas impostas pelas sucessivas aplicações de tensão em nível próximo ao seu limite no mesmo dia, com algumas disrupções e conseqüente geração de sobretensões no transformador.

2.2.4.2 Verificação da suportabilidade em 60 Hz do IP, sob chuva de 5 mm/min, com BS de dimensões conforme novo detalhamento do fabricante:

Os ensaios iniciais, como relatado anteriormente, foram realizados com BS confeccionados no CEPEL, seguindo-se as dimensões que constam no catálogo do fabricante Tyco, ou seja, com 770 mm de diâmetro externo. Na medida em que FURNAS manteve contatos mais próximos com este fabricante, tomou ciência que, de fato, o diâmetro externo dos BS é função do diâmetro do isolador no qual ele será aplicado. Deve-se ressaltar que este dispositivo não tem utilização anterior no sistema de FURNAS e, portanto, este detalhe não era de conhecimento prévio.

Uma vez que os isoladores sob ensaio possuem diferentes diâmetros, serão necessários quatro distintos BS com diâmetros de 685 mm, 710 mm, 740 mm e 770 mm. Estas novas dimensões geraram a necessidade de se refazer os ensaios, empregando-se os BS com diâmetros definitivos, com o objetivo de avaliar a influência desta modificação, e a eventual necessidade de se alterar o número de unidades a serem utilizadas e sua disposição ao longo da coluna. Para fins desta avaliação inicial, novos BS foram também confeccionados pelo CEPEL, em PVC. Decidiu-se nos ensaios de tensão suportável a 60 Hz adotar os critérios mais rígidos até então empregados, ou seja, realizá-los sob chuva de 5 mm/min e com duração de até 3 minutos.

Em relação ao fabricante A, para o qual inicialmente recomendou-se a utilização de cinco BS de 770 mm, os novos ensaios indicaram a necessidade de oito BS, nas saias de número 2, 7, 12, 17, 22, 27, 32 e 37, conforme ilustrado na Figura 7 (de fato, observam-se nove BS na figura, mas o último deles, localizado na base da coluna é desnecessário). Apresenta-se também a atividade registrada com a câmera UV, a qual está limitada ao topo da coluna.

Já para o fabricante B, para o qual inicialmente recomendava-se quatro BS de 770 mm, os ensaios com os novos BS indicaram a necessidade de seis BS, nas saias de número 2, 9, 14, 21, 28 e 35, conforme ilustrado na Figura 8. A atividade registrada com a câmera UV é também apresentada na Figura 8, podendo-se identificar que, mais uma vez, a mesma está restrita ao topo.



Figura 7 – Fabricante A – Disposição dos BS e Quadro da filmagem com câmera UV. Ensaio de tensão suportável a 60 Hz, 885 kV, sob chuva de 5 mm/min por 3 minutos.



Figura 8 – Fabricante B – Disposição dos BS e Quadro da filmagem com câmera UV. Ensaio de tensão suportável a 60 Hz, 885 kV, sob chuva de 5 mm/min por 3 minutos.

2.2.4.3 Verificação da Tensão Suportável a Impulso Atmosférico do IP, a seco e sob chuva de 5 mm/min, sem e com BS:

Uma vez conhecidos os resultados das avaliações de suportabilidade a 60 Hz das colunas de isoladores, a partir da inclusão dos novos “Booster Shed”, e que serviram para a

Ensaio normalizados e Pesquisa Experimental em componentes da SE Itaberá 765 kV de Furnas

definição da quantidade e localização dos mesmos ao longo da coluna, o próximo passo foi a verificação do desempenho dos isoladores sob o ponto de vista da tensão suportável a impulso atmosférico, incluindo a avaliação do efeito da presença dos BS.

O procedimento, conforme previsto em Norma, considera a aplicação de surtos somente a seco. No entanto, no âmbito da Pesquisa Experimental, estenderam-se os ensaios à condição sob chuva de 5 mm/min. Foram aplicados 15 impulsos por polaridade, e é aceitável por Norma a ocorrência de até 2 descargas no conjunto de aplicações para cada condição de ensaio.

Apesar da tensão suportável a impulso atmosférico das colunas de isoladores (classe 800 kV) corresponder a 2100 kV, aplicou-se surtos com amplitude de 2250 kV (com forma de onda 1,2/50 μ s).

Para fins da avaliação efetiva da influência dos BS na suportabilidade a impulso atmosférico, foram realizados ensaios com e sem a presença dos BS, de acordo com as dimensões informadas pelo fabricante, e seguindo as disposições e quantidades anteriormente especificadas pelo CEPEL para cada fabricante.

Como um dos principais resultados dos ensaios pode-se destacar que foi verificado, com a presença dos BS, para ambos os fabricantes, a seco e sob chuva, que não houve qualquer caso de interrupção ao longo destes ensaios.

Sem a presença dos BS houve a ocorrência de uma única descarga na coluna de isolador do fabricante B, porém sob chuva de 5 mm/min.

Portanto, como conclusão geral, pode-se afirmar que os isoladores de ambos os fabricantes estão adequados, sob o ponto de vista do desempenho da tensão suportável a impulso atmosférico, com e sem a presença dos novos BS.

2.2.4.4 Verificação da suportabilidade do IP do Fabricante A, em 60 Hz, com seção inferior modificada e com BS:

Como parte da Pesquisa Experimental, o projeto novo da coluna completa de isoladores do Fabricante A também foi avaliado com “Booster Sheds” feitos pelo próprio fabricante (BS-A). O BS-A foi feito de material do tipo borracha com diâmetro de 610 mm. Além da diferença de material, o BS-A tem diâmetro 160 mm menor do que o BS feito pelo CEPEL.

Tanto com um total de quatro BS-A, sendo três instalados na seção superior e um na seção inferior, como com três BS-A, todos instalados na seção superior, a coluna de isoladores nova suportou a tensão de 885 kV por 1 minuto, sob chuva de 5 mm/min. As imagens da câmera UV, no entanto, mostraram intensa atividade associadas a descargas ao longo da coluna com os BS-A.

2.2.5 COMPARAÇÃO ENTRE INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO DA INTENSIDADE DE CHUVA (SE ITABERÁ E LABORATÓRIO AT1/CEPEL)

Nos ensaios sob a chuva, a mesma é gerada artificialmente e sua intensidade é determinada coletando-se em um pluviômetro a quantidade de água precipitada em um dado intervalo de tempo, normalmente de 1 minuto. O gerador de chuva é formado por vários bocais, posicionado na vertical ao lado do objeto ensaiado, sendo que parte da precipitação atinge o objeto na direção vertical e parte na horizontal. O procedimento de “calibração” consiste em medir, com um pluviômetro especial, a precipitação em cada uma destas duas direções da precipitação. O pluviômetro tem duas bocas de captação, sendo uma boca posicionada na horizontal (medindo a precipitação vertical) e a outra formando um ângulo de 45° com a vertical (medindo a precipitação horizontal). As quantidades de precipitações de cada direção são armazenadas em dois reservatórios graduados, separadamente. A razão entre a altura de água armazenada no reservatório pelo tempo da medição é a intensidade da chuva gerada. No procedimento de “calibração” a chuva artificial é medida movimentando-se o pluviômetro ao longo da vertical do objeto em ensaio, durante 1 minuto.

Para medir as intensidades das chuvas reais que atingem as colunas de isoladores na SE Itaberá, 4 pluviógrafos eletrônicos, idênticos aos utilizados em estações meteorológicas, estão sendo instalados em pontos estratégicos. O pluviógrafo tem uma única boca,

posicionada na horizontal, e a quantidade de precipitação é medida eletronicamente por meio de um sistema automático de aquisição de dados.

A partir das medições realizadas com os dois instrumentos em laboratório, concluiu-se que:

- Os valores medidos pelos dois instrumentos são, para o propósito em vista, compatíveis entre si, considerando a dinâmica dos eventos que eles medem, e utilizando-se os procedimentos de medição próprios de cada um.
- Portanto, os valores medidos em campo podem ser utilizados diretamente para reprodução em laboratório.

3 AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DA ESTRUTURA ISOLANTE DE SUPORTE DO FILTRO DE ONDA

Cada coluna de isoladores utilizada no isolamento da base do filtro de onda da SE Itabera é igual a do Fabricante A, utilizada como suporte de barramento. Nesse caso do filtro, são utilizadas três colunas de isoladores em paralelo, formando um tripé com distâncias entre eixos de cada coluna igual a 900 mm.

Essa estrutura isolante do filtro também foi submetida a ensaios dielétricos no laboratório do CEPEL, segundo procedimento normatizado: verificação de suportabilidade a seco e sob chuva de 1 mm/min, com aplicação de tensão de 900 kV e 885 kV por 1 minuto, respectivamente. Foram também realizados ensaios de Pesquisa Experimental com tensão aplicada de 885 kV, sob chuva de 5 mm/min, por 1 minuto, e também, por mais de 1 minuto. Deve-se destacar que a tensão suportável a seco a 60 Hz, corresponde a 960 kV, mas como o valor da tensão máxima possível com a fonte de alta tensão do laboratório é de 900 kV, limitou-se este ensaio a este valor de tensão.

Tanto nos ensaios segundo procedimento normatizado como nos ensaios da Pesquisa Experimental, o filtro foi montado numa estrutura similar à utilizada no campo, conforme mostrado na Figura 9, onde a altura da estrutura até a base das três colunas de isoladores é de 5 metros.

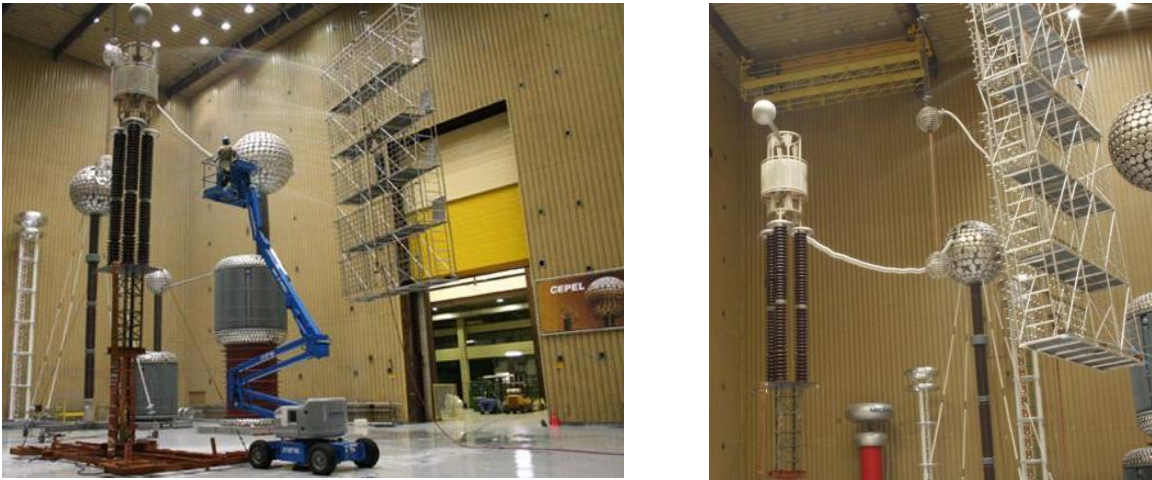


Figura 9 – Arranjo para ensaio dos isoladores do filtro de onda sob chuva

3.1 ENSAIOS NORMALIZADOS NA ESTRUTURA ISOLANTE DO FILTRO DE ONDA

O arranjo composto por três colunas de isoladores de pedestal multicorpo, para suporte do Filtro de Onda, conforme a montagem encontrada na SE Itaberá (tripé com distâncias entre eixos de cada coluna igual a 900 mm), quando avaliado em laboratório do CEPEL, suportou, sob condições normalizadas, a aplicação de tensão de 900 kV e 885 kV por 1 minuto, respectivamente a seco e sob chuva (1 mm/min). No entanto, as imagens obtidas pela câmera UV mostraram intensa atividade associada a descargas, tanto no topo como ao longo das colunas de isoladores e entre elas. Mais uma vez, destaca-se que a tensão suportável a seco a 60 Hz corresponde a 960 kV, tendo sido aplicado neste ensaio, pela razão já mencionada, o valor de 900 kV.

3.2 PESQUISA EXPERIMENTAL COM A ESTRUTURA ISOLANTE DO FILTRO DE ONDA

O isolamento da base do filtro de onda, composto por três colunas de isoladores do Fabricante A, não suportou a tensão aplicada de 885 kV, por 1 minuto, sob chuva de 5 mm/min. Houve descarga pelo isolamento no instante que a tensão atingiu o nível de 885 kV, em dois ensaios consecutivos, com cerca de 10 minutos de intervalo entre ensaios. Conforme mostrado na foto da Figura 10, as descargas ocorreram tanto longitudinalmente pela superfície do isolador, como transversalmente entre colunas de isoladores.

Alterou-se o posicionamento do conjunto de três isoladores em relação á estrutura de chuva da montagem do ensaio, girando-o de forma que duas colunas de isoladores foram

posicionadas diretamente na sua direção. O isolamento do filtro apresentou desempenho similar ao do posicionamento anterior, que consistia de apenas uma coluna diretamente voltada para a estrutura de chuva.



Figura 10 – Fotos obtidas com câmera fotográfica comum exposta durante todo o tempo de ensaio de verificação de tensão suportável, 885 kV, sob chuva de 5 mm/min

Diante dos resultados apresentados para a estrutura isolante do Filtro de Onda, o CEPEL realizou um estudo sobre distribuição de potencial e campo elétrico. Esse estudo resultou na indicação de instalar um anel de blindagem (diâmetro do tubo do anel: 305 mm; diâmetro do anel: 2550 mm) envolvendo o topo do conjunto dos três isoladores, abaixo da base da bobina, visando melhorar a concentração de campo elétrico em partes identificadas como críticas da estrutura isolante.

O anel sugerido pelo estudo foi instalado no arranjo e ensaiado. Inicialmente, para verificar o comportamento deste novo arranjo, ensaiou-se o mesmo em condições a seco e sob chuva de 1 mm/min. Não ocorreram descargas em nenhuma destas situações, porém, para o ensaio sob chuva, identificou-se através da câmera UV alguma atividade, principalmente na região superior das colunas de isoladores e no anel.

Em função destes primeiros resultados, optou-se por instalar um segundo anel, de mesmas dimensões, na base das colunas de isoladores. Ao se repetir o ensaio sob chuva (1 mm/min) não se verificou diferença significativa entre este arranjo duplo e o anterior (com

um anel). Em seqüência, com os dois anéis, nas condições de Pesquisa Experimental, com tensão aplicada de 885 kV, sob chuva de 5 mm/min, por 1 minuto, os isoladores suportaram até 1 minuto de ensaio, havendo descarga em seguida. Pelas imagens da câmera UV observou-se intensa atividade sobretudo ao longo da coluna de isoladores mais atingida pela chuva. Portanto, mesmo com o arranjo livre de atividades a seco, em condições de chuva intensa, a descarga acontece por causa da água que escorre pelas saias dos isoladores.

De posse destes resultados, foram realizados ensaios adicionais, no âmbito da Pesquisa Experimental, fazendo-se uso dos “Booster Shed”. Inicialmente instalaram-se cinco BS na coluna de isoladores que recebe diretamente a chuva. Ao se aproximar da tensão de 885 kV, sob chuva de 5 mm/min, houve descarga durante a elevação da tensão, por uma das colunas sem BS. Com 860 kV, suportou por 1 minuto, mas com atividade intensa (câmera UV) na parte superior da coluna sem BS.

Em seqüência, inseriu-se um 6º BS. Com 885 kV, sob chuva de 5 mm/min, houve descarga na coluna desprotegida após 20 segundos, a qual já apresentava elevada atividade segundo a câmera UV. A coluna protegida apresentou baixa atividade segundo a câmera UV.

Colocaram-se dois BS em cada coluna, próximo ao topo. Houve descarga com 885 kV, sob chuva de 5 mm/min, após 30 segundos.

Portanto, mesmo com a presença dos “Booster Shed” no conjunto isoladores do Filtro de Onda, permaneceu a instabilidade no comportamento das colunas de isoladores do filtro em condições de chuva 5 mm/min.

Frente a esses resultados, é recomendável que FURNAS passe a não utilizar a estrutura isolante composta por três colunas de isoladores e avalie a possibilidade de retirada dos Filtros de Onda, considerando outras opções para comunicação, ou a substituição da estrutura isolante do Filtro de Onda por uma que utilize um único isolador pedestal, caso viável tecnicamente.

4 AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE ISOLADORES COM INSTALAÇÃO PARCIAL DE BOOSTER SHEDS (SEÇÃO SUPERIOR)

Tendo em vista a instalação escalonada dos BS, função do seu cronograma de fabricação e fornecimento, e o fato dos primeiros lotes conterem unidades adequadas para instalação na seção superior dos isoladores suporte de barramento, ainda no escopo da

Pesquisa Experimental, foram realizados ensaios de tensão suportável a 60 Hz, sob chuva intensa, para verificar o desempenho dielétrico dos IP nesta condição de instalação parcial de defletores de chuva.

Estes ensaios, para efeito de uma avaliação prévia, foram realizados em Janeiro de 2010, com unidades de BS confeccionadas pelo CEPEL, conforme medidas do fabricante Tyco. Foram realizados com os IP em arranjos representando duas posições diferentes no barramento de 765 kV, conforme utilizados na SE Itaberá, ou seja, na sua extremidade e no meio, como ilustrado na Figura 11. O posicionamento dos BS foi mantido igual ao anteriormente recomendado pelo CEPEL para o caso da instalação plena de BS (6 no IP do fabricante B e 8 no IP do fabricante A), não se requerendo portanto, alterações de posicionamento subseqüentes, quando do recebimento do conjunto completo de BS por FURNAS.

Como conclusão, verificou-se que, nas configurações ensaiadas (IP na extremidade ou no meio de barramento), os IP suportaram a tensão aplicada de 885 kV sob chuva de 5 mm/min por até 3 minutos, com os BS instalados somente em sua seção superior (4 no IP do fabricante B e 5 no IP do fabricante A). Mas, como pode ser observado na Figura 12, obtida pelas imagens de câmera UV, a instalação plena de BS (b) elimina as atividades associadas à formação de descarga ao longo de toda a coluna de isoladores, enquanto que com a instalação parcial de BS (d) há atividades de descargas, embora em número muito reduzido e de baixa intensidade, na região da base da seção inferior. Finalmente, também com base nas imagens da Figura 12, o desempenho do IP com instalação parcial de BS (d) é muito superior ao do IP sem BS (a).



Figura 11 – Instalação dos IP na extremidade e meio do barramento conforme ensaiados no Laboratório de Alta Tensão do CEPEL

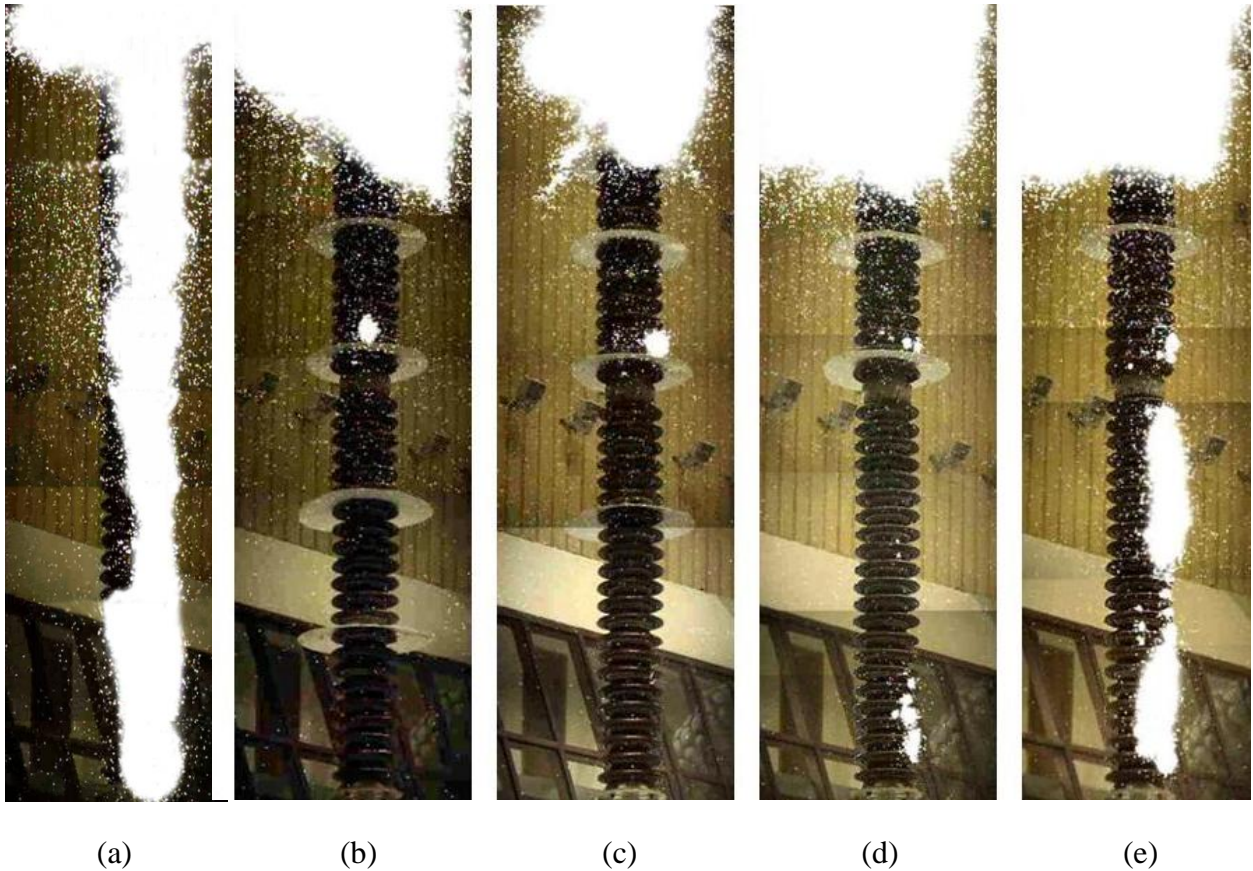


Figura 12 – Quadros de filmagem feita com a câmera UV (fabricante B)

- (a) Sem BS
- (b) 6 BS: saias 2, 9, 14, 21, 28, 35. (“Instalação plena”)
- (c) 5 BS: 2, 9, 14, 21, 28
- (d) 4 BS: 2, 9, 14, 21 (“Instalação parcial” somente na seção superior)
- (e) 3 BS: 2, 9, 14

5 SUGESTÕES DO CEPEL QUANTO À INDICAÇÃO DE ITENS PARA APERFEIÇOAMENTO DA NORMA BRASILEIRA NBR 6936, COM RELAÇÃO À CLASSE DE TENSÃO 800 kV

A NBR 6936/1992 foi inteiramente baseada na Norma IEC 60060-1/1989 e precisa ser revisada para considerar possíveis avanços de conhecimento nos últimos 20 anos. Deve-se destacar que há grupos internacionais do Cigré/IEC estudando especificamente o assunto normatização em ultra-alta-tensão (Joint IEC-Cigré Coordination Group – JICCG).

São os seguintes os itens da Norma NBR 6936 que o CEPEL sugere para revisão:

- Itens 4.4.1 e 4.4.2 – Procedimento de ensaio:
 1. Especificar procedimento normatizado para ensaios sob chuvas intensas. Há apenas informações sobre métodos convencionais.

2. Definir arranjos específicos para ensaios dielétricos em isolador suporte classe 800 kV.
3. Considerar a dispersão da chuva ao longo do item sob ensaio de grandes dimensões.
4. Investigar influência da duração do ensaio e sua representatividade.
5. Avaliar a inclusão de investigações com câmera UV

6 LEVANTAMENTO DO ESTADO DA ARTE DE ISOLADORES TIPO SUPORTE PARA SISTEMAS CLASSE 800 kV EM CORRENTE ALTERNADA

Inicialmente foi realizada uma pesquisa bibliográfica com o objetivo de identificar na literatura técnica, artigos sobre isoladores suporte e seu histórico de operação [8-11].

Foi feito um levantamento do estado da arte em termos da aplicação de isoladores tipo suporte sob condições de chuva intensa. Não foi encontrada literatura sobre isoladores suporte e seu histórico de operação sob chuva intensa, para a classe de tensão de 800 kV. Recorreu-se a trabalhos publicados para classes de tensão menores, no sentido de se obter indícios sobre os problemas observados na SE Itaberá.

Como principal resultado, verificou-se que existem relatos do uso em até 500 kV de “Booster Shed” em buchas e isoladores para reduzir os efeitos de chuvas intensas, poluição e devido a congelamento, sob condições climáticas que podem ser distintas das brasileiras. Portanto, por mais que os resultados até o momento encontrados em laboratório tenham sido promissores, a sua aplicação no nível de tensão de 765 kV deverá ser acompanhada em termos de seu desempenho nas condições específicas de campo. Está em curso no CEPEL uma avaliação dos aspectos ligados ao envelhecimento do material com que o mesmo é fabricado, sob condições climáticas brasileiras.

Além da pesquisa bibliográfica, foram feitas também consultas à Hydro-Quebec e aos seguintes fabricantes de isoladores: Isoelectric (Itália), NGK (Japão), LAPP (USA), CERISOL (Portugal), Hunan Liling Huadian (China) e Isoladores Santana (Brasil).

A Hydro-Quebec relatou o desenvolvimento em conjunto com a NGK de isolador e “Booster Shed”, para aplicação no caso de congelamento e poluição (500 kV). Não tem experiência sob chuvas intensas.

Nenhum dos fabricantes consultados possui isolador comercial para sistemas com classe de tensão de 800 kV, projetado para condições de chuvas intensas. Dois fabricantes

apresentaram protótipos de isolador suporte de barramento classe 800 kV para condições de chuva intensa, a saber:

- *A ISOELECTRIC apresentou um isolador desenvolvido para classe de tensão 500 kV. Trata-se de um isolador composto por uma única seção, com núcleo de fibra de vidro e saias de material polimérico com diâmetros e espaçamentos alternadamente diferentes. Segundo o citado fabricante, o isolador de 500 kV, de mesmo tipo, está sendo utilizado na Austrália em uma região de chuvas intensas durante seis meses do ano e seca intensa nos outros seis meses.*
- *A LAPP também apresentou um protótipo de isolador classe 800 kV, projetado para condições de chuvas intensas.*
- *Ambos os protótipos precisam ser avaliados em laboratório.*

A Isoladores Santana está desenvolvendo um novo isolador pedestal de porcelana tipo multicone classe 800 kV.

Por fim, verificou-se que atualmente o projeto de subestações leva em consideração diversos aspectos os quais servirão para definir se o projeto será ao ar livre, híbrido (misto de ar livre e SF-6) e compacto com SF-6. A tendência para as novas SEs é o arranjo híbrido, sendo por exemplo, os barramentos, seccionadoras e disjuntores blindados.

7 ESTUDOS E ANÁLISES DA MALHA DE ATERRAMENTO DA SE ITABERÁ

Uma equipe do DMEQ.O de FURNAS, acompanhada por pessoal do CEPTEL, realizou uma verificação da continuidade das conexões dos equipamentos de entrada das linhas de transmissão à malha de aterramento e da continuidade elétrica dos condutores da malha de aterramento, não tendo sido encontrado qualquer não conformidade.

A mesma equipe do DMEQ.O de FURNAS realizou uma medição de resistência de aterramento da SE Itaberá pelo método da queda de potencial, o valor encontrado foi de $0,5 \Omega$, compatível com a resistividade elétrica do solo da região e das dimensões da instalação.

A partir do valor da corrente de curto-circuito da subestação de Itaberá, levando-se em conta as linhas de transmissão que chegam a essa instalação, foi calculado o valor da parcela da corrente de curto-circuito que flui entre os condutores da malha de aterramento e o solo, corrente de malha que é da ordem de 7263 A.

Simulação digital da Malha de aterramento da SE Itaberá: a partir do desenho da malha de aterramento da SE e do valor da resistência de aterramento da instalação, estimou-se

o valor da resistividade equivalente do solo na região da subestação. A simulação digital foi feita empregando-se o Programa Malha do CEPEL, que resultou os valores indicados na Tabela 5.

Tabela 5 – SE Itaberá - simulação digital

Resistividade equivalente do solo (Ωm)	500
Corrente de malha (A)	7263
Resistência de aterramento (Ω)	0,53
Elevação de potencial da malha (V)	3862,2
Tensão de toque máxima admissível (V), sem EPI e com brita	638,0
Máxima tensão de toque obtida na simulação (V)	585,5

Concluiu-se que a malha de aterramento da SE Itaberá não apresenta qualquer problema relativo à continuidade dos condutores de aterramento, à conexão dos equipamentos da instalação à malha de aterramento e à segurança de pessoas que circulem na sua instalação.

8 MEDIÇÕES DE RESISTÊNCIA DE ATERRAMENTO DAS TORRES PRÓXIMAS À SE DE ITABERÁ, REALIZADAS POR EQUIPE DE FURNAS

Foram realizadas por equipe de FURNAS [12], medições de resistência de aterramento das três primeiras torres das LT's 765 kV Itaberá-Ivaiporã, circuitos 1, 2 e 3 e Itaberá-Tijuco Preto, circuitos 1, 2 e 3, adjacentes a SE Itaberá.

As medidas foram executadas conforme instruções do manual técnico do equipamento utilizado e seguindo o padrão de FURNAS.

Os resultados das medidas de resistência dos aterramentos das torres, conduzidas por FURNAS, situaram-se dentro dos níveis aceitáveis para esta classe de tensão.

9 PRINCIPAIS CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

9.1 AVALIAÇÃO DE ISOLADORES DE PEDESTAL TIPO MULTICORPO

- As amostras de isoladores, objeto das avaliações, são do modelo pedestal tipo multicorpo para suporte de barramento e de filtro de onda, referentes a dois fabricantes distintos. Foram retiradas unidades de operação, incluindo as que em inspeções rotineiras da equipe de manutenção de FURNAS apresentaram trincas na sua parte inferior e também unidades que estavam armazenadas em almoxarifado.

- Foram feitos ensaios de desempenho dielétrico, sob condições normatizadas (tensão suportável em frequência industrial 60 Hz, a seco e sob chuva; tensão suportável e

corrente de fuga em 60 Hz, poluição natural sob névoa limpa; arco de potência em 60 Hz), e iniciadas pesquisas experimentais adicionais, motivadas por indicações da literatura técnico-científica e relatos sobre a intensidade de chuvas na região de Itaberá.

- Adicionalmente, foram realizadas avaliações de modelo de isolador com a seção inferior modificada para uma configuração uniforme com 406 mm de diâmetro, visando maior robustez mecânica, assim como alternativas voltadas a aumentar o desempenho dielétrico sob chuvas intensas, tais como a utilização de “Booster Shed”. Nessa alternativa, inicialmente, o CEPEL realizou experimentos utilizando peças de “Booster Shed” confeccionadas em sua oficina, com base em modelo do fabricante Tyco, em PVC com espessura de 3 mm, e com diâmetros de 770 mm. Outras alternativas, tais como RTV silicone e graxa de silicone, foram examinadas e os resultados não foram satisfatórios. Além disso, soluções com esses produtos requerem manutenção freqüente o que dificulta ao extremo a aplicação em grande quantidade de isoladores como é o caso da SE Itaberá.

- Resumo das indicações já obtidas quanto à avaliação de isoladores de pedestal tipo multicorpo:

- ✓ Os ensaios dos isoladores tipo multicorpo para suporte de barramento, tanto em amostras retiradas de almoxarifado ou de campo da SE Itaberá, com ou sem trincas na sua base, atenderam os requisitos de aprovação, previstos em norma, do ponto de vista do desempenho elétrico (tensão suportável em freqüência industrial 60 Hz, a seco e sob chuva; tensão suportável e corrente de fuga em 60 Hz, poluição natural sob névoa limpa; arco de potência em 60 Hz). Desta forma, as trincas não afetaram o desempenho dielétrico a seco ou sob chuva, estando em conformidade com os procedimentos estabelecidos em Norma Brasileira (NBR 6936).

- ✓ Quanto ao aspecto mecânico, a avaliação dos isoladores com a primeira saia trincada indica que estes devem ser retirados de operação, pois a erosão logo abaixo da região das trincas, entre a porcelana e o flange da base, pode progredir com o tempo e comprometer o desempenho da coluna de isoladores, pelo menos mecanicamente. Neste sentido, recomenda-se que fabricantes sejam contactados para o desenvolvimento de isoladores com maior resistência mecânica.

- ✓ As avaliações realizadas com o propósito de Pesquisa Experimental, em condições de chuva com valores de precipitação acima daqueles normatizados, indicaram que a suportabilidade dielétrica das seções e colunas das amostras de

isoladores tipo pedestal retiradas de campo, é reduzida pela ocorrência de chuvas intensas (acima de 3 mm/min por 1 minuto), confirmando as informações disponíveis na literatura. Esta redução, segundo as medições realizadas, pode ser até da ordem de 30 % em relação à tensão suportável a 60 Hz, a seco.

✓ Quanto ao modelo de isolador apresentado pelo fabricante A, com seção inferior modificada visando maior robustez mecânica, apresentado a FURNAS para a substituição dos isoladores trincados, a seção inferior suportou a tensão aplicada de 455 kV por 1 minuto, sob chuva de 5 mm/min, nos ensaios da Pesquisa Experimental. A seção superior do isolador não suportou este valor de tensão aplicada, quando submetida a ensaios, sob estas mesmas condições de chuva, em três tentativas realizadas. Ainda sob estas condições de chuva, na coluna de isoladores completa, quando submetida à tensão de 885 kV, ocorreu a disrupção após 30 segundos de tensão aplicada. Assim, o perfil uniforme de saias da seção inferior apresentado, em lugar do perfil original que tem dois conjuntos de saias de diâmetros diferentes, pode ter levado a uma menor suportabilidade dielétrica sob chuvas intensas.

✓ Com relação à utilização de “Booster Shed”, com base nos resultados obtidos nas condições de avaliação da Pesquisa Experimental e imagens de câmera de espectro de radiação ultravioleta (UV), pode-se concluir que seu uso traz reduções substanciais nas atividades associadas a descargas ao longo das colunas de isoladores pedestal tipo multicorpo para suporte de barramento.

✓ Nas condições da Pesquisa Experimental, os resultados iniciais indicaram que cinco “Booster Shed”, confeccionados pelo CEPEL e com diâmetro externo de 770 mm, para efeito de primeira avaliação, mostraram ser suficientes para um bom desempenho dielétrico da coluna de isoladores de pedestal multicorpo, para suporte de barramento, de um dos fabricantes. Nas mesmas condições da Pesquisa Experimental, quatro “Booster Shed” mostraram ser suficientes para um bom desempenho dielétrico da coluna de isoladores do outro fabricante. Além da quantidade, as melhores localizações para os “Booster Shed” nas colunas de isoladores também foram diferentes para cada um dos fabricantes.

✓ Na seqüência da Pesquisa Experimental, informações posteriores e mais detalhadas do fabricante Tyco dos “Booster Shed”, indicaram que, uma vez que as colunas de isoladores sob ensaio possuem diferentes diâmetros, serão necessários quatro distintos BS com diâmetros de 685 mm, 710 mm, 740 mm e 770 mm, em lugar do

modelo único com 770 mm indicado em catálogo, e inicialmente utilizado. Com base nestas novas dimensões, o CEPEL confeccionou outras unidades de BS, e os ensaios de tensão suportável a 60 Hz foram refeitos, decidindo-se adotar os critérios mais rígidos até então empregados, ou seja, realizá-los sob chuva de 5 mm/min e com duração de 3 minutos. Em relação ao fabricante A, para o qual inicialmente recomendou-se a utilização de cinco BS de 770 mm, os novos ensaios indicaram a necessidade de oito BS nas saias de número 2, 7, 12, 17, 22, 27, 32 e 37. Já para o fabricante B, para o qual inicialmente recomendava-se quatro BS de 770 mm, os novos ensaios indicaram seis BS, nas saias de número 2, 9, 14, 21, 28 e 35.

✓ Uma vez conhecidos os resultados das avaliações de suportabilidade a 60 Hz das colunas de isoladores, a partir da inclusão dos novos “Booster Shed”, e que serviram para a definição da quantidade e localização dos mesmos ao longo da coluna, o próximo passo foi a verificação do desempenho dos isoladores sob o ponto de vista da tensão suportável a impulso atmosférico, incluindo a avaliação do impacto da presença dos BS. Pode-se destacar que foi constatado, com a presença dos BS, para ambos os fabricantes, a seco e sob chuva de 5 mm/min, que não houve qualquer caso de interrupção ao longo destes ensaios. Portanto, como conclusão geral, pode-se afirmar que os isoladores de ambos os fabricantes estão adequados, sob o ponto de vista do desempenho da tensão suportável a impulso atmosférico, com e sem a presença dos novos BS.

✓ Em função do caráter probabilístico dos fenômenos de formação das descargas disruptivas, mesmo nas condições controladas de ensaios em laboratório, e da pequena diferença de valores de tensão obtidos nos ensaios, não se pode categoricamente afirmar que haja uma superioridade de desempenho de um modelo de um isolador de um fabricante em relação ao outro.

✓ Ainda quanto à sua localização, um “Booster Shed” instalado exatamente no topo da coluna de isoladores poderá ter a sua superfície afetada, ao longo do tempo, pela ação do campo elétrico mais intenso dessa região. Esta condição deverá ser avaliada segundo orientações do fabricante quanto ao material utilizado.

✓ Com relação ao modelo de isolador de pedestal multicorpo, para suporte de barramento, com seção inferior modificada, no ensaio da seção superior, em três tentativas, esta não suportou a tensão aplicada de 455 kV por 1 minuto. No ensaio com a coluna de isoladores completa, quando submetida à tensão de 885 kV, ocorreu

disrupção em 30 segundos. Assim, o perfil uniforme de saias, em lugar do perfil original que tem dois conjuntos de saias de diâmetros diferentes, pode ter levado a uma menor suportabilidade dielétrica sob chuvas intensas.

✓ O arranjo composto por três colunas de isoladores de pedestal multicorpo, para suporte do Filtro de Onda, conforme a montagem encontrada na SE Itaberá (tripé com distâncias entre eixos de cada coluna igual a 900 mm), quando avaliado em laboratório do CEPEL, suportou, sob condições normatizadas, a aplicação de tensão de 900 kV e 885 kV por 1 minuto, respectivamente, a seco e sob chuva (1mm/min). No entanto, as imagens obtidas pela câmera UV mostraram intensa atividade associada a descargas, tanto no topo como ao longo das colunas de isoladores e entre elas. Deve-se destacar que a tensão suportável a seco a 60 Hz, corresponde a 960 kV, mas como o valor da tensão máxima possível com a fonte de alta tensão do laboratório é de 900 kV, limitou-se o ensaio a seco a este valor.

✓ Ainda no que se refere ao suporte do Filtro de Onda, no âmbito da Pesquisa Experimental, com a aplicação de 885 kV e sob chuva com intensidade de 5 mm/min houve descarga em todas as configurações consideradas: original; com instalação de um e de dois anéis de equalização de potencial, e adotando-se os “Booster Shed”.

✓ Frente a esses resultados, é recomendável que FURNAS passe a não utilizar a estrutura isolante composta por três colunas de isoladores e avalie a possibilidade de retirada dos Filtros de Onda, considerando outras opções para comunicação, ou a substituição da estrutura isolante do Filtro de Onda por uma que utilize um único isolador pedestal, caso viável tecnicamente.

✓ Os IP ensaiados com BS instalados somente na seção superior (4 no IP do fabricante B e 5 no IP do fabricante A), nas configurações da extremidade ou do meio de barramento, suportaram a tensão aplicada de 885 kV, sob chuva de 5 mm/min, por até 3 minutos. Mas, como pode ser observado pelas imagens de câmera UV, a instalação plena de BS elimina as atividades associadas à formação de descarga ao longo de toda a coluna de isoladores, enquanto que com a instalação parcial de BS há atividades de descargas, embora em número muito reduzido e de baixa intensidade, na região da base da seção inferior. Finalmente, tomando também como base as imagens da câmera UV, observa-se que o desempenho do IP com instalação parcial de BS é muito superior ao do IP sem BS.

9.2 SUGESTÕES DO CEPEL QUANTO À INDICAÇÃO DE ITENS PARA APERFEIÇOAMENTO DA NORMA BRASILEIRA NBR 6936, COM RELAÇÃO À CLASSE DE TENSÃO 800 kV

A NBR 6936/1992 foi inteiramente baseada na Norma IEC 60060-1/1989 e precisa ser revisada para considerar possíveis avanços de conhecimento nos últimos 20 anos. Deve-se destacar que há grupos internacionais do Cigré/IEC estudando especificamente o assunto normatização em ultra-alta-tensão (Joint IEC-Cigré Coordination Group – JICCG).

São os seguintes os itens da Norma NBR 6936 que o CEPEL sugere para revisão:

- Itens 4.4.1 e 4.4.2 – Procedimento de ensaio:
 1. Especificar procedimento normatizado para ensaios sob chuvas intensas. Há apenas informações sobre métodos convencionais.
 2. Definir arranjos específicos para ensaios dielétricos em isolador suporte classe 800 kV.
 3. Considerar a dispersão da chuva ao longo do item sob ensaio de grandes dimensões.
 4. Investigar influência da duração do ensaio e sua representatividade.
 5. Avaliar a inclusão de investigações com câmera UV

9.3 LEVANTAMENTO DO ESTADO DA ARTE DE ISOLADORES TIPO SUPORTE PARA SISTEMAS CLASSE 800 kV EM CORRENTE ALTERNADA

Foram feitas consultas à Hydro-Quebec e a diversos fabricantes de isoladores. Nenhum dos consultados relatou a existência de isoladores comerciais projetados para classe de tensão de 800 kV, aplicável a condições de chuvas intensas. Uma pesquisa bibliográfica também constatou a ausência de literatura sobre isoladores suporte, para a classe de tensão de 800 kV, com aplicação específica para uso sob chuva intensa.

Como principal resultado, verificou-se em nível internacional que existem relatos do uso em até 500 kV de “Booster Shed” em buchas e isoladores para reduzir os efeitos de chuvas intensas, poluição e devido a congelamento, sob condições climáticas que podem ser distintas das brasileiras. Está em curso no CEPEL uma avaliação dos aspectos ligados ao envelhecimento do material com que o mesmo é fabricado, sob condições climáticas brasileiras.

Ainda no levantamento do estado da arte de subestações classe 800 kV, a tendência para as novas subestações é o arranjo híbrido sendo, por exemplo, os barramentos, seccionadoras e disjuntores blindados a SF6, e os demais equipamentos ao ar livre.

9.4 ESTUDOS E ANÁLISES DA MALHA DE ATERRAMENTO E MEDIÇÕES DE RESISTÊNCIA DE ATERRAMENTO DAS TORRES PRÓXIMAS À SE DE ITABERÁ

- Quanto às avaliações da malha de aterramento da SE Itaberá, concluiu-se que esta apresenta desempenho adequado, sem qualquer problema relativo à continuidade dos condutores de aterramento, à conexão dos equipamentos da instalação à malha de aterramento, e à segurança de pessoas que circulem na sua instalação.

- Os resultados das medidas de resistência dos aterramentos das torres, conduzidas por FURNAS, situaram-se dentro dos níveis aceitáveis para esta classe de tensão.

10 REFERÊNCIAS

- [1] NBR 6936 (Técnicas de Ensaio Elétricos de Alta-Tensão). Abril de 1992
- [2] Relatório Técnico DLE 20838/09 - Verificação de desempenho de isoladores tipo pedestal, utilizados na SE de Itaberá, FURNAS – Parte 1, setembro de 2009.
- [3] DAEE-SP/USP, “Equações de Chuvas Intensas no Estado de São Paulo”, junho 1999. Disponível em <http://www.sigrh.sp.gov.br/sigrh/basecon/ecisp/PlugDAEE.pdf>;
- [4] “Transmission Line Reference Book – 200 kV and above”, Third Edition, Electric Power Research Institute, dezembro 2005.
- [5] Catálogo Tyco Electronics Raychem Insulation Enhancement Systems, item “HVBS Booster Sheds”
- [6] Edited by A. Haddad and D. F. Warne, “Advances in High Voltage Engineering”, Institution of Engineering and Technology, London, UK, 2004, Ch. 6.8.1, p. 296, Booster Sheds.
- [7] C.H.A. Ely, P.J. Lambeth and J.S.T. Looms, “The booster shed: prevention of flashover of polluted substation insulators in heavy wetting”, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-97, No. 6, Nov/Dec, 1978, pp. 2187-2197.
- [8] V. Sklenicka, J. Vokalek e Paul C. van der Wal: “Pollution performance of double insulator assemblies”, High Voltage Engineering Symposium, IEE / 1999, artigo 467.
- [9] Xinqiao Wu, Zongren Peng, Peng Liu e Zhong Yu: “Calculation of Electric-field Distribution and Research on Characteristics of Shielding Ring along the Long-rod Post Porcelain Insulators Used in 1000kv System”, 8th International Conference on Properties and applications of Dielectric Materials, 2006, pag 603 - 606.
- [10] Joze Hrastnik e Joze Pihler: “Designing a New Post Insulator Using 3-D Electric-Field Analysis”, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 24, nr. 3, 07/2009, pag. 1377-1381.
- [11] Kenneth Jabrand e Helge Nordli: “Innovative substation solutions to reduce investment costs – improved availability and reliability”, Reunion de Verano, RVP-A1/2001, Acapulco, de 9 a 13 de julho de 2001.
- [12] Paulo Borges dos Santos “Medida de Resistência de Aterramento de Torres” Relatório FURNAS/ DRQ.O/DMEQ.O, 04/11/2007.