



**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 -X

GRUPO DE ESTUDOS DE DESEMPENHO DE SISTEMAS ELÉTRICOS - GDS

Estudo de Coordenação do Isolamento baseado em Sobretensões Provocadas por Aplicação e Eliminação de Defeitos, e sua Relação com Chuvas Intensas

**Rogério Magalhães de Azevedo (*)
Francisco M. S. Carvalho, Orsino Oliveira Filho
CEPEL**

**Waldemar A. S. Cruz
ELETROBRÁS**

**Sylvia G. Carvalho
FURNAS**

RESUMO

Neste trabalho são analisados distúrbios que ocorreram na subestação Itaberá 765 kV, relacionados com sobretensões provocadas por aplicação e eliminação de defeitos. Por meio de simulações com o programa ATP, investiga-se o desempenho dos pára-raios e, assim como nas informações dos RDPs e do sistema de proteção, mostra-se que os curtos-circuitos ocorreram para valores de sobretensões entre 1,55pu e 1,65pu.

É apresentada uma análise da relação entre a intensidade da chuva e a redução da suportabilidade dielétrica a 60Hz dos isoladores. Esta relação foi comprovada em ensaios de tensão alternada sob chuva, realizados no CEPEL em isoladores retirados da subestação.

PALAVRAS-CHAVE

Coordenação do Isolamento, ATP/ATPDraw, Pára-raios de ZnO, Isolador de Pedestal, Ensaios Dielétricos.

1.0 - INTRODUÇÃO

Em fevereiro de 2007, a subestação de Itaberá, integrante do sistema de transmissão em 765 kV de FURNAS, foi atingida por um forte temporal com incidência de muita chuva e descargas atmosféricas, provocando curtos-circuitos e, conseqüentemente, o desligamento de linhas de transmissão e de um dos barramentos de 765 kV da subestação. Outras ocorrências com as mesmas características aconteceram no mesmo local em julho de 2003 e em 1989.

As informações dos registradores digitais de perturbação (RDPs) e do sistema de proteção mostraram que um primeiro curto-circuito monofásico ocorreu em uma das linhas de transmissão, cerca de 500 metros a partir da subestação, provavelmente causado por uma descarga atmosférica. Decorridos 16 ms, aproximadamente, um novo curto-circuito foi registrado em uma das fases sãs, só que desta vez, em uma coluna de isoladores de um dos barramentos da subestação. Outros curtos-circuitos também foram observados após as manobras de eliminação de defeitos anteriores.

Os distúrbios descritos acima são tipicamente relacionados com as sobretensões causadas por aplicação e eliminação de defeitos [1,2]. Assim, foram realizadas simulações com o Alternative Transient Program (ATP) [3] para reproduzir os múltiplos eventos de curtos-circuitos. Embora este estudo seja feito para análise de fenômenos que causam, tipicamente, sobretensões de manobra, todos os trechos de barramentos da subestação foram representados por circuitos π s. Foram, também, representados os equipamentos de manobra e compensação. Desta forma, os defeitos e manobras ocorridos foram simulados exatamente na seqüência obtida através do RDP.

(*) 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) 2598-6329, Fax: (+55 21) 2270-4189, azevedo@cepel.br

As simulações, assim como os oscilogramas obtidos com os RDPs, mostraram que os curtos-circuitos ocorreram para valores relativamente baixos de sobretensões, entre 1,55 pu e 1,65 pu, indicando que, ou as sobretensões não atingiram o nível de proteção dos pára-raios, ou eles atuaram devidamente. Além disso, como parte da investigação de possíveis causas para os defeitos, alguns pára-raios de ZnO foram ensaiados nos laboratórios do CEPEL. Os resultados são apresentados na referência [4].

Uma possível relação entre a intensidade da chuva e a redução da suportabilidade dielétrica a 60 Hz dos isoladores da subestação é apresentada, baseada em dados históricos de precipitação pluviométrica na região de Itaberá e em trabalhos publicados na literatura [5,6,7]. Posteriormente, no CEPEL, esta relação foi comprovada em ensaios de tensão alternada em 60 Hz sob chuva, realizados nos isoladores de pedestal retirados da subestação [8].

2.0 - MODELAGEM DO SISTEMA DE TRANSMISSÃO

Para a simulação das ocorrências, a rede elétrica mostrada na Figura 1 foi modelada nos programas ATP/ATPDraw com as seguintes características:

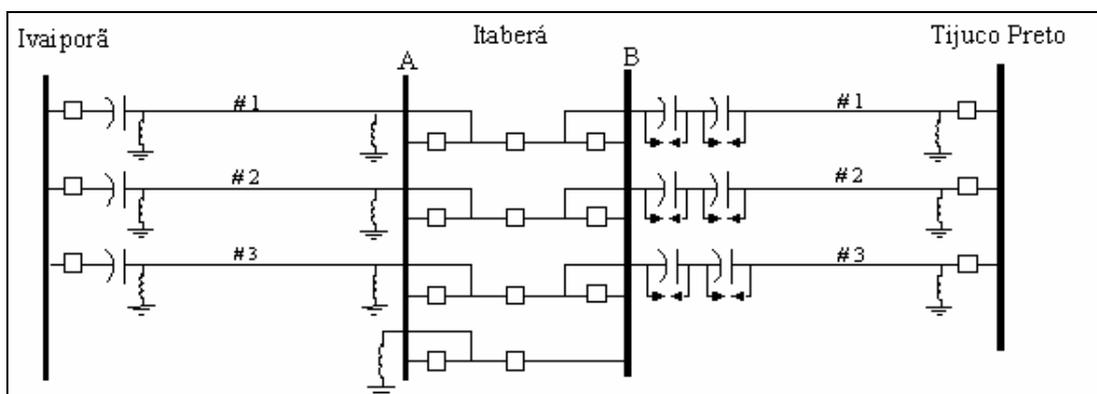


Figura 1 – Diagrama unifilar da rede estudada

- As linhas de transmissão em 765 kV foram representadas por modelo matemático de parâmetros distribuídos e constantes em frequência, com transposição em trechos iguais a 1/6, 1/3, 2/3, 5/6 do comprimento. Os equipamentos de compensação reativa foram representados por elementos concentrados.
- Para monitoração e simulação dos defeitos quanto à sua localização, os 3 primeiros vãos de cada linha e os trechos de barramento e “bays” da SE Itaberá foram representados por circuitos π s equivalentes.
- Os pára-raios de ZnO foram representados por resistores não-lineares com descrição da característica tensão versus corrente por pontos.
- A rede elétrica a partir das Subestações de Ivaiporã e Tijuco Preto em 765 kV foi representada por equivalentes próprios de Thevenin em 60 Hz.
- A potência transmitida pelo sistema foi ajustada para 2.600 MW e a tensão de regime permanente na SE Itaberá é de 1,030 pu.
- Os curtos-circuitos foram simulados conforme seqüência mostrada nos oscilogramas fornecidos por FURNAS e aplicados no instante em que a tensão atingiu o seu valor máximo.

3.0 - DESCRIÇÃO DA OCORRÊNCIA DE 2007

A Figura 2 mostra os oscilogramas com as medições de tensões e correntes durante o distúrbio. O primeiro defeito monofásico ocorreu na LT Itaberá-Ivaiporã (IAIV3), provavelmente causado por uma descarga atmosférica. Após 18 ms, um novo defeito em uma das fases sãs ocorreu no isolador de um dos barramentos da subestação. A eliminação destes dois curtos-circuitos também causou outros defeitos.

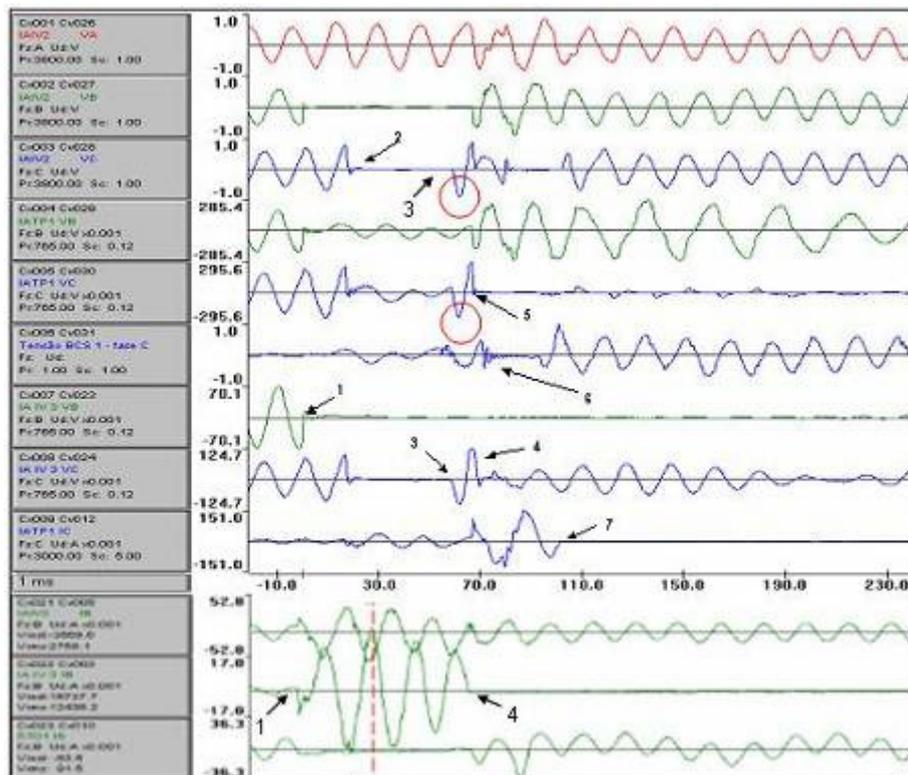


Figura 2 – Oscilogramas de tensões e correntes medidas no campo durante o distúrbio

Eventos como os descritos acima são casos típicos sobretensões provocadas por aplicação e eliminação de curto-circuito. Para a obtenção destas sobretensões e investigação da atuação dos pára-raios durante o distúrbio em Itaberá, os curtos-circuitos e as manobras dos disjuntores foram simulados no ATP. A seqüência dos eventos, mostrada na Figura 2, é descrita a seguir:

1. T_0 : Curto-circuito na fase B da LT IAIV3, na segunda torre;
2. $T_0 + 18$ ms: Curto-circuito na fase C da barra B;
3. $T_0 + 56,4$ ms: Início da abertura dos disjuntores da barra B (fase A);
4. $T_0 + 58,7$ ms: Início da abertura dos disjuntores da LT IAIV3 (fase A);
5. $T_0 + 67,9$ ms: Curto-circuito na fase C da LT IATP1, na segunda torre;
6. $T_0 + 75$ ms: Disparo do gap do BCS-1, fase C;
7. $T_0 + 92$ ms: Início da abertura dos disjuntores da LT IATP1.

Além da ocorrência descrita acima, uma outra com as mesmas características aconteceu nesta subestação em julho de 2003.

4.0 - DESEMPENHO DOS PÁRA-RAIOS ZNO

As Figuras 3 e 4 mostram os resultados de duas simulações, considerando ou não a presença dos pára-raios de ZnO na subestação. Quando comparadas com os oscilogramas mostrados na Figura 2, pode-se observar que houve a atuação dos pára-raios de forma satisfatória. A Tabela 1 apresenta os valores das sobretensões obtidos na medição de campo e nas simulações com e sem pára-raios, no instante de maior atuação dos pára-raios, indicado com um círculo vermelho nas Figuras 2 a 4.

Além disso, como parte da investigação de possíveis causas para os defeitos, alguns pára-raios de ZnO foram ensaiados nos laboratórios do CEPEL. Os resultados são apresentados na referência [4].

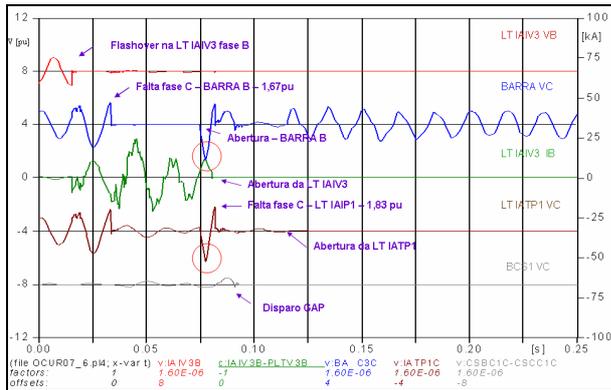


Figura 3 – Resultado da simulação sem pára-raios.

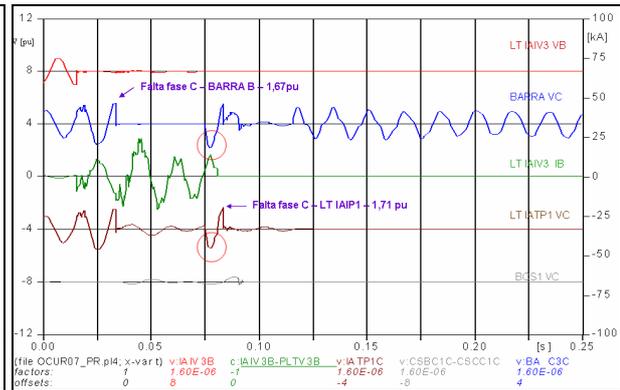


Figura 4 – Resultados da simulação com pára-raios.

TABELA 1 – Valores das sobretensões: comparação oscilograma x simulações

Local da Medição	Sobretensão (pu)		
	Oscilograma	Simulação sem pára-raios	Simulação com pára-raios
Barramento – fase C	1,65	2,66	1,79
LT IAIP1 – fase C	1,26	2,28	1,46

5.0 - EFEITO DA CHUVA NA SUPORTABILIDADE DOS ISOLADORES

As condições para a disrupção nos isoladores submetidos a uma sobretensão temporária é dependente, entre outros fatores, da intensidade da chuva [5,6,7]. A maior influência neste sentido é o gotejamento ou o próprio escoamento da água entre as saias do isolador. Numa condição extrema, sob chuva intensa, pode-se formar até mesmo uma cascata, paralela ao comprimento da cadeia. A Figura 5, retirada da referência [5], mostra a curva do fator de correção da tensão crítica de frequência fundamental de uma cadeia de isoladores vertical em função da intensidade da chuva. Nesta curva, pode-se notar que uma chuva extremamente intensa pode causar uma redução da suportabilidade dielétrica da cadeia em cerca de 30% ou mais.

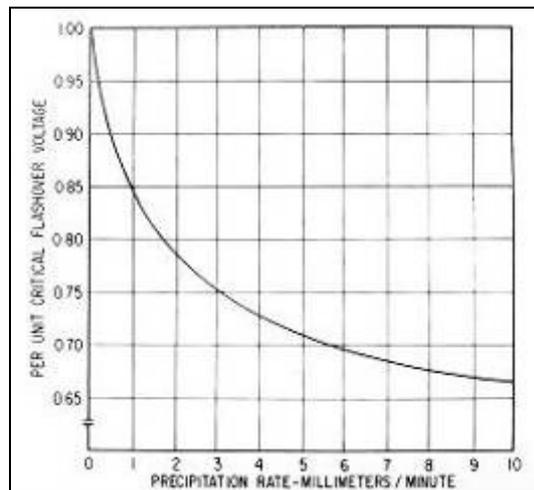


Figura 5 – Tensão crítica de frequência fundamental: fator de correção em função da intensidade da chuva (cadeia de isoladores em "I") [5].

Entretanto, deve-se ressaltar que os ensaios sob chuva para determinação das tensões críticas ou suportáveis, principalmente para 60Hz, não podem ser repetidos de forma confiável. Outros fatores que também devem ser levados em conta nesta redução, são a contaminação e o envelhecimento dos isoladores.

5.1 Resultados das simulações

A Tabela 2 apresenta os resultados das simulações das ocorrências de 2003 e 2007. Em ambos os casos, o primeiro curto-circuito foi causado, provavelmente, por uma descarga atmosférica. As localizações dos defeitos subsequentes a este primeiro curto-circuito são mostradas na Tabela 2.

Tabela 2 – Resultados obtidos nas simulações das ocorrências de 2003 e 2007

Localização do Defeito	Tensão no instante do cc		Redução
	[kV _{pico}]	[pu]	%
2007: Barra B - fase C	967	1,55	28
LT IATP1 - fase C	1022	1,64	48
2003: LT IAIV1 - fase B	790	1,26	60
Stub do reator de barra - fase A	972	1,56	28
Stub do reator de barra - fase B	1144	1,83	16
Stub do reator de barra - fase C	1150	1,84	15
Barra B - fase C	1080	1,73	20
LT IAIV2 - fase A	1145	1,83	42
LT IATP1 - fase B	1144	1,83	42

Nas simulações, seguindo o mesmo padrão observado nos oscilogramas, os curtos-circuitos foram aplicados no instante máximo da tensão, considerando a sua localização indicada na Tabela 2. Também é apresentada a diferença relativa entre este valor máximo de tensão e a tensão suportável a 60 Hz da cadeia de isoladores (CI) das linhas de transmissão ou do isolador de pedestal (IP) da subestação, para a condição de limpos e secos.

Na Tabela 2, pode-se notar que, para os defeitos onde há IPs, o valor da tensão no instante do defeito está corresponde a uma redução de 15% a 28% da tensão suportável do IP. Para os defeitos nas linhas de transmissão, as tensões nas CIs no instante do defeito corresponde a uma redução de 42% a 48% do valor da tensão suportável da CI.

Isto significa que ambos os isoladores (CI e IP) apresentaram descargas como se eles tivessem tido uma redução na tensão suportável.

5.2 Intensidade da chuva na região

Baseado nos resultados anteriores, o conhecimento do valor de intensidade da chuva (por exemplo, taxa de precipitação a cada 5 minutos) no momento dos defeitos na subestação, seria um dado importante para o esclarecimento das causas do distúrbio. Um exemplo de registro pluviométrico é mostrado na Figura 6, indicando uma chuva com intensidade de 4,2 mm/min no posto de Itararé em 1981 [9].

PREFIXO:	F6-004												
NOME DO POSTO:	Itarare												
ENTIDADE:	DAEE												
MUNICÍPIO:	Itarare												
ALTITUDE (m):	760.00												
LATITUDE:	24°07'00"												
LONGITUDE:	49°20'00"												
DATA INICIAL:	01/12/1969												
DATA FINAL:	1997												
EVENTOS DE CHUVA - PRECIPITAÇÃO (mm)													
Data	Hora	5'	10'	15'	20'	25'	30'	35'	40'	45'	50'	55'	60'
16/10/1981	7:00	0.6	0.7	21.0	21.0	0.2	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Figura 6 – Precipitação registrada em Itararé no ano de 1981.

Entretanto, estes registros pluviométricos foram coletados somente até 1999. A partir desta data, somente estão disponíveis dados horários ou diários de precipitação.

A Tabela 3, extraída de [10], mostra o resultado de um estudo de previsão de chuvas intensas, relacionando a duração da chuva, a precipitação e o tempo de retorno, a partir dos dados coletados entre 1969 e 1999 para a região de Itararé.

Tabela 3 - Previsão de precipitação máxima, em mm, para a região de Itararé.

Duração t (minutos)	Período de retorno T (anos)								
	2	5	10	15	20	25	50	100	200
10	17,4	24,8	29,7	32,5	34,4	35,9	40,5	45,0	49,6
20	25,2	35,4	42,2	46,0	48,7	50,7	57,0	63,3	69,6
30	30,2	41,9	49,7	54,0	57,1	59,5	66,7	74,0	81,2
60	38,8	52,8	62,1	67,3	71,0	73,8	82,5	91,1	99,7
120	47,6	63,4	73,9	79,8	83,9	87,1	96,9	106,7	116,4
180	52,9	69,6	80,7	86,9	91,3	94,7	105,0	115,3	125,6
360	62,5	80,5	92,5	99,3	104,0	107,6	118,8	130,0	141,1
720	73,0	92,3	105,1	112,3	117,3	121,2	133,2	145,1	157,0
1080	79,7	99,7	113,0	120,4	125,7	129,7	142,1	154,5	166,7
1440	84,8	105,3	118,9	126,5	131,9	136,0	148,8	161,4	174,0

6.0 - CONCLUSÃO

O trabalho apresentado, sobre coordenação do isolamento, baseado nas simulações de aplicação e eliminação de defeitos, permite que sejam feitos os seguintes comentários:

- A comparação dos resultados das simulações com os oscilogramas obtidos com os RDPs mostrou que houve atuação dos pára-raios, que limitaram as sobretensões na subestação em níveis compatíveis com seu nível de proteção (em torno de 1,9 pu) sem, contudo, evitar os defeitos nos isoladores de pedestal.
- A diminuição da suportabilidade dielétrica dos isoladores de pedestal pode estar associada à intensidade da chuva. Entretanto, não estão disponíveis dados meteorológicos para fundamentar uma análise conclusiva com relação a esta possibilidade.
- Os operadores da subestação deram um importante relato de quanto intensa era a chuva no momento das ocorrências. Além disso, um estudo realizado pelo DAEE-SP e USP, em 1999, mostra a possibilidade de chuvas com intensidade acima de 3 mm/min para um período de retorno igual a 10 anos.

Uma importante contribuição deste trabalho foi a sugestão para a realização de ensaios de tensão suportável a 60 Hz dos isoladores sob chuvas intensas. Estes ensaios foram realizados no Laboratório do CEPEL e os resultados apresentados na referência [8] estão resumidos no Anexo A.

7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) A. Clerici, G. Santagostino, A. Magagnoli, "Influence of Fault Initiation and Fault Clearing Overvoltages on the Insulation of UHV Lines", IEEE Trans. On Power Apparatus and Systems, vol. PAS-94, no. 3, May 1975.
- (2) P. Thanassoulis, N. de Franco, A. Clerici, M. Cazzani, "Overvoltages on a Series-Compensated 750 kV System for the 10000 MW Itaipu Project", IEEE Trans. On Power Apparatus and Systems, vol. PAS-94, no. 2, Mar 1975.
- (3) Canadian/American EMTP User Group, *Alternative Transient Program – Rule Book*, Portland-OR, USA, 1986.
- (4) O. Oliveira Filho, F. B. Barbosa, R. M. de Azevedo, W. A. S. Cruz e S. G. Carvalho, "Performance Evaluation of 20 Years Old ZnO Surge Arresters Based on Laboratory Tests", *International Conference on High Voltage Engineering and Application*, Chongqing, China, November 2008.
- (5) EPRI - "Transmission Line Reference Book - 345 kV and above", second edition, Electric Power Research Institute, Palo Alto, Califórnia, USA, 1982.
- (6) J.P. Riu, B. Hutzler, S.W. Rowe, J. Huc, P. Maurin, "Wet Tests under A.C. Voltage and Switching Impulses Procedure and Significant Parameters", IEEE Trans. On PWD, Vol. 3, No. 1, January 1988.
- (7) A. de la O, R.S. Gorur, "Flashover of Contaminated Nonceramic Outdoor Insulators in a Wet Atmosphere", IEEE Trans. On Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 5, No. 6, December 1998.
- (8) O. Oliveira Filho, D. R. Mello, J. A. Cardoso, R. M. de Azevedo, W. A. S. Cruz e S. G. Carvalho, "Performance Evaluation of 800 kV Porcelain Multicone Type Insulators Under Heavy Rain Based on Laboratory Tests", *International Conference on High Voltage Engineering and Application*, Chongqing, China, November 2008.

- (9) Banco de dados do Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo, disponível em <http://www.dae.sp.gov.br>.
- (10) 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>.

ANEXO A – ENSAIOS EM ISOLADORES DE PORCELANA, TIPO MULTICONE, SOB CHUVA

Este anexo apresenta, resumidamente, parte dos resultados de uma investigação baseada em ensaios de alta tensão alternada 60 Hz, realizados em isoladores de porcelana classe 800 kV, tipo multicone, retirados de serviço após mais de 20 anos em operação, bem como em isolador novo. Estes isoladores, compostos de duas seções, têm tensões suportáveis a 60 Hz de 1100 kV (seco) e 960 kV sob chuva (1 mm/min). Os isoladores foram ensaiados em dois arranjos: cada unidade separada e as duas unidades em série, uma sobre a outra, como são utilizadas em serviço. Os ensaios foram realizados sob chuva artificial, com intensidade variando de 1 mm/min, conforme normas, a 5 mm/min, baseado em informações sobre intensidade de chuva no local onde os isoladores estavam sendo utilizados. A Figura A.1 mostra os arranjos destes ensaios.



Figura A.1 – Arranjos dos ensaios: uma seção (ensaio a seco) e isolador completo sob chuva

O procedimento do ensaio foi simplificado em comparação ao ensaio normalizado. Inicialmente, cada isolador foi energizado com uma tensão supostamente suportável, por 1 minuto, e posteriormente aumentada gradualmente até ocorrer a descarga ou atingir a maior tensão possível no ensaio, isto é, 900 kV_{rms}.

Foram ensaiadas 4 colunas de isoladores, de dois fabricantes diferentes:

- seção superior A1: esta coluna teve a seção inferior quebrada durante a ocorrência de 2007 (figura A.2);
- coluna B1: retirada de serviço (20 anos) com trincas na primeira saia da seção inferior (figura A.2);
- coluna A2: 20 anos em serviço, sem trincas visíveis;
- coluna B2: Nunca utilizado, armazenado durante 20 anos.



Figura A.2 – Seção inferior da coluna A1 com primeira saia quebrada e trincas na seção da coluna B1.

As medições de resistência para cada saia foram na faixa de 2,5 GΩ a 5,0 GΩ, exceto para as saias com trincas, cujas medições deram na faixa de 200 kΩ a 800 kΩ. Entretanto, como as trincas só aparecem na primeira saia, isto não justificaria uma redução significativa da suportabilidade dielétrica, como pode ser visto na Figura A.3, apesar da simplicidade do ensaio realizado. Mas esta condição pode levar a falhas mecânicas da coluna de isoladores.

Os ensaios nas colunas completas foram limitados à máxima tensão do transformador de teste, isto é, 900 kV_{rms}. Os resultados são mostrados na Tabela A.1. Considerando a tensão suportável a seco de 1100 kV_{rms}, informada pelos fabricantes, foram observadas reduções de 29% e 18% para as colunas A2 e B2, respectivamente.

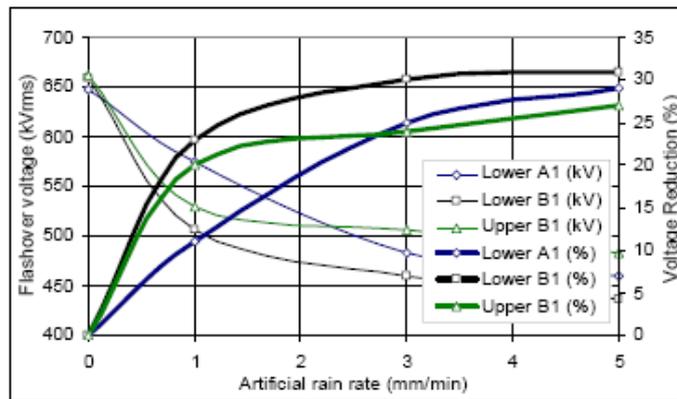


Figura A.3 – Redução da suportabilidade nos ensaios das seções dos isoladores A1 e B1.

Tabela A.1 – Descargas nos ensaios com isoladores A2 e B2, completos.

Isolador	Seco	1 mm/min	3 mm/min	5 mm/min
Coluna A2	Suportou 900 kV _{rms}	Suportou 900 kV _{rms}	Descarga 800 kV _{rms}	Descarga 780 kV _{rms}
Coluna B2	Suportou 900 kV _{rms}	Descarga 900 kV _{rms}	Descarga 850 kV _{rms}	Descarga 900 kV _{rms}

As imagens obtidas com uma câmera UV são muito interessantes para mostrar o processo de descarga ao longo da coluna de isoladores. É possível ver que as atividades de descarga são mais concentradas na parte superior do isolador e que aumentam consideravelmente com o aumento da precipitação da chuva artificial. As Figuras A.4 a A.6 mostram o isolador B2 durante os ensaios com chuva de 1, 3 e 5 mm/min, para uma mesma tensão aplicada de 750 kV_{rms}.



Figura A.4 – Coluna B2; 750 kV_{rms}; 1mm/min



Figura A.5 – Coluna B2; 750 kV_{rms}; 3 mm/min



Figura A.6 – Coluna B2; 750 kV_{rms}; 5 mm/min