



EXPERIÊNCIA DA ITAIPU BINACIONAL COM O USO DE ELASTÔMERO DE SILICONE PARA EVITAR DESCARGAS DISRUPTIVAS EXTERNAS EM BUCHAS DE 500 kV DE TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA

Luiz Fernando Pisa

Itaipu Binacional

Brasil

RESUMEN

Este informe técnico apresenta a experiência da área de Manutenção da Itaipu Binacional com o uso de elastômeros de silicone para o revestimento de buchas de 500 kV de transformadores de potência, com o intuito de eliminar a ocorrência de descargas disruptivas externas (flashovers) que ocorreram nos transformadores principais dos serviços auxiliares da Usina de ITAIPU durante a fase da entrada em operação da usina, na qual as condições ambientais eram muito desfavoráveis do ponto de vista da presença de poluentes em suspensão; e posteriormente relatar as decisões técnicas tomadas com relação a continuidade do uso do produto, considerando a melhoria das condições ambientais na área da usina hidrelétrica a partir dos anos 2000.

PALABRAS CLAVES

Bucha, Isoladores, Descargas Disruptivas, Poluentes, Elastômero de Silicone, RTV.

1. INTRODUÇÃO

A utilização de elastômeros de silicone ou RTV (Room Temperature Vulcanizing) para o revestimento de isoladores de equipamentos de alta tensão é uma solução consagrada mundialmente, e sua utilização é muito comum em áreas sujeitas a poluição industrial, névoa salina e/ou instalações litorâneas, com intuito de evitar a ocorrência de descargas disruptivas externas ao longo dos isoladores. No caso da Usina Hidrelétrica de ITAIPU as condições ambientais da região não indicavam a princípio a possibilidade de se defrontar com estas



X SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
19, 20 y 21 de setiembre de 2012

condições adversas, no entanto considerando o porte da usina e o tempo necessário para a entrada em operação das primeiras 18 unidades geradoras (1984 – 1991) houve um período em que instalações energizadas em 500 kV ficaram submetidas a condições ambientais desfavoráveis do ponto de vista de contaminação por poluição, convivendo por cerca de oito anos com um ambiente similar ao de poluição industrial que provocou a ocorrência de descargas disruptivas externas em buchas de 500 kV de transformadores de potência. Em consequência destas ocorrências a área de manutenção de ITAIPU teve de agir com intuito de buscar uma solução técnica para evitar a reincidência de “flashovers” externos que foram verificados nestas buchas em meados dos anos 80; e posteriormente, no final dos anos 2000 uma nova decisão técnica teve de ser tomada em função do final da vida útil do revestimento de borracha de silicone que havia sido aplicado sobre as buchas nos anos 80, considerando as novas condições ambientais vigentes na usina nesta etapa de plena operação e manutenção. NOTA: ao longo deste IT a designação simplificada “RTV” será utilizada para se referir aos elastômeros de silicone (borracha de silicone) aplicados sob a forma líquida ou spray, e vulcanizáveis a temperatura ambiente, para o revestimento de isoladores de alta tensão.

1.1. Instalações envolvidas

Os serviços auxiliares da Usina Hidrelétrica de ITAIPU tem em cada setor da usina (50 Hz e 60 Hz) como sua fonte principal um banco de três transformadores monofásicos, sendo que cada transformador é dotado de três enrolamentos 525 / 13,8 / 13,8 kV, com potência nominal unitária de 15 MVA, totalizando 45 MVA por banco de transformadores. Este banco de transformadores é alimentado em 500 kV pela Subestação Blindada e Isolada a gás SF₆ (GIS) instalada no interior da Casa de Força da Usina, e seus enrolamentos secundários em 13,8 kV alimentam quadros principais que compõem os serviços auxiliares da usina em 13,8 kV. Na indisponibilidade desta fonte principal (transformadores auxiliares) os serviços auxiliares da Usina de Itaipu contam com fontes alternativas secundárias, sendo que no setor de 50 Hz a fonte é proveniente de uma linha subterrânea em 66 kV proveniente da Subestação da Margem Direita de ITAIPU, e no setor de 60 Hz a fonte secundária é uma linha aérea em 69 kV proveniente da Subestação Foz do Iguazu de propriedade da COPEL. Na hipótese da indisponibilidade das fontes primárias e secundárias dos serviços auxiliares, a Usina de ITAIPU conta em cada setor da usina com 2 grupos de geradores a diesel de 5 MVA cada um, 6,9/13,8 kV, totalizando portanto 10 MVA de geração para cada um dos setores de 50 Hz e de 60 Hz dos serviços auxiliares da usina.

Os bancos de transformadores principais dos serviços auxiliares existentes nos setores de 50 Hz e de 60 Hz da Usina Hidrelétrica de ITAIPU, foram fornecidos com buchas papel-óleo (OIP) de 500 kV tipo OKTF, de fabricação Felten & Guillaume, e entraram em operação em 1984. Nestas buchas de 500 kV ocorreram descargas disruptivas externas (“flashovers”) nos anos 80, conforme relatado a seguir.

1.2 Início da operação de ITAIPU e as condições ambientais vigentes nos anos 80

A Usina Hidrelétrica de ITAIPU, em função de suas dimensões e potência instalada, foi construída e colocada em operação em etapas que demandaram vários anos consecutivos de

X SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
19, 20 y 21 de setiembre de 2012

construção e montagem, sendo que o início da construção ocorreu em meados dos anos 70, e a entrada em operação das últimas unidades geradoras se verificou em meados dos anos 2000. Em função deste cronograma relativamente extenso houve um período em que instalações energizadas em 500 kV, conviveram com uma rotina diária de montagem eletromecânica de vulto, e ficaram sujeitas as condições ambientais típicas de um ambiente de poluição industrial. No período compreendido entre 1984 e 1991 o contingente de trabalhadores alocados na Usina Hidrelétrica de ITAIPU e envolvidos com as atividades de construção, montagem eletromecânica, operação e manutenção, oscilou entre 18.000 e 10.000 pessoas.

2. OCORRÊNCIA DE DESCARGAS DISRUPTIVAS EM BUCHAS DE 500 KV

Em 19.07.1986 ocorreu o desligamento automático do banco de transformadores principais dos serviços auxiliares de 50 Hz (TA 01) da Usina de ITAIPU, pelas proteções de sobrecorrente e diferencial do vão de 500 kV. Inspeção realizada no local indicou a ocorrência de uma descarga disruptiva externa ao longo do isolador de porcelana da bucha de 500 kV (H1) fase T, com sinais de descarga disruptiva e fusão de material na cabeça da bucha e no pé da bucha. Após limpeza da bucha, ensaios elétricos no transformador e na bucha, e análise cromatográfica do óleo isolante de ambos (trafo e bucha) com resultados satisfatórios, o banco foi liberado para retorno à operação.

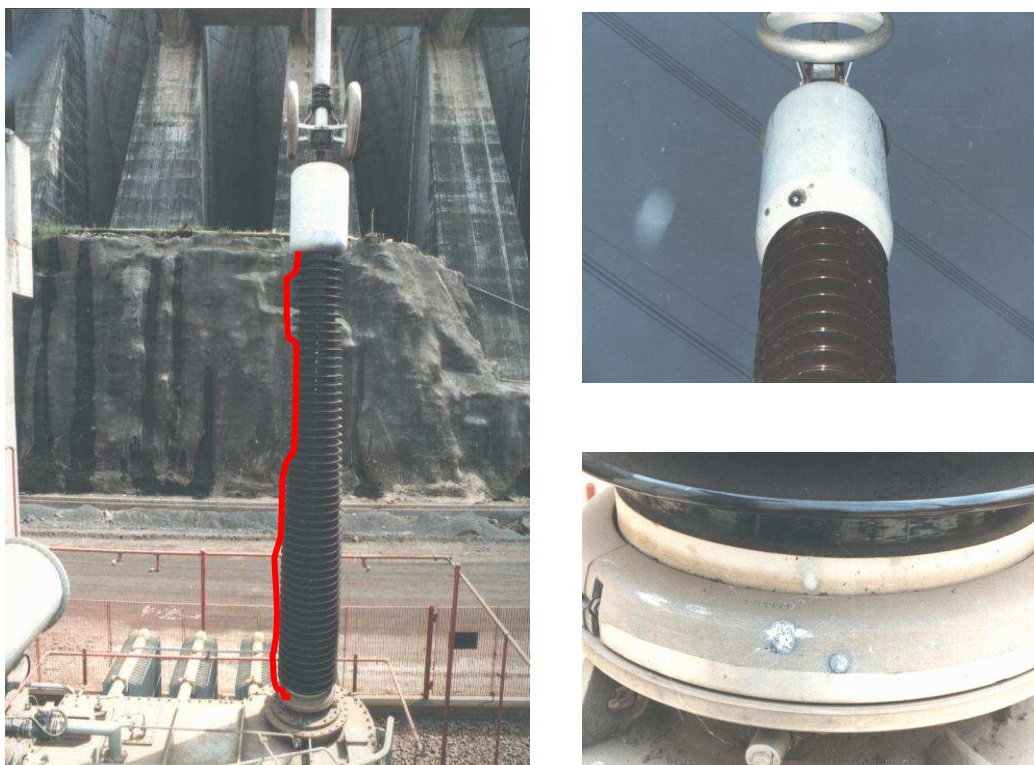


Figura 1 – Esquemático da descarga disruptiva típica e conseqüências do arco elétrico em bucha de 500 kV

X SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
19, 20 y 21 de setiembre de 2012

Em 09.04.1987 ocorreu o desligamento automático do banco de transformadores principais dos serviços auxiliares de 60 Hz (TA 02) da Usina de ITAIPU, pelas proteções de sobrecorrente e diferencial do vão de 500 kV. Inspeção realizada no local indicou a ocorrência de uma descarga disruptiva externa ao longo do isolador de porcelana da bucha de 500 kV (H1) fase A, com sinais de descarga disruptiva e fusão de material na cabeça da bucha e no pé da bucha. Após limpeza da bucha, ensaios elétricos no transformador e na bucha, e análise cromatográfica do óleo isolante de ambos (trafo e bucha), com resultados satisfatórios, o banco foi liberado para retorno à operação.

Em 03.07.1987 com uma diferença de poucos minutos entre os dois eventos, ocorreu o desligamento automático do banco de transformadores principais dos serviços auxiliares de 50 Hz (TA 01) da Usina de ITAIPU, e também do banco de transformadores principais dos serviços auxiliares de 60 Hz (TA 02), os quais estão distantes fisicamente cerca de 700 metros. Inspeções realizadas no local indicaram as mesmas constatações verificadas por ocasião das falhas ocorridas anteriormente em 1986 e 1987, ver Figura 1. Após limpeza das buchas e realização dos ensaios elétricos e cromatográficos os bancos de transformadores TA 01 e TA 02 retornaram a operação.

2.1 Identificação da origem do problema

Após a ocorrência das descargas disruptivas verificadas em 1986 foram feitas análises das ocorrências do ponto de vista elétrico e ambiental, e analisada também a literatura disponível na ocasião (1), na qual concessionárias de energia elétrica e fabricantes de elastômeros de silicone (RTV - Room Temperature Vulcanizing) descreviam o fenômeno da formação das trilhas secas (“dry bands”) como sendo a origem das descargas disruptivas em isoladores submetidos à poluição severa associada às condições de umidade e presença de poluentes condutivos. A área de Manutenção de ITAIPU decidiu então realizar em seu próprio laboratório a análise do material depositado sobre os isoladores de porcelana das buchas de 500 kV, que vinha sendo periodicamente coletado, e os resultados destas análises confirmaram a existência de poluentes condutivos, ver Tabela 1.

Tabela 1 – Condutividade do material coletado sobre as saias de porcelana das buchas

Condição do material poluente	Condutividade em $\mu\text{S}/\text{cm}$
A seco	Não foi possível determinar
Molhado – solução de 0,1 % em água pura	66
Molhado – solução de 0,2 % em água pura	130
Água pura (referência)	2

X SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
19, 20 y 21 de setiembre de 2012

O material que se depositava sobre os isoladores de porcelana dos equipamentos de alta tensão instalados no pé da barragem da Usina de ITAIPU durante os anos 80 era proveniente da intensa atividade que se verificava na ocasião na área da usina, ver Figura 2, e que consistia basicamente de atividades de concretagem, intenso fluxo de veículos pesados e leves, montagem eletromecânica de porte, jateamento de condutos forçados de unidades geradoras, e outras.

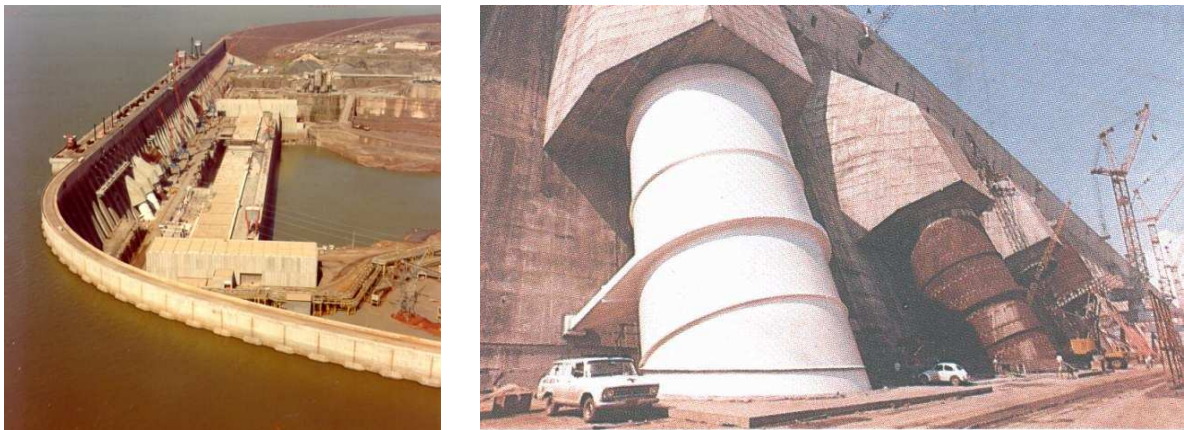


Figura 2 – Estágio das obras civis e montagem eletromecânica em ITAIPU nos anos 80

A análise química dos poluentes realizada em ITAIPU indicou a seguinte composição do material poluente depositado sobre as buchas de 500 kV: SiO_2 – 48,9% de massa, CaO – 11,1% de massa, Fe_2O_3 – 13,6% de massa, Al_2O_3 – 14,2% de massa, MgO – 4,9% de massa, e perda ao fogo de 6,7% de massa, totalizando 99,4%. O resultado da análise permitiu confirmar que o material poluente consistia basicamente de mistura de cimento, terra e cinza, cuja composição típica é apresentada na Tabela 2.

Estes poluentes se depositavam em grande quantidade, e com intensa frequência, sobre os isoladores de porcelana dos equipamentos de 500 kV, e criavam condições desfavoráveis sob o ponto de vista dielétrico, ver Figura 3.

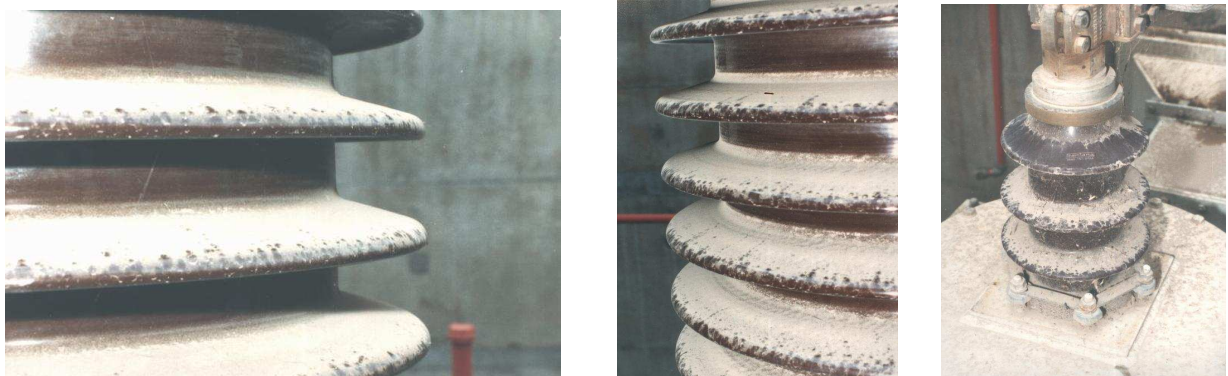


Figura 3 – Deposição de poluentes sobre as buchas de 500 kV e de neutro, dos transformadores

X SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
19, 20 y 21 de setiembre de 2012

Tabela 2 – Composição típica do material poluente coletado da superfície das buchas de 500 kV

Poluente	Composto	Composição
Cimento	CaO	60,65%
	SiO ₂	19,22%
	Al ₂ O ₃	4,6%
	Fe ₂ O ₃	3,4%
Cinza	SiO ₂	50,6%
	Al ₂ O ₃	25,3%
	Fe ₂ O ₃	3,6%

Identificados os poluentes e a sua característica condutiva, foram analisadas as condições nas quais se verificaram as descargas disruptivas ocorridas em 1986 e 1987, e se constatou que as quatro ocorrências foram precedidas por um período de estiagem mais prolongado, no qual o acúmulo de poluentes sobre as buchas se intensificou, e com a chegada da primeira precipitação pluviométrica a descarga disruptiva ocorreu logo nos primeiros instantes após o início da chuva. Este quadro coincidia perfeitamente com a descrição do fenômeno da formação das trilhas secas ou “dry bands” conforme apresentado na literatura disponível (1).

2.2. Providências para correção do problema

Uma vez identificado o mecanismo de formação das descargas disruptivas a área de manutenção de ITAIPU implantou uma periodicidade de limpeza bimestral destas buchas de 500 kV, e passou a analisar a implantação de uma solução definitiva que evitasse os desligamentos frequentes dos bancos de transformadores para manutenção. Também foi analisado o porquê das descargas ocorrerem somente nas buchas de 500 kV dos transformadores auxiliares, e não nos demais equipamentos de 500 kV existentes ao pé da barragem da Usina de ITAIPU. A análise comparativa entre os equipamentos de 500 kV mostrou que dentre os vários equipamentos que operavam na saída da Casa de Força da Usina (para-raios, buchas SF₆ / Ar, isoladores de pedestal, etc) as buchas de 500 kV tipo OKTF instaladas nos transformadores dos serviços auxiliares eram as que apresentavam a menor distância de escoamento, Tabela 3.

X SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
19, 20 y 21 de setiembre de 2012

Tabela 3 – Distância de escoamento dos isoladores de equipamentos de 500 kV instalados no pé da barragem

Equipamento de 500 kV	Distância de escoamento
Pára-raios	11.913 mm
Isoladores suporte de barramentos aéreos	13.025 mm
Bucha SF ₆ / Ar	12.800 mm
Isoladores suporte das Bobinas de Bloqueio	13.000 mm
Buchas OKTF dos Transformadores do Serviço Auxiliar	10.200 mm

Considerando os critérios da norma IEC 60137, verificou-se que as buchas atendiam aos requisitos da norma apenas para a classe I, ou seja, poluição leve, 16 mm/kV. Como as condições na Usina naquela ocasião configuravam um quadro de poluição pesada, ficou evidente que as buchas não apresentavam uma distância de escoamento adequada. Deste modo foram analisadas as soluções passíveis de implantação a curto prazo, e a viabilidade de implantação de saias poliméricas de maior diâmetro sobre o isolador de porcelana, as chamadas “rubber sheds” para aumento da distância de escoamento; e também a aplicação de elastômero de silicone, ou RTV, sobre as buchas de 500 kV. Após uma análise das soluções mais viáveis a ITAIPU, em conjunto com o fabricante do transformador, optou pela aplicação do RTV.

2.3 Implantação da solução técnica

A ITAIPU e o fabricante dos transformadores optaram pela aquisição do produto Sylgard Q3-6539, de fabricação norte americana (Dow Corning), cuja aplicação foi realizada sob a forma de spray com uso de pistola atomizada sobre a superfície dos isoladores de 500 kV. Para a aplicação do RTV sobre as buchas foi elaborado um planejamento com o fabricante do transformador sendo definido que a aplicação do produto seria realizada por um supervisor do fabricante, e o maquinário e pessoal de apoio seria fornecido por ITAIPU, sendo que os custos de aquisição do produto (Sylgard) foram rateados entre a ITAIPU e o fabricante do transformador. Para aplicação do produto nas 8 buchas de 500 kV (3 transformadores monofásicos + 1 reserva instalado, em cada setor – 50 Hz e 60 Hz – dos serviços auxiliares da Usina) foi previsto o desligamento de cada banco de transformadores por um período de 15 dias. Neste período foi realizada a montagem de andaimes ao redor de cada transformador monofásico, cobertura do local com utilização de lonas plásticas, ventilação do ambiente

X SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
19, 20 y 21 de setiembre de 2012

confinado, fonte de ar comprimido para aplicação do RTV sob a forma de spray, além dos demais recursos para viabilizar a correta e segura aplicação do produto, ver Figura 4.

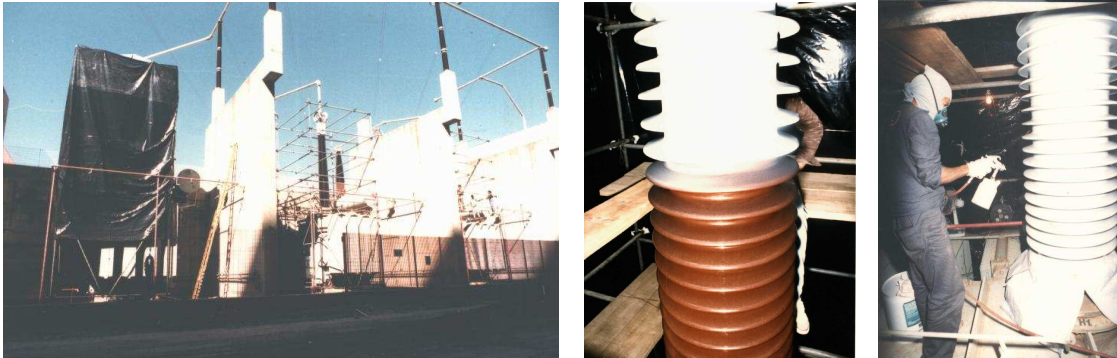


FIGURA 4 – Aplicação do RTV nas buchas de 500 kV no ano de 1988

Após a aplicação do produto sobre as buchas dos transformadores de 50 Hz, o procedimento foi repetido de modo idêntico sobre as buchas dos transformadores de 60 Hz. A aplicação do RTV nas buchas dos transformadores de 50 Hz (TA 01) foi realizada de 04 a 21.04.1988, e a aplicação nos transformadores de 60 Hz (TA 02) foi realizada de 23.04 a 6.05.1988. Ao final dos trabalhos foi verificado que a aparência da camada de RTV aplicada, bem como a espessura final, indicava um ótimo resultado, ver Figura 5. A espessura média da película de RTV sobre os isoladores de porcelana obtida após a cura do produto foi estimada como superior a 1,0 mm.



FIGURA 5 – Aparência final das buchas de 500 kV após a aplicação do RTV em 1988

3. DESEMPENHO DO RTV APLICADO EM 1988 NAS BUCHAS DE 500 KV

Com a conclusão dos trabalhos de aplicação do RTV sobre as buchas dos transformadores em 1988, a área de manutenção da ITAIPU deixou de realizar as limpezas bimestrais das buchas de 500 kV, e voltou a adotar a manutenção bienal com equipamento desligado, para inspeção e limpeza, e manutenções quadrienais para realização de ensaios elétricos e verificações complementares. Deste modo os transformadores operaram normalmente de 1988 até 2005 sem qualquer reincidência de descargas disruptivas externas nas buchas de 500 kV, apesar das



**X SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
19, 20 y 21 de setiembre de 2012**

condições ambientais na Usina ainda terem permanecido desfavoráveis (cimento, poeira, cinza, etc) até meados dos anos 90. Em 2005 a área de manutenção de ITAIPU passou a avaliar a conveniência técnica da continuidade em operação dos transformadores com o RTV aplicado sobre as buchas, uma vez que as condições ambientais no entorno da Casa de Força da Usina haviam melhorado substancialmente e o produto estava aplicado há cerca de 17 anos.

3.1 Avaliação da condição das buchas de 500 kV após 17 anos em operação com o RTV

A área de Manutenção de ITAIPU realizou pesquisa na literatura técnica e encontrou relato de instalações de classe de tensão < 345 kV operando com RTV aplicado há mais de 10 anos (2,3); no entanto não foi encontrada informação disponível sobre o tempo máximo de operação de instalações de 500 kV revestidas com elastômero de silicone (RTV), que auxiliasse a ITAIPU na tomada de decisão. Assim em 2005 foi realizada avaliação da camada de RTV das buchas de 500 kV e foi constatada uma redução significativa da hidrofobicidade, e também uma leve deterioração superficial da camada com pequena liberação de material sólido devida provavelmente a ação prolongada da radiação UV. Em função destas constatações ITAIPU decidiu que estas buchas de 500kV deveriam ter o revestimento de RTV removido ou renovado.

3.2 Escolha da opção técnica para a continuidade em operação das buchas de 500 kV

Uma vez consensado tecnicamente em ITAIPU que o revestimento de silicone aplicado sobre as buchas de 500 kV em 1988 encontrava-se em final de vida útil, a área de Manutenção de ITAIPU passou a considerar duas opções técnicas: a) a remoção definitiva do RTV aplicado sobre as buchas e o retorno à operação dos transformadores com as buchas tal qual originalmente fornecidas, devido à melhoria das condições ambientais, e b) a renovação do revestimento de silicone (RTV) com aplicação de uma nova camada sobre a camada existente.

Para a avaliação técnica da opção “a” a ITAIPU consultou o fornecedor original do RTV e a solução técnica indicada foi a remoção através da aplicação de jato de material não abrasivo (sabugo de milho). A ITAIPU considerou esta opção como sendo de implementação mais complexa pela falta de experiência anterior neste tipo de procedimento. Para avaliação da opção “b” a área de manutenção de ITAIPU investigou a experiência existente sobre a reaplicação de RTV em isoladores de alta tensão, e foi verificado que no Reino Unido (UK) havia experiência bem sucedida de aplicação de nova camada de RTV sobre camada envelhecida de RTV em isoladores de 275 kV (3). Deste modo a área de Manutenção de ITAIPU decidiu que a melhor opção técnica seria a aplicação de nova camada de RTV sobre a camada original de 1988.

4. APLICAÇÃO DE NOVA CAMADA DE RTV SOBRE A CAMADA EXISTENTE NAS BUCHAS DE 500 KV

Em 2006 foi realizado o processo de aquisição do elastômero de silicone que viria a ser aplicado sobre as buchas de 500 kV dos transformadores principais dos serviços auxiliares, e no início de 2007 foi recebido em ITAIPU o produto Si-Coat 570 de fabricação canadense (CSL Silicones Inc.). Considerando a experiência que a ITAIPU já possuía com a aplicação de RTV foi elaborado um cronograma de trabalho em conjunto com a equipe de proteção anti-corrosiva existente na empresa, responsável pelas atividades de pintura, de tal modo que foi definido um procedimento de trabalho mais otimizado em relação àquele adotado em 1988. Neste

X SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
19, 20 y 21 de setiembre de 2012

procedimento foi definido que previamente a aplicação do RTV as buchas seriam submetidas a processo de limpeza manual com água e álcool hidratado e secagem com sopro de ar comprimido (3, 4). Deste modo em dezembro de 2007 foi realizada a aplicação do RTV sobre as buchas de 500 kV dos transformadores do setor de 50 Hz; e em maio de 2008 foi realizada a aplicação do RTV sobre as buchas de 500 kV dos transformadores de 60 Hz, ver Figura 6.



Figura 6 – Aplicação do RTV sobre as buchas dos transformadores de 60 Hz em maio de 2008.

5. CONCLUSÃO

A ocorrência de descargas disruptivas externas em isoladores de porcelana de buchas de 500 kV em ITAIPU mostrou a importância em se considerar nas especificações técnicas não somente as condições ambientais normalmente vigentes na área escolhida para o aproveitamento hidrelétrico, ou subestação de transmissão, mas também aquelas condições ambientais que serão verificadas durante a fase de implantação do empreendimento. A experiência adquirida por ITAIPU na utilização de elastômeros de silicone (RTV) nas buchas de 500 kV confirmou a eficácia deste produto para evitar a ocorrência de “flashovers” em isoladores submetidos a condições ambientais adversas do ponto de vista da presença de poluentes condutivos. Também foi possível constatar que é viável realizar um recobrimento (re-coating) da camada de RTV originalmente aplicada, quando condições de aderência e resistência mecânica da camada original ainda estiverem presentes.

BIBLIOGRAFIA

- (1) TERRY R. ADAMS and ED REYNAERT, “Performance of SYLGARD High Voltage Insulator Coating for Porcelain Insulators at the Idaho Power Donn Substation”, Dow Corning Corporation, Form number 10.285, 1986.
- (2) BRUCE CAMPBELL, “Silicone Rubber Insulators for High-Voltage Transmission Lines”, Dow Corning Corporation, Midland, Michigan, Form number 10.561, de 1993.
- (3) Case History, “National Grid 275 kV Substation: Cleaning and applying a Sylgard overcoat to Earth Switch Bushings and Support Post Insulators”, Dow Corning Corporation, de 2006.
- (4) Technical Data Sheet, Si-Coat 570, RTV Silicone High Voltage Insulator Coating, CSL Silicones Inc., de 2004.



Comité Nacional Paraguayo



Unión de Ingenieros de ANDE

X SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
19, 20 y 21 de setiembre de 2012
