SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA

GSE - 29
16 a 21 Outubro de 2005
Curitiba - Paraná

GRUPO VIII
GRUPO DE ESTUDO DE SUBESTAÇÕES E EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS – GSE

SOLUBILIDADE DO AR EM SF_6 FASE LÍQUIDA VERSUS TEMPERATURA, E SUA APLICAÇÃO PARA PURIFICAÇÃO DO SF_6

José Guilherme Rodrigues Filho *

ITAIPU BINACIONAL – SMIE.DT

Eleceu Barz

ITAIPU BINACIONAL – SMMT.DT

RESUMO

O manuseio do gás SF_6, seja para manutenção preventiva ou para reparo após falha, em equipamentos de alta-tensão que utilizam este meio como dielétrico, acaba por introduzir pequenas quantidades de ar, quer nas conexões tipo engate rápido ou no processo de vácuo prévio ao re-enchimento. Após algumas intervenções este teor pode alcançar o limite recomendado pela IEC-376 (1), que é de 0,05% (500 ppm_m). Para retirar esta contaminação, os processos disponíveis de filtragem através de cartuchos de adsorsão com 70% de Al_2O_3 e 30% de peneira molecular 4 Angstrom, não se mostram eficazes (2).
O procedimento descrito, utilizando dos recursos disponíveis nas próprias unidades para manuseio do SF_6(3), permite através da separação por temperatura de liquefação, purificar o SF_6 de forma a obter teores residuais de ar da ordem de 0,001%, cinqüenta vezes inferior ao limite recomendado pela IEC-370.
O processo também reduz à níveis de ND (Não Detectado), a contaminação por CF_4, subproduto da decomposição do SF_6 em presença de arco, comum no caso de compartimentos de manobra como disjuntores, chaves seccionadoras ou após falhas envolvendo descargas através do dielétrico.

PALAVRAS-CHAVE

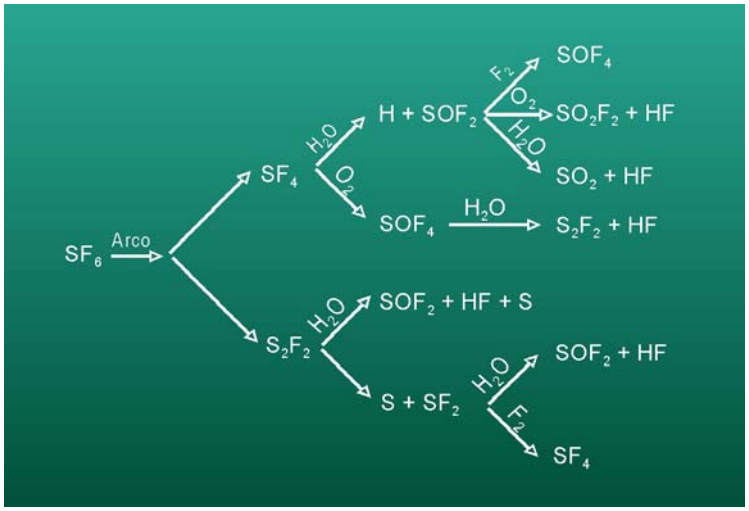
Purificação Regeneração SF_6, Contaminação SF_6 AR CF_4.

1.0 - INTRODUÇÃO

Apesar das Subestações e equipamentos isolados a gás SF_6 terem recebido a alcunha de "Maintenance Free" por parte dos fabricantes, observa-se hoje a necessidade de intervenções, quer para atividades preventivas, quer para corretivas. Essas intervenções implicam em manuseio do gás, para sua retirada dos compartimentos e posterior re-enchimento. Nestes processos existem dois momentos em que se são introduzidas pequenas quantidades de ar à massa de SF_6 que esta sendo manuseada.
O primeiro, e mais comum, é quando da re-conexão de mangueiras através de engates rápidos, uma vez que sempre fica um pequeno volume de ar no ponto de acoplamento do engate rápido.
O segundo e normalmente o responsável pela introdução da maior quantidade de ar, é o valor final da pressão (Vácuo) que se atinge antes do re-enchimento com SF_6.
Como exemplo, se durante o período de vácuo for atingido o valor de 0,5 mmHg de pressão absoluta, ao se proceder ao enchimento com SF_6 até a pressão de 500 kPa, absoluta, fica um residual de ar equivalente à 0,013%. Nestas condições, após um segundo processo de re-enchimento já se terá contaminado o SF_6 com teores próximos do limite. Se por algum motivo, como restrição de tempo ou performance das bombas de vácuo, não foi obtido um valor final de vácuo desejado, a contaminação será ainda maior.

*USINA HIDRELÉTRICA DE ITAIPU – Av. Tancredo Neves, 6731 – Foz do Iguaçu - PR - BRASIL
Tel.: (45) 520-2696 - e-mail: jgrfilho@itaipu.gov.br

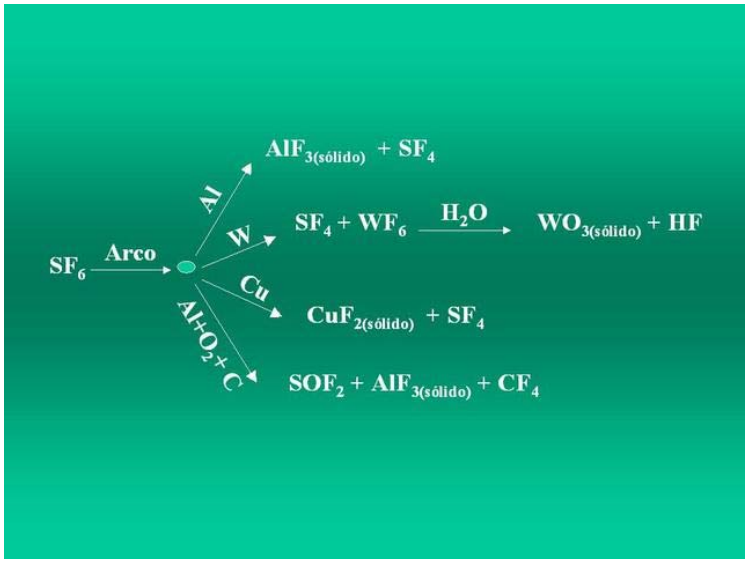
A simples contaminação por baixos percentuais de ar não chega a comprometer o desempenho do SF_6 como dielétrico, mas associado à umidade, mesmo em baixos teores, e em presença de arco elétrico, como nos compartimentos de manobra, chaves seccionadoras e disjuntores, permite que sejam formados subprodutos sólidos e gasosos que podem comprometer a médio prazo o dielétrico e o desempenho do equipamento.
A árvore dos subprodutos formados a partir do SF_6, em presença de arco elétrico esta ilustrada na Figura 1 para subprodutos gasosos e na Figura 2 para subprodutos gasosos e sólidos.



Os principais subprodutos gasosos são:

HF	Fluoreto de Hidrogênio
SO_2	Dioxido de enxofre
SOF_2	Fuoreto de tionila
SO_2F_2	Difluoreto de sulfurila
SF_4	Tetrafluoreto de enxofre

Figura 1- Decomposição do SF_6 em subprodutos gasosos



Os principais subprodutos sólidos são:

AlF_3	Fluoreto de alumínio
WO_3	Oxido de tungstênio
CuF_2	Fluoreto de cobre

Figura 2 - Decomposição do SF_6 em subprodutos sólidos

Tanto a deposição dos subprodutos sólidos nas superfícies dos isoladores poliméricos como as reações secundarias com os subprodutos gasosos mais agressivos, HF e SO_2, têm como conseqüência a formação de camadas condutivas sobre as superfícies isolantes:

$$\mathbf{HF + SiO_2 = SiF_4 + 2H_2O}$$

Fica evidente que em se mantendo o mais baixo possível os teores dos reagentes primários com o SF_6, que são a água(H_2O) e o oxigênio(O_2), e também dos subprodutos, menor será o grau de formação de camadas condutivas sobre as superfícies isolantes.

Este controle deve ser feito através de:

1- Medição do ponto de orvalho, que permite obter o teor de umidade;
2- Medição do teor de pureza (%) do SF_6, que pode ser verificado utilizando aparelhos baseados na comparação da velocidade de propagação do som no SF_6 da amostra com a velocidade para o SF_6 puro;
3- Análise fisico-química de amostra para determinar o teor específico de cada contaminante em ppm.

Os teores máximos aceitáveis de contaminação (massa/massa) para SF_6 novo recomendados pela IEC-376 são:

H_2O	Umidade	15 ppm
HF	Fluoreto de Hidrogênio	0,3 ppm
SOF_2	Fluoreto de tionila	*
SO_2F_2	Difluoreto de sulfurila	*
SF_4	Tetrafluoreto de enxofre	* (1,0 ppm total de fluoretos)
CF_4	Tetrafluoreto de carbono	0,05% (500 ppm)
AR	Oxigênio + Nitrogênio	0,05% (500 ppm)

Uma vez detectado a superação destes valores deve-se analisar o comprometimento do equipamento e para cada condição programar o tratamento adequado.

2.0 – O CONTROLE DO SF_6 NA ITAIPU

Visando preservar ao máximo a integridade dos equipamentos, assim como a confiabilidade do sistema, ITAIPU procura manter os 110.000 kg de SF_6 de sua SIG dentro do padrão para gás novo, principalmente nos equipamentos de manobra.
Isto é feito através de medições do teor de umidade (ponto de orvalho) e de pureza (velocidade de propagação do som) a cada dois anos.
Ao final do ano de 1999, com uma massa de aproximadamente 600 kg de SF_6 (12 cilindros de 50 kg) contaminados com valores em torno de 0,15% de ar e de 0,10% de CF_4, acumulados após uma manutenção over-haul (1995 à 1998) em todos os 52 disjuntores da SIG de ITAIPU, foram aplicados os métodos convencionais de purificação em diversos cilindros, sem que se obtivesse o resultado desejado.
Embora a literatura cite como meios de purificação a filtragem através de cartuchos de adsorsão com 70% de Al_2O_3 e 30% de peneira molecular 4 Angstrom, a separação por liquefação do SF_6 e a separação por diferença de densidade. Estes três métodos não se mostraram capazes de obter o resultado de pureza desejado para contaminação por O_2 e CF_4.
Na análise dos resultados, verificou-se que mesmo sem atingir o patamar desejado de 0,05%, nos cilindros em que pela evaporação de parte da fase líquida houve uma acentuada queda de temperatura na massa restante, foram alcançados os patamares mais baixos de contaminação.
Alterando o procedimento de forma a obter por evaporação da fase líquida do SF_6, uma queda de temperatura até o “congelamento” da mesma, e procedendo-se então a sua separação, foi possível atingir patamares da ordem de 0,01% para teor de ar e de ND (Não Detectado) para CF_4 , valores plenamente satisfatórios.
A redução da temperatura por evaporação da fase líquida foi obtida pelo transvasamento forçado entre “cilindros” de 50 kg através de um compressor (19 m^3/h - 50 bar - "Oil Free" da Haug), sendo necessário a evaporação de aproximadamente 20 kg até o “congelamento” dos 30 kg restantes. Obteve-se com este processo temperaturas da ordem de 60 graus Celsius negativos.
Pôde-se assim após sucessivos “transvasamentos forçados”, com uma taxa de recuperação de 60 % a 70% em cada ciclo, chegar a um total de 580 kg recuperados. Aos 20kg restantes, com maior concentração de ar e CF_4, aplicou-se separação por liquefação/densidade e se juntou ao próximo lote a ser recuperado. De 1999 até o presente já foram recuperados com este método em torno de 2400 kg de SF_6.

3.0 – DESENVOLVIMENTO DO PROCESSO DE PURIFICAÇÃO

Como em consulta aos meios técnicos e acadêmicos não foram obtidas informações específicas sobre a “provável” diferença de solubilidade do AR (O_2 + N_2) ou do CF_4 em SF_6 fase líquida em função da temperatura, de forma a obter um melhor entendimento do fenômeno físico que deu suporte ao método utilizado e otimizar o processo de tratamento, foram realizadas as medições para determinação dos teores de AR e CF_4 encontrados no SF_6 após a redução para diversos patamares de temperatura.
Este levantamento, assim como o método aqui apresentado certamente irão subsidiar futuras melhorias nos processos de purificação e manuseio do gás, assim como proporcionar um melhor entendimento das características deste elemento chave das SE’s Isoladas a gás e cada vez mais comum em equipamentos de manobra das SE’s convencionais.
Para permitir a medição da temperatura do SF_6 em diversos patamares e as correspondentes amostragens para determinação dos teores residuais de contaminação por AR e CF_4, foram instalados em um vaso de pressão,

originalmente um extintor de incêndio para 6 kg de CO_2, os seguintes acessórios, conforme Figuras 3 e 4 :

- uma bainha de termômetro, para acesso a parte interna do cilindro e instalação de um termopar
- uma válvula de amostragem, para conexão ao cilindro de amostragem
- uma válvula de engate rápido tipo Dilo, para conexão ao compressor

Figura 3 – Vaso de pressão e acessórios

Figura 4- Detalhe do experimento durante a amostragem, onde se observa o vaso de pressão sobre a balança, as conexões ao termopar e ao compressor

Provocando a evaporação rápida de parte do SF_6, armazenado na fase líquida no vaso de pressão, utilizando um compressor como meio para estabelecer um alto fluxo para outro cilindro, ocorre no cilindro de origem a queda de temperatura, **resfriamento por evaporação adiabática**.
Graduando-se o tempo de operação do compressor foram obtidos vários patamares de redução da temperatura, sendo atingido o patamar inferior de setenta e um ponto seis graus Celsius negativos, Figura 5.

Figura 5 – Termômetro digital com a indicação do patamar mínimo obtido

A partir de um volume de SF_6 contaminado com 2,5% de AR e 0,1% de CF_4, foram coletadas amostras em oito patamares de redução de temperatura.
Os valores obtidos estão mostrados na Tabela 1 e plotados nos gráficos das Figuras 6 e 7.

Da observação da TABELA 1, dos gráficos das Figuras 6 e 7, verifica-se que para temperaturas da ordem de **–10 °C** (dez graus Celsius negativos), tanto o teor de contaminação por AR como por CF_4 já se tornam compatíveis (inferiores) ao recomendado pela IEC-376 para gás novo. Para temperaturas inferiores a **–20 °C** (vinte graus Celsius negativos), obtém-se teores de contaminação dez vezes inferiores ao recomendado, sendo que para estes valores muito baixos do teor de AR passa a haver uma oscilação nos resultados, o que pode ser atribuído ao processo de amostragem e medição.

Tabela 1 – Teores residuais de AR e CF_4 versos temperatura

Temperatura [°C]	AR [%]	CF4 [%]
20,0	2,5000	0,1000
0,0	0,2500	0,0870
- 10,0	0,0050	0,0200
- 22,3	0,0020	0,0070
- 32,9	0,0041	ND
- 42,3	0,0030	ND
-51,7	0,0074	ND
- 60,8	0,0017	ND

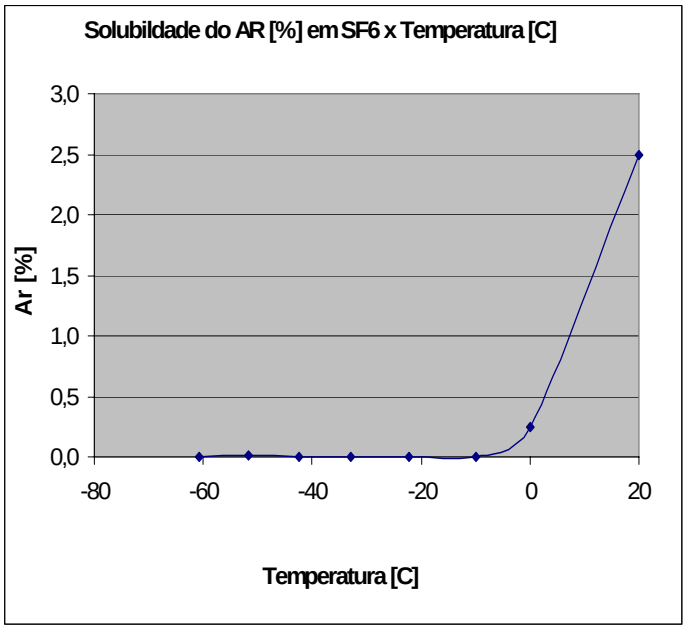


Figura 6 – Teor do Ar em SF_6 x Temperatura

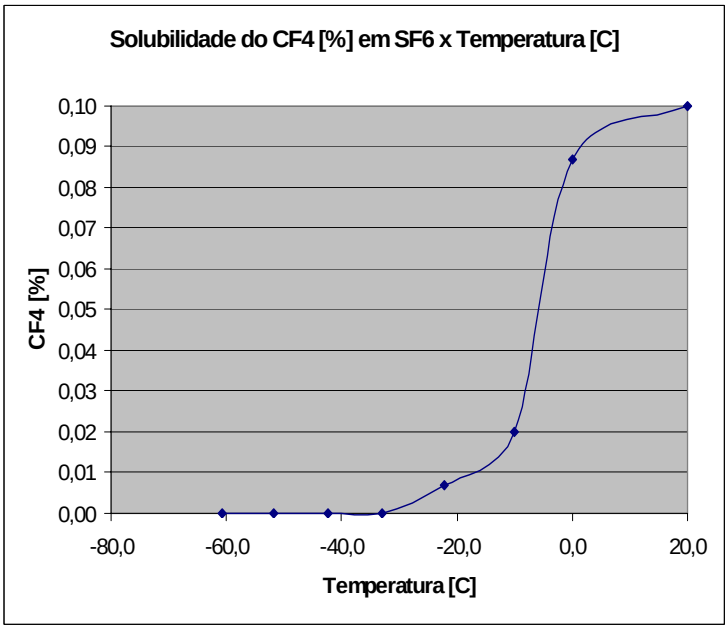


Figura 7 – Teor de CF_4 em SF_6 x Temperatura

4.0 – CONCLUSÕES

Pela correlação obtida nas curvas de solubilidade tanto do AR como do CF_4, verifica-se que redução da temperatura é um método eficaz para reduzir o teor destes contaminantes do SF_6 em sua fase líquida.
Observa-se ainda que para se atingir o valor normatizado, 0,05%, não há necessidade de se chegar a valores extremamente baixos de temperatura, podendo-se adotar com boa margem de segurança o valor de – 20 °C.

Tendo a ITAIPU os recursos necessários para execução do processo no campo, podemos concluir que temos o domínio da técnica para recuperação do SF_6, sem a emissão de frações contaminantes ou do próprio SF_6 para a atmosfera.
O processo pode ser aplicado tanto para pequenos volumes, no caso de se ter o SF_6 armazenado em cilindros de 50 kg, Figura 8, como para grandes volumes, no caso de se ter o armazenamento em cilindros de 600 kg, Figura 9. Observa-se que em ambos os casos, a redução de temperatura da fase líquida chega a criar uma fina camada branca de gelo na base do cilindro, demarcando a altura em ficou a fase líquida no cilindro de origem.

Figura 8 – Processo de purificação utilizando cilindros de 50 kg

Figura 9 – Processo de purificação utilizando cilindros de 600 kg

5.0 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

(1) IEC 376. Specification and acceptance of new sulphur hexafluoride

(2) CIGRÉ WG23-10 TASK FORCE 01. SF_6 RECYCLING GUIDE

(3) DILO Armaturen und Anlagen GmbH. Instruções de operação para carro de serviço 3-005-C