

# Avaliação da degradação de hexafluoreto de enxofre em equipamentos elétricos isolados a gás

C. C. Santos, ELETRONORTE, T. Wortelmann, GAS, M. Mattoso, LACTEC, E. M. Trindade, LACTEC, H. M. Wilhelm, LACTEC<sup>1</sup>

**Resumo** - Neste trabalho foi validado em laboratório e em campo o espectrômetro de mobilidade iônica (IMS), equipamento indicado para monitorar a qualidade do gás SF<sub>6</sub> isolante de forma *on line*. A validação do IMS em laboratório foi realizada através da técnica de espectrometria na região do infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) e em campo, através de ensaios em vários disjuntores da ELETRONORTE.

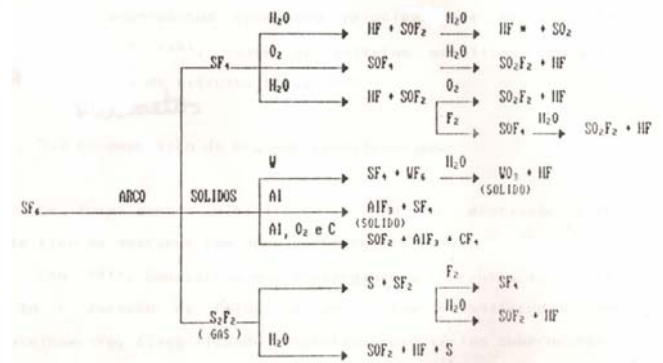
**Palavras-chave:** hexafluoreto de enxofre, SF<sub>6</sub>, disjuntor, espectrometria de mobilidade iônica, subprodutos.

## I. INTRODUÇÃO

O gás hexafluoreto de enxofre (SF<sub>6</sub>) é utilizado como isolante em equipamentos elétricos como transformadores, religadores, disjuntores, entre outros. Quando submetido a uma descarga elétrica, a molécula de SF<sub>6</sub> pode formar diversos íons e moléculas neutras, dependendo do tipo de excitação e da qualidade da energia envolvida. Após a interrupção da descarga e com o resfriamento do meio, ocorre uma recomposição parcial do gás (reações reversíveis) com formação de diversos subprodutos. Pois, o equipamento elétrico isolado contém substâncias que apresentam grande afinidade com os elementos enxofre e flúor, como materiais evaporados dos eletrodos e materiais de revestimentos como vidro, cerâmica, plástico, oxigênio e água.

Assim, o gás isolante SF<sub>6</sub> possui um tempo de vida útil, que é dependente do número e da intensidade de descargas elétricas parciais que ocorrem no equipamento à medida que este estiver em operação. Quanto maior a frequência e a intensidade de arcos elétricos, mais rápido será o processo de envelhecimento do gás, com formação de uma solução gasosa de vários subprodutos em uma matriz de SF<sub>6</sub> (Figura 1). O subproduto dominante do desgaste elétrico é o fluoreto de tionila (SOF<sub>2</sub>), e os demais subprodutos encontrados na forma de traços são o dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>), o sulfeto de carbonila (COS) e o tetrafluoreto de enxofre (SF<sub>4</sub>). A maioria dos subprodutos formados é extremamente tóxica e corrosiva, podendo reagir com superfícies metálicas, como os materiais constituintes dos eletrodos como alumínio (Al), tungstênio (W) e cobre (Cu), e outros componentes para formar moléculas mais estáveis. No caso dos eletrodos são

formados fluoretos metálicos como AlF<sub>3</sub>, WF<sub>6</sub> e CuF<sub>2</sub> (Figura 1). Estes fluoretos metálicos, geralmente, encontram-se no estado sólido e permanecem depositados no interior dos equipamentos elétricos. Os eletrodos tornam-se deformados e desgastados devido ao ataque químico, prejudicando seu desempenho. Materiais de isoladores (resina epóxi, polietileno, SiO<sub>2</sub>) também podem reagir com os subprodutos, levando a formação de CF<sub>4</sub> e SiF<sub>4</sub>.



**Figura 1.** Subprodutos provenientes da decomposição do gás SF<sub>6</sub> submetido a arco elétrico.

Em geral, problemas de segurança de trabalho podem ser gerados devido ao acúmulo dos subprodutos da decomposição do gás isolante nos equipamentos isolados com SF<sub>6</sub>. Além disso, podem ocorrer falhas na operação normal do equipamento, comprometendo a confiança técnica na continuidade da operação.

Do ponto de vista toxicológico os valores máximos aceitáveis para os subprodutos da decomposição do SF<sub>6</sub> ainda não estão definidos para todos os compostos (Tabela 1). O AlF<sub>3</sub>, por exemplo, é um agente irritante para a pele, para os olhos e para o sistema respiratório, sendo classificado como produto tóxico para ingestão. O CuF<sub>2</sub> pode causar sérios danos aos olhos, à pele e irritações pulmonares. O WF<sub>6</sub>, além do danos provocados pelo CuF<sub>2</sub>, pode desencadear edemas pulmonares fatais, hipocalcemia e interferir em várias funções metabólicas vitais, inclusive em órgãos como coração, fígado e rins.

Os subprodutos gasosos são todos de alta toxicidade e absoluta corrosividade ao sistema respiratório humano, devendo o gás envelhecido ser manipulado com o máximo de atenção e cuidado.

**Tabela 1.** Concentrações máximas aceitáveis de contaminantes em gás SF<sub>6</sub> em uso.

C. C. Santos trabalha nas Centrais Elétricas do Norte do Norte do Brasil (e-cleusomir@eln.gov.br).

T. Wortelmann trabalha na G.A.S. Gesellschaft für analytische Sensorsysteme mbH (wortelmann@gas-dortmund.de).

M. Mattoso trabalha no Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (e-mail: mauricio@lactec.org.br).

E. M. Trindade trabalha no Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (e-mail: trindade@lactec.org.br).

H. M. Wilhelm trabalha no Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (e-mail: helenaw@lactec.org.br).

Contaminante	Concentração máxima aceitável
HF	2 mg/m <sup>3</sup> (3 ppm)
S <sub>2</sub> F <sub>10</sub>	0,25 mg/m <sup>3</sup> (0,025 ppm)
SO <sub>2</sub>	13 mg/m <sup>3</sup> (5 ppm)
Fluoretos	25 mg/m <sup>3</sup>

A utilização de materiais adsorventes em equipamentos isolados a gás SF<sub>6</sub> é um procedimento normal para eliminação de umidade e subprodutos da degradação elétrica do gás. A umidade pode ser oriunda dos materiais poliméricos do interior do equipamento e da dessorção normal das superfícies metálicas, expostas anteriormente a ambientes com alguma umidade presente e, principalmente, de possíveis vazamentos gerados durante a manutenção e operação do equipamento. Os principais materiais adsorventes utilizados são a peneira molecular e a alumina. Estes materiais são compostos de substâncias inorgânicas do tipo zeólitas, com silicatos de magnésio e alumínio. A aplicabilidade deste tipo de material é indiscutível e são capazes de adsorver umidade com extrema rapidez e amplitude. Porém, a adsorção de subprodutos não é tão elementar, já que a avidéz reacional do material é por moléculas de água. Uma vez que os sítios ativos estão preenchidos, a interação com os subprodutos fica prejudicada. Como a umidade está presente desde o fechamento do equipamento para a instalação, a adsorção de água já começa a ocorrer antes do início da operação. Assim, quando o processo de degradação do gás iniciar, a adsorção dos subprodutos já está em segunda escala. Dessa forma, a qualidade da alumina utilizada e assim, a avaliação da sua capacidade de adsorção, é fundamental para garantir o poder isolante do gás SF<sub>6</sub>.

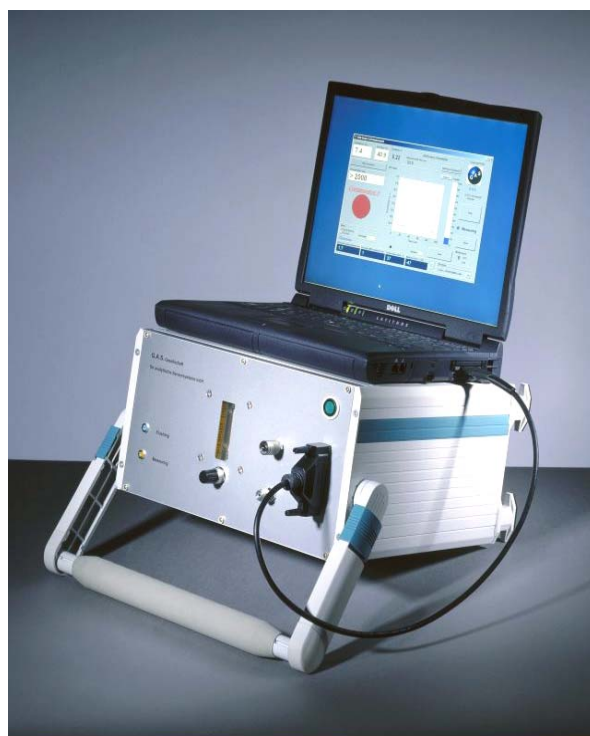
A única forma de verificar a qualidade do gás isolante SF<sub>6</sub> utilizado em equipamentos do setor elétrico é através da detecção dos subprodutos da sua decomposição. Os resultados dessa análise servem de diagnóstico para inferir, de forma indireta, sobre o funcionamento dos equipamentos isolados, permitindo a atuação preditiva do setor de manutenção. Adotando essa metodologia, falhas podem ser evitadas, até mesmo uma parada obrigatória de máquina, o que significa um menor custo operacional.

A única metodologia proposta comercialmente e disponível até o momento, capaz de avaliar a qualidade do gás SF<sub>6</sub> em uso, em campo e de forma *on line* é a **espectrometria de mobilidade iônica (IMS)**. Esta técnica permite a observação, de uma forma simples e direta, de processos que estão ocorrendo dentro do equipamento isolado. O princípio de funcionamento do equipamento de IMS é baseado na diferença de velocidade dos íons gerados após aplicação de uma descarga elétrica parcial no gás em uso, comparativamente ao gás SF<sub>6</sub> novo. O sistema registra o tempo de translação desses íons até uma placa de Faraday. Quanto maior a diferença entre esses tempos, maior será a diferença química entre o gás SF<sub>6</sub> em uso e o novo, indicando que algo anormal está ocorrendo no sistema investigado.

No entanto, este tipo de equipamento ainda não foi validado nacionalmente com medições realizadas em campo. Assim, este trabalho teve por objetivo validar um espectrômetro de mobilidade iônica em laboratório e em campo, através de um conjunto de medidas realizadas em disjuntores da ELETRONORTE.

## II. EXPERIMENTAL

Foi adquirido um IMS portátil da G. A. S., Gesellschaft für analytische Sensorsysteme mbH (Figura 2), da Alemanha. A técnica de IMS foi validada em laboratório através de análises comparativas com a técnica de Espectrometria na Região do Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR). Nesta validação foram utilizadas amostras de gás SF<sub>6</sub> novo, e de SF<sub>6</sub> padrão (gás SF<sub>6</sub> contaminado em laboratório com subprodutos de degradação, adquiridos separadamente, em concentrações variadas). Dessa forma, foi possível avaliar a resposta do IMS. As análises espectroscópicas foram realizadas em um espectrômetro modelo DA-8. O espectrômetro DA-8 apresenta uma série de vantagens sobre um espectrômetro de infravermelho convencional, como vácuo opcional no compartimento de amostras e alta resolução. É ainda provido de compartimento duplo de amostras, permitindo a utilização de duas celas de gases.



**Figura 2.** Espectrômetro de mobilidade iônica (IMS).

Visando a validação do IMS em campo, como ferramenta na manutenção preditiva para diagnosticar a qualidade do gás SF<sub>6</sub>, foram realizados ensaios em equipamentos operando em subestações da ELETRONORTE, com diferentes localizações (Figura 3).



**Figura 3.** Validação do IMS em campo.

O procedimento resumido adotado para a realização das medidas em campo, visando à avaliação da qualidade do gás SF<sub>6</sub> em disjuntores através do IMS, consistiu em:

**1.** Preparo do IMS para as medidas. O IMS foi purgado com gás SF<sub>6</sub> novo durante pelo menos 10 minutos no próprio local da inspeção, diretamente de um cilindro contendo gás SF<sub>6</sub> novo, disponibilizado pela concessionária.

**2.** Análise do gás SF<sub>6</sub> novo (**medida de referência**). Após a purga do IMS com SF<sub>6</sub> novo foi realizada uma análise deste gás pelo IMS. O *software* que acompanha o equipamento, além de mostrar o espectro, mostra também o tempo de translação dos íons gerados pelo gás sob análise, e possibilita a exportação dos dados no formato ASCII.

**3.** Análise do gás em uso (**medida da amostra**). O IMS foi conectado ao disjuntor pelo corpo técnico da concessionária, através de um engate rápido e a medida foi realizada *on-line*, sem o desligamento da máquina. Além de parâmetros da medida de referência, o *software* exibe durante a medida da amostra o espectro das medidas de referência e de amostra. No final da medida é exibido na tela o grau de contaminação do compartimento analisado. O grau de contaminação do gás em uso é calculado pelo *software* através do deslocamento do seu pico comparativamente ao da medida de referência. De acordo com o IMS, a extensão da contaminação do gás em uso pode ser classificada em três níveis: baixa contaminação, contaminação e alta contaminação (Tabela 2).

**Tabela 2.** Parâmetros utilizados pelo IMS para classificar a qualidade do gás SF<sub>6</sub> analisado.

Classificação do gás analisado	Deslocamento do pico (ms)	Concentração dos subprodutos de degradação (ppm <sub>v</sub> )
Pureza OK	0 até 1,5	< 500
Baixa Contaminação	1,5 até 3	500 - 1000
Contaminação	3 até 6	1000 - 2000
Alta Contaminação	> 6	> 2000

**4.** Finalização da medida da amostra. Ao término da medida da amostra o IMS foi desconectado do disjuntor.

**5.** Limpeza do IMS. O IMS foi novamente conectado ao cilindro contendo SF<sub>6</sub> novo e circulado com este gás por pelo menos 10 minutos antes de ser desligado.

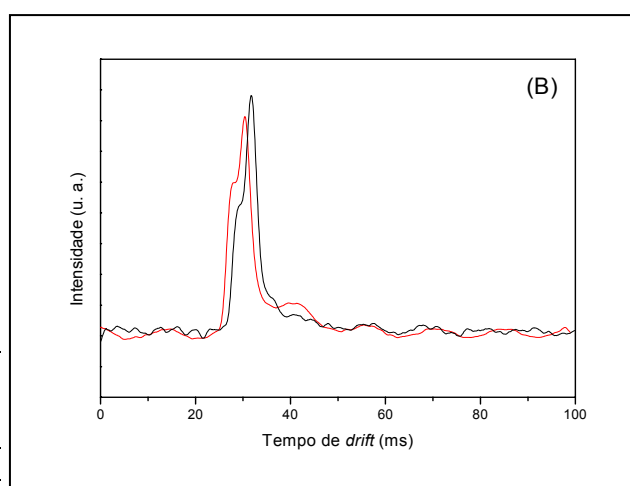
**6.** Análise do gás SF<sub>6</sub> em outro disjuntor. Após o procedimento de limpeza descrito no item 5, outro disjuntor foi analisado.

### III. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O IMS adquirido e utilizado neste projeto já vem calibrado pelo fabricante para determinação da concentração de subprodutos (sensor de IMS) e para medições complementares de umidade (sensor cerâmico). De acordo com o certificado de calibração emitido pelo BAM (Bundesanstalt für Materialforschung und – prüfung), da Alemanha, a calibração do sensor cerâmico é feita com um sensor de umidade da Michell Instruments, que é um sensor semelhante ao utilizado no equipamento DP19, comumente utilizado nos ensaios de manutenção preditiva, para determinar o *Dew Point* do gás SF<sub>6</sub>.

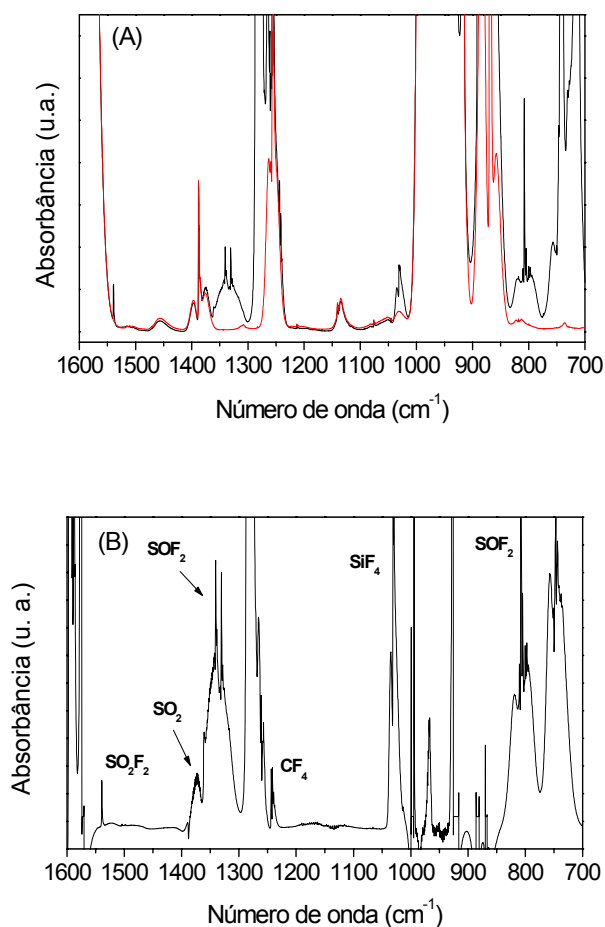
Após aquisição do espectrômetro de mobilidade iônica, foram analisadas, em laboratório, amostras de gás SF<sub>6</sub> novo e padrão (Figura 4). O deslocamento do pico máximo para o gás padrão comparativamente ao novo é um indicativo da presença de subprodutos de degradação nesse gás. Quanto maior este deslocamento, maior a concentração desses subprodutos.

Na Figura 5 estão ilustrados os espectros de infravermelho (FTIR) obtidos para amostras de gás SF<sub>6</sub> novo e padrão. Os resultados mostram que é possível identificar os subprodutos da degradação do gás SF<sub>6</sub> por esta técnica. Na sequência, gás SF<sub>6</sub> padrão foi analisado por IMS. Ambas as técnicas (IMS e FTIR) forneceram teores iguais de contaminantes, indicando a confiabilidade dos resultados emitidos pelo IMS.



**Figura 4.** Espectro de Mobilidade Iônica para o gás SF<sub>6</sub> novo (□) e padrão (□).





**Figura 5.** Espectros de infravermelho para o gás SF<sub>6</sub> novo (■) e padrão (□).

O espectrômetro de mobilidade iônica (IMS) foi validado em campo através de medidas em 4 diferentes locais (subestações) da concessionária. O gás isolante dos equipamentos analisados neste conjunto de medidas em campo foi classificado somente em não contaminado e pouco contaminado, pois não foram encontrados equipamentos com altos teores de contaminação. Na Tabela 3 estão mostrados os percentuais de equipamentos contaminados e não contaminados da concessionária, localizados em diferentes locais.

**Tabela 3.** Classificação da qualidade do gás SF<sub>6</sub> para os equipamentos analisados em campo.

Local de instalação	Número de equipamentos analisados	Número de equipamentos apresentando gás SF <sub>6</sub>	
		Não contaminado	Pouco contaminado <sup>1</sup>
1	10	30 %	70 %
2	12	42 %	58 %
3	2	100 %	0 %
4	26	11 %	89 %

<sup>1</sup> Concentração de subprodutos: 500 – 1000 ppm<sub>v</sub>

#### IV. CONCLUSÃO

O IMS foi validado nacionalmente através de ensaios laboratoriais, utilizando-se a técnica de espectrometria na região do infravermelho, e em campo, de forma *on line*, através de medidas em disjuntores da ELETRONORTE. A partir dessas validações, a utilização do IMS, um equipamento portátil, robusto e de fácil operação, é recomendada para avaliar a qualidade do gás SF<sub>6</sub> em equipamentos elétricos isolados a gás, em ensaios de manutenção preditiva, permitindo que a concessionária tenha informações nunca antes obtidas para o acompanhamento do desgaste deste tipo de material.

#### V. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Soppart, O., Pilzecker, P., Baumbach, I. J., Klocknow, D., Trindade, E. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 7, 229, 2000.
- [2] Eiceman, G. A.; Trends Anal. Chem. 4, 259. 2002.
- [3] Turner, R. B.; Brokenshire, J. L.; Trends Anal. Chem. 13, 275, 1994.
- [4] Baumbach, J.; Pilzecker, P.; Trindade, M. E.; Meinders, J.; Transmission & Distribution World 46, 2000.
- [5] Aksenov, P. Yu., Lyapin, G. A., Popkov, I. V., Sakharov, E. A., Tarasov, I. A., Izvestiya Akademii Nauk SSSR. Energetika i Transport, 21, 3, 44, 1983.
- [6] Ajita, L., Nakaguishi, Y. C., Dallavalli, J. M., Munõz-Rojas, E. P., Robert, R., Relatório de Pesquisa, SF<sub>6</sub>, COPEL, 2, 1-46, Janeiro, 1985.
- [7] Pisa, F. L., Monografia apresentada no III Curso de Especialização em Materiais para Equipamentos Elétricos, UFPR/COPEL/LAC, 1-24, 1996.
- [8] Trudeau, L. M., Rochefort, A., Fréchette, F. M, IEEE - Annual Report - Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 645, Outubro, 1996.
- [9] Baumbach, J., Pilzecker, P., Trindade, E., Meinders, J., Transmission & Distribution World, 46-50, January, 2000.
- [10] Itani, M. A., Perry, P. M., Houston, M. J., IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 102, 2, 312-314, Fevereiro, 1983.
- [11] Rauth, T., Grill, V., Foltin, M., Scheier, P., Märk, T. D., The Journal of Chemical Physics, 96, 12, 9241, 1992.
- [12] Kuwahara, H., Yoshinaga, K., Sakuma, S., Yamauchi, T., Miyamoto, T., IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 101, 10, 3977, 1982.