

Grupo de Trabalho  
D1.01

# 010

## **Manuseio, Segurança e Manutenção de Hexafluoreto de Enxofre (SF<sub>6</sub>) em Equipamentos Elétricos**

Dezembro 2008







## **Manuseio, Segurança e Manutenção de Hexafluoreto de Enxofre (SF<sub>6</sub>) em Equipamentos Elétricos**

### **Grupo de trabalho D1.01**

Força Tarefa 05: João Carlos Sihvenger (*Coordenador*), Alexandre T. de Souza Machado, Alzete Martins Quadros, Eduardo Marques Trindade, Jayme Leite Nunes, Lilian Tatiana Chanas Vacca



## ÍNDICE

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>CARACTERÍSTICAS GERAIS DO GÁS SF<sub>6</sub></b> .....	<b>1</b>
2.1	Propriedades físicas.....	2
2.1.1	Densidade.....	2
2.1.2	Pressão de vapor.....	3
2.1.3	Pressão do gás.....	3
2.1.4	Solubilidade.....	4
2.1.5	Transferência de calor e condutividade térmica.....	4
2.2	Propriedades químicas.....	5
2.3	Propriedades dielétricas.....	7
2.3.1	Rigidez dielétrica.....	7
2.3.2	Constante dielétrica.....	8
2.3.3	Fator de dissipação.....	8
2.3.4	Capacidade de interrupção de arco.....	9
<b>3</b>	<b>CAMPOS DE APLICAÇÃO DO SF<sub>6</sub></b> .....	<b>9</b>
3.1	Histórico do uso industrial do SF <sub>6</sub> .....	9
3.2	Aplicação em equipamentos elétricos.....	10
<b>4</b>	<b>GÁS SF<sub>6</sub> NOVO</b> .....	<b>12</b>
4.1	Contaminantes.....	13
4.2	Amostragem.....	15
4.3	Ensaio de aceitação.....	17
4.3.1	Identificação.....	18
4.3.2	Teor de água.....	19
4.3.3	Fluoretos hidrolisáveis.....	21
4.3.4	Acidez.....	21
4.3.5	Tetrafluoreto de carbono (CF <sub>4</sub> ), oxigênio (O <sub>2</sub> ) e nitrogênio (N <sub>2</sub> ).....	22
4.3.6	Teor de óleo mineral.....	22
4.3.7	Peso molecular.....	23
4.3.8	Toxidez.....	23
<b>5</b>	<b>GÁS USADO E PRODUTOS SÓLIDOS DE DECOMPOSIÇÃO</b> .....	<b>23</b>
5.1	Contaminantes no gás usado.....	23
5.1.1	Impurezas provenientes do manuseio e em serviço.....	25
5.1.2	Impurezas durante funcionamento normal do equipamento.....	26
5.1.3	Impurezas em equipamentos de comutação.....	26
5.1.4	Impurezas devido a arcos internos.....	26
5.2	Amostragem.....	26

5.2.1	Amostragem do gás usado .....	26
5.2.2	Amostragem dos produtos sólidos de decomposição do SF <sub>6</sub> .....	28
5.3	Ensaio de Controle do Gás Usado .....	28
5.3.1	Teor de água e materiais condensáveis .....	29
5.3.2	Acidez .....	29
5.3.3	Fluoretos hidrolisáveis .....	30
5.3.4	Teor de oxigênio .....	31
5.3.5	Rigidez dielétrica .....	32
5.3.6	Identificação .....	32
5.3.7	Identificação dos produtos gasosos de decomposição .....	32
5.4	Ensaio dos produtos sólidos de decomposição do SF <sub>6</sub> .....	33
<b>6</b>	<b>ARMAZENAGEM DO GÁS .....</b>	<b>33</b>
<b>7</b>	<b>RECUPERAÇÃO DO GÁS .....</b>	<b>34</b>
<b>8</b>	<b>ASPECTOS DE SEGURANÇA NOS SERVIÇOS DE MANUTENÇÃO .....</b>	<b>35</b>
8.1	Considerações Gerais .....	35
8.2	Equipamentos de proteção individual .....	37
8.3	Cuidados e precauções nos serviços de manutenção .....	39
8.4	Cuidados quanto ao homem .....	40
<b>9</b>	<b>CONSIDERAÇÕES SOBRE MANUTENÇÃO DE EQUIPAMENTOS ISOLADOS A SF<sub>6</sub> .....</b>	<b>41</b>
9.1	Considerações Gerais .....	41
9.2	Grupo de recuperação e transferência de gás .....	43
9.2.1	Objetivo .....	43
9.2.2	Descrição dos componentes .....	44
9.2.3	Procedimento de Utilização .....	45
<b>10</b>	<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>47</b>



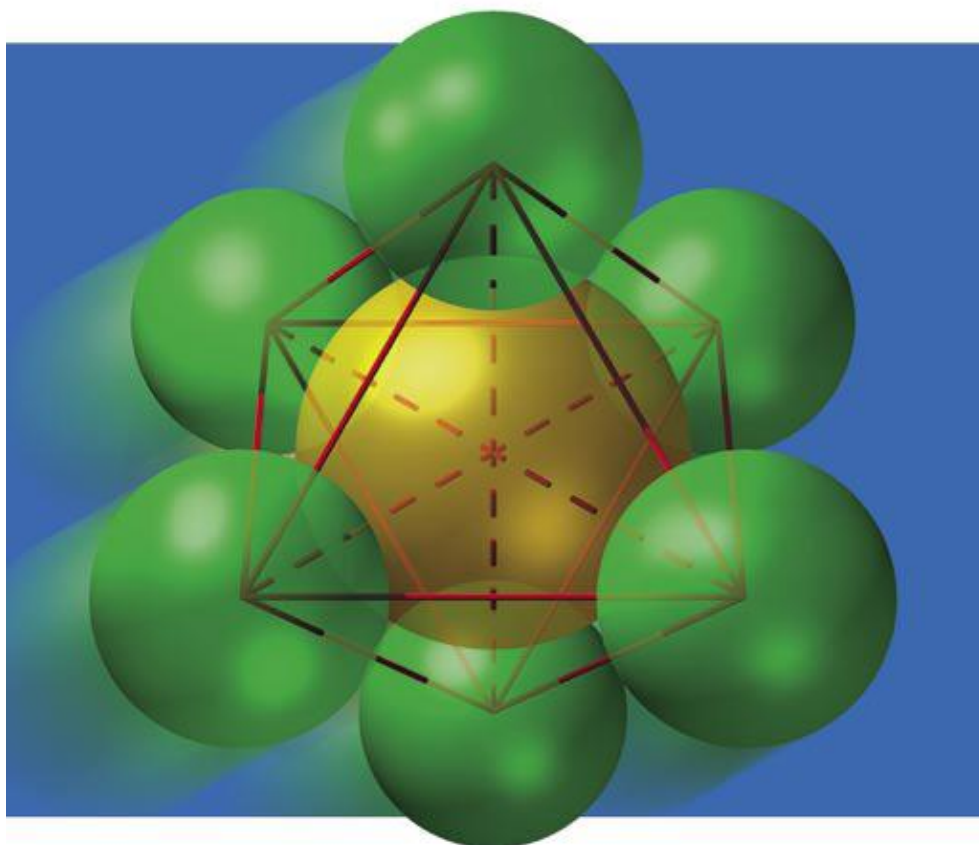
## 1 INTRODUÇÃO

A utilização do gás hexafluoreto de enxofre ( $\text{SF}_6$ ) em equipamentos elétricos, pelas empresas de energia elétrica do Brasil, conduziu à necessidade de introdução de procedimentos específicos de manutenção. Esta necessidade levou à elaboração deste trabalho, através da participação das empresas no CIGRÉ, abordando conhecimentos mais amplos sobre este gás, sua aplicação no setor elétrico, consequência de seu uso com relação ao homem e sobre os equipamentos, além dos aspectos de segurança envolvidos.

O presente trabalho desenvolveu-se a partir de informações existentes na literatura mundial, nas experiências das concessionárias, de laboratórios, dos centros de pesquisa de energia elétrica do país e dos fabricantes do gás  $\text{SF}_6$  e de equipamentos elétricos.

## 2 CARACTERÍSTICAS GERAIS DO GÁS $\text{SF}_6$

O  $\text{SF}_6$  é um gás incolor, inodoro, não tóxico, quimicamente inerte e estável e não inflamável. A estrutura molecular do  $\text{SF}_6$ , mostrada na figura 1, é um octaedro regular de simetria perfeita, onde o átomo de enxofre fica localizado no centro e os átomos de flúor em cada um dos seis vértices.



**Figura 1** – Estrutura molecular do  $\text{SF}_6$

Suas principais características encontram-se descritas na tabela 1.



**TABELA 1 - Características típicas do gás SF<sub>6</sub>.**

<b>FÍSICAS</b>	
Fórmula	SF <sub>6</sub>
Peso molecular (u.m.a)	146,05
Temperatura de sublimação, a 1 atm (°C)	- 63,9
Ponto de fusão, a 32,5 psia (°C)	- 50,8
Densidade do gás a 21°C, 1 atm (g/L) Relativa ao ar = 1, a 21,1°C, 1 atm (g/L)	6,139 ≅ 5
Tensão superficial a - 20°C (dina/cm)	8,02
Viscosidade do líquido a 25°C, 1 atm (cP) Viscosidade do gás a 25°C, 1 atm (cP)	0,277 0,015
Índice de refração, a 0°C, 760 mmHg (n <sub>D</sub> )	1,000783
Temperatura crítica, T <sub>c</sub> (°C)	45,66
Pressão crítica, P <sub>c</sub> (psia)	544,3
Volume crítico, V <sub>c</sub> (mL/g)	1,356
Solubilidade do SF <sub>6</sub> a 1,0133 bar em: Óleo de transformador a 27°C, 1 atm (ml SF <sub>6</sub> /ml de óleo) Água a 20 °C, 1 atm (ml SF <sub>6</sub> /ml água)	0,408 ≅ 0,0063
Solubilidade da água no SF <sub>6</sub> (% p/p)	≅ 0,0097
<b>ELÉTRICAS</b>	
Rigidez dielétrica (N <sub>2</sub> = 1) a 60 Hz – 1,2 MHz	≅ 2,3 a 2,5
Constante dielétrica a 25°C, 1 atm	1,002049
Fator de dissipação a 1 atm (tg δ)	< 2 x 10 <sup>-7</sup>
<b>TERMODINÂMICAS</b>	
Condutividade Térmica, 30°C (cal/cm.s)	3 x 10 <sup>-5</sup>
Calor de vaporização, 70°C (Btu)	28,4

## 2.1 Propriedades físicas

### 2.1.1 Densidade

O SF<sub>6</sub> é um dos mais pesados gases conhecidos, apresentando uma densidade de 6,139 g/L a 21°C e

1 bar, ou seja, 5 vezes maior que a densidade do ar. A variação da densidade do gás SF<sub>6</sub> com a pressão pode ser calculada a partir das equações de estado, como por exemplo a de Beattie-Bridgeman. A tabela 2 apresenta algumas destas relações.

**TABELA 2 - Variação da densidade do gás SF<sub>6</sub> com a pressão.**

Pressão (atm)	Densidade do gás a 21,1°C	
	g/L	lb/ft <sup>3</sup>
1	6,139	0,387
2	12,4	0,77
3	18,8	1,17
5	32,3	2,02
10	69,6	4,34

### 2.1.2 Pressão de vapor

A pressão de vapor do SF<sub>6</sub> representa a pressão exercida pelo SF<sub>6</sub> na forma do vapor quando em equilíbrio com a forma líquida. Porém, nas condições normais de operação em equipamentos do setor elétrico, o gás SF<sub>6</sub> encontra-se totalmente na forma de gás ou vapor.

A tabela 3 apresenta a variação da pressão de vapor do SF<sub>6</sub> com uma larga faixa de temperatura.

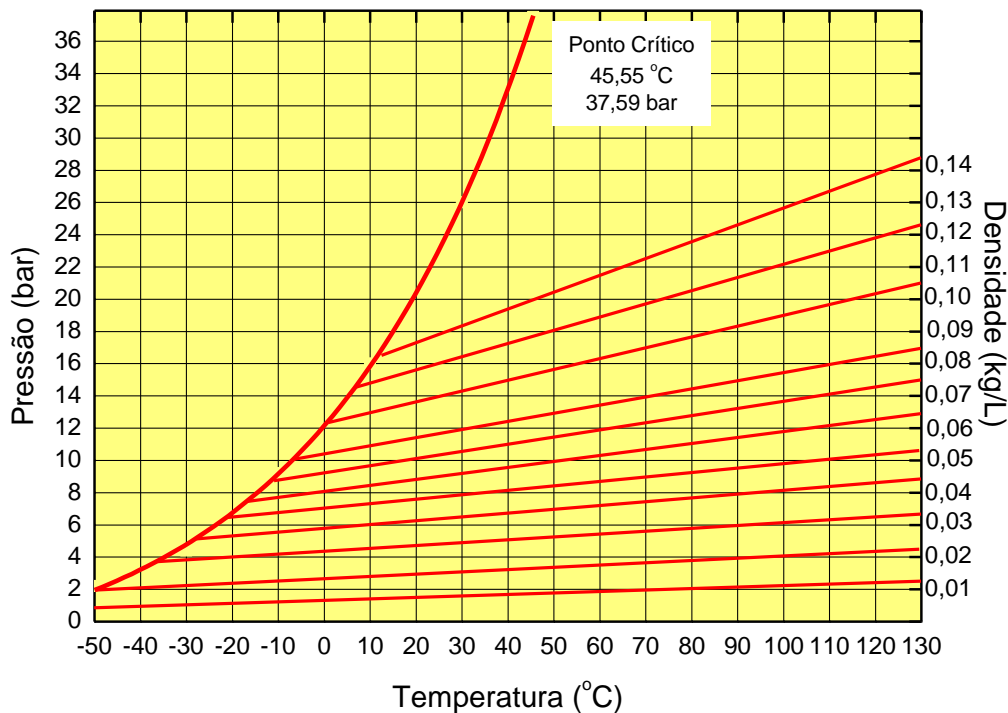
**TABELA 3 – Variação da pressão de vapor do SF<sub>6</sub> com a temperatura.**

Temperatura (°C)	-50	-45	-40	-35	-30	-25	-20	-15	-10	-5
Pressão (bar)	2,34	2,87	3,49	4,20	5,02	5,95	7,01	8,19	9,52	11,01
Temperatura (°C)	0	+5	+10	+15	+20	+25	+30	+35	+40	+45
Pressão (bar)	12,65	14,47	16,47	18,67	21,08	23,72	26,62	29,79	33,27	37,13

### 2.1.3 Pressão do gás

As instalações contendo SF<sub>6</sub> podem ser submetidas a grandes variações de temperatura sem que isto represente grandes variações de pressão. De uma pressão de 1,52 bar a -10°C, chega-se a 1,92 bar a 65°C (0,4 bar para uma variação de 75°C).

A figura 2 apresenta as curvas de variação de pressão com a temperatura para várias densidades de SF<sub>6</sub>.



**Figura 2** – Curvas pressão versus temperatura do SF<sub>6</sub> para pesos específicos constantes.

### 2.1.4 Solubilidade

A solubilidade do SF<sub>6</sub> em óleo mineral isolante a 25°C e 1 bar é de 0,408 cm<sup>3</sup>/ml de óleo, enquanto que sua solubilidade na água, nas mesmas condições, é de 0,0063 cm<sup>3</sup>/ml de água.

A solubilidade da água no SF<sub>6</sub> é de 0,0097 (± 0,010 %) por peso a 10°C.

A tabela 4, a seguir, apresenta a variação da solubilidade do SF<sub>6</sub> com a temperatura, em óleo mineral isolante.

**TABELA 4 - Solubilidade de SF<sub>6</sub> em óleo isolante de base naftênica não inibido.**

Temperatura (°C)	Solubilidade a 1 atm (ml gás / ml de óleo)	Constante da Lei de Henry (K)
27	0,408	2,45
50	0,344	2,91
70	0,302	3,31

### 2.1.5 Transferência de calor e condutividade térmica

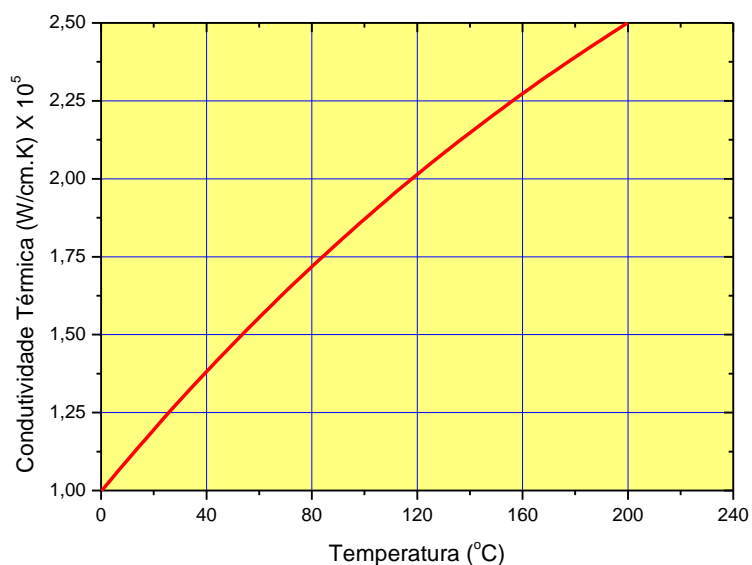
Conforme mostrado na tabela 5, a condutividade térmica do SF<sub>6</sub> é da mesma grandeza de outros gases dielétricos. Entretanto, o seu coeficiente de transferência de calor é maior que o do ar. A alta

densidade do gás SF<sub>6</sub> torna-o um excelente meio refrigerante para o sistema com convecção natural. Este efeito ainda pode ser melhorado através de projetos específicos para este fim ou pelo uso de pequenos insufladores para aumentar a turbulência.

**TABELA 5 - Condutividade térmica dos gases dielétricos.**

Gases	Condutividade Térmica a 30°C (cal/s.cm.°C)
SF <sub>6</sub>	3,36 x 10 <sup>-5</sup>
99% SF <sub>6</sub> - 1% He	4,70 x 10 <sup>-5</sup>
Nitrogênio (N <sub>2</sub> )	6,20 x 10 <sup>-5</sup>
Hélio (He)	33,86 x 10 <sup>-5</sup>
Dióxido de Carbono (CO <sub>2</sub> )	4,12 x 10 <sup>-5</sup>
Ar	5,12 x 10 <sup>-5</sup>
Argônio (Ar)	4,249 x 10 <sup>-5</sup>

A figura 3 apresenta um gráfico com a variação da condutividade térmica do SF<sub>6</sub>, em função da temperatura.



**Figura 3** – Curva condutividade térmica versus temperatura do SF<sub>6</sub>.

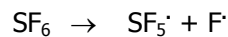
## 2.2 Propriedades químicas

Em condições normais, o gás hexafluoreto de enxofre é quimicamente inerte e estável; e sua reatividade está entre as mais baixas de todas as substâncias.

O SF<sub>6</sub> pode ser aquecido a 500 °C em recipientes de quartzo sem que ocorra qualquer decomposição. Em temperaturas de até aproximadamente 150 °C, os materiais geralmente utilizados, como metais,

cerâmica, vidro, borracha e resinas são completamente estáveis na presença do hexafluoreto de enxofre. Em temperaturas próximas a 200 °C ou superior, alguns metais começam a ter algum efeito sobre a decomposição do SF<sub>6</sub>. No entanto, em regime normal de trabalho, metais e ligas não têm um efeito significativo na decomposição até que a temperatura atinja 400 a 600°C.

Descargas elétricas causam uma decomposição do gás, de forma proporcional a energia gerada. Sob a influência de um arco elétrico, parte do hexafluoreto de enxofre pode ser dissociada, como mostra a seguinte equação:



Esta reação é reversível. Após a descarga, os produtos da dissociação se recombinam, desde que não ocorra nenhuma reação secundária com moléculas de água, com metais vaporizados, com as paredes do recipiente ou outros componentes da construção do reservatório. Das reações secundárias podem resultar produtos sólidos e gasosos, tais como:

- Fluoretos metálicos, sulfetos metálicos e óxidos metálicos;
- Outros fluoretos de enxofre, como SF<sub>4</sub>;
- Oxifluoretos de enxofre, tais como SOF<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>F<sub>2</sub> e SOF<sub>4</sub>.

Os produtos sólidos da decomposição, resultantes das descargas de alta energia, também são dielétricos, de modo que, se depositados na forma de pó na superfície dos isoladores, de uma forma geral não prejudicam a eficácia operacional do equipamento afetado.

No entanto, este princípio aplica-se apenas se a umidade do gás, no interior do equipamento, for extremamente baixa. Se expostos a umidade, os produtos de decomposição, citados anteriormente, se decompõem por hidrólise, formando produtos secundários, por exemplo, como ilustrado nas seguintes equações:



O fluoreto de hidrogênio (HF), formado nestas reações, reage energeticamente com quaisquer materiais contendo dióxido de silício (SiO<sub>2</sub>), como por exemplo vidro e porcelana. O uso desses materiais em equipamentos no qual o SF<sub>6</sub> é utilizado como isolante elétrico (dissipação de arco elétrico, por exemplo) é apropriado somente sob certas condições.

Como já citado anteriormente, o SF<sub>6</sub> puro é quimicamente inerte e, portanto, não causa corrosão. No entanto, na presença de umidade, produtos de decomposição do hexafluoreto de enxofre, primários e secundários, formam eletrólitos corrosivos, que podem causar danos e falha operacional, em particular nos equipamentos elétricos. Se a formação de produtos de decomposição não pode ser evitada através da utilização de métodos de construção adequados, a corrosão pode ser em grande parte eliminada através da eliminação de umidade, como também através do emprego de materiais adequados.

Metais e ligas comumente utilizados, como o alumínio, aço, cobre e latão, permanecem praticamente livres de ataque corrosivo. Por outro lado, materiais como vidro, porcelana, papel isolante e materiais similares podem ser gravemente danificados, dependendo da concentração das substâncias corrosivas. Materiais isolantes tais como resina epóxi, PTFE, polietileno, cloreto de polivinila e poliésteres, são apenas ligeiramente afetados.

## 2.3 Propriedades dielétricas

O SF<sub>6</sub> apresenta excelentes propriedades dielétricas, que são atribuídas à forte afinidade eletrônica (eletronegatividade) da molécula. Esta propriedade baseia-se essencialmente em dois mecanismos: união/dissociação de elétrons e captura ressonante, de acordo com as equações:



Os processos representados pelas equações 1 e 2 aplicam-se para energias eletrônicas de cerca de 0,1 eV. Apesar destas propriedades dependerem de vários fatores, estão essencialmente relacionadas com a natureza marcadamente eletronegativa da molécula de SF<sub>6</sub>, que capta os elétrons livres e retarda o fenômeno de avalanche, dando início a interrupção da descarga. Esta é também a razão do SF<sub>6</sub> ser um meio supressor de arco com uma eficiência estimada em 10 vezes a do ar.

### 2.3.1 Rigidez dielétrica

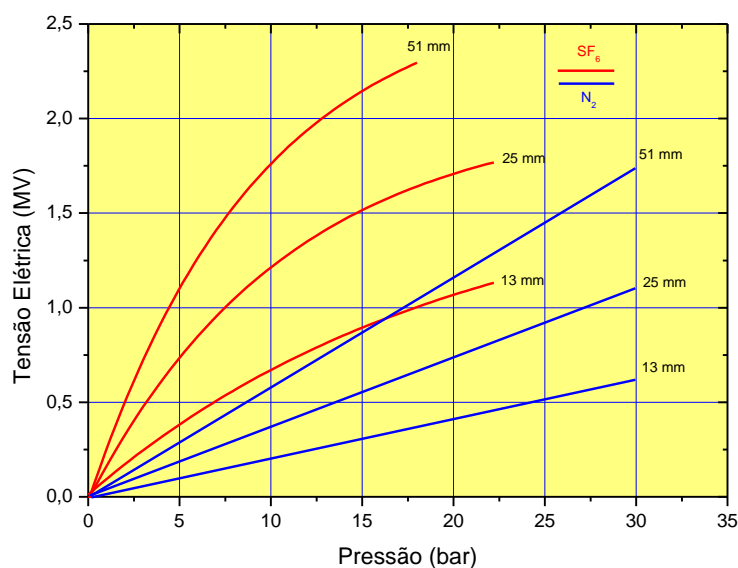
A forte interação de elétrons de alta energia com a molécula de SF<sub>6</sub> provoca sua rápida desaceleração para menor energia de captura eletrônica e dissociação das ligações. A ruptura do SF<sub>6</sub> é, portanto, apenas possível em alta intensidade de campo.

A rigidez dielétrica a 60 Hz e 1 bar, em campo homogêneo, é da ordem de 2,3 a 2,5 vezes mais elevada do que os valores correspondentes para ar ou nitrogênio. A figura 4 mostra a rigidez dielétrica em relação à pressão num campo não-homogêneo, em comparação com uma mistura de N<sub>2</sub> / CO<sub>2</sub>, para diferentes distâncias de eletrodos.

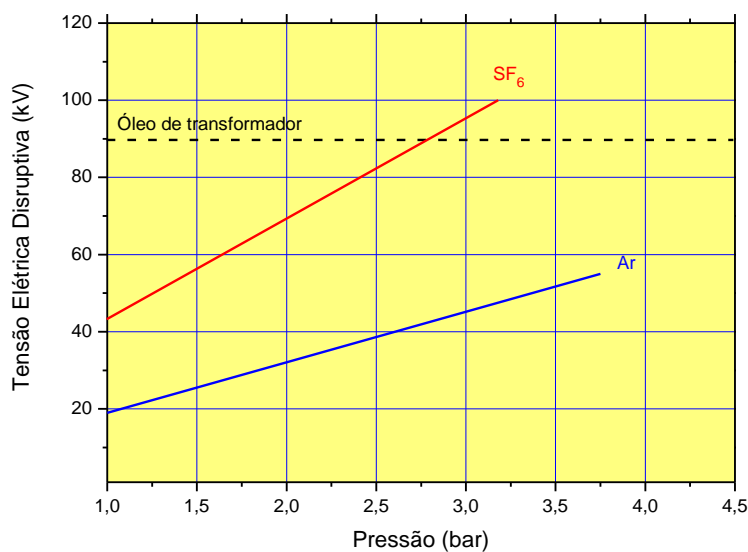
A rigidez dielétrica do ar é severamente aumentada pela adição de pequenas quantidades de SF<sub>6</sub>. Em contrapartida, o ar tem apenas uma influência limitada sobre a rigidez dielétrica do hexafluoreto de enxofre. A adição de 10% de ar por volume reduz cerca de 3% a rigidez dielétrica do SF<sub>6</sub> e a adição de 30% de ar reduz cerca de 10%.

A rigidez dielétrica do SF<sub>6</sub> somente é afetada por óleo de transformador a uma pressão de 3 bar (figura 5) e independe da frequência. O gás SF<sub>6</sub> é, portanto, um gás isolante ideal para equipamentos UHF.

A tensão de início de corona utilizando SF<sub>6</sub> em campos não homogêneos também é consideravelmente superior aos que utilizam ar.



**Figura 4** – Dependência da rigidez dielétrica do SF<sub>6</sub> com a pressão, em comparação com misturas de N<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>.



**Figura 5** – Rigidez dielétrica de óleo isolante, ar e SF<sub>6</sub>, em função da pressão.

### 2.3.2 Constante dielétrica

Devido a não existência de momento de dipolo na molécula de SF<sub>6</sub>, sua constante dielétrica não varia com a frequência. Na faixa de 1 a 22 atm, a variação da constante dielétrica é de cerca de 7%.

### 2.3.3 Fator de dissipação

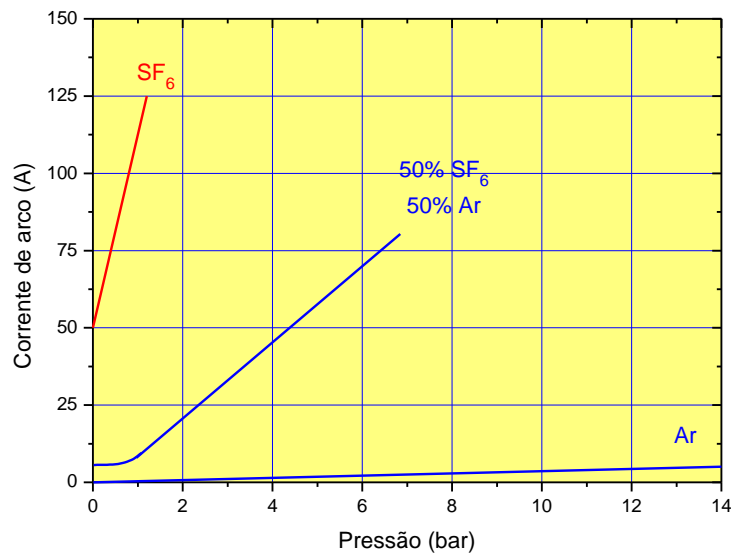
O fator de dissipação ( $\text{tg } \delta$ ) do SF<sub>6</sub> é extremamente baixo, menor que  $2 \times 10^{-7}$  à pressão atmosférica.

Este valor está abaixo dos limites de detecção dos equipamentos normalmente disponíveis.

### 2.3.4 Capacidade de interrupção de arco

A alta capacidade de transferência de calor e a baixa temperatura de ionização do SF<sub>6</sub> proporcionam-lhe excelente propriedade de extinção de arco elétrico. O tempo de extinção é aproximadamente 100 vezes menor no SF<sub>6</sub> do que no ar, sob condições semelhantes (figura 6).

O gás SF<sub>6</sub>, como os vários gases usados como isolantes, apresenta a característica de ser um meio isolante autoregenerável após ocorrência de descarga, não havendo aumento de pressão como consequência dessa descarga, nem tampouco a formação de depósitos condutores de carvão, como ocorre nos óleos isolantes.



**Figura 6:** Capacidade de extinção de arco para SF<sub>6</sub>, ar e uma mistura dos dois gases.

## 3 CAMPOS DE APLICAÇÃO DO SF<sub>6</sub>

### 3.1 Histórico do uso industrial do SF<sub>6</sub>

As primeiras pesquisas sobre aplicação industriais de SF<sub>6</sub> foram feitas em 1937, pela General Electric Company, que sugeriu sua utilização em equipamentos por causa da sua grande rigidez dielétrica. Em 1939 foi patenteado por Thomson-Houston o uso do SF<sub>6</sub> para cabos e capacitores.

Logo após a II Guerra Mundial, em 1947, apareceram trabalhos sobre a isolação de transformadores e em 1948 foi desenvolvido um processo industrial nos Estados Unidos para a produção comercial do gás SF<sub>6</sub>.

Em torno de 1960, iniciou-se a comercialização em larga escala do SF<sub>6</sub> na indústria elétrica nos



Estados Unidos e na Europa, ao mesmo tempo em que eram lançados os primeiros disjuntores e chaves utilizando este gás.

### 3.2 Aplicação em equipamentos elétricos

A indústria de equipamentos elétricos de potência é um dos maiores usuários de SF<sub>6</sub>. O gás tem sido usado como meio de extinção e isolamento em transformadores de alta tensão, pára-raios, barramentos, subestações blindadas e como meio de extinção de isolamento em disjuntores.

**Transformadores** – A alta capacidade de transferência de calor, a não inflamabilidade e a não toxidez têm conduzido ao aumento do uso de SF<sub>6</sub> na fabricação de transformadores. Estes equipamentos têm sido instalados em locais que exigem alta segurança operacional, tais como minas e lojas de departamentos. O peso reduzido, o projeto compacto e o baixo nível de ruído são outras vantagens significativas (figura 7).

**Barramentos (linhas de transmissão blindadas)** – Os barramentos de alta tensão blindados a SF<sub>6</sub> são utilizados para conexões entre instalações, possuindo diversas vantagens em relação ao sistema convencional, tais como: segurança, economia de espaço, aplicação em níveis de tensão elevados e estética (figura 8).

Estas instalações são seguras porque os condutores estão contidos em invólucros metálicos selados e aterrados. Por esta razão, eles podem ser dispostos um ao lado do outro, economizando espaço. Por exemplo, a largura da faixa de terreno para o barramento blindado é da ordem de 5% a 10% daquela utilizada pelas linhas de transmissão convencionais. Além disso, eles podem ser subterrâneos ou instalados sobre pilares. Apesar dos barramentos blindados serem mais caros que as instalações convencionais, eles se tornam viáveis em áreas onde se tenha alta densidade populacional ou onde o custo do terreno é alto.

Em sistemas de Carrier de alta frequência, a potência pode ser aumentada em cerca de dez vezes quando são utilizados linhas de transmissão blindadas com SF<sub>6</sub>. Do ponto de vista construtivo, isto oferece a vantagem de reduzir dimensões das estações de transmissão em UHF de alta potência.

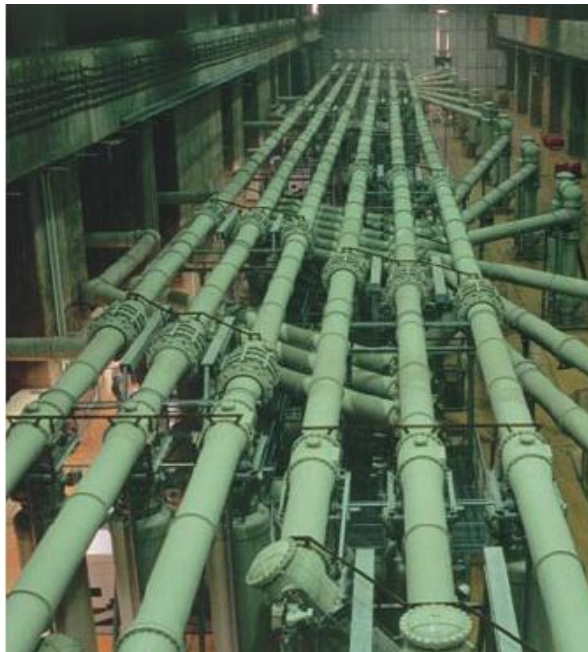


**Figura 7** - Transformador elevador (23 – 107 kV), isolado a SF<sub>6</sub> – Japão.



**Figura 8** - Linha de transmissão com mistura de SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub>, em túnel da Alemanha (Siemens).

**Subestações blindadas** – As principais características das subestações blindadas a SF<sub>6</sub> são as proteções contra contatos acidentais, a proteção contra contaminação por materiais estranhos, a compacticidade, a economia de espaço, o baixo nível de ruídos e a eliminação do risco de incêndio (figura 9).



**Figura 9** - Subestação blindada e isolada a gás SF<sub>6</sub> - usina de Itaipu Binacional (ABB).

As subestações blindadas são particularmente vantajosas em locais onde haja problemas de espaço, pois elas necessitam de cerca de 10 a 15% do espaço requerido para uma estação do tipo convencional. Estas subestações blindadas podem, por isso, ser instaladas nos próprios centros de consumo, em áreas densamente povoadas, onde os custos do terreno são muito elevados.

**Cabos de alta tensão** – Ultimamente tem aumentado o interesse na utilização do hexafluoreto de enxofre como dielétrico gasoso em cabos de energia em tensões elevadas. A boa condutividade

térmica do gás permite maiores capacidades de corrente. Comparando com outros tipos de cabos, a corrente de carga e as perdas dielétricas permanecem pequenas.

**Disjuntores** – Apesar do nitrogênio do ar (em disjuntores a ar comprimido) substituir de modo notável o hidrogênio proveniente da decomposição do óleo isolante como meio extintor de arco, suas propriedades a esse respeito, são inferiores às das do hidrogênio. O aparecimento do SF<sub>6</sub> veio preencher esta lacuna, reunindo as boas propriedades extintoras do hidrogênio com a incombustibilidade do nitrogênio (figura 10).

Atualmente existem em operação dois tipos construtivos de disjuntores a SF<sub>6</sub>: disjuntores a dupla e simples pressão.



**Figura 10:** Disjuntores a SF<sub>6</sub> (245 kV) – França.

**Outras aplicações em alta tensão** – O SF<sub>6</sub> é utilizado na isolamento de geradores de alta tensão em aceleradores de partículas, tais como aceleradores Van der Graaf, betatrons e geradores de nêutrons em institutos científicos, além de aplicações com radiação na medicina e na indústria.

Similarmente, o SF<sub>6</sub> tem tido bom desempenho em estabilizadores de tensão de microscópio eletrônico e em aparelhos de Raio-X, do tipo utilizado em ensaios não destrutivos de materiais e no exame de produtos para a indústria.

## 4 GÁS SF<sub>6</sub> NOVO

O SF<sub>6</sub> é um produto industrial desenvolvido a partir da síntese direta do flúor e enxofre fundidos. O produto resultante é purificado por lavagem, craqueamento e secagem, sendo posteriormente liquefeito por compressão para eliminar os elementos não condensáveis, tais como oxigênio e nitrogênio do ar, e o tetrafluoreto de carbono, antes de ser estocado na forma comprimida em recipiente de aço.

O SF<sub>6</sub> é fornecido pressurizado, na forma líquida a temperatura ambiente, em tanques de aço

(garrafas, recipientes cilíndricos e esféricos). A capacidade do tanque pode variar de 5 a 600 kg (figura 11).



**Figura 11:** Exemplos de recipientes de SF<sub>6</sub> novo

## 4.1 Contaminantes

O SF<sub>6</sub> novo pode conter contaminantes provenientes de seus processos de fabricação e purificação ou do seu manuseio, transporte e transvazamento.

Os provenientes dos processos de fabricação e purificação são, principalmente, o tetrafluoreto de carbono (CF<sub>4</sub>), o fluoreto de hidrogênio (HF) e os fluoretos solúveis, enquanto que os provenientes da manipulação são, principalmente, o ar, a umidade e o óleo mineral.

Esses contaminantes podem alterar as características do SF<sub>6</sub> de três formas distintas: quanto a sua toxidez, sua corrosividade e sua rigidez dielétrica.

O gás novo pode conter impurezas altamente tóxicas que só podem ser detectadas através de métodos biológicos. Outros tipos de impurezas podem afetar a operação do equipamento, como por exemplo água, impurezas ácidas e oxigênio, que podem causar corrosão, ocasionando falhas mecânicas de operação. Água em combinação com qualquer impureza ácida pode condensar a baixas temperaturas e altas pressões de operação, com perigo para a segurança operacional do equipamento.

Pode haver também, no gás novo, substâncias que não apresentam perigo para o funcionamento do equipamento, porém são indesejáveis porque provocam uma diluição do SF<sub>6</sub> ou porque em certas circunstâncias podem levar a dificuldade no manuseio subsequente. Na prática, o ar é o principal produto que potencialmente pode provocar tal risco de contaminação.

A maioria das impurezas presentes no SF<sub>6</sub> novo está em concentração tão baixa, que praticamente não afeta a rigidez dielétrica do produto.

Os teores máximos aceitáveis dessas impurezas no SF<sub>6</sub> novo, segundo as normas internacionais, encontram-se na tabela 6, a seguir:

**Tabela 6 - Níveis máximos de impurezas para SF<sub>6</sub> novo (IEC 60376 - 05).**

Conteúdo	Especificação	Método analítico (somente para indicação)	Incerteza
Ar (O <sub>2</sub> + N <sub>2</sub> )	2 g/kg [nota 1]	Absorção infravermelho	35 mg/kg
		Cromatografia gasosa	3 – 10 mg/kg
		Densidade	10 mg/kg
CF <sub>4</sub>	2400 mg/kg [nota 2]	Cromatografia gasosa	9 mg/kg
H <sub>2</sub> O	25 mg/kg [nota 3]	Gravimétrico	9 mg/kg
		Eletrolítico	2 – 15 mg/kg
		Ponto de orvalho	1 °C
Óleo mineral	10 mg/kg	Fotométrico	< 2 mg/kg
		Gravimétrico	0,5 mg/kg [nota 5]
Acidez total (expressa em HF)	1 mg/kg [nota 4]	Titulação	0,2 mg/kg
<p>Nota 1: 2 g/kg é equivalente a 1% vol sob condições ambientes (100 kPa e 20°C).</p> <p>Nota 2: 2400 mg/kg é equivalente a 4000 µl/l sob condições ambientes (100 kPa e 20°C).</p> <p>Nota 3: 25 mg/kg é equivalente a 200 µl/l e para um ponto de orvalho de -36°C, medido em condições ambientes (100 kPa e 20°C).</p> <p>Nota 4: 1 mg/kg é equivalente a 7,3 µl/l sob condições ambientes (100 kPa e 20°C).</p> <p>Nota 5: Dependendo da quantidade da amostra.</p>			

Devido aos níveis máximos de impurezas que podem estar presentes no SF<sub>6</sub>, a quantidade de SF<sub>6</sub> no cilindro (medido na fase líquida), deverá ser superior a 99,7% em peso. Existem outros métodos de quantificação, sem separação das diferentes impurezas, que não podem ser considerados como métodos analíticos (por exemplo, a medição através da velocidade do som). A tabela 7 apresenta os valores limites para qualificação de SF<sub>6</sub> novo.

**Tabela 7 – Valores limites para SF<sub>6</sub> novo, segundo ASTM D-2472 - 00 (A).**

Propriedade	Valor limite
Teor de água, ponto de orvalho máx., °C	- 62 (B)
Fluoretos hidrolizáveis, expressos como HF Acidez, máx., ppm (p/p)	0,3
Ar, expresso como N <sub>2</sub> , máx., % (p/p)	0,05
Tetrafluoreto de carbono, máx., % (p/p)	0,05
Dosagem, mín, % (p/p)	99,8

(A) Por acordo entre o comprador e o fabricante, podem ser exigidas análises em que os limites estabelecidos para propriedades, elementos ou compostos não estejam especificados nesta tabela.

(B) Corresponde a um teor de água de 8 ppm por volume a  $1.01325 \times 10^5$  Pa.

## 4.2 Amostragem

O hexafluoreto de enxofre é normalmente fornecido pelo fabricante em cilindros ou reservatórios sob pressão onde a maior parte do produto (aproximadamente 93% em peso, com taxa de enchimento = 1 kg/l) é constituída pela fase líquida com uma pequena proporção na forma de vapor acima do líquido.

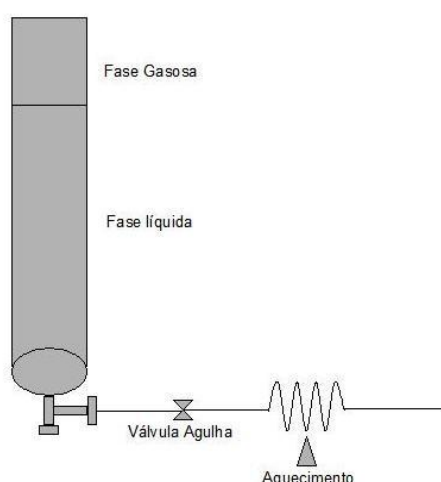
Impurezas estão presentes nas fases gasosas e líquida do SF<sub>6</sub> em proporções diferentes.

As amostras devem ser tomadas na fase líquida do SF<sub>6</sub>, de modo a que sejam representativas da maior Impurezas parte do conteúdo do cilindro, invertendo-se o cilindro de tal modo que a válvula de saída esteja no ponto mais baixo.

O ideal é que a amostra passe diretamente do cilindro (ou reservatório) para o dispositivo ou aparelho de análise.

Para se transferir a amostra do cilindro ao aparelho de análise, deve-se utilizar um tubo de aço inoxidável em forma de serpentina, aquecido com água ou ar quente para vaporizar o SF<sub>6</sub> líquido. Este tubo deve possuir uma válvula de agulha de regulagem fina, também em aço inoxidável, devido à dificuldade de se controlar o fluxo de gás somente pela válvula do cilindro (figura 12). Essa válvula de agulha deve ser conectada diretamente na saída da válvula do cilindro ou através de um pequeno tubo de aço inoxidável. Estas ligações devem suportar pressões de trabalho da ordem de 40 bar.

Deve-se purgar a tubulação de amostragem deixando-se fluir o SF<sub>6</sub> suavemente por alguns segundos imediatamente antes do início da coleta ou do ensaio.



**Figura12** – Esquema de transferência do SF<sub>6</sub> para o aparelho de análise.

Deve-se evitar o fechamento simultâneo das válvulas dos cilindros e de regulagem fina, pois o SF<sub>6</sub> líquido retido entre elas, com a elevação da temperatura poderá provocar uma explosão.

A tubulação deverá ter aproximadamente 2 m de comprimento e um diâmetro interno de aproximadamente 3 mm. Para utilização de juntas rosqueadas estanques a gás, é permitido o emprego da fita de politetrafluoretileno. Deve-se evitar o uso das que contenham plastificantes, pois se corre o risco de introduzir impurezas na amostra.

As juntas permanentes do tipo metal com metal na tubulação de amostragem deverão ser soldadas (eliminar o excesso de solda). Outros tipos de juntas metálicas de compressão poderão ser utilizados.

Quando não for possível passar o gás diretamente do cilindro ao aparelho de análise será necessário o uso de um cilindro intermediário de amostragem. Os cilindros intermediários em aço inoxidável dos tipos de uma ou duas válvulas deverão resistir à pressão de teste de 70 bar e não devem ser excessivamente cheios. Recomenda-se pesar o cilindro de amostragem antes e após enchimento.

A relação máxima de enchimento do cilindro deverá ser de 1 kg/litro em climas temperados e 0,75 kg/litro em climas tropicais.

O processo de limpeza do cilindro e coleta do gás consiste em:

- Abrir a válvula de saída de gás do cilindro de amostragem;
- Submeter o cilindro ao vácuo, durante aproximadamente 20 minutos;
- Fechar a válvula do cilindro;
- Conectar ao reservatório de SF<sub>6</sub>;
- Abrir a válvula de entrada do cilindro de amostragem e deixar encher completamente com SF<sub>6</sub>;
- Fechar as válvulas tanto do cilindro de amostragem, como também do container que está sendo amostrado;
- Efetuar a purga do cilindro de amostragem, abrindo a válvula de saída de gás para retirar todo o gás do cilindro, sendo que o gás de purga deve ser recebido em reservatório próprio de coleta de gás usado, de modo que não seja descartado no ambiente;
- Repetir esta operação por mais duas vezes, sempre recebendo o gás em recipiente apropriado, para descarte e futuro tratamento;
- Por fim coletar amostra na quantidade necessária respeitando-se a taxa de enchimento;

Todo o esforço deve ser feito para assegurar que o cilindro de amostragem esteja quimicamente limpo. Os cilindros de amostragem não devem ser usados para materiais diferentes do SF<sub>6</sub>. Quando eles não estiverem em uso devem ser armazenados com uma leve sobrepressão de SF<sub>6</sub> (figura 13).



**Figura 13:** Exemplo de cilindros de amostragem de SF<sub>6</sub> (capacidade 500 ml).

### 4.3 Ensaios de aceitação

Os ensaios de aceitação do gás SF<sub>6</sub> novo são descritos nas normas IEC 60376 e ASTM D 2472-81.

Para aceitação do gás, devem ser observados os limites descritos nas tabelas constantes do item 4.1, de acordo com os quais deve ser emitido um certificado de qualidade pelo fornecedor do gás, apresentando os valores reais da partida entregue. Quando da recepção do gás fica a critério do usuário, sugere-se a repetição de todos os ensaios, sendo recomendado principalmente o de teor de água, fluoretos hidrolizáveis, teor de ar e teor de óleo mineral. A tabela 8 apresenta os métodos de ensaios descritos nas normas mencionadas.

**Tabela 8 - Métodos de ensaio para aceitação do SF<sub>6</sub> novo.**

Ensaio	Método	Norma	
		IEC	ASTM
Identificação	Infravermelho	IEC 60376	--
	Densidade		
Teor de água	Gravimétrico	IEC 60376	D 2029
	Eletrolítico		
	Ponto de orvalho		
Fluoretos hidrolizáveis	Colorimétrico	IEC 60376	--
Acidez	Titulação	IEC 60376	D 2284
Teor de CF <sub>4</sub> , O <sub>2</sub> e N <sub>2</sub>	Cromatografia de gás	IEC 60676	D 2685
Teor de óleo mineral	Infravermelho	IEC 60376	--
Peso molecular	Densidade	--	D 1070
Toxidez	Compatibilidade biológica	IEC 60376	D 2472

O método indicado pela ASTM para determinação de Fluoretos hidrolizáveis, na prática determina acidez. A seguir são apresentados o objetivo e uma descrição simplificada de cada um dos métodos de ensaio.



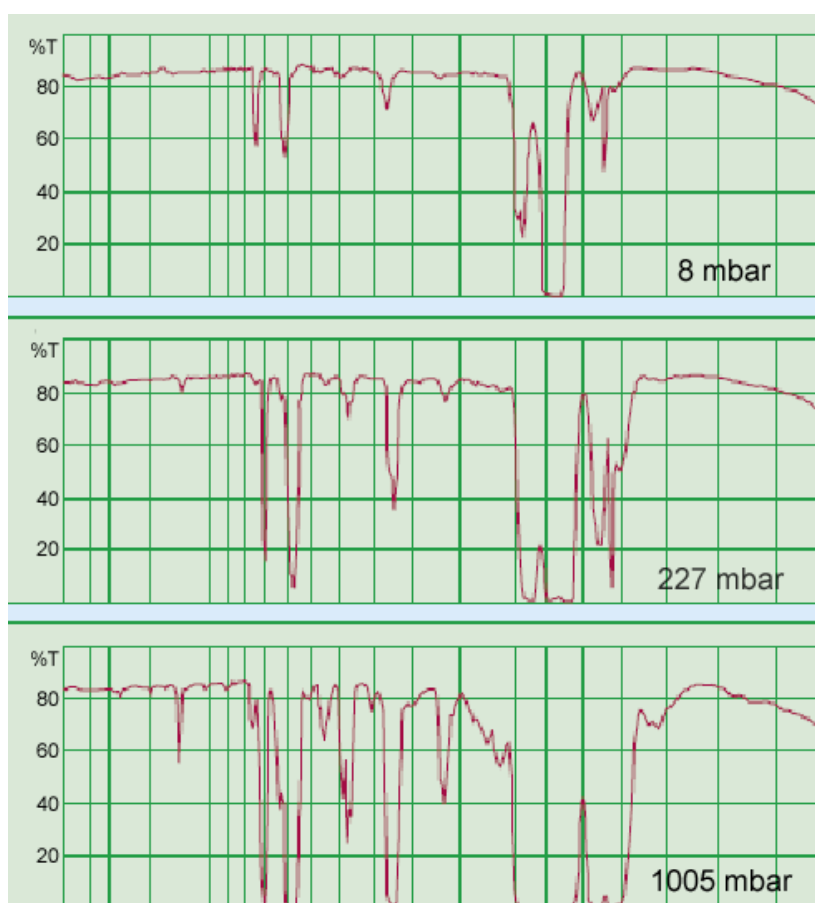
### 4.3.1 Identificação

Este ensaio tem como objetivo confirmar que o gás fornecido é realmente o hexafluoreto de enxofre ( $\text{SF}_6$ ).

**Método de ensaio** - Para a identificação do gás fornecido, dois métodos podem ser usados: o de espectrofotometria de infravermelho e o de densidade. Ambos encontram-se descritos em detalhe na norma IEC 376, seção 7.

O primeiro necessita de um aparelho de espectrofotometria de infravermelho e consiste basicamente em se traçar o espectro do gás fornecido e compará-lo com o de um gás previamente identificado como sendo  $\text{SF}_6$ .

O  $\text{SF}_6$  apresenta, na análise por espectrofotometria de infravermelho, em torno de 15 picos característicos, em determinados comprimentos de onda ( $\text{cm}^{-1}$ ), conforme mostra a figura 14.



**Figura 14:** Espectros do  $\text{SF}_6$ , registrados em três diferentes concentrações (janela de NaCl).

O método de densidade consiste na pesagem de um volume conhecido de gás. O método é suficientemente preciso e rápido, requerendo para sua determinação uma ampola de vidro de 100 ml, dotada nas extremidades de válvulas estanques ao vácuo, e uma balança analítica. O resultado é obtido através da relação entre a massa e o volume da amostra. A norma ASTM D 1070 apresenta outros métodos para determinação da densidade.

### 4.3.2 Teor de água

Em geral o elemento em maior quantidade entre os produtos condensáveis no gás SF<sub>6</sub> novo é a água.

**Métodos de ensaio** – Vários métodos para determinação de teor de água são conhecidos, como por exemplo, o método gravimétrico, o de ponto de orvalho e o eletrolítico. Entretanto, o método gravimétrico é mais preciso e o que deve ser utilizado para verificação dos outros métodos. Para ensaios rotineiros os métodos mais usados são o do ponto de orvalho e o eletrolítico, por serem mais rápidos.

**Método gravimétrico** - O método gravimétrico consiste em se fazer passar um volume conhecido de SF<sub>6</sub> através de tubos contendo perclorato de magnésio anidro. O acréscimo de massa dos tubos, após passagem de um volume conhecido de gás, indica a quantidade de água contida no volume de gás. Devido às dificuldades inerentes ao método, o ensaio deve ser executado por técnicos experientes. As mudanças das condições ambientais durante o ensaio, tais como umidade e temperatura, podem influenciar nos resultados. Este método, apesar da precisão dos resultados obtidos, é extremamente caro e não pode ser considerado como de utilidade em análise de rotina.

**Método do ponto de orvalho** – A temperatura da condensação das impurezas em um gás, isto é, o seu ponto de orvalho, é medida passando-se uma amostra de gás através de uma célula fechada na qual é exposta uma superfície (quase sempre um espelho de metal) cuja temperatura é baixada artificialmente de modo controlado. Quando a temperatura da superfície é reduzida, as impurezas do gás, tais como a água e/ou outras substâncias condensáveis, se depositam na superfície espelhada formando uma névoa visível ou “orvalho”. A temperatura da primeira aparição do “embaçamento” do espelho não pode ser usada por si mesma para determinação do ponto de orvalho. A temperatura em que essa condensação permanece estável é o ponto de orvalho. Entretanto vale lembrar que particularmente para pontos de orvalho baixos, o que é normal para gases isolantes elétricos, a verdadeira temperatura do ponto de orvalho é ligeiramente maior do que a temperatura na qual a condensação é observada. Com auxílio de uma tabela fornecida pelos fabricantes de equipamentos de medição, determina-se a quantidade de água e função do ponto de orvalho medido. Este cálculo já é intrínseco dos equipamentos mais modernos.

Os instrumentos existentes para determinação do ponto de orvalho são de dois tipos:

a) Instrumentos automáticos: A maioria desses instrumentos tem seu funcionamento baseado no princípio do resfriamento de uma superfície polida (espelho) sobre a qual passa um fluxo de gás a ser analisado. O espelho é resfriado até a formação de uma névoa sobre sua superfície, oriunda da condensação da umidade contida no gás sob determinada temperatura. Um arranjo ótico eletrônico regula a capacidade de resfriamento, e a temperatura do espelho é medida com um sensor Pt-100.

O conjunto de medição é formado basicamente por uma bateria Peltier, onde o lado frio desta bateria é um espelho de ponto orvalho com um sensor de temperatura acoplado. O calor residual produzido é dissipado através de um ventilador. A formação de condensado é controlada por um arranjo ótico eletrônico e um foto-resistor, quando então é processado num controlador Peltier. A corrente que circula é ajustada de maneira que uma condensação bem definida seja formada no espelho. A

temperatura do ponto de orvalho é medida através do sensor de temperatura (Pt-100), amplificada e após estabilizada é então indicada no medidor digital (figura 15).

b) Instrumentos manuais: Estes são feitos de muitas formas, mas têm uma característica comum, que é o controle manual do resfriamento do espelho em função da aparição ou do desaparecimento do condensado.

O instrumento foi desenvolvido para suprir a necessidade de um equipamento de custo aceitável e utilizado sem a necessidade de amostragem de gás. Evita a maioria das dificuldades operacionais, é facilmente operado por pessoal com experiência mínima e ao mesmo tempo oferece uma boa precisão. As características essenciais deste instrumento são:

- Embora se use em termômetro comum, a temperatura da superfície refrigerada do espelho é medida precisamente, utilizando um termômetro apropriadamente projetado que faz parte da massa isotérmica na qual está o espelho. Esta concepção assegura uma alta resistência térmica entre o espelho refrigerado e o ar do ambiente, de modo que as perdas caloríferas no espelho são pequenas. Isto assegura que a temperatura do espelho seja constante em toda a sua área e idêntica a do receptáculo do termômetro;
- A observação da primeira aparição de condensado é feita facilmente por meio de duas características de projeto. Primeiramente, o espelho refrigerador, ou seja, um disco com cerca de 1 cm de diâmetro de cobre niquelado polido, é cercado, sem solução de continuidade sensível, por uma superfície de comparação refletora que é sempre mais quente que o espelho refrigerador e permanece livre de condensação: Em segundo lugar, uma tela enegrecida, que é disposta de maneira que todas as superfícies refletoras pareçam pretas quando não houver depósito presente. Essas duas características asseguram que o depósito apareça, assim que seja produzido, sob a forma de um disco branco delimitado por um fundo negro, que pode ser observado clara e imediatamente, mesmo que não se tenha experiência com o espelho.

Esse instrumento é projetado para usar CO<sub>2</sub> sólido em acetona refrigerante e resultados com precisão melhor que 1°C, nos pontos de orvalho em torno de - 50°C, e resultados mais precisos em pontos de orvalho superiores.



**Figura 15** - Instrumento para medição de ponto de orvalho – DP-19.

**Método eletrolítico** - O elemento básico do higrômetro eletrolítico é uma célula através da qual passa o gás contendo umidade. Estas células contêm dois eletrodos de fio de ródio enrolados no interior ou no exterior de um tubo isolante. O pequeno espaço entre estes eletrodos é preenchido por um filme de pentóxido de fósforo. Uma tensão contínua é aplicada entre estes eletrodos. Enquanto o pentóxido de fósforo estiver inteiramente seco nenhuma corrente passará pela célula. O gás a ser analisado é passado através da célula sendo a sua umidade absorvida pelo pentóxido de fósforo. Simultaneamente uma corrente elétrica passa através do filme provocando a eletrólise da água absorvida. A energia elétrica necessária para a eletrólise total da água é uma medida da quantidade de água absorvida de acordo com a lei de Faraday. Se a vazão do gás é constante e precisamente conhecida, o fluxo de corrente elétrica, quando se estabelece o regime permanente, é uma medida da concentração de água no gás. Essa corrente deve ser medida por um amperímetro de precisão. Este é o método usual, mas nos casos em que não se consegue atingir o regime permanente, a corrente deve ser registrada utilizando-se um registrador potenciométrico. Nesse caso a energia é calculada por integração.

Todas as conexões do instrumento com a linha de amostragem devem ser completamente metálicas. Recomenda-se o uso de aço inoxidável. A exatidão do aparelho depende da eficiência de absorção, da precisão do medidor de fluxo e do amperímetro. A eficiência da absorção, em particular, pode conduzir a erros sem que ocorra nenhuma indicação. Isto é mais provável de acontecer quando a aparelhagem não é utilizada somente para o gás SF<sub>6</sub> novo. Nestes casos ela pode ter sido saturada por água, contaminada por vapores de óleo, etc.

Quando o aparelho é usado somente para verificações de gás novo, recomenda-se a calibração a cada 12 meses. Para a calibração devem-se fazer ensaios comparativos tendo como referência o método gravimétrico e amostras de SF<sub>6</sub> que não contenham mais que 15 ppm em massa de água. O resultado obtido não deve variar mais que 2 ppm em relação a este valor. No caso de um aparelho eletrolítico ser usado para diversos fins, recomenda-se calibrações mais freqüentes de modo a assegurar sua exatidão.

Além da recalibração periódica indicada, é interessante sempre que possível uma verificação mais freqüente pela análise do SF<sub>6</sub> contido em um cilindro já analisado, guardado especialmente para este fim. É permitido o uso de nitrogênio com a mesma concentração de água por umidade de volume, isto é, abaixo de 80 ppm em massa.

### 4.3.3 Fluoretos hidrolisáveis

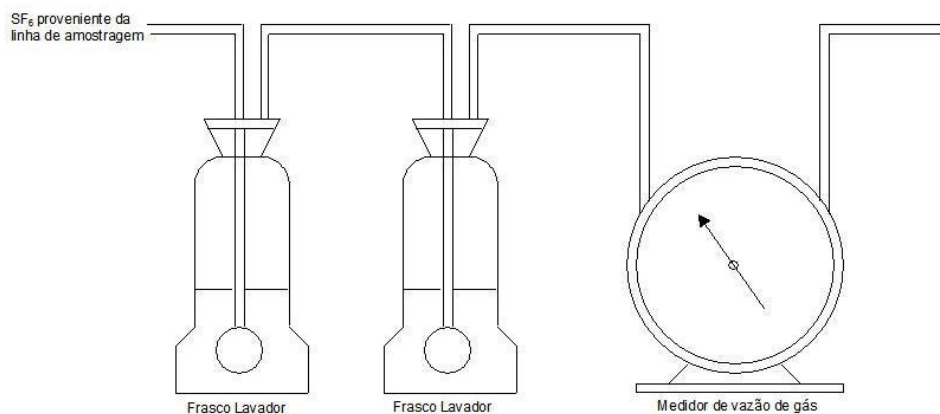
Método de ensaio – O gás é agitado em uma ampola de 1.000 ml com uma solução de hidróxido de sódio. Os íons flúor liberados são dosados por colorimetria, após a adição do reagente complexante de lantânio alizarina. Para este método é necessário o uso de um colorímetro fotoelétrico ou de um espectrofotômetro que abranja a região da luz visível.

### 4.3.4 Acidez

Método de ensaio – As impurezas ácidas ou os produtos de decomposição de caráter ácido presentes na amostra de gás são absorvidos por uma solução alcalina, padronizada, de hidróxido de sódio. O

excesso de base é titulado (titulação de retorno) com uma solução padrão de ácido sulfúrico, em presença de um indicador (púrpura de bromo cresol em solução alcoólica). O resultado é expresso em partes por milhão em massa.

A figura 16 a seguir apresenta um esquema da aparelhagem para determinação de acidez do gás SF<sub>6</sub>.



**Figura 16** - Sistema para determinação da acidez livre.

#### 4.3.5 Tetrafluoreto de carbono (CF<sub>4</sub>), oxigênio (O<sub>2</sub>) e nitrogênio (N<sub>2</sub>)

**Método de ensaio** – Uma amostra do gás SF<sub>6</sub> é injetada em um cromatógrafo de gás que separa os três componentes, se presentes. O pico correspondente a cada gás é comparado com os de uma mistura padrão de composição conhecida e os resultados são expressos em partes por milhão.

O método descrito pela ASTM determina somente a quantidade de nitrogênio e, baseado na composição do ar (70% de N<sub>2</sub> e 21% de O<sub>2</sub>), obtém-se a quantidade de oxigênio.

O método IEC determina diretamente por cromatografia as quantidades de tetrafluoreto de carbono, oxigênio e nitrogênio.

#### 4.3.6 Teor de óleo mineral

Este método se aplica a determinação da quantidade de óleo mineral em SF<sub>6</sub> novo. A presença de óleos minerais no gás SF<sub>6</sub> deve-se a utilização de sistemas hidráulicos para compressão do gás, durante sua produção e armazenamento.

**Método de ensaio** – O óleo mineral em suspensão no SF<sub>6</sub> é absorvido em tetracloreto de carbono pelo borbulhamento de um volume conhecido de gás através desse solvente contido em dois tubos de absorção. A concentração do óleo mineral no tetracloreto é então determinada pela absorvância da solução no espectro de infravermelho em 2930 cm<sup>-1</sup> (inverso do comprimento de onda), correspondente a faixa de absorção dos grupos metil e metileno parafínicos. Pelo valor de absorvância obtido determina-se o conteúdo de óleo, em ppm, através de um gráfico com curva padrão.

Por ser tóxico, o tetracloreto de carbono, em locais onde é proibido o seu uso, pode ser substituído por tetracloroetileno, que possui toxidez inferior. Nesse caso, a precisão do método é diminuída, especialmente para teores baixos de óleo. A aparelhagem utilizada é similar a da figura 16, porém com a utilização do solvente clorado nos frascos lavadores, para absorção do óleo mineral.

#### 4.3.7 Peso molecular

**Método de Ensaio** – O peso molecular é obtido do valor de densidade nas condições normais de temperatura e pressão (273 K ou 0°C/1 atm), conforme os procedimentos recomendados no item 4.3.1, assumindo-se que 1 mol do gás ocupa 22,4 litros nestas condições.

#### 4.3.8 Toxidez

**Método de Ensaio** – O método de compatibilidade biológica para a determinação do grau de toxidez do gás novo consiste na exposição de cobaias a um ambiente de aproximadamente 80% de SF<sub>6</sub> e 20% de O<sub>2</sub> (em volume) durante determinado período de tempo. O resultado do ensaio consiste na observação do comportamento das cobaias após o ensaio, conforme os critérios contidos em cada norma IEC ou ASTM.

## 5 GÁS USADO E PRODUTOS SÓLIDOS DE DECOMPOSIÇÃO

Durante a operação dos equipamentos elétricos, o gás isolante está continuamente submetido a esforços elétricos que podem provocar sua decomposição. Nas subestações blindadas, em condições normais de operação, com exceção dos equipamentos de interrupção de arco, a decomposição do SF<sub>6</sub> é muito lenta resultando em quantidades muito pequenas de produto. Entretanto, quando o SF<sub>6</sub> é utilizado em equipamentos de interrupção de arco ou nos demais equipamentos quando em condições anormais de operação, são produzidas quantidades apreciáveis de produtos de decomposição, que irão contaminar o gás isolante.

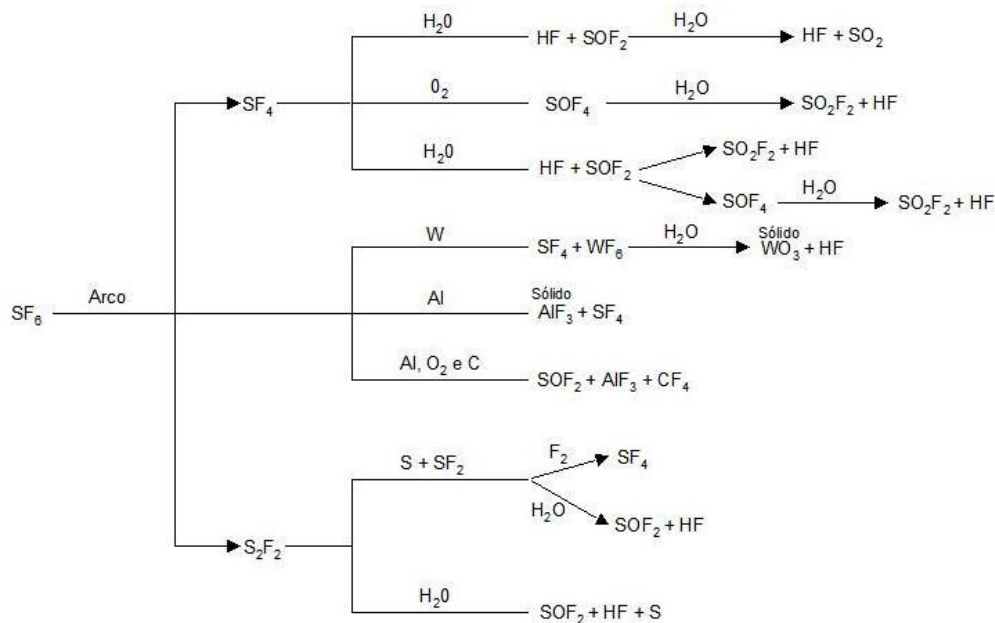
### 5.1 Contaminantes no gás usado

O gás SF<sub>6</sub> usado apresenta alguns contaminantes que já estavam presentes no gás novo. Outros são gerados pela ação de descargas elétricas durante a operação do equipamento. Dependendo do equipamento, a presença de contaminantes tem maior ou menor importância. Por exemplo, nos disjuntores normalmente são encontrados quantidades apreciáveis de produtos de decomposição.

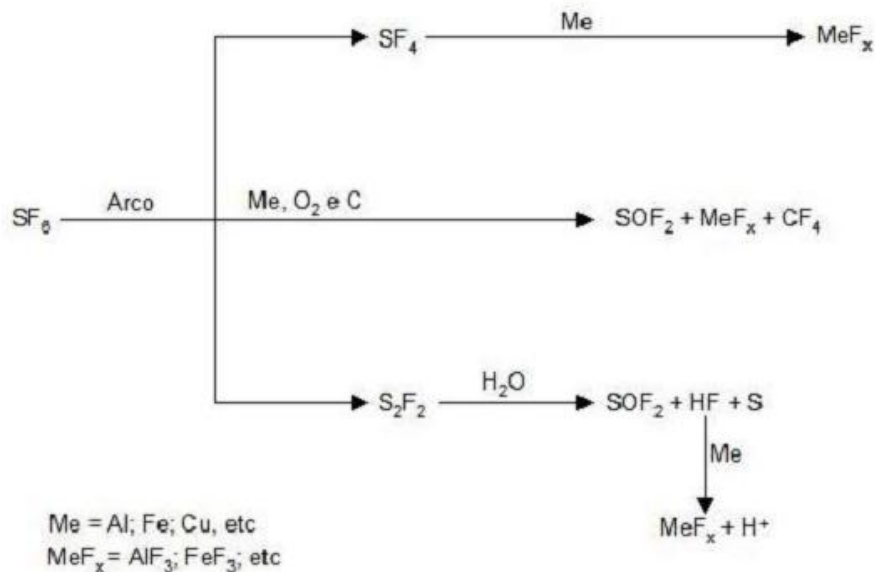
A descarga elétrica decompõe o SF<sub>6</sub> formando produtos gasosos e sólidos. Os principais produtos gasosos de decomposição do SF<sub>6</sub> por descarga elétrica são o fluoreto de sulfúrico (SO<sub>2</sub>F<sub>2</sub>), o dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>), o fluoreto de tionila (SOF<sub>2</sub>) e o fluoreto de hidrogênio (HF). A figura 17 apresenta as reações de decomposição do SF<sub>6</sub> sob arco elétrico.

A formação de produtos sólidos na maioria dos casos depende dos materiais de construção e dos sistemas isolantes, que foram envolvidos durante o defeito ou falha. Tais produtos são geralmente constituídos de fluoretos metálicos ou seus produtos de hidrólise.

A figura 18 apresenta um diagrama com a formação dos principais produtos sólidos de decomposição sob arco.



**Figura 17** - Diagrama de formação dos produtos de decomposição do SF<sub>6</sub> sob condições de arco.



**Figura 18** - Diagrama de Formação dos produtos sólidos de decomposição do SF<sub>6</sub>.

Além desses, algumas vezes são encontrados também os sulfetos metálicos, o enxofre puro, o carbono e o metal puro finamente dividido, formados por erosão.

Os mais sérios contaminantes que podem estar presentes em uma subestação blindada a SF<sub>6</sub> são as partículas condutoras. As partículas de metal ou os materiais carbônicos têm a tendência de se

posicionarem no gás SF<sub>6</sub> entre o condutor interno e a blindagem aterrada. Quando essas partículas tocam qualquer dos eletrodos elas se carregam e são repelidas pelo mesmo. Dependendo de suas massas, da tensão aplicada, do espaço entre os eletrodos e de outros fatores, elas podem ou não atingir o outro eletrodo antes da inversão da polaridade em um sistema de 60 Hz. Em qualquer dos casos, a cada vez que uma partícula atinge qualquer eletrodo, uma pequena descarga ocorre. Nas tensões normais de operação, mesmo que as descargas causem ionização local do gás SF<sub>6</sub>, não ocorre ruptura completa do isolamento interno. Entretanto, se o gradiente de tensão for suficientemente alto, as partículas são aceleradas tão rapidamente que a ionização por colisão ocorre mais rápido que a velocidade de absorção dos íons pelas moléculas de SF<sub>6</sub>, neste caso, a avalanche iônica provoca a ruptura completa do isolamento interno.

Certas impurezas como o nitrogênio somente resultam na diluição do produto, o que não é importante quando a porcentagem é baixa. Outras impurezas devem estar limitadas a pequenas quantidades, de forma que tanto separadamente quanto em combinação, elas não apresentem perigo à operação do equipamento no qual o gás é utilizado. Por exemplo, algumas impurezas ácidas e oxigênio (especialmente em combinação) podem ocasionar corrosão levando a defeitos mecânicos de operação. A água em combinação com qualquer impureza ácida pode condensar em baixas temperaturas ou altas pressões de operação com perigo para a segurança do equipamento.

Não há regras precisas referentes a limites aceitáveis para uso de gás puro uma vez que eles dependem em grande parte do projeto e da localização do equipamento, da distância mínima de descarga, da presença de arco interno, da natureza dos elementos em contato com o gás, de dispositivos absorventes, etc. O fabricante deve indicar claramente para cada equipamento qual o nível máximo de impurezas permitido para o tratamento ou substituição. Entretanto, o SF<sub>6</sub> de maneira geral não pode ser usado quando o seu teor de impurezas condensáveis der um ponto de orvalho na pressão de operação do equipamento maior que a menor temperatura de operação. A tabela 9 apresenta um resumo das principais impurezas encontradas no SF<sub>6</sub> e suas possíveis origens.

### 5.1.1 Impurezas provenientes do manuseio e em serviço

Enchimento e esvaziamento do equipamento podem ocasionar introdução de ar e vapor de água.

A umidade pode ser dessorvida de superfícies internas do equipamento e de partes poliméricas. Óleos provenientes de manuseio de equipamentos (bombas e compressores) podem ser introduzidos ao SF<sub>6</sub>.

**Tabela 9: Origem das impurezas do gás SF<sub>6</sub>.**

Situação	Fontes de impurezas	Possíveis impurezas
Durante manuseio e em serviço.	Vazamentos e vácuo deficiente. Dessorção.	Ar, óleo, H <sub>2</sub> O.
Exercendo isolação.	Descargas parciais: corona e centelhamento.	HF, SO <sub>2</sub> , SOF <sub>2</sub> , SOF <sub>4</sub> e SO <sub>2</sub> F <sub>2</sub> .
Comutação.	Arco, erosão. Erosão mecânica.	H <sub>2</sub> O, HF, SO <sub>2</sub> , SOF <sub>2</sub> , SOF <sub>4</sub> , SO <sub>2</sub> F <sub>2</sub> , CuF SF <sub>6</sub> , SF <sub>4</sub> , WO <sub>3</sub> , CF <sub>2</sub> e AlF <sub>3</sub> . Partículas metálicas.
Arco interno.	Fusão e decomposição de materiais.	Ar, H <sub>2</sub> O, HF, SO <sub>2</sub> , SOF <sub>2</sub> , SOF <sub>4</sub> , SO <sub>2</sub> F <sub>2</sub> , SF <sub>4</sub> e CF <sub>4</sub> . Partículas metálicas, AlF <sub>3</sub> , FeF <sub>3</sub> , WO <sub>3</sub> , CuF <sub>2</sub> .



### 5.1.2 Impurezas durante funcionamento normal do equipamento

Durante o funcionamento do equipamento, pode ocorrer decomposição do SF<sub>6</sub> por descargas parciais (corona e centelhamento). Ocorre a fragmentação do SF<sub>6</sub>, formando SF<sub>5</sub>, SF<sub>4</sub> e flúor atômico, que se combinam com O<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>O e formam outros compostos, principalmente HF, SO<sub>2</sub>, SOF<sub>2</sub>, SOF<sub>4</sub>, e SO<sub>2</sub>F<sub>2</sub>. Devido a baixa energia das descargas parciais, a quantidade formada destes compostos geralmente é desprezível.

### 5.1.3 Impurezas em equipamentos de comutação

Durante a interrupção de corrente, a existência de altas temperaturas devido ao arco leva à formação de produtos de decomposição do SF<sub>6</sub>, à vaporização de metais, de plásticos e geração de impurezas. Também ocorrem reações químicas entre os produtos formados. A quantidade desses produtos é dependente do número de operações, do desenho do equipamento e do uso de absorventes sólidos.

Equipamentos de comutação podem também conter partículas provenientes do atrito entre os contatos.

### 5.1.4 Impurezas devido a arcos internos

A ocorrência de arcos internos é extremamente rara. As impurezas no SF<sub>6</sub> em equipamento sob arco são similares as normalmente encontradas em equipamentos de comutação. A diferença está na quantidade dos compostos formados, que levam ao risco potencial de toxidez. Além disso, ocorre vaporização de materiais metálicos, ocorrendo também produtos de reações adicionais.

## 5.2 Amostragem

### 5.2.1 Amostragem do gás usado

A manipulação do gás SF<sub>6</sub> usado exige cuidados especiais devido à natureza tóxica dos seus produtos de decomposição. O item 8 trata especificamente sobre este tema.

A amostra de gás deve ser representativa do material presente no equipamento. Em quase todos os casos o SF<sub>6</sub> estará presente no estado gasoso e conseqüentemente uma amostra gasosa deve ser retirada. Entretanto, em alguns casos uma grande porção do gás pode estar no estado líquido. Neste caso uma amostra líquida deve ser retirada, tomando-se cuidados específicos de modo a assegurar que nenhum SF<sub>6</sub> líquido fique retido entre duas válvulas fechadas. O líquido retido entre elas, com o aumento da temperatura, pode provocar um acidente.

Outros fatores que também devem ser observados são: (1) a amostra de gás não deve ser retirada através dos filtros de purificação, presentes em certos equipamentos; (2) uma quantidade suficiente de gás deve ser deixada passar pelo dispositivo de amostragem de modo a se obter uma amostra representativa; (3) armazenar o gás proveniente de purgas e outros processos em dispositivos apropriados para futuro tratamento e reaproveitamento, evitando-se a emissão para o meio ambiente.

No caso de amostragem de SF<sub>6</sub> usado, armazenado na forma líquida fora do equipamento, a amostra deve ser retirada conforme descrito para o gás novo (item 4.2).

Cilindros de amostragem – O procedimento ideal indica que a amostra deve ser transferida diretamente do equipamento para o aparelho de análise. Entretanto, quando este procedimento não for possível torna-se necessário o uso de um cilindro de amostragem de aço inoxidável.

Quando a amostra for retirada no estado líquido, o cilindro deve ser resistente a uma pressão de 70 bar e não deve ser cheio completamente. Neste caso é necessário que o peso de SF<sub>6</sub> contido em cada cilindro de amostragem seja, conforme já mencionado, de 0,75 a 1 kg por litro.

O tamanho do cilindro de amostragem deve ser coerente com o volume de amostra necessário para os ensaios. Normalmente, um volume de 20 a 25 litros a 4 atm e temperatura ambiente (80 a 100 litros de gás, na temperatura ambiente e pressão atmosférica ) é necessário para a execução da série completa de ensaios.

O cilindro para amostragem de SF<sub>6</sub> não deve ser usado para outras substâncias e após o seu uso normal deve ser limpo conforme indicado no item 4.2.

Antes da amostragem, deve ser feito vácuo no cilindro, de preferência no próprio local de uso. Caso este procedimento não seja possível, fazer vácuo no cilindro logo antes de levá-lo ao local de amostragem. Quando possível, recomenda-se lavar o cilindro com uma porção do gás a ser amostrada, tomando-se cuidado para não jogar o gás de lavagem no ambiente, devendo ser captado em recipiente ou dispositivo apropriado.

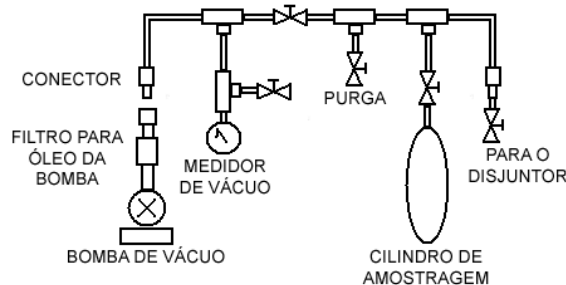
Linhas e conexões – Uma linha de amostragem é necessária, para conectar o equipamento do qual será retirada a amostra com o aparelho de análise ou com o cilindro de amostragem. A linha deve ser aproximadamente de 3 a 6 mm de diâmetro e deve ser de aço inoxidável. As juntas e conexões devem ser totalmente metálicas do tipo compressão ou soldadas. A tubulação deve ser limpa internamente e toda a graxa e resíduos de fluxo de solda devem ser removidos.

Para se executar a amostragem deve-se proceder como a seguir:

- remover a válvula do recipiente de amostragem;
- limpar a válvula com um pano seco;
- soprar ar seco no ponto de amostragem por 10 a 15 minutos, até aquecê-lo ao toque;
- conectar a linha de amostragem à válvula;
- deixar passar por alguns segundos o gás SF<sub>6</sub> pela tubulação de amostragem;
- conectar o cilindro de amostragem ou o aparelho de ensaio à linha;
- proceder o enchimento do cilindro ou o ensaio.

Recomenda-se que o cilindro seja pesado antes e imediatamente após o enchimento. Observar a taxa de enchimento.

A figura 19, a seguir, apresenta um exemplo de sistema de amostragem.



**Figura 19** - Sistema de amostragem utilizado pela British Columbia Hydro and Power Authority – Canadá.

### 5.2.2 Amostragem dos produtos sólidos de decomposição do SF<sub>6</sub>

Devido à natureza tóxica dos produtos de decomposição do SF<sub>6</sub>, a amostragem dos produtos sólidos de decomposição exige cuidados especiais de segurança que são detalhados no item 8 do presente trabalho.

Recolher com uma espátula os produtos sólidos de decomposição do SF<sub>6</sub>, tomando o máximo cuidado para evitar a dispersão do pó e o contato com a pele. Transferir o material para um recipiente com tampa e enviar para análise no laboratório.

## 5.3 Ensaio de Controle do Gás Usado

Os ensaios de controle do gás SF<sub>6</sub> usado são descritos na norma IEC 480.

Para acompanhamento do gás em uso nos diversos equipamentos recomenda-se que seja feito no campo o ensaio de materiais condensáveis através da determinação do ponto de orvalho. Este ensaio fornece informações sobre a presença, no gás, de água e outros materiais condensáveis (SO<sub>2</sub>, HF, etc). Caso os valores obtidos se aproximem dos limites recomendados pelo fabricante do equipamento, deve-se realizar também o ensaio de acidez para verificação da constituição dos condensáveis, isto é, água ou outros produtos.

Caso não se disponha de um equipamento para determinação do ponto de orvalho, recomenda-se a realização no campo do ensaio de teor de água e a retirada de uma amostra para ensaio de acidez em laboratório.

Como ensaios rotineiros de controle em laboratório recomendam-se o teor de água, acidez, fluoretos hidrolisáveis, oxigênio e nitrogênio. Os demais ensaios ficam a critério de cada usuário.

A periodicidade recomendada dos ensaios do gás SF<sub>6</sub> contido nos diversos equipamentos deve obedecer aos seguintes critérios:

- Recomendações do fabricante do equipamento;
- No comissionamento do equipamento;
- 2 a 3 meses antes do término da garantia do equipamento;
- Antes e após cada remanejamento, complementação ou recuperação do gás;
- Fora dos critérios acima mencionados não existe uma periodicidade uniforme para ensaios no gás.

Por ser importante, para efeito de monitoramento, ter um histórico de dados das condições do gás SF<sub>6</sub> em uso nos equipamentos, recomenda-se quando da ocorrência de defeito ou falha nos equipamentos, a realização do conjunto de ensaios de controle de laboratório.

### 5.3.1 Teor de água e materiais condensáveis

O teor de água do gás encontrado nos equipamentos em operação depende da eficiência do tratamento do gás antes do enchimento. É também função da temperatura do equipamento no momento em que é feita a medição. Devido aos fenômenos de absorção, o teor de água do gás varia diretamente com a temperatura do equipamento. A determinação do teor de água é muito importante, pois:

- um alto teor de água pode acelerar a decomposição do SF<sub>6</sub> durante condições de arco ou corona;
- a água acelera a corrosão dos materiais, quando em presença dos produtos de decomposição;
- um alto teor de água pode conduzir aos fenômenos de condensação a baixas temperaturas.

**Método de ensaio** – Para a determinação do teor de água no SF<sub>6</sub> em equipamentos elétricos deve ser utilizado os mesmos métodos descritos para o gás novo (item 4.3.2.). Os métodos mais recomendados para ensaios no campo são o eletrolítico e o de ponto de orvalho. No caso de utilização do ponto de orvalho, o resultado obtido corresponderá ao somatório do teor de água e dos outros materiais condensáveis (por ex. SO<sub>2</sub>, HF). Para determinar o valor real de água deve-se subtrair a parcela correspondente aos outros materiais condensáveis, o que pode ser feito pela realização do ensaio de acidez.

### 5.3.2 Acidez

O controle da acidez do SF<sub>6</sub> contido em equipamentos é muito importante devido às impurezas ácidas acelerarem a corrosão, provocando falhas mecânicas. As impurezas ácidas, quando combinadas com a

água podem condensar em temperaturas baixas de operação, ou quando em altas pressões de operação, com perigo para a segurança elétrica do equipamento.

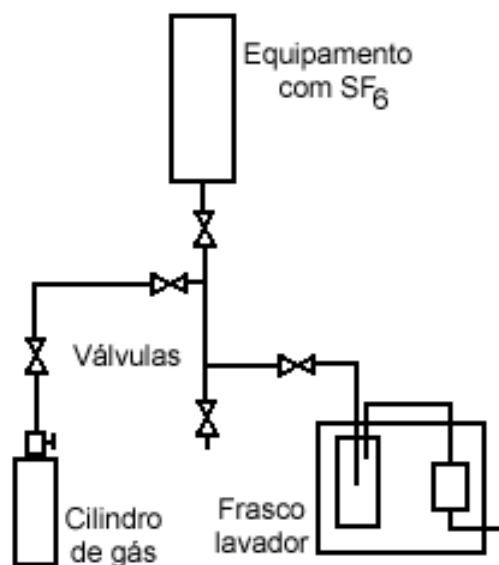
**Método de ensaio** – O método de ensaio para determinação da acidez do SF<sub>6</sub> em equipamentos encontra-se descrito na IEC 480, seção 8.

A acidez do SF<sub>6</sub> é medida borbulhando-se 20 litros do gás em uma solução diluída de hidróxido de sódio contendo indicador. A quantidade de gás necessária para mudar a cor do indicador é registrada, e a acidez resultante é calculada através da concentração da base (NaOH) e do volume de gás passado pela solução. A acidez do SF<sub>6</sub> é a concentração total dos ácidos presentes em partes por milhão (ppm), em massa, calculada como ácido fluorídrico (HF). Outros produtos hidrolisáveis, como por exemplo, o SOF<sub>2</sub> e o SF<sub>4</sub>, que podem ser formados pela degradação do SF<sub>6</sub>, também serão determinados por este método, como quantidade equivalente a HF.

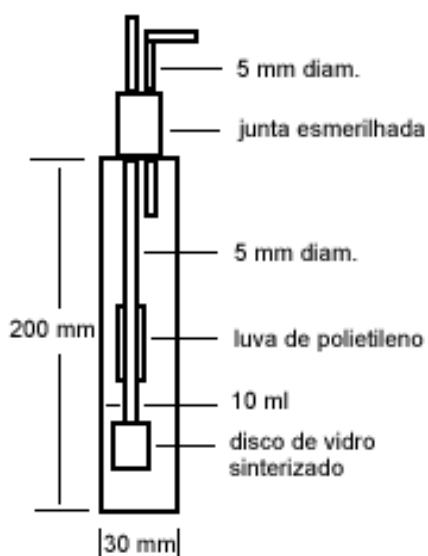
As figuras 20 e 21 apresentam o diagrama esquemático e um dispositivo necessário para realização do ensaio.

### 5.3.3 Fluoretos hidrolisáveis

O controle de teor de fluoretos hidrolisáveis é importante devido ao fato de que estes compostos (SF<sub>4</sub>, SOF<sub>2</sub>, etc.), quando em presença de umidade, tendem a formar HF, o que acelera os problemas de corrosão.



**Figura 20** - Esquema do dispositivo para a determinação da acidez do SF<sub>6</sub>.



**Figura 21** - Detalhe do frasco lavador do dispositivo de determinação da acidez do SF<sub>6</sub>.

**Método de ensaio** – Para a execução deste ensaio dois métodos podem ser utilizados. Em ambos o gás SF<sub>6</sub> é borbulhado através de uma solução de hidróxido de sódio para obtenção de uma solução de íons fluoretos. No método A os fluoretos são determinados por colorimetria enquanto que no método B a determinação é potenciométrica. Ambos estão descritos na norma IEC 480, seção 9. As condições descritas nesses métodos são menos precisas que aquelas especificadas para o SF<sub>6</sub> novo (item 4.3.3). Entretanto, as técnicas de amostragem descritas são de mais simples execução no campo.

Tanto o método A como o método B estimam a quantidade de fluoreto hidrolisáveis contida no gás em ppm massa de ácido fluorídrico (HF). A aparelhagem necessária para a realização deste ensaio é semelhante a utilizada para o ensaio de acidez (item 5.3.2, figura 20), exceto que para este ensaio são usados dois frascos lavadores conectados em série.

O método A necessita de um espectrofotômetro de ultravioleta-visível, enquanto que para o método B é preciso um potenciômetro com eletrodo seletivo para íons fluoretos e um eletrodo de referência (calomelano).

### 5.3.4 Teor de oxigênio

O teor de oxigênio do SF<sub>6</sub> deve ser mantido o mais baixo possível de modo a evitar a formação de substâncias ácidas nocivas ao equipamento. O oxigênio pode ser acidentalmente admitido como resultado de vazamento de ar durante a transferência de gás.

**Método de Ensaio** – A determinação do teor de oxigênio pode ser feita basicamente por dois métodos. Entretanto, para ensaios em campo o método recomendável é o do analisador portátil de oxigênio, que avalia a susceptibilidade magnética do gás. O outro método, por cromatografia de gás, é o de uso normal em laboratório. Esses métodos são descritos na norma IEC 480.

O método da susceptibilidade magnética baseia-se no fato de que o oxigênio é um dos poucos gases

que possuem um forte paramagnetismo.

Os aparelhos necessários para o método da susceptibilidade magnética são de dois tipos: O de rotor suspenso e o de bobina magnética. Ambos são capazes de detectar oxigênio em SF<sub>6</sub> até o limite de aproximadamente 250 ppm em massa, o que equivale a 1.000 ppm em volume.

O método de cromatografia de gás é o mesmo descrito para o gás novo (item 4.3.5).

### 5.3.5 Rigidez dielétrica

O ensaio de rigidez dielétrica do SF<sub>6</sub>, da mesma maneira dos outros gases usados como meio isolante (por exemplo, ar), não é utilizado no controle de manutenção periódica. Entretanto, pode ser utilizado como um controle alternativo da qualidade do meio isolante.

A presença dos produtos de decomposição do SF<sub>6</sub> não altera significativamente sua rigidez dielétrica. Entretanto, é influenciada pela presença de partículas condutoras e de umidade.

**Método de Ensaio** – Para determinação da rigidez dielétrica do SF<sub>6</sub> deve-se utilizar o método ASTM D 2477.

### 5.3.6 Identificação

O ensaio de identificação do gás SF<sub>6</sub> contido em equipamento normalmente só é usado quando se tem dúvidas quanto a natureza do meio isolante.

**Método de Ensaio** – Para identificação do SF<sub>6</sub> deve ser utilizado os métodos para o gás novo (item 4.3.1).

### 5.3.7 Identificação dos produtos gasosos de decomposição

O objetivo deste ensaio é a identificação e quantificação dos diversos produtos gasosos de decomposição do SF<sub>6</sub>.

**Método de Ensaio** – Os produtos gasosos resultantes da decomposição do SF<sub>6</sub> sob condições de arco elétrico podem ser analisados através da cromatografia em fase gasosa. Estas técnicas permitem a determinação dos seguintes gases CF<sub>4</sub>, SOF<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>F<sub>2</sub>, pentafluoreto de enxofre (S<sub>2</sub>F<sub>10</sub>), tetrafluoreto de enxofre (SF<sub>4</sub>), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e tetrafluoreto de silício (SiF<sub>4</sub>), desde que a amostragem seja feita em recipientes especiais de TEFLON®, ou que os ensaios sejam realizados diretamente no recipiente sob análise.

As técnicas de análise cromatográficas normalmente utilizadas para determinação desses gases fazem uso de detetores de condutividade térmica. Quando essas impurezas estão presentes na ordem de uma dezena de ppm em volume, equipamentos analíticos mais sofisticados são necessários, como por exemplo, sistema especiais de cromatografia de gás associado a um espectrômetro de massa (CG/EM).

## 5.4 Ensaios dos produtos sólidos de decomposição do SF<sub>6</sub>

Algumas propriedades dos principais produtos sólidos de decomposição do SF<sub>6</sub> encontram-se descritas na tabela 10.

**Tabela 10 - Propriedades dos produtos sólidos de decomposição de SF<sub>6</sub>.**

Propriedade	C	S <sub>6</sub>	Al <sub>2</sub> S <sub>3</sub>	FeS	CuS <sub>2</sub>	CuF <sub>2</sub>	CuF	FeF <sub>3</sub>	FeF <sub>2</sub>	AlF <sub>3</sub>
Cor	preto	Amarelo	amarelo	marron	preto	azul	vermelho	verde	verde/azul	incolor
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	2,10	2,07	2,02	4,94	5,70	-	-	3,00	~ 4	3,07
Ponto de fusão (oC)	-	120	1.100	1103	1100	-	908	-	> 1000	1040
Calor de formação (kcal/mol)	-	-	126	22,8	19-20	132	-	233	-	250 a 330
Peso molecular	12	257	150	88	159	102	82,5	113	93,9	64
Solúvel	ácidos e álcalis	Álcalis	decompõe ao ar úmido	ácidos	ácidos e álcalis	ácidos e álcalis	ácidos	água e álcalis	água e álcalis	água

A identificação e a análise dos produtos sólidos de decomposição envolvem a combinação de vários métodos. As características estruturais podem ser determinadas por difração de Raio-X, microscopia eletrônica de varredura e métodos dispersivos.

A composição elementar pode ser determinada por espectroscopia de emissão em plasma e os componentes iônicos podem ser analisados por métodos analíticos convencionais por via úmida e/ou análise de íons específicos.

## 6 ARMAZENAGEM DO GÁS

Os procedimentos de armazenagem mencionados a seguir são válidos para o SF<sub>6</sub> novo, usado e contaminado.

Os cilindros de SF<sub>6</sub> devem ser estocados em local próprio. Este local deve ser seco, protegido da luz solar direta, bem ventilado e de preferência resistente ao fogo. O local não deve conter materiais inflamáveis ou explosivos, nem tampouco fontes de calor. Os depósitos de cilindros de SF<sub>6</sub> devem conter pelo menos um extintor de incêndio adequado ao depósito, em local de fácil acesso. Os depósitos não devem ficar totalmente abaixo do nível do solo, bem como não devem ter ligações com lugares baixos.

Não é permitido guardar cilindros de SF<sub>6</sub> em escadarias, corredores, áreas de circulação, passagens estreitas e de circulação de veículo ou mesmo perto delas, saída de emergência, garagem, estacionamento de veículo e ambientes de trabalho.



No caso de utilização de sistema de exaustão forçada no local de estocagem, este sistema deve ser colocado na parte inferior, uma vez que o SF<sub>6</sub> é cerca de 5 vezes mais pesado que o ar. Nos depósitos não é permitida a operação de transvazamento ou esvaziamento de cilindro.

Os cilindros devem estar de acordo com norma ABNT NB-46, ou seja, deve ser da cor bege, notação 10 YRT/5 e devem conter no mínimo as seguintes informações:

- Fórmula química do gás: SF<sub>6</sub>;
- Nome do gás: hexafluoreto de enxofre;
- Nome do fabricante;
- Nome do distribuidor nacional;
- Prazo de validade do ensaio hidrostático.

Os cilindros de SF<sub>6</sub> devem ser estocados na posição vertical e presos na parede ou em suporte, de modo a evitar quedas. Devem-se evitar choques violentos entre os mesmos. Os cilindros nunca devem ser tombados, arrastados ou rolados, mesmo a curtas distâncias. Efetuar sempre a movimentação com pequenos carros de mão específicos para movimentação de cilindros.

Os cilindros cheios de SF<sub>6</sub> novo, usado ou contaminado, assim como os cilindros vazios não devem ser armazenados no mesmo local. Os cilindros devem ser marcados ou rotulados quanto ao seu conteúdo (novo, usado ou contaminado, e cheio ou vazio).

Os cilindros devem ser sempre armazenados e transportados com as respectivas tampas protetoras das válvulas. Nunca violar os mecanismos de segurança das válvulas e dos cilindros.

Nenhuma parte do cilindro deve ser submetida a temperaturas maiores que 50°C. Temperaturas maiores que essa podem causar gaseificação total do conteúdo do cilindro, com excessivo aumento da pressão interna.

## 7 RECUPERAÇÃO DO GÁS

O gás contido em equipamentos elétricos possui quantidade variável de contaminantes que, dependendo do equipamento e de sua natureza, toxidez ou corrosividade, devem ser removidos. A remoção destes contaminantes é relativamente simples, sendo usado na maioria dos casos um equipamento de bomba de vácuo, um compressor, um tanque de armazenamento, um sistema de aquecimento e um filtro para limpeza e/ou secagem. Esses equipamentos são normalmente capazes de remover a umidade e as quantidades de produtos de decomposição formados por arco durante a operação normal dos disjuntores. Nos casos de gases provenientes de falhas internas nas unidades, o uso direto desses equipamentos pode não ser suficiente devido à grande quantidade de SOF<sub>2</sub> presente. Nestes casos, uma das soluções é a utilização de sistema de filtração suplementar com solução de soda caustica (NaOH) entre o equipamento elétrico e a unidade de recuperação.

Caso o gás SF<sub>6</sub> esteja contaminado com ar, SF<sub>4</sub>, e/ou gases inertes, para sua recuperação é necessário liquefazer o SF<sub>6</sub> e purgar a fase gasosa até eliminação completa dos contaminantes.

Para a remoção da umidade normalmente são utilizados filtros a base de peneira molecular (molecular sieve 3A ou 4A) ou filtros de alumina. Os filtros de peneira molecular são mais eficientes do que os de alumina para a remoção de umidade. A cal sodada é outro meio utilizado na remoção da umidade de gás já que tanto o hidróxido de cálcio quanto o hidróxido de sódio são higroscópicos.

A ativação da alumina e da peneira molecular pode ser feita por aquecimento em corrente de ar ou gás inerte seco. A recuperação dos filtros de peneira molecular é feita pela passagem de nitrogênio ou ar seco aquecido a 150°C, em contrafluxo. Os filtros de alumina não são recuperáveis e uma vez saturados devem ser substituídos.

A remoção dos produtos de decomposição do SF<sub>6</sub>, devido as suas características ácidas, é normalmente feita com o uso de adsorventes alcalinos ou de características nucleofílicas. Os mais utilizados comercialmente são a alumina ativa (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), e a cal sodada (CaO + NaOH), ou ainda a mistura desses dois absorventes. A alumina ativa consiste em alumina tratada a altas temperaturas. As granulometrias mais utilizadas estão na faixa de 8 a 12 mesh, embora outras também sejam usadas. Outro adsorvente que produz bons resultados é o carvão ativado.

A cal sodada não é passível de reutilização devido a mesma atuar por reações químicas que a decompõem. Não é possível se determinar a quantidade de adsorvente necessária para cada caso. Entretanto, sugere-se o uso de uma quantidade de adsorvente de cerca de 10% em peso do gás a ser tratado. O adsorvente deve ser posicionado de maneira a permitir o máximo de contato com todo o volume de gás. Se o tratamento envolve também a fase líquida, colocar o adsorvente em ambas as fases. Caso isto não seja possível, posicione-o na fase líquida.

Independentemente do material utilizado, o importante é garantir que os elementos adsorventes estejam em boas condições (não saturadas), de modo a obter-se a máxima eficiência no tratamento.

Devido à impossibilidade de manter os materiais dos filtros em contato com o ambiente, estes devem ser adquiridos em embalagens individuais de 1 kg cada.

## **8 ASPECTOS DE SEGURANÇA NOS SERVIÇOS DE MANUTENÇÃO**

### **8.1 Considerações Gerais**

Nas condições ambientais, o hexafluoreto de enxofre puro é um gás incolor, inodoro, atóxico, quimicamente estável e inerte, praticamente insolúvel em água e não inflamável. Quando presente em concentrações superiores a 35% em volume no ar ambiente pode provocar a asfixia devido à redução do teor de oxigênio do ar para valores inferiores aos mínimos necessários para a respiração (17% em volume).

O risco de concentrações elevadas do gás é maior em instalações localizadas ao nível do solo, em ambientes não ventilados e/ou que possuam porões e dutos para cabos, devido à alta densidade do

SF<sub>6</sub> (cerca de 5 vezes a do ar). O valor máximo permitido de SF<sub>6</sub> no ar para uma jornada normal de trabalho é de 1.000 ppm (6.000 mg/m<sup>3</sup>).

Quando submetido a descarga ou arco elétrico, o SF<sub>6</sub> se decompõe formando quantidade de produtos de decomposição que dependem do número, da intensidade e do tempo de duração do arco. Os produtos de decomposição formados podem reagir por sua vez com os contaminantes presentes no gás e com os materiais de construção dos equipamentos formando produtos gasosos e sólidos. Nestas reações formam-se fluoretos de enxofre gasosos e fluoretos metálicos sólidos (por ex. Al<sub>2</sub>F<sub>3</sub>, pó branco). Os principais compostos formados são: tetrafluoreto de enxofre (SF<sub>4</sub>), fluoreto de enxofre (SF<sub>2</sub>), óxido de flúor sulfuroso (SO<sub>2</sub>F<sub>2</sub>), difluoreto de enxofre (S<sub>2</sub>F<sub>2</sub>) e o fluoreto de tionila (SOF<sub>2</sub>). Alguns desses compostos por sua vez podem reagir com a umidade do gás dando origem ao ácido fluorídrico (HF) e o dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>).

A natureza tóxica destes produtos de decomposição exige dos técnicos de manutenção e operadores dos equipamentos cuidados especiais de segurança que são descritos no item 8.3. A não observância dos mesmos pode levar desde a simples irritação da pele até desmaios e distúrbios circulatórios. O item 8.4 orienta aos primeiros socorros, nos casos de contato com estes produtos.

Os produtos de decomposição apresentam um odor acre, semelhante a ovo podre, que pode ser percebido mesmo em baixas concentrações, quando o nível de toxidez é praticamente nulo. Devido a isto, este é um excelente aviso de presença dos mesmos.

A concentração máxima no ar dos principais produtos de decomposição, para uma jornada normal de trabalho, encontra-se a seguir:

- SOF<sub>2</sub> = 1 ppm (v/v);
- SO<sub>2</sub>F<sub>2</sub> = 100 ppm (v/v);
- SO<sub>2</sub> = 5 ppm vol – 13 mg/m<sup>3</sup>;
- HF = 3 ppm vol – 2 mg/m<sup>3</sup>;
- Fluoretos = 25 mg/m<sup>3</sup>.

Além destes, outros produtos podem surgir no processo de decomposição do SF<sub>6</sub> sob arco ou ainda pela interação destes produtos com os materiais dos equipamentos. A lista a seguir apresenta as concentrações máximas permitidas no ar, para uma jornada de trabalho, destes produtos.

- SF<sub>4</sub> = 0,1 ppm (v/v);
- S<sub>2</sub>F<sub>2</sub> = 0,5 ppm (v/v);
- SOF<sub>4</sub> = 1 ppm (v/v);
- Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> = 2,5 mg/m<sup>3</sup>;

- $S_2F_{10}$  = 0,025 ppm (v/v) - 0,25 mg/m<sup>3</sup>;
- $WF_6$  = 0,1 ppm (v/v);
- $SiF_4$  = 0,6 ppm (v/v);
- $CF_4$  = 1000 ppm (v/v);
- $CS_2$  = 10 ppm (v/v);
- CO = 50 ppm (v/v);
- $H_2S$  = 20 ppm (v/v).

Nos recintos fechados onde existem equipamentos contendo  $SF_6$ , todos os acessos devem conter aviso da existência do gás no local, da possível liberação de produtos nocivos no caso de falha nos equipamentos e dos procedimentos de segurança aplicáveis.

## 8.2 Equipamentos de proteção individual

A tabela 11 a seguir relaciona as situações que podem ocorrer em locais em que existam equipamentos isolados a  $SF_6$ , e os equipamentos de proteção individual E.P.I que devem ser utilizados em cada situação encontrada nos serviços de manutenção (item 8.3).

**Tabela 11 – Equipamentos de proteção individual necessários para as diversas condições de manutenção.**

Condição	Quantidade de oxigênio no ambiente	Presença de produtos de decomposição	Equipamentos de proteção individual *
1	> 17%	Não	Nenhum
2	> 17%	Sim	3 ou ( 4 + 5 ) 6 ou 7 8 9
3	< 17%	Não	1
4	< 17%	Sim	2 ou ( 1 + 5 ) 6 ou 7 8 9

\* Os números indicados nesta coluna correspondem aos equipamentos da relação a seguir.

1. Respirador autônomo.
2. Respirador autônomo com máscara facial.
3. Máscara facial (grau de proteção 3) com filtros combinados contra gases ácidos (letra B) e aerodispersóides, conforme norma DIN 3181.
4. Máscara semi-facial (grau de proteção 3) com filtros combinados contra gases ácidos (letra B) e aerodispersóides, conforme norma DIN 3181.
5. Óculos contra fumos e gases, armação de borracha sem ventilação, retenção através de elástico e lente incolor ou com armação de vinil sem furos da ampla visão com lente de policarbonato.
6. Guarda-pó de mangas compridas, comprimento abaixo do joelho, descartável ou não, dos seguintes materiais: tecido plastificado impermeável, polietileno ou papel reforçado com nylon.
7. Macacão ou calça e jaqueta impermeável.
8. Luvas, descartáveis ou não, de neoprene, PVC ou polietileno.
9. Botas de PVC ou neoprene ou cobertura para proteção de botas comuns.

#### OBSERVAÇÕES:

- Os equipamentos de proteção individual devem ser mantidos em locais de fácil acesso, fora e próximo das instalações que contenham o SF<sub>6</sub>. Os cuidados com estes equipamentos devem seguir a orientação de seus fabricantes;
- A vida útil dos filtros de respiração é determinada pelo tamanho e pelas condições de uso dos mesmos;
- Os filtros contra aerodispersóides tendem a entupir com a disposição contínua de partículas. Pelo aumento da resistência respiratória o usuário nota a saturação do filtro.
- A capacidade de absorção de um filtro contra gases é limitada em função da quantidade do material ativo que ele contém. Quando utilizados até o limite de sua capacidade de absorção, o usuário normalmente é alarmado com antecedência pela recepção do odor ou por irritação mucosa.
- Os equipamentos de proteção individual são descartáveis. Porém, quando utilizados nos serviços em equipamentos contendo produtos de decomposição do SF<sub>6</sub>, devem ser retirados e lavados diariamente com água e sabão neutro após o serviço, neutralizando-se em seguida a água de lavagem com soda.
- Os equipamentos de proteção individuais descartáveis utilizados devem ser retirados com máximo cuidado evitando-se a dispersão do pó e colocados em um recipiente (por ex. tambor

de 200 litros). A seguir os mesmos devem ser neutralizados em uma solução a 3% de soda. Após a neutralização estes materiais poderão ser descartados de acordo com a legislação local dos órgãos ambientais.

### 8.3 Cuidados e precauções nos serviços de manutenção

a) A permanência de pessoas que trabalhem em ambientes fechados que contenham equipamentos com SF<sub>6</sub>, para operação ou manutenção preventiva desses equipamentos, sem que se processe a abertura do equipamento ou expansão do SF<sub>6</sub> para o meio ambiente, não exige a utilização de equipamentos de proteção individuais (E.P.I.) específicos. No entanto, é aconselhável que o operador tenha em seu local habitual de permanência (por ex. sala de controle ou sala de painéis) e de fácil acesso, uma máscara facial ou uma máscara semi-facial e óculos, indicados no item 8.2.

b) No caso de falhas no interior do compartimento com SF<sub>6</sub>, em ambientes fechados, onde tenha havido ocorrência de vazamento de SF<sub>6</sub> e de seus produtos de decomposição (existência de cheiro desagradavelmente acre ou ovo podre), deve-se abandonar imediatamente o recinto e interditar a entrada do mesmo. Somente entrar no recinto com equipamentos de respiração autônomo e demais equipamentos de proteção individual (condição 4 da tabela 11) ou, após fazer-se boa ventilação (concentração de oxigênio no ar maior que 17%), com máscara facial e demais equipamentos de proteção individual (condição 2 da tabela 11).

c) No caso de necessidade de intervenção no compartimento do equipamento contendo SF<sub>6</sub>, preceder conforme a seguir:

1º Drene o gás do equipamento para um reservatório apropriado, de preferência através da unidade de tratamento de gás. Aplique vácuo ao equipamento para retirada total do gás, recolhendo-o ao mesmo reservatório utilizado na drenagem ou, quando em ambientes abertos e em pequenas quantidades (por ex. disjuntores ao tempo), liberando-o por borbulhamento lento através de uma solução de soda (NaOH) ou carbonato de sódio (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) a 3%.

2º Quando da abertura do equipamento, a equipe de manutenção deve estar usando os equipamentos de proteção individual indicados na tabela 11.

3º Antes de entrar no equipamento, inspecione-o para verificar a existência de produtos sólidos de decomposição.

4º Se não forem encontrados produtos sólidos de decomposição, ventile o equipamento com ar por 10 minutos. Após esse procedimento dispensa-se o uso dos equipamentos de proteção individual específicos. Durante o trabalho no interior do mesmo mantenha uma ventilação suave.

5º Se forem encontrados produtos sólidos de decomposição, a equipe de manutenção deve utilizar os equipamentos de proteção individual indicados na condição 2 da tabela 11. A remoção destes produtos deve ser feita com aspirador de pó. Os aspiradores com filtro de papel (grau de porosidade maior que 5%) são os mais apropriados. A exaustão deste equipamento deve ser feita bem longe da área de trabalho. Todas as partes internas devem ser esfregadas com um pano seco que não solte

fibras, para remover os produtos sólidos não removidos pelo processo de aspiração. Após esse procedimento dispensa-se o uso dos equipamentos de proteção individual específicos.

d) Os produtos sólidos de decomposição do SF<sub>6</sub> e todos os materiais usados na operação de limpeza tais como panos filtros do aspirador, elementos filtrantes de gás do disjuntor e das unidades de tratamento e equipamentos de proteção individual descartáveis devem ser manuseados com o máximo cuidado, evitando-se a dispersão do pó (o elemento filtrante não deve ser aberto) e colocados em um recipiente (por ex. tambor 200 litros). A seguir, os mesmos devem ser neutralizados em uma solução de soda a 3%, após o que poderão ser descartados de acordo com a legislação local dos órgãos ambientais.

## 8.4 Cuidados quanto ao homem

O hexafluoreto de enxofre comercializado não é tóxico, porém quando submetido a descargas ou arco elétrico ocorre formação de produtos de decomposição de vários graus de toxidez. Os produtos de decomposição gasosos mesmo em pequenas concentrações, abaixo dos limites de intoxicação, podem ser percebidos pela presença de um cheiro desagradavelmente acre ou de ovo podre.

Em geral os produtos de decomposição gasosos e sólidos são de natureza irritante, podendo causar desconforto, como náuseas, enjôo, dificuldade de respiração e irritação dos olhos e vias respiratórias. Além disso, os produtos sólidos podem causar uma sensação de queimadura da pele. Estes efeitos são reversíveis e não produzem danos permanentes as áreas afetadas, se o tempo de exposição for pequeno.

Devido a diluição do oxigênio do ar, o gás SF<sub>6</sub> mesmo quando puro, em determinadas concentrações no ar ambiente, pode ocasionar asfixia. Concentrações elevadas podem ocorrer em instalações sem ventilação, bem como em subsolos ou tubulações para cabos.

Deve ser evitado o contato dos produtos de decomposição com a pele, os olhos e a roupa bem como a inalação ou ingestão dos mesmos. Deve-se cuidar da limpeza do corpo, das vestimentas e do ambiente de trabalho.

Não comer, beber ou fumar, nem guardar alimentos em instalações contendo equipamentos com SF<sub>6</sub> ou próximo a equipamentos sob manutenção.

Deve-se evitar o uso de lentes de contato, quando em exposição a produtos de decomposição do SF<sub>6</sub>.

Durante os intervalos do serviço de manutenção e após o mesmo é aconselhável lavar-se cuidadosamente com água em abundância e sabão neutro.

No caso de asfixia ou contaminação por inalação, retire a vítima de imediato do local contaminado, e deixe-a em local arejado e caso seja necessário, aplicar respiração artificial. Recomenda-se em ambos os casos a consulta a um médico.

No caso de produtos de decomposição atingirem os olhos, deve-se lavá-los ininterruptamente com água em abundância e procurar de imediato socorro médico.

Quando estes produtos atingirem a pele, lavar imediatamente as partes contaminadas, com água em abundância, e em seguida lavá-las com solução saturada de carbonato de sódio ou sabão neutro. Recomenda-se a seguir a consulta a um médico. Se as roupas estiverem contaminadas deverão ser retiradas de imediato.

## **9 CONSIDERAÇÕES SOBRE MANUTENÇÃO DE EQUIPAMENTOS ISOLADOS A SF<sub>6</sub>**

### **9.1 Considerações Gerais**

Apesar do grande campo de aplicação do SF<sub>6</sub> em equipamentos elétricos em nível internacional, no Brasil o seu uso restringe-se a disjuntores, chaves interruptoras, subestações e barramentos (fluodutos) blindados.

Este item trata dos cuidados sobre os procedimentos durante os serviços de instalação e manutenção isolados a SF<sub>6</sub>.

a) Nos equipamentos fornecidos com SF<sub>6</sub> deve-se verificar se a pressão positiva de gás está no valor recomendado pelo fabricante. Caso este valor seja inferior ao esperado porém superior a pressão atmosférica, deve-se procurar e reparar o vazamento. Entretanto, se a pressão interna for igual a pressão atmosférica, devem-se seguir os procedimentos recomendados pelo fabricante, devido à possibilidade de presença de contaminação.

b) Nos equipamentos fornecidos com nitrogênio ou sem pressão de gás, onde é necessária a instalação do elemento dessecante, deve-se procurar expor este elemento pelo menor tempo possível às condições ambientais.

c) Nos casos de equipamentos fornecidos com pressão de gás, onde a pressão final se iguala à atmosférica, ou nos casos de equipamentos fornecidos com nitrogênio ou sem pressão de gás, faz-se necessária a realização de vácuo nos equipamentos antes do enchimento dos mesmos com gás SF<sub>6</sub>. As condições e os procedimentos de execução do vácuo nestes tratamentos dependem dos projetos dos equipamentos e variam de acordo com o fabricante.

d) Em todos os casos deve-se efetuar a retirada do ar existente nas tubulações, nos dispositivos e nas mangueiras usadas no processo de enchimento, injetando-se SF<sub>6</sub> ou submetendo-se a um processo de vácuo.

e) Durante a colocação do gás, deve-se controlar a vazão do gás SF<sub>6</sub> abrindo-se um pouco a válvula de redução da garrafa, para evitar o seu congelamento.

Nas manutenções preventivas, onde for necessária a abertura dos compartimentos que contem gás SF<sub>6</sub>, devem-se tomar precauções e seguir as recomendações citadas no item 8.3 (cuidados e precauções nos serviços de manutenção).

Após os serviços que exigem a retirada do gás, será necessária a realização do enchimento do



equipamento com gás SF<sub>6</sub>. Para tanto, deve-se proceder conforme a recomendação de cada fabricante de equipamento.

Além dos ensaios convencionais normalmente realizados durante a manutenção das chaves, interruptores, disjuntores e subestações blindadas (por ex. resistência de contato, fator de potência), os equipamentos isolados a SF<sub>6</sub> são normalmente submetidos aos seguintes ensaios:

Estanqueidade ou detecção de vazamento: Este ensaio tem por objetivo detectar, a partir da queda de pressão, vazamento anormal de SF<sub>6</sub>. Nesta verificação, deve-se levar em conta a variação normal da pressão com a temperatura ambiente.

Para os equipamentos que utilizam gás SF<sub>6</sub>, é admitida uma queda de pressão de gás, prevista pelos fabricantes, sem caracterizar vazamento no equipamento.

Caracterizado um vazamento, a sua localização é feita através de detectores especiais, que são equipamentos portáteis e fornecem indicação ótica (micro-amperímetro) e/ou acústica de vazamento.

A procura do ponto de vazamento é feita por meio de uma sonda manual (pistola) que detecta a mistura de ar e SF<sub>6</sub>. Para a localização do vazamento deve-se percorrer o equipamento com a sonda manual. O aumento ou redução na intensidade do sinal emitido indica se a sonda se aproxima ou se afasta do ponto de vazamento, o que facilita sua localização; a leitura do micro-amperímetro indica a quantidade de gás SF<sub>6</sub> contido na mistura.

Teor de umidade do gás: Este ensaio tem por finalidade verificar a presença de umidade no gás, o que provoca aumento das perdas dielétricas, acelera a decomposição do SF<sub>6</sub> em presença de arco ou corona e acelera a corrosão dos materiais quando frente a produtos de decomposição.

Os métodos mais recomendados para a medição do teor de umidade são o eletrolítico e o ponto de orvalho, já descritos no item 4.3.2.

Os valores esperados de teor de umidade são estabelecidos pelos fabricantes do equipamento dependendo deste e de sua pressão de trabalho. Normalmente, em disjuntores, por exemplo, o teor de umidade do SF<sub>6</sub> novo, até a pressão de 7 bar, está na faixa de 150 a 200 mg/kg, a 20°C, e o SF<sub>6</sub> usado, um máximo de 300 a 500 mg/kg, a 20°C.

Ensaio de tensão aplicada: Este é um tipo de ensaio que é executado em alguns equipamentos específicos, tais como subestações e barramentos blindados, isolados a SF<sub>6</sub>. Normalmente não é executado em chaves de interrupção a SF<sub>6</sub> nem em disjuntores a SF<sub>6</sub> de uso externo. É executado na instalação completa e tem por finalidade determinar o estado de seu isolamento. Ele detecta possíveis danos de transporte ou ainda a presença de qualquer material estranho que porventura tenha sido deixado dentro do equipamento, antes da unidade ser posta em serviço. Detecta, ainda, partículas condutoras que podem estar em suspensão no gás ou nas superfícies isolantes.

Este não é um ensaio de uso rotineiro na manutenção preventiva, e sim durante a fabricação das unidades e por ocasião de suas instalações. No entanto, ele é normalmente executado após a manutenção corretiva.

Consiste na aplicação por tempo de 1 minuto, de uma tensão acima da nominal, na frequência industrial, cujo valor varia de acordo com a classe de tensão nominal do equipamento. Este será considerado em boas condições se suportar a tensão de ensaio pelo tempo estipulado sem apresentar descargas internas.

Verificação do monitor de gás: Este ensaio tem por objetivo verificar a correta atuação de dispositivo cuja finalidade é controlar as condições de densidade do SF<sub>6</sub> através da pressão do gás, sendo normalmente, compensado para variações de temperatura ambiente. Esta verificação deve ser feita antes dos ensaios do teor de umidade. Com o equipamento na pressão nominal, drena-se lentamente o gás acompanhando a atuação dos contatos de supervisão de pressão de gás através da indicação da pressão em um manômetro de precisão previamente instalado. Em seguida, estabelece-se lentamente a pressão nominal do equipamento, verificando os valores de pressão de normalização da situação de cada contato de supervisão.

Resistência de contato em subestação e barramentos blindados: Este ensaio tem a finalidade de verificar a resistência de contato das conexões dos barramentos e buchas, dos contatos dos disjuntores, seccionadores, chaves de aterramento, na montagem e nas manutenções. É executada a medição da queda de tensão entre os terminais do componente a ser ensaiado, em que se faz passar uma corrente contínua, de acordo com a norma IEC correspondente (usualmente 100 A).

## 9.2 Grupo de recuperação e transferência de gás

### 9.2.1 Objetivo

A estação móvel de tratamento de gás tem as seguintes funções:

- Evacuar o gás no equipamento;
- Vaporizar o SF<sub>6</sub> líquido e encher o equipamento com o gás;
- Retirar o gás de equipamento, liquefazendo-o simultaneamente;
- Armazenar o SF<sub>6</sub> sob a forma líquida;
- Encher cilindros com SF<sub>6</sub> sob a forma líquida;
- Filtrar, limpar e secar o gás SF<sub>6</sub>;
- Encher o equipamento com nitrogênio, se necessário.

A limpeza e a secagem do gás ocorrem tanto no processo de liquefação, como no de enchimento. A estação móvel de tratamento pode ser utilizada nos serviços de montagem, condicionamento de compartimentos, manutenção e reparos.

## 9.2.2 Descrição dos componentes

O grupo de recuperação é formado pelos seguintes componentes:

- Unidade de filtragem: Os elementos filtrantes (ver item 7) retiram do gás a umidade e os produtos de decomposição do SF<sub>6</sub>;
- Unidade de vácuo: É composta por uma bomba de vácuo necessária a todas as operações de envaziamento do sistema;
- Compressor de gás: É utilizado para comprimir o gás para armazená-lo em reservatórios ou cilindros. Esta operação é executada sempre abaixo dos valores de pressão e temperatura críticas do gás;
- Unidade de refrigeração: Esta unidade fica instalada após a saída do compressor com a finalidade de resfriar o gás após sua compressão;
- Unidade de liquefação: Esta unidade é composta pelo compressor e pela unidade de refrigeração do gás;
- Unidade de armazenagem: Esta unidade é composta pelos cilindros e tanques para armazenamento do SF<sub>6</sub> líquido.



**Figura 22:** Estação de tratamento de gás SF<sub>6</sub>.

Alguns grupos de recuperação possuem, ainda, uma unidade de evaporação com a finalidade de vaporizar o SF<sub>6</sub> líquido quando do enchimento dos equipamentos. Além destes componentes, os grupos de recuperação possuem dispositivos de proteção como, por exemplo:

- Sensores de pressão de atuação no compressor para proteção de baixa pressão na entrada, e de alta pressão na saída do mesmo. O de alta pressão desliga o compressor no caso de a pressão atingir valores acima de 35 bar a 20°C, ou seja, a pressão crítica do SF<sub>6</sub>;
- Termostato do evaporador para proteção do evaporador contra o sobreaquecimento.

### 9.2.3 Procedimento de Utilização

Os procedimentos de utilização da estação de tratamento do gás, que envolvem trabalho com gás SF<sub>6</sub> contaminado, exigem cuidados especiais de segurança devido à natureza tóxica dos seus produtos de decomposição. Devem ser, portanto, observados os aspectos de segurança mencionados no item 8. Estes aspectos de segurança devem também ser observados quando da manutenção da própria estação de recuperação (por ex. troca de filtros).

Os procedimentos de utilização dos grupos de recuperação de gás variam com os tipos e fornecedores dos mesmos. Entretanto, todos utilizam os mesmos princípios de operação:

a) Retirada de N<sub>2</sub> ou ar do equipamento.

O gás é drenado do equipamento, através do grupo de recuperação, para a atmosfera. Neste procedimento são feitas apenas manobras de válvulas no grupo de recuperação, sem a necessidade de utilização de quaisquer dos componentes principais descritos, podendo-se apenas controlar a pressão de gás por um de seus manômetros.

b) Evacuação do equipamento para enchimento.

O gás residual, na pressão atmosférica, é retirado do equipamento através da bomba de vácuo do grupo de recuperação e liberado para a atmosfera. Os demais componentes descritos não são necessários nesta etapa.

c) Enchimento do Equipamento:

Acopla-se o cilindro ao grupo de recuperação e purga-se toda a linha até o equipamento com o gás de enchimento. Neste procedimento normalmente não é necessário a utilização de quaisquer dos componentes do grupo de recuperação.

No caso de o enchimento ser executado com o cilindro de SF<sub>6</sub> na posição invertida, ou seja, com a válvula na posição mais baixa, faz-se necessária a utilização do evaporador de modo a vaporizar o SF<sub>6</sub> líquido antes da entrada no equipamento.

d) Retirada do gás SF<sub>6</sub>.

O gás é transferido do equipamento para o reservatório de armazenamento do grupo de recuperação, utilizando a unidade de liquefação (compressor com unidade de refrigeração). Quando a pressão do gás dentro do equipamento atingir a pressão atmosférica, faz-se uma manobra de válvula para o funcionamento em série da bomba de vácuo. Este procedimento retira o gás SF<sub>6</sub> residual do equipamento. Através deste processo o gás passa pelos filtros do grupo de recuperação, que retiram a umidade, os óleos do compressor e da bomba de vácuo, caso presentes, além de produtos de decomposição do gás. No processo de liquefação do gás SF<sub>6</sub> ocorre a separação do ar que porventura esteja misturado ao SF<sub>6</sub>.

e) Reenchimento do equipamento.

O gás é transferido do reservatório de armazenamento do grupo de recuperação diretamente para o equipamento. Alguns carrinhos permitem que esta transferência se faça através do compressor.

Quando o tanque de armazenamento possibilita a retirada do SF<sub>6</sub> no estado líquido, faz-se necessária a utilização de uma unidade de evaporação na saída do reservatório, de modo a vaporizar o SF<sub>6</sub> antes da entrada no equipamento.

## 10 BIBLIOGRAFIA

- Norma IEC 60480 – 2004: Guidelines for the checking and treatment of sulfur hexafluoride (SF<sub>6</sub>) taken from electrical equipment and specification for its re-use.
- Norma IEC 60376 – 2005: Specification of technical grade sulfur hexafluoride (SF<sub>6</sub>) for use in electrical equipment.
- Brochura CIGRÉ – SF<sub>6</sub> Recycling guide (revision 2003) – Task Force B3.02.01: Re-use of SF<sub>6</sub> gas in electrical power equipment and final disposal.
- GCOI – SCM 055 – 1985: Manuseio, segurança e manutenção do hexafluoreto de enxofre (SF<sub>6</sub>) em equipamentos elétricos.
- Catálogo Solvay Fluor.