



**XX SNPTEE  
SEMINÁRIO NACIONAL  
DE PRODUÇÃO E  
TRANSMISSÃO DE  
ENERGIA ELÉTRICA**

Versão 1.0  
22 a 25 Novembro de 2009  
Recife - PE

**GRUPO XIII**

**GRUPO DE ESTUDO DE TRANSFORMADORES, REATORES, MATERIAIS  
E TECNOLOGIAS EMERGENTES - GTM**

**ANÁLISE CROMATOGRÁFICA DE GASES DISSOLVIDOS APLICADA AOS ÓLEOS VEGETAIS ISOLANTES**

**Adriana de Castro Passos Martins(\*)**

**Dayve José Vassalo  
CEMIG GT**

**Costabile Di Sessa**

**RESUMO**

Este trabalho tem como objetivo apresentar o estado da arte de monitoramento preditivo de equipamentos preenchidos com óleo vegetal isolante por meio da análise cromatográfica dos gases dissolvidos.

Neste trabalho foram compilados os coeficientes de solubilidade dos gases comumente gerados em equipamentos elétricos estejam eles operando normalmente ou não para alguns dos óleos disponíveis comercialmente no mercado brasileiro. São apresentadas algumas considerações, como o fato de que os fabricantes de óleo recomendarem a utilização dos diagnósticos padronizados atualmente aplicáveis a óleos minerais e o fato de não existir atualmente uma base de dados suficientemente extensa que possa garantir que nenhum desvio destes padrões ocorrerá de forma a levar à necessidade de ajustes específicos para os óleos vegetais isolantes. Serão apresentados dados de monitoramento de equipamento em serviço preenchidos com óleo vegetal isolante.

Parte deste trabalho foi realizado no âmbito do GT Cigré D1.01- Líquidos Isolantes, na Força Tarefa 02- Óleo Vegetal.

**PALAVRAS-CHAVE**

Óleo Vegetal Isolante, Análise Cromatográfica de Gases Dissolvidos, Coeficientes de Solubilidade.

**1.0 - INTRODUÇÃO**

A análise cromatográfica de gases dissolvidos é uma ferramenta consagrada para diagnóstico preditivo de equipamentos elétricos tais como transformadores, reatores, reguladores de tensão, entre outros, preenchidos com óleo mineral isolante. A técnica consiste na extração dos gases dissolvidos em amostras de óleo destes equipamentos, separação e quantificação destes gases por meio de cromatografia gasosa e posterior interpretação destes resultados para a obtenção de um diagnóstico confiável para a determinação da condição operativa do equipamento em questão. Existem hoje diversos guias padronizados que auxiliam os especialistas na interpretação dos resultados da análise cromatográfica, todos eles construídos a partir de bases de dados de gases dissolvidos em equipamentos preenchidos com óleo mineral isolante. Toda a experiência de mais de 30 anos em diagnóstico de condição operativa de equipamentos do sistema elétrico por análise cromatográfica, responsável direta pela atual confiabilidade da metodologia, está construída tendo como base as taxas de geração e as relações de gases obtidas para óleo mineral isolante.

Além disto, cada tipo de fluido dielétrico vai apresentar em operação nos equipamentos uma capacidade maior ou menor de solubilizar um determinado gás com o qual entre em contato, ou de solubilizar os gases gerados a partir

(\*) Osório De Moraes, 281, Cidade Industrial – CEP 32210-140 Contagem, MG – Brasil  
Tel: (+55 31) 38785412 – Email: adrianap@cemig.com.br

da sua própria decomposição. Tal capacidade, a uma determinada temperatura, é determinada pelo coeficiente de solubilidade deste gás no fluido (Coeficientes de Ostwald).

O coeficiente de solubilidade de Ostwald ( $\alpha_x$ ) de um gás  $x$  é definido pelo volume de gás dissolvido na unidade de volume da fase líquida (óleo), nas condições de temperatura e pressão parcial do sistema, ou seja:

$$\alpha_x = \frac{V_x}{V_l}$$

onde:

$V_x$ : volume do gás  $x$ ;

$V_l$ : volume do líquido.

O Coeficiente de Ostwald também pode ser definido como a relação entre as concentrações do gás  $x$  no óleo (fase líquida) e no gás do colchão de gás.

O conhecimento destes coeficientes é de suma importância para a correta quantificação dos gases dissolvidos no fluido isolante e posterior interpretação dos resultados obtidos na análise cromatográfica. As normas atuais que estabelecem o procedimento para a determinação de gases dissolvidos apresentam apenas os coeficientes de solubilidade para os gases dissolvidos em óleo mineral isolante. Sabe-se que no caso dos óleos vegetais isolantes a composição do óleo básico varia em função dos tipos de sementes empregadas (girassol, canola, soja, etc). Assim, para cada tipo de semente ou composição de ésteres naturais utilizados para a fabricação do óleo (e consequentemente para cada marca de óleo vegetal isolante), a solubilidade dos gases no óleo vegetal isolante deve sofrer variações, mais ou menos significativas.

## 2.0 - DETERMINAÇÃO DOS GASES DISSOLVIDOS EM ÓLEOS VEGETAIS ISOLANTES

De acordo com o previsto no item 4.14 do documento *Guide for Acceptance and Maintenance of Natural Ester Fluids in Transformers* [1], a análise cromatográfica dos gases dissolvidos em óleos vegetais isolantes deve ser realizada segundo a metodologia prevista na ASTM D 3612: *Standard Test Method for Analysis of Gases Dissolved in Electrical Insulating Oils by Gas Chromatography* [2]. Segundo esta mesma referência, todos os métodos previstos na ASTM D 3612 são aplicáveis, no entanto o método C ("headspace") resulta em menor necessidade de manutenção da coluna cromatográfica quando comparado com o método de injeção direta (Método B). No caso de aplicação do Método A, observa-se uma maior dificuldade para limpeza da câmara de extração à vácuo, em função da viscosidade mais alta apresentada pelos óleos vegetais isolantes.

### 2.1 Coeficientes de Solubilidade

Para a realização da determinação do conteúdo de gases dissolvidos segundo os métodos previstos na ASTM D 3612, é necessário o conhecimento do coeficiente de Ostwald dos gases nos diferentes tipos de óleos vegetais isolantes, na temperatura de 25°C (Método A) e/ou na temperatura de 70°C (Método C). A Tabela 1 apresenta estes coeficientes de solubilidade para alguns dos óleos vegetais isolantes disponíveis no mercado brasileiro.

Tabela 1 – Coeficientes de Solubilidade (Ostwald) para Alguns Óleos Vegetais Isolantes

Gás	Tipo de Óleo							
	Biotemp®		Biovolt A®[5]		Biovolt HW®[5]		Environtemp FR3®[6]	
	25°C * [3]	70°C [4]	25°C **	70°C ***	25°C ***	70°C ***	25°C	70°C
H <sub>2</sub>	0,041	0,069	0,05	0,147	0,04	0,138	0,05	0,097
O <sub>2</sub>	0,112	0,129	0,10	0,205	0,11	0,127	0,15	0,255
N <sub>2</sub>	0,063	0,061	0,07	0,141	0,07	0,072	0,07	0,141
CH <sub>4</sub>	0,308	0,324	0,30	0,387	0,30	0,316	0,30	0,387
CO	0,094	0,097	0,11	0,168	0,10	0,103	0,09	0,148
CO <sub>2</sub>	1,29	1,055	1,19	1,047	1,24	1,005	1,33	1,187
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	1,51	1,261	1,30	1,499	1,49	1,390	1,19	1,389
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	2,04	1,550	1,47	1,697	2,0	1,510	1,45	1,677
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	2,28	1,495	1,62	1,753	2,12	1,335	1,63	1,763

\*Dados fornecidos pela ABB;

\*\*Dados disponibilizados pelo LACTEC, fornecidos pela Mineraltec;

\*\*\*Dados preliminares, fornecidos pela Mineraltec. Ensaio realizado no laboratório MGM em amostras produzidas em escala laboratorial.

Podemos observar que as principais diferenças entre os coeficientes de solubilidade dos gases para os diversos tipos de óleos vegetais isolantes são apresentadas pelos gases etano e acetileno.

A Tabela 2 apresenta, para fins comparativos, os Coeficientes de Solubilidade dos gases em alguns tipos de óleo mineral isolante, onde observamos que a principal diferença entre os coeficientes do óleo mineral e dos óleos vegetais é apresentada pelo gás acetileno.

Tabela 2 - Coeficientes de Solubilidade (Ostwald) para Óleo Mineral Isolante

Gás	Coeficientes de Solubilidade	
	25°C [2]*	70°C [2]**
H <sub>2</sub>	0,0558	0,074
O <sub>2</sub>	0,179	0,17
N <sub>2</sub>	0,0968	0,11
CH <sub>4</sub>	0,438	0,44
CO	0,133	0,12
CO <sub>2</sub>	1,17	1,02
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	1,22	1,47
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	2,59	2,09
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	1,22	0,93

\* Válidos para óleo mineral isolante com densidade de 0,855g/cm<sup>3</sup> a 15.5°C. Para óleos com outra densidade, outros coeficientes devem ser calculados.

\*\* Voltesso 35.

### 3.0 - GERAÇÃO DE GASES EM ÓLEOS VEGETAIS ISOLANTES

De acordo com as referências [1,6], os defeitos térmicos e elétricos nos equipamentos gerariam os mesmos tipos de gases em óleos vegetais isolantes que são gerados em óleos minerais isolantes, sob as mesmas condições de defeito. Também de acordo com estas referências, sob uma mesma magnitude de defeito elétricos os óleos vegetais isolantes tenderiam a produzir um volume menor de gases quando comparados ao óleo mineral isolante. Sob as mesmas condições de defeito térmico, aconteceria o contrário: os óleos vegetais isolantes tenderiam a produzir um volume maior de gases indicativos do defeito. Também pode-se observar uma evolução mais significativa de hidrogênio e etano em alguns tipos de óleos isolantes vegetais [6]. Os gases monóxido de carbono e dióxido de carbono podem ser produzidos a partir da degradação térmica do grupo éster presente nos óleos vegetais isolantes [7]. No entanto, estas tendências são indicadas por uma experiência de campo e um volume de dados ainda limitado.

#### 3.1 Experiência da CEMIG

A Tabela 3 apresenta os resultados da análise cromatográfica dos gases dissolvidos obtidos a partir de amostras coletadas em um transformador de 138kV-25MVA, energizado em 05/08/2006, com 17.700L de óleo, preenchido com Biotemp®.

Tabela 3 - Resultados da Análise Cromatográfica – Transformador 138kV-25MVA preenchido com óleo Biotemp.

Data	H2	O2	N2	CH4	CO	CO2	C2H4	C2H6	C2H2
5/8/2006	ND	2237	4877	ND	3	28	1,5	ND	ND
7/11/2006	ND	2518	8440	ND	14	163	ND	ND	ND
9/11/2006	4	7459	17530	1	29	216	,7	ND	ND
2/5/2007	4	1531	7653	1	16	94	ND	ND	ND
28/5/2007	9	855	5058	2	25	84	,5	ND	ND
2/7/2007	6	503	5526	1	30	115	,6	ND	ND
8/8/2007	7	1196	8187	1	37	154	,7	ND	ND
13/8/2007	5	410	4301	1	23	81	ND	ND	ND
29/8/2007	7	486	5212	1	33	122	,6	ND	ND
7/9/2007	6	1015	6468	1	27	106	,4	ND	ND
1/10/2007	6	841	6721	1	32	133	,5	ND	ND
11/11/2007	7	1045	8968	2	41	196	,9	,6	ND
13/12/2007	4	1368	6944	1	23	97	,4	ND	ND

3/1/2008	2	994	6458	1	23	83	1,0	ND	ND
3/1/2008	5	1059	6556	1	35	153	,4	ND	ND
27/1/2008	3	1430	6924	1	17	92	,2	ND	ND
29/2/2008	5	708	6179	1	31	131	,6	ND	ND
31/3/2008	6	689	7115	1	51	166	,6	,6	ND
17/4/2008	6	6373	28016	1	49	168	,6	,6	ND
29/11/2008	5	2571	12913	1	34	199	,3	ND	ND
4/3/2009	6	3119	15494	1	39	178	,5	,6	ND
5/3/2009	7	669	7393	1	48	210	,6	,8	ND
11/3/2009	8	1659	13027	2	59	276	,8	1,0	ND

Os resultados da análise cromatográfica dos gases dissolvidos deste transformador parecem indicar uma condição normal de operação, mesmo com a pouca experiência existente atualmente no monitoramento de equipamentos preenchidos com óleo vegetal isolante. No entanto, observa-se que, comparando-se os resultados apresentados na Tabela 3 com os resultados obtidos para transformadores preenchidos com óleo mineral isolante de mesmo porte, com o mesmo tempo de operação e condições semelhantes de carregamento médio, a taxa de evolução e a concentração dos gases apresenta-se significativamente menor no caso do óleo vegetal isolante deste transformador. Outro fato observado é que o volume total de gases extraído nas amostras do óleo vegetal isolante deste transformador é de 5 a 7 vezes menor do que o volume extraído para as amostras retiradas de transformador es preenchidos com óleo mineral isolante.

A Tabela 4 e as Figuras 1 a 3 apresentam os resultados das análises cromatográficas de amostras coletadas periodicamente de 5 transformadores idênticos de 15kV, 5kVa, que foram mantidos energizados em paralelo em condições de sobrecarga, durante o período de 14 meses, em pesquisa realizada pela CEMIG. Dois transformadores foram preenchidos com óleo vegetal isolante do fabricante A, dois foram preenchidos com óleo vegetal isolante do fabricante B e o quinto foi preenchido com óleo mineral isolante naftênico de marca consagrada no mercado nacional, para fins de comparação. Todos os transformadores foram energizados em dezembro de 2007. As temperaturas a que estavam submetidas os óleos sob teste foram monitoradas 'on-line' durante todo o período da pesquisa e não foram observadas oscilações significativas entre os transformadores.

Tabela 4: Resultados Análise Cromatográfica – Pesquisa CEMIG

Nº Série	Tipo de Óleo	Data	H2	O2	N2	CH4	CO	CO2	C2H4	C2H6	C2H2
129860	A	11/1/2008	10	487	44877	6	50	2272	3,9	367,0	ND
		15/4/2008	79	737	44171	2	178	45621	3,4	400,0	ND
		19/11/2008	2	5347	27801	1	270	30710	1,0	320,0	ND
		3/3/2009	214	1476	32561	21	265	29610	1,3	234,0	ND
165106	A	11/1/2008	8	1497	57157	9	34	4573	5,9	380,0	ND
		15/4/2008	138	507	31721	1	377	62275	6,0	320,0	ND
		19/11/2008	432	661	35027	33	606	50540	2,0	377,0	ND
		3/3/2009	337	1451	54029	36	1082	65589	3,4	413,0	ND
228124	B	11/1/2008	8	4407	39116	2	92	3780	,9	1,8	ND
		15/4/2008	31	1597	39575	ND	150	15532	18,0	9,0	ND
		19/11/2008	60	1307	42141	8	212	14999	36,0	40,0	ND
		3/3/2009	76	964	36664	9	360	15707	39,0	33,0	ND
128737	B	11/1/2008	2	2868	34564	2	71	1900	,6	ND	ND
		15/4/2008	4	5161	38961	1	212	4748	5,6	1,5	ND
		19/11/2008	4	6461	41839	2	233	2417	3,1	12,0	ND
		3/3/2009	8	1156	34222	3	498	3548	1,9	17,0	ND
218721	Naftênico	11/1/2008	5	2571	70878	4	148	5463	,6	1,3	ND
		15/4/2008	48	4616	64586	2	956	74859	3,8	8,3	ND
		19/11/2008	99	8791	58080	24	591	40346	9,2	20,0	ND
		3/3/2009	271	14307	77677	57	480	36428	16,0	46,0	ND

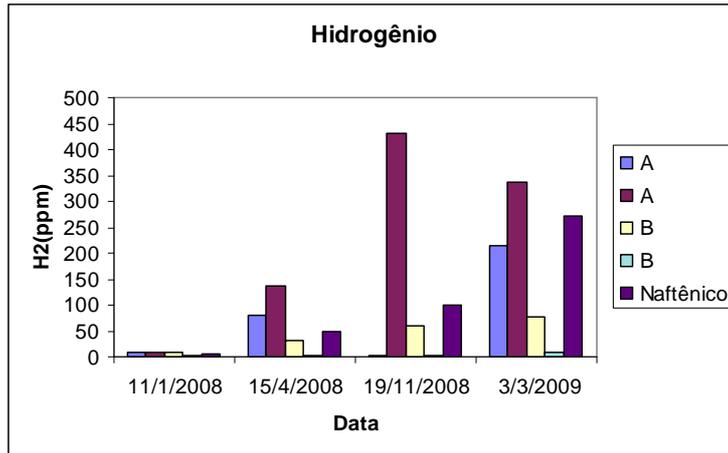


Figura 1

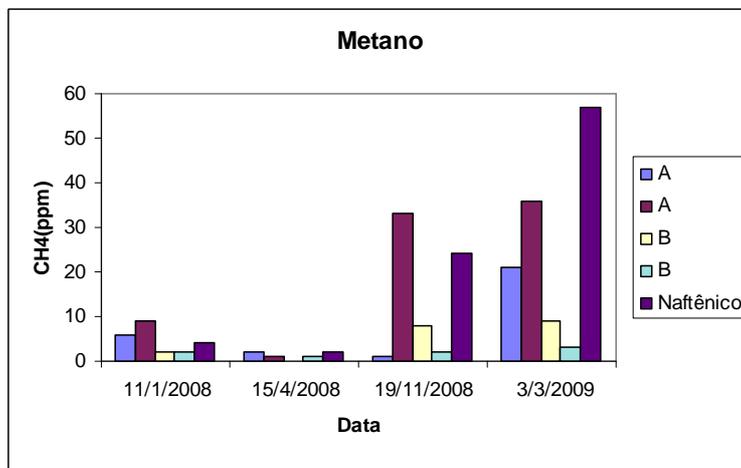


Figura 2

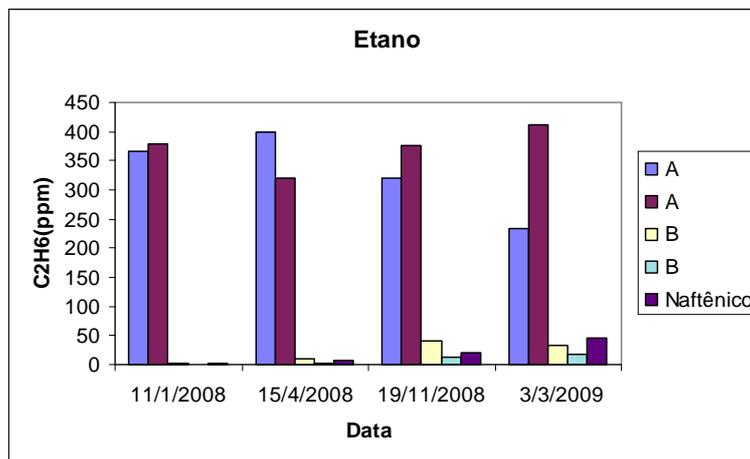


Figura 3

Os resultados das análises cromatográficas das amostras coletadas no transformador preenchido com óleo mineral isolante naftênico refletem as condições prolongadas de sobrecarga a que o transformador esteve submetido. De uma forma geral e descontando-se algumas flutuações causadas pelas condições de amostragem, a geração de hidrogênio apresentada pelo óleo vegetal isolante do fabricante B foi bem menor do que a geração apresentada pelo óleo do fabricante A, assim como as taxas de geração de etano e metano. O óleo vegetal isolante do fabricante A apresentou uma tendência bem maior de geração de etano até mesmo quando comparado com o óleo

mineral isolante. Observa-se também a evolução da concentração de monóxido de carbono em todas as unidades preenchidas com óleo vegetal isolante, geração esta que provavelmente pode ser atribuída à decomposição térmica do grupo éster presentes nestes óleos.

Em uma segunda fase da pesquisa, os transformadores objeto desta pesquisa serão ensaiados e abertos para inspeção e retirada de amostras de papel isolante, para obter-se uma melhor interpretação dos resultados.

#### 4.0 - CONCLUSÕES

Sempre que houver a introdução de um novo óleo vegetal isolante no mercado é necessário que o fabricante meça e informe os valores dos Coeficientes de Solubilidade dos Gases nas temperaturas de 25°C e 70°C.

Os resultados das análises cromatográficas obtidas em campo e em experiências localizadas até o momento apontam para a necessidade de uma formação de uma base de dados maior e consistente de resultados para que sejam definidos os critérios de diagnóstico de defeito térmico e/ou elétrico em equipamentos elétricos preenchidos com óleos vegetais isolantes, tendo-se em vista o fato significativo de que óleos vegetais de bases diferentes apresentam diferentes taxas de geração entre si e em comparação com o óleo mineral isolante para alguns gases quando submetidos às mesmas condições de solicitação. Ajustes no nível de sensibilidade dos diagnósticos deverão ser feitos, tendo em vista que as razões de gases provavelmente não serão as mesmas que hoje são utilizadas para a indicação de defeitos em transformadores preenchidos com óleo mineral isolante.

#### 5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) IEEE *Guide for Acceptance and Maintenance of Natural Ester Fluids in Transformers* – IEEE Std C57.147-2008. IEEE Power & Energy Society, Transformer Committee.
- (2) ASTM D 3612-2002: *Standard Test Method for Analysis of Gases Dissolved in Electrical Insulating Oils by Gas Chromatography*
- (3) Comunicação Interna ABB-CEMIG de 09/03/2009 – Autorização para publicação neste artigo
- (4) Jalbert, J., Gilbert, R., Tetreault, P., Khakani, A, A El. *Matrix effects affecting the indirect calibration of the static headspace-gas chromatographic method used for dissolved gas analysis in dielectric liquids*. Anal. Chem., 2003, 5320-5329.
- (5) Comunicação Interna Mineraltec-CEMIG de 06/03/2009 – Autorização para publicação neste artigo.
- (6) Environtemp FR3 Fluid – *Dissolved Gas Guide* – Section R900-20-19 – Agosto, 2006.
- (7) Walsh, E.J., Oommen, T. V. & Clairbone, C.C. *A Biodegradable Transformer Insulating Fluid*. ABB Power T&D Company Inc.

#### 6.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

Adriana de Castro Passos Martins  
Belo Horizonte, 1973  
Graduação em Engenharia Química – UFMG – 1996  
Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais – UFMG – 1998  
Engenheira Química - CEMIG - 1997.