



**XXII SNTPEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

BR/GTM/31
13 a 16 de Outubro de 2013
Brasília - DF

GRUPO - XIII

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

**MONITORAMENTO PREDITIVO POR ANÁLISE CROMATOGRÁFICA DE GASES DISSOLVIDOS APLICADA
A COMUTADORES DE DERIVAÇÃO EM CARGA – EXPERIÊNCIA DA CEMIG.**

**SESSA, C.D*.
CEMIG GT**

**MARTINS, A.D.C.P.
CEMIG GT**

**PROENÇA, M.J.
CEMIG D**

**VASSALO, D.J.
CEMIG GT**

**TEIXEIRA, R.M.
CEMIG GT**

RESUMO

O monitoramento preditivo de equipamentos elétricos isolados a óleo mineral isolante por análise cromatográfica de gases dissolvidos é uma prática consolidada e de resultados reconhecidos, principalmente no caso de equipamentos como transformadores e reatores, de todas as classes de tensão. A aplicação desta técnica para outros equipamentos ou acessórios, como os Comutadores de Derivação em Carga (CDC), vem sendo recomendada em guias internacionais de diagnóstico da análise cromatográfica de gases dissolvidos. O objetivo deste trabalho é demonstrar os resultados já alcançados pela CEMIG em mais dez anos de experiência de aplicação do monitoramento por análise cromatográfica em CDC.

PALAVRAS-CHAVE

CDC, Monitoramento, Preditivo, Cromatografia.

1.0 - INTRODUÇÃO

O Comutador de Derivação em Carga (CDC) é um dispositivo para mudança de ligação de derivação de um enrolamento de um transformador regulador adequada para operação com o transformador energizado, em vazio ou em carga⁽¹⁾. Os planos de manutenções preventivas sistemáticas de CDC, historicamente, têm como base principal as recomendações dos fabricantes destes equipamentos, que em sua maioria indicam controles preventivos baseados no número de operações ou no tempo de operação⁽²⁾. O que se observa, no entanto, é que não existe uma correlação perfeita entre estas duas variáveis consideradas como limite para a execução das manutenções preventivas e a condição real do CDC, fato confirmado em levantamento recente, que mostra que 26% das falhas de transformadores de subestações são originadas por defeitos nos CDC⁽³⁾. Os defeitos em CDC podem ocorrer antes ou depois do tempo limite determinado pelo número total de operações ou pelo tempo de operação. A constatação destes aspectos, a partir das experiências de campo, tem levado naturalmente à necessidade de desenvolvimento e implantação de técnicas de monitoramento preditivo que possibilitem estabelecer estratégias de manutenção mais eficazes para CDC, permitindo a definição do momento ótimo de manutenção. Esta definição é um fator imprescindível para a garantia da disponibilidade dos equipamentos com elevado grau de confiabilidade. Neste cenário, a aplicação de técnicas preditivas baseadas na análise cromatográfica de gases dissolvidos de amostras do óleo mineral isolante de CDC, com base em alguns resultados e pesquisas preliminares, mostrou-se promissora para a CEMIG, e há cerca de uma década vem sendo aplicada sistematicamente.

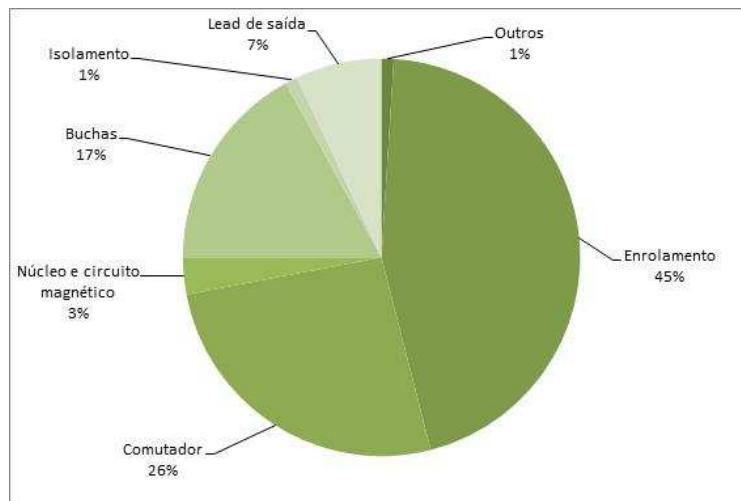


Figura 1 – Localização de falhas de transformadores de subestação (>100 kV)⁽³⁾

2.0 - MONITORAMENTO PREDITIVO POR ANÁLISE DOS GASES DISSOLVIDOS EM ÓLEO ISOLANTE

A metodologia de ensaio utilizada pela CEMIG para a quantificação do teor de gases dissolvidos no óleo mineral isolante dos CDC é a ASTM D3612⁽⁴⁾ método C (*Headspace*). As principais vantagens da aplicação da técnica de monitoramento por análise cromatográfica dos gases dissolvidos em óleo mineral isolante, considerando-se o ambiente regulatório do setor elétrico brasileiro, onde qualquer interrupção pode causar perdas de receita, aplicação de multas e penalidades, são:

- Monitoramento que é realizado com o equipamento energizado;
- Elimina parada para ensaios elétricos, aumentando disponibilidade e reduzindo custos;
- Permite programação da manutenção;
- Reduz custo de reparo dos equipamentos;
- Importante ferramenta de tomada de decisão após ocorrências do sistema elétrico, pois permite que o equipamento seja energizado ou não com segurança.

A frequência de monitoramento de CDC através da análise cromatográfica praticada pela CEMIG para transformadores com tensão nominal acima de 138kV é, principalmente, semestral. Na prática adotada pela CEMIG, ao serem observados desvios significativos no perfil e concentração de gases dissolvidos no óleo mineral isolante de um dado equipamento elétrico, este equipamento passa a ser monitorado com frequência de amostragem aumentada. Nestes casos, um nível de criticidade é associado à condição do equipamento com base no monitoramento preditivo. A Figura 2 apresenta o fluxograma esquemático das etapas do monitoramento preditivo adotado pela CEMIG para os seus equipamentos.

Algumas publicações internacionais⁽⁵⁾ tem recomendado a prática de se realizar o monitoramento dos CDC em operação por meio da aplicação da técnica de análise cromatográfica de gases dissolvidos no óleo mineral isolante. A metodologia de diagnóstico adotada pela CEMIG, para qualquer equipamento, é fundamentada na análise do histórico de teor de gases dissolvidos em cada unidade avaliada, em paralelo com o perfil de gases da família de equipamentos a qual a esta unidade pertence, levando-se em consideração o histórico de manutenção e operação do equipamento sob investigação. Esta metodologia foi estendida para os CDC.

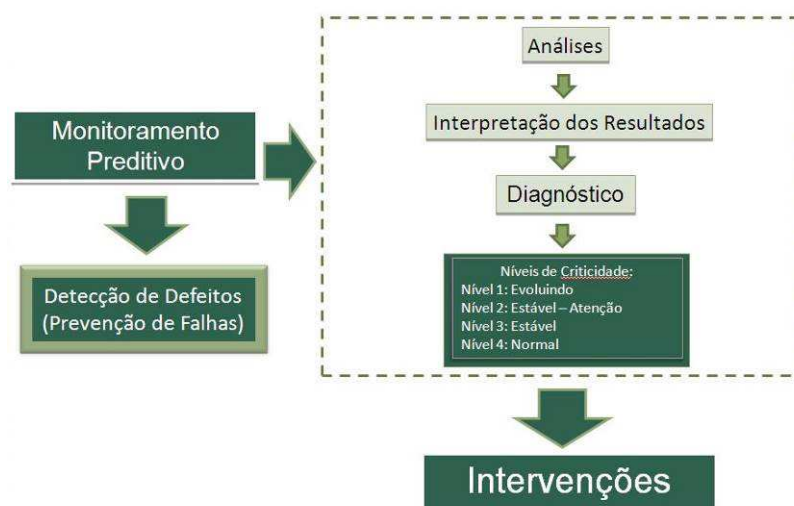


Figura 2 – Fluxograma do Monitoramento Preditivo de Equipamentos Elétricos por Análise Cromatográfica de Gases Dissolvidos

3.0 - APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE ANÁLISE CROMATOGRÁFICA A CDC

A principal questão a ser contornada para a aplicação do monitoramento preditivo por análise cromatográfica em CDC é o fato de que a concentração de gases gerados dentro destes equipamentos, quando há a funcionalidade de extinção de arco, é bastante elevada. No entanto, a experiência tem demonstrado que, mesmo nestes casos, é possível estabelecer uma correlação entre taxas de elevação de alguns gases específicos e defeitos relacionados a desgastes e/ou carbonização nos contatos, rompimento de cordoalhas, entre outros. Ou seja, é possível estabelecer critérios de diagnóstico da condição operativa de CDC a partir da concentração e da taxa de evolução dos gases dissolvidos no óleo mineral isolante destes equipamentos. Serão apresentados, a título de estudos de caso, quatro exemplos práticos de detecção de defeitos incipientes em CDC pela análise cromatográfica. Os casos apresentados neste informe abrangem apenas CDC dos tipos onde não há comunicação do óleo isolante com o óleo do tanque principal, nem contato dos gases gerados no tanque da CDC com o óleo mineral isolante do tanque principal, via tanque de expansão, por exemplo. Um diagrama esquemático das CDC contempladas neste informe técnico está apresentado na Figura 3⁽²⁾. Importante ressaltar que, em nenhum dos quatro estudos de caso apresentados, o tempo ou número de operações recomendado para a realização da manutenção preventiva sistemática havia sido atingido.

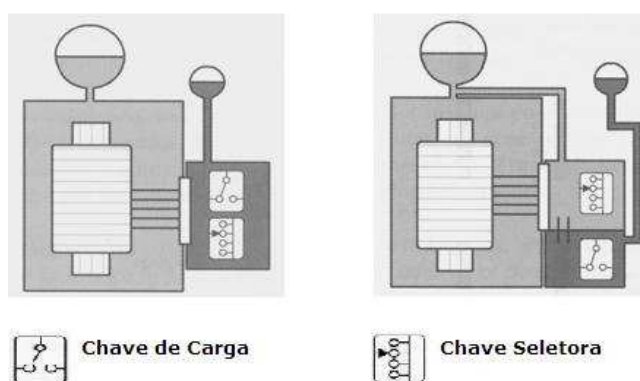


Figura 3 – Desenho esquemático das CDC contempladas neste informe técnico⁽²⁾

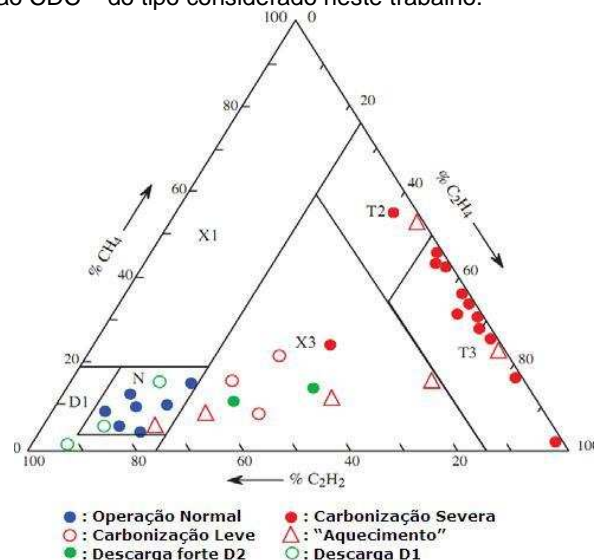
Para identificar mais precisamente o tipo de CDC considerada no contexto deste trabalho, foi utilizado o sistema de classificação proposto no documento do WG D1.32 do Cigré⁽⁵⁾.

A	Interrupção de arco no óleo para alteração da corrente de carga	
V	Interruptores a vácuo para alteração da corrente de carga	
	R	Tipo resistor

	X	Tipo reator	
		S	Chaves de carga e seletora em compartimentos de óleo diferentes
		C	Chaves de carga e seletora no mesmo compartimento de óleo

Tabela 1 – Esquema de classificação para CDC

Para comparação do diagnóstico da CEMIG com os diagnósticos propostos pelas referências, será considerado o Triângulo de Duval aplicável ao CDC⁽⁵⁾ do tipo considerado neste trabalho.

Figura 4 – Triângulo de Duval aplicável a CDC de tanque separado⁽⁵⁾

3.1 Chave A – 138 kV – 25 MVA – Tipo ARS – Fabricação 1984

Na Tabela 2 a seguir é apresentado o histórico resumido do monitoramento por análise cromatográfica desta chave.

Data amostragem	H ₂ (ppm)	O ₂ (ppm)	N ₂ (ppm)	CH ₄ (ppm)	CO (ppm)	CO ₂ (ppm)	C ₂ H ₄ (ppm)	C ₂ H ₆ (ppm)	C ₂ H ₂ (ppm)	Gás Combustível (ppm)
22/02/2013	36455	5982	7513	22248	ND	1927	36733	22923	38543	156902
17/08/2012	14564	20185	69756	3097	252	1758	5080	728	17815	41536
20/03/2012	23492	18594	58970	2864	235	2036	3516	368	20759	30475
09/02/2011	2712	112491	363647	314	254	638	375	31	1628	5314
17/08/2010	33735	11680	58506	4077	626	2171	6525	1335	33201	79499
12/02/2010	30212	13300	62538	4017	628	2911	7748	1575	30077	74257
04/08/2009	2160	59392	184996	159	388	808	24	5,1	1762	4498
04/02/2009	19447	7503	59230	5983	534	2211	6458	267	28477	61166
11/08/2008	17543	21778	64633	3212	332	797	2776	953	26833	51649
28/02/2008	19676	21578	82678	2134	273	1224	2667	88	24346	24838

Tabela 2 – Histórico de Resultados da Análise Cromatográfica do CDC A

O diagnóstico CEMIG para o resultado da análise da amostra de 22/02/2013 indicava a presença de degradação térmica do óleo oriunda de ponto quente. Aplicando estes dados no Triângulo de Duval específico deste tipo de CDC, a resposta do método aponta para a região X3 do diagrama, que indica falha do tipo T3 em progresso (na maioria dos casos) ou a presença de descargas anormais. O transformador foi desligado e o CDC inspecionado em campo. O defeito encontrado foi um *microswitch* danificado e um ponto de solda entre o contato e resistência que havia se soltado. A solução adotada para eliminação do defeito foi a substituição do *microswitch* e a recomposição da solda. A Figura 5 a seguir apresenta os defeitos encontrados na inspeção interna.



Figura 5 – Resultado da inspeção no CDC A

3.2 Chave B – 138 kV – 25 MVA – Tipo ARS – Fabricação 1986

Na Tabela 3 a seguir é apresentado o histórico resumido do monitoramento por análise cromatográfica desta chave.

Data amostragem	H ₂ (ppm)	O ₂ (ppm)	N ₂ (ppm)	CH ₄ (ppm)	CO (ppm)	CO ₂ (ppm)	C ₂ H ₄ (ppm)	C ₂ H ₆ (ppm)	C ₂ H ₂ (ppm)	Gás Combustível (ppm)
10/12/2012	25630	5791	48634	5261	261	3082	18066	3211	10867	63296
23/10/2012	18107	5418	35409	2775	165	1696	8617	1187	8121	30851
14/09/2012	15005	9113	45476	2572	122	1746	7766	1093	9165	35723
14/08/2012	29620	19030	68215	4324	422	2596	10623	1514	15107	61610
25/05/2012	23147	8112	30934	3650	ND	2038	5942	927	12560	46226
23/03/2012	15984	18415	60184	3008	214	2293	5833	803	15332	25842
04/02/2011	22043	61909	249526	2962	443	2771	2959	302	20433	28709
20/08/2010	3220	13799	28182	1170	89	1408	2235	213	11525	18452
04/02/2010	14429	22694	71208	2191	414	2855	3430	322	20573	41359
24/11/2009	23427	19395	83981	3300	423	2935	3423	190	22091	30763
08/07/2009	20026	32444	91575	1753	433	2082	1542	95	14087	37936

Tabela 3 – Histórico de Resultados da Análise Cromatográfica do CDC B

Este CDC encontrava-se em monitoramento especial por análise cromatográfica pelo fato do teor de C₂H₂ estar acima do valor típico para esta família de equipamentos. Porém, devido à evolução atípica do gás C₂H₄ na amostra de 10/12/12, foi solicitada a antecipação da manutenção de rotina por tempo (60 meses), recomendada pelo fabricante, que estava agendada para dezembro 2013. O diagnóstico da análise cromatográfica para o resultado da amostragem de 10/12/2012 indicava a presença de degradação térmica do óleo oriunda de ponto quente. Aplicando estes dados no Triângulo de Duval específico deste tipo de CDC, a resposta do método aponta para a região X3 do diagrama, que indica falha T3 em progresso (na maioria dos casos) ou a presença de descargas anormais. O transformador foi desligado, o CDC inspecionado e enviado para manutenção em oficina. Foram identificados alguns contatos frouxos que poderiam ter se soltado em operação, gerando danos graves ao CDC, podendo até mesmo levar à falha do transformador. A solução adotada para eliminação do defeito foi o reaperto dos contatos. A Figura 6 a seguir apresenta os defeitos encontrados durante a inspeção.

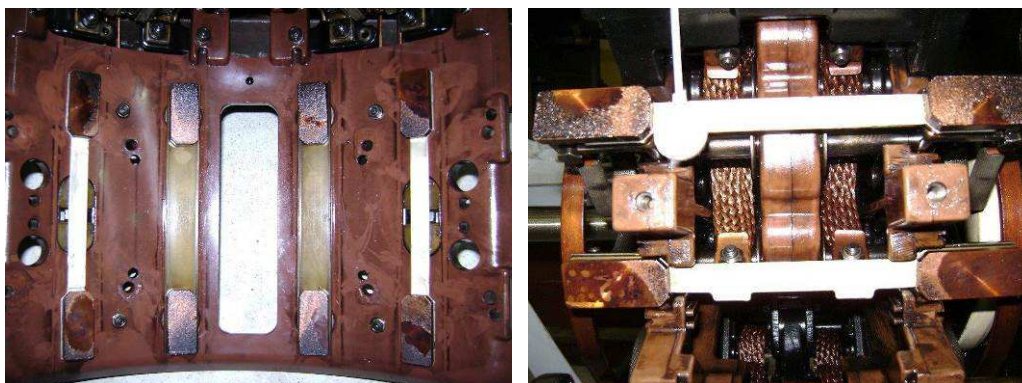


Figura 6 – Resultado da inspeção da CDC B

3.3 Chave C – 138 kV – 25 MVA – TIPO AXC – Fabricação 1970

Na Tabela 4 a seguir é apresentado o histórico resumido do monitoramento por análise cromatográfica desta chave.

Data amostragem	H ₂ (ppm)	O ₂ (ppm)	N ₂ (ppm)	CH ₄ (ppm)	CO (ppm)	CO ₂ (ppm)	C ₂ H ₄ (ppm)	C ₂ H ₆ (ppm)	C ₂ H ₂ (ppm)	Gás Combustível (ppm)
18/02/2009	3070	22311	58485	22824	40	4129	80922	15529	588	122973
26/10/2008	2670	38192	111095	71165	54	3021	67061	22796	430	163746
22/04/2008	1199	25668	88615	12880	2977	4419	17242	3624	58	37980
18/10/2007	147	22645	66936	40	215	1995	300	23	376	1101
20/04/2007	299	23676	57185	47	335	2404	283	14	230	1208
24/11/2006	244	33327	76449	54	29	2098	227	9.5	289	852
14/05/2006	250	35924	87172	53	97	1757	175	9.2	388	972
13/11/2005	171	6062	77337	52	212	2067	123	10	297	865
28/04/2005	358	47419	117041	67	234	2107	188	2.5	422	1271
31/10/2004	102	32113	74239	16	147	609	25	1.9	198	489

Tabela 4 – Histórico de Resultados da Análise Cromatográfica do CDC C

O diagnóstico da CEMIG para o resultado da análise cromatográfica da amostra de 18/02/2009 indicava a presença de degradação térmica do óleo oriunda de ponto quente. Aplicando estes dados no Triângulo de Duval específico deste tipo de CDC, a resposta do método é a região T3 que indica, além de defeito térmico severo, uma carbonização também severa. O transformador foi desligado e o CDC inspecionado. Durante a inspeção, foram identificados diversos pontos quentes, com deterioração dos contatos do CDC. A solução adotada para eliminação do defeito foi a remoção dos contatos derretidos e a confecção de novos contatos. A Figura 7 a seguir apresenta os defeitos encontrados durante a inspeção.

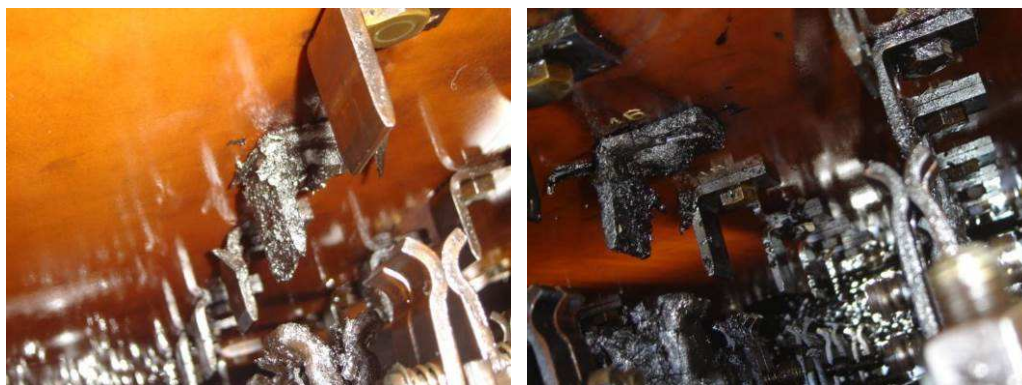


Figura 7 – Resultado da inspeção do CDC C

3.4 Chave D – 138 kV – 25 MVA – Tipo ARC – Fabricação 1994

Na Tabela 5 a seguir é apresentado o histórico resumido do monitoramento por análise cromatográfica.

Data amostragem	H ₂ (ppm)	O ₂ (ppm)	N ₂ (ppm)	CH ₄ (ppm)	CO (ppm)	CO ₂ (ppm)	C ₂ H ₄ (ppm)	C ₂ H ₆ (ppm)	C ₂ H ₂ (ppm)	Gás Combustível (ppm)
23/02/2012	23331	17052	32256	4097	75	988	4162	186	35341	31851
28/10/2011	19588	17642	27797	2556	155	759	2348	106	24422	24753
11/10/2010	8133	37239	76936	577	201	1056	708	43	6889	16551
13/10/2009	1730	33627	69244	73	66	351	77	ND	1153	3099
22/04/2009	5839	19871	66095	459	290	895	698	25	7453	7311
18/02/2009	8785	3292	59603	596	304	1306	934	35	10369	21023
24/04/2008	6836	34967	92041	524	2585	938	509	32	6335	16821
23/10/2007	6357	22603	49744	499	192	1059	716	8.7	12646	20418
19/05/2007	5066	20964	62976	390	243	1135	454	ND	5195	11348

Tabela 5 – Histórico de Resultados da Análise Cromatográfica do CDC D

O diagnóstico CEMIG para o resultado da análise cromatográfica da amostra de 23/02/2012 indicava a presença de um provável centelhamento. Aplicando estes dados no Triângulo de Duval específico deste tipo de CDC, a resposta do método aponta operação normal na região N do triângulo. O transformador foi desligado e o CDC inspecionado. Foi identificado um resistor de transição interrompido. A solução adotada para eliminação do defeito foi a troca do resistor. A Figura 8 a seguir evidencia o resultado da inspeção.



Figura 8 – Resultado da inspeção da CDC D

3.5 Aplicabilidade da análise cromatográfica em CDC do tipo V

A utilização na CEMIG de Comutadores de Derivação em Carga do tipo onde a interrupção se dá numa câmara de vácuo é relativamente recente, portanto, a base de dados do monitoramento por análise cromatográfica ainda é limitada. Ainda não foi observado um caso de defeito incipiente, identificado pelo monitoramento preditivo por análise cromatográfica neste tipo de chave, com a subsequente inspeção interna. A título de exemplo, é apresentado na Tabela 6 a seguir o histórico de monitoramento por análise cromatográfica de um CDC do tipo VRC. Neste tipo de CDC, não é esperada a geração de elevadas concentrações de gases no óleo mineral isolante, portanto, qualquer alteração que possa ser considerada significativa, em princípio, precisa ser avaliada e investigada. Durante operação normal de um CDC do tipo VRC, por exemplo, é esperada a formação de gases associados a sobreaquecimento ou arco elétrico cujas concentrações, apesar de baixas, dependem muito do seu modo de operação.

Data amostragem	H ₂ (ppm)	O ₂ (ppm)	N ₂ (ppm)	CH ₄ (ppm)	CO (ppm)	CO ₂ (ppm)	C ₂ H ₄ (ppm)	C ₂ H ₆ (ppm)	C ₂ H ₂ (ppm)	Gás Combustível (ppm)
07/01/2013	27	5143	14630	4	398	1182	1.2	ND	ND	430,2
10/12/2012	48	15377	53356	5	259	1268	0.8	ND	ND	312,8
20/11/2012	50	16303	48649	4	169	941	0.4	ND	ND	223,4
15/10/2012	36	11798	30884	2	76	461	ND	ND	ND	114
19/09/2012	19	24374	75409	2	55	450	ND	ND	ND	76

Tabela 6 – Histórico de Resultados da Análise Cromatográfica de CDC do tipo VRC

4.0 - CONCLUSÃO

A técnica de análise cromatográfica de gases dissolvidos em óleo isolante pode ser aplicada com alta taxa de acerto na detecção de defeitos internos em CDC onde não há contato direto do óleo deste equipamento com o óleo do tanque principal e nem contato dos gases gerados no tanque da CDC com o óleo do tanque principal, para transformadores com tensões de trabalho entre 138 kV e 500 kV. Para empresas que ainda não dispõem de banco de dados para análise de variações relevantes na concentração de gases, foi possível demonstrar que a aplicação do método do Triângulo de Duval específico para CDC⁽⁵⁾ é suficientemente confiável para a realização dos diagnósticos de condição operativa de CDC, mas para futuros aprimoramentos da taxa de acerto e da precisão destes diagnósticos, a formação de base de dados e experiência própria é recomendável. Como desafio futuro, é possível considerar a possibilidade de diminuição gradativa das manutenções baseadas em tempo ou por número de operação dos CDC, passando o monitoramento preditivo a orientar quando será necessária uma intervenção para manutenção, associando-se os resultados da análise cromatográfica com outras variáveis possíveis de serem monitoradas neste tipo de equipamento.

5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) ABNT NBR5458 – Transformadores de Potência - Terminologia.
- (2) Technical Brochure 445 – Guide for Transformer Maintenance – WG A2.34 de 2010.
- (3) Transformer Reliability Survey: Interim Report – Electra nº 261- pags 46 a 49 – Abril 2012.
- (4) ASTM D3612 – Standard Test Method for Analysis of Gases Dissolved in Electrical Insulating Oil by Gas Chromatography.
- (5) Technical Brochure 443 – DGA in Non Mineral Oils and Load Tap Changers and Improved DGA Diagnosis Criteria – WG D1.32 – 2010.

6.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

Costabile Di Sessa, nascido em São Paulo em 27 de março de 1979.

Graduação em Engenharia Química pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (2004).

Atua há sete anos na área de manutenção preditiva de equipamentos elétricos isolados a óleo e é atualmente Engenheiro de Planejamento da Manutenção.

Tem experiência em diagnósticos preditivos de óleo isolante, controle de qualidade de materiais através de análises físico-químicas e no planejamento da manutenção.