

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

**ANÁLISE DE CONTAMINANTES EM ÓLEO MINERAL ISOLANTE PARA IDENTIFICAÇÃO E AVALIAÇÃO DE
FALHAS EM TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA**

**LAÍS PASTRE DILL*(1); HELENA WILHELM(1); PAULO DE OLIVEIRA FERNANDES(1); SÉRGIO MOURA
PERES(1); KETHLYN GHELLERE MOSCON(1); VITOR CRISTIANO BENDER; TIAGO BANDEIRA
MARCHESAN; JOSÉ BATISTA FERREIRA NETO(2)
VEGOOR(1);SANTO ANTÔNIO ENERGIA(2)**

RESUMO

Conhecer quais os materiais envolvidos nas falhas/defeitos de transformadores auxilia na caracterização de um defeito/falha incipiente. Neste estudo foi desenvolvida uma metodologia otimizada de caracterização de falhas em transformadores, constituída por análises físico-químicas, de gases dissolvidos (AGD) incluindo os gases propano, propileno e butano, compostos voláteis, além da análise de partículas quanto a quantidade, natureza e morfologia. Os resultados demonstraram a importância da metodologia desenvolvida comparativamente ao método tradicionalmente utilizado.

PALAVRAS-CHAVE

Partículas; diagnóstico de falhas; localização da falha; transformadores de potência; metodologias complementares

1.0 - INTRODUÇÃO

O monitoramento das condições de operação de transformadores é de extrema importância, devido ao alto custo do equipamento e ao fato de que falhas destes ativos podem levar a interrupções do fornecimento de energia por períodos prolongados. A análise periódica das características do óleo isolante é um procedimento fundamental para garantir o funcionamento correto do equipamento e prolongar sua vida útil. O óleo isolante se deteriora naturalmente em serviço, sendo esta deterioração agravada por fatores como: presença de oxigênio, temperaturas elevadas, presença de metais e umidade (1-3).

A ocorrência de falhas em transformadores gera produtos de degradação dos materiais de construção e a identificação destes produtos pode auxiliar na caracterização da falha (1, 2, 4).

Atualmente, o método mais utilizado para o diagnóstico de falhas é a Análise de Gases Dissolvidos (AGD), porém através deste método isoladamente não é possível dizer com exatidão qual a característica da falha em questão, ou sua localização aproximada. Em geral partículas e água reduzem a rigidez dielétrica e podem aumentar o fator de perdas do óleo isolante, portanto, valores atípicos destas propriedades podem indicar a presença de partículas no óleo isolante, como por exemplo, óleos com acidez baixa e tensão interfacial alta, mas com fator de perdas muito elevado. Adicionalmente, partículas metálicas podem ser resultados de falhas envolvendo o tanque (oxidação, problemas de pintura), núcleo e espiras (4-6). A presença de qualquer destas partículas pode ser indicada por discrepância nos ensaios físico-químicos convencionais.

Neste estudo foi desenvolvida uma metodologia para caracterização de partículas em óleos isolantes de transformadores, quanto a sua quantidade, natureza e morfologia. Espectrometria de emissão atômica por plasma acoplado indutivamente (ICP-OES) e espectrometria de emissão atômica por eletrodo de disco rotativo (RDE-OES) podem ser utilizadas para quantificar e identificar os metais presentes, a contagem de partículas e o índice de partículas magnéticas (PQI) indicam a intensidade da falha e, a ferrografia, ao determinar a morfologia, permite identificar a origem da partícula e seu processo de formação.

Adicionar a concentração dos gases propano, propileno e butano a AGD tradicional é possível confirmar os diagnósticos, conforme metodologia utilizada neste trabalho.

2.0 - METODOLOGIA

Amostras de óleo mineral isolante de transformadores em operação de clientes anônimos da Vegoor que apresentaram diagnóstico de falha pela AGD tradicional ou discrepâncias entre os ensaios físico-químicos foram selecionadas para aplicar a metodologia proposta, que consiste na análise dos gases C3 (propano e propileno) e C4 (butano) e na análise das partículas.

2.1 Análise de gases dissolvidos (AGD)

A análise de gases dissolvidos (AGD) no óleo isolante foi realizada em um cromatógrafo com fase gasosa da Agilent Technologies 7820A com amostrador de Headspace Agilent Technologies 7697A e detecção por ionização de chama (FID) e por condutividade térmica (TCD), de acordo com o procedimento descrito na norma ASTM D3612-02 Método C. Além dos gases comuns, gases de maior massa molar foram analisados, a saber propano, propileno (ou propeno) e butano. Com os dados de teores de CO₂ e CO foi determinada a razão de CO₂/CO.

2.2 Análises físico-químicas

2.2.1 Teor de Água

O teor de água das amostras de óleo isolante foi determinado segundo a norma ABNT NBR 10710, pelo método Karl Fischer coulométrico (parte B), em um Titulador Karl Fischer Coulométrico Hanna Instruments HI 904.

2.2.2 Tensão Interfacial

A tensão interfacial dos óleos isolantes foi medida no equipamento tensiômetro calibrado a 25 °C (marca Kruss, modelo 8600), a partir do método do anel, descrito na norma ABNT NBR 6234.

2.2.3 Índice de Neutralização Total

O índice de neutralização total ou índice de acidez total (do inglês *Total Acid Number* - TAN) foi determinado através do método do indicador, que consiste na titulação das amostras de óleo com uma solução de base (NaOH), segundo a norma ABNT NBR 14248. Utilizou-se um titulador Titrator PRO 613-5287.

2.2.4 Fator de Potência ou Fator de Perdas Dielétricas

O fator de potência foi determinado a 100 °C em um aparelho medidor de perdas dielétricas Tan delta Huazheng HZJD-3Z, segundo a norma NBR 12133 MB 3474.

2.2.5 Rigidez Dielétrica

Um medidor de rigidez dielétrica Huazheng HZJQ-X1 com eletrodos do tipo calota foi utilizado para a obtenção da rigidez dielétrica segundo a norma ABNT NBR IEC 60156.

2.3 Cromatografia a gás com detecção de espectrometria de massas (GC-MS)

A presença de compostos voláteis foi identificada por meio de cromatografia em fase gasosa empregando amostrador de *headspace* e detecção de espectrometria de massas em um equipamento Agilent Technologies, modelo 7820A com detector modelo 5977B MSD.

2.4 Contagem de partículas

A contagem de partículas foi realizada por meio da análise da distribuição de tamanho de partícula empregando um equipamento detector e classificador de partículas Spectro Scientific LaserNet Fines SpectroLNF Q200, de acordo com a norma ASTM D6786-15, com o resultado expresso conforme a ISO 4406.

2.5 Índice de quantificação de partículas (PQI)

O índice médio de compostos ferrosos (partículas magnéticas) presentes no óleo foi analisado com um equipamento Parker Analox PQL, de acordo com a norma ASTM D8184.

2.6 Análises elementares

A análise de metais foi realizada por diferentes metodologias. A espectrometria de emissão atômica com plasma indutivamente acoplado (ICP-OES) foi realizada de acordo com a norma ASTM D7151-15. Um espectrômetro elementar de emissão atômica por eletrodo de disco rotativo (RDE-OES) Spectroil Q100 também foi utilizado para quantificar alguns elementos metálicos, de acordo com a norma ASTM D6595.

2.7 Natureza, formato e tamanho de partículas

As características das partículas foram investigadas com o uso do método de ferrografia analítica de acordo com a norma ASTM D7690-11. Este teste requer amostras de óleo de 1 mL para o preparo de uma lâmina de microscópio com um analisador ferrografo Spectro Scientific modelo T2FM 500. As lâminas foram analisadas em microscópio metalográfico Biopika B100.

3.0 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Análise de gases dissolvidos

Os resultados da análise de gases dissolvidos das amostras de óleo mineral isolante de clientes anônimos são apresentados nas Tabelas 1 e 2.

TABELA 1. Análise de gases dissolvidos das amostras de óleo mineral isolante. Gases comuns.

Amostra	Gás (ppm)										Diagnóstico
	H ₂	O ₂	N ₂	CH ₄	CO	CO ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₂	CO ₂ /CO	
Amostra 1	9	21721	59571	1	32	705	5	2	1	22	AEBE
Amostra 2	7	22451	58282	1	18	596	4	2	2	33	AEBE
Amostra 3	146	6646	58230	61	596	12254	199	38	131	21	AEBE
Amostra 4	2	23757	58405	1	4	350	6	0	1	88	AEBE
Amostra 5	22	13245	74589	4	343	3538	6	1	1	10	AEBE
Amostra 6	26	5316	74175	5	523	2549	5	1	1	5	AEBE
Amostra 7	17	300	13174	12	218	2223	10	8	4	10	AEBE
Amostra 8	19	15243	47722	10	77	1436	12	6	13	19	AEBE
Amostra 9	7	21115	63774	3	46	1410	4	3	1	31	AEBE
Amostra 10	17	3708	38110	16	287	2343	13	7	4	8	AEBE
Amostra 11	16	1801	19018	12	315	2232	9	6	4	7	AEBE
Amostra 12	4	18798	49982	3	38	1087	24	5	5	29	AEBE
Amostra 13	7	5927	60855	12	750	6438	11	2	3	9	DP
Amostra 14	5	2388	79508	34	158	5516	17	207	0	35	FTBT
Amostra 15	17	805	93844	67	509	6579	33	234	0	13	FTBT
Amostra 16	4	1420	61690	40	126	5278	266	299	0	42	FTBT
Amostra 17	1	3663	15875	1	40	165	1	13	0	4	FTBT
Amostra 18	1	3663	15875	1	40	165	1	13	0	4	FTBT
Amostra 19	3	2112	67843	18	244	7080	37	64	0	29	FTBT
Amostra 20	9	7348	108932	53	349	8255	23	109	0	24	FTBT
Amostra 21	95	1697	31528	31	188	7222	141	52	6	38	FTBT
Amostra 22	24	7289	54266	2	270	1449	6	3	2	5	FTAT
Amostra 23	680	1609	19296	91	89	7134	6	26	1	80	FTAT
Amostra 24	3	1809	45050	0	6	339	11	3	3	57	FTAT
Amostra 25	2776	12175	39461	545	107	3096	7	148	4	29	FTAT
Amostra 26	124	2925	76686	1316	414	11406	15	119	3	28	FTAT
Amostra 27	21144	6444	27331	9664	73	1247	7	3283	2	17	FTAT
Amostra 28	8	2262	73982	56	276	5410	39	20	0	20	FTAT
Amostra 29	1207	4001	25658	2133	272	6663	3340	1108	8	24	FTAT
Amostra 30	3	19105	50752	1	19	489	10	0	0	26	FTAT
Amostra 31	8	9223	39822	9	169	7593	42	2	14	45	FTAT
Amostra 32	4	7935	43544	11	306	18019	74	8	0	59	FTAT
Amostra 33	6	38390	118946	5	165	6161	18	5	1	37	FTAT
Amostra 34	13	10336	50661	14	213	31821	36	9	0	149	FTAT
Amostra 35	94	34653	103620	2	80	3346	59	3	0	42	FTAT
Amostra 36	15	9746	80836	10	281	6308	44	13	0	22	FTAT
Amostra 37	9	6724	84495	12	460	6189	58	10	0	13	FTAT
Amostra 38	20	6054	50620	8	397	7221	80	9	0	18	FTAT
Amostra 39	117	1710	79433	51	228	8745	15	76	1	38	ON
Amostra 40	18	5683	36383	13	214	3052	9	23	0	14	ON
Amostra 41	196	511	35876	84	84	1870	8	31	0	22	ON
Amostra 42	285	7757	35604	36	96	793	5	8	0	8	ON
Amostra 43	286	875	54318	172	170	4207	12	116	0	25	ON
Amostra 44	2	3582	9482	0	5	110	2	0	0	22	ON
Amostra 45	2	3501	9506	0	7	157	2	0	0	22	ON
Amostra 46	517	186	53993	341	743	21401	242	679	3	29	ON
Amostra 47	8	2906	14746	1	88	650	1	0	0	7	ON
Amostra 48	16346	1047	25553	6837	47	1771	1219	3715	20	38	ON
Amostra 49	51	382	17592	30	175	1404	6	9	0	8	ON
Amostra 50	26	461	14379	10	160	1238	2	3	0	8	ON
Amostra 51	48	979	31723	22	90	1130	17	146	0	13	ON
Amostra 52	1175	1451	63447	675	145	12576	9	293	0	87	ON
Amostra 53	42	422	15265	24	170	1576	5	7	0	9	ON
Amostra 54	364	2646	40167	69	265	12824	21	36	0	48	ON

NOTA: AEBE: arco elétrico de baixa energia; DP: descarga parcial; FTBT: falha térmica de baixa temperatura (150 - 300 °C); FTAT: falha térmica de alta temperatura (> 700 °C); ON: operação normal.

TABELA 2. Análise de gases dissolvidos das amostras de óleo mineral isolante. Gases: propano, propileno e butano.

Amostra	Gás (ppm)			Diagnóstico
	C ₃ H ₈	C ₃ H ₆	C ₄ H ₁₀	
Amostra 1	0	8	66	AEBE
Amostra 2	2	10	78	AEBE
Amostra 3	23	190	108	AEBE
Amostra 4	1	8	89	AEBE
Amostra 5	2	9	469	AEBE
Amostra 6	1	6	800	AEBE
Amostra 7	5	12	431	AEBE
Amostra 8	4	26	55	AEBE
Amostra 9	11	37	265	AEBE
Amostra 10	2	9	461	AEBE
Amostra 11	9	27	331	AEBE
Amostra 12	5	25	39	AEBE
Amostra 13	7	18	55	DP
Amostra 14	123	21	49	FTBT
Amostra 15	213	55	116	FTBT
Amostra 16	211	204	84	FTBT
Amostra 17	32	1	9	FTBT
Amostra 18	-	-	63	FTBT
Amostra 19	83	21	45	FTBT
Amostra 20	117	62	63	FTBT
Amostra 21	21	8	353	FTBT
Amostra 22	2	9	469	FTAT
Amostra 23	11	3	55	FTAT
Amostra 24	0	13	94	FTAT
Amostra 25	54	6	31	FTAT
Amostra 26	140	21	103	FTAT
Amostra 27	1197	8	89	FTAT
Amostra 28	37	66	424	FTAT
Amostra 29	234	2595	246	FTAT
Amostra 30	0	8	0	FTAT
Amostra 31	4	23	18	FTAT
Amostra 32	5	12	146	FTAT
Amostra 33	8	39	7	FTAT
Amostra 34	5	8	1462	FTAT
Amostra 35	14	35	502	FTAT
Amostra 36	13	18	186	FTAT
Amostra 37	18	28	105	FTAT
Amostra 38	17	31	782	FTAT
Amostra 39	81	36	42	ON
Amostra 40	41	8	34	ON
Amostra 41	37	13	12	ON
Amostra 42	4	8	20	ON
Amostra 43	86	10	43	ON
Amostra 44	8	0	6	ON
Amostra 45	9	0	9	ON
Amostra 46	704	666	725	ON
Amostra 47	1	3	125	ON
Amostra 48	11	13	101	ON
Amostra 49	14	18	345	ON
Amostra 50	2	7	605	ON
Amostra 51	447	122	455	ON
Amostra 52	381	52	172	ON
Amostra 53	5	10	414	ON
Amostra 54	42	27	136	ON

NOTA: AEBE: arco elétrico de baixa energia; DP: descarga parcial; FTBT: falha térmica de baixa temperatura (150 - 300 °C); FTAT: falha térmica de alta temperatura (> 700 °C); ON: operação normal.

A AGD de gases comuns permitiu a obtenção de um diagnóstico das amostras a partir de um software desenvolvido internamente, que utiliza as quantidades e razões dos hidrocarbonetos e do hidrogênio para a emissão do diagnóstico. Com tais relações é, então, possível prever a condição do transformador, que pode estar em operação normal ou se há possibilidade de uma falha térmica ou elétrica estar ocorrendo dentro do equipamento.

Os diagnósticos obtidos foram: arco elétrico de baixa energia (amostra 1-12), descarga parcial (amostra 13), falha térmica de baixa temperatura (150 - 300 °C) (amostra 14-21), falha térmica de alta temperatura (amostra 22-38) e operação normal (amostra 39-54). Quanto a AGD dos gases propano, propileno e butano, esta mostrou a concordância entre as concentrações de propano e etano e entre propileno e etileno, na maioria dos casos, confirmando o diagnóstico obtido.

3.2 Análises físico-químicas

Os resultados da análise físico-química de algumas das amostras deste estudo são apresentados na Tabela 3.

TABELA 3. Análises físico-químicas de algumas das amostras de óleo mineral isolante.

Amostra	Diagnóstico por AGD	Parâmetro físico-químico				
		Fator de Perdas Dielétricas a 100 °C (%)	Teor de água (ppm)	Rigidez Dielétrica (kV)	Tensão Interfacial (mN/m)	TAN (mg KOH/g)
Amostra 3	AEBE	2,44	15	61	31	0,02
Amostra 8	AEBE	4,13	29	55	21	0,11
Amostra 18	FTBT	28,16	37	46	23	0,05
Amostra 20	FTBT	20,3	29	32	25	0,11
Amostra 21	FTBT	0,96	37	46	37	0,01
Amostra 26	FTAT	25,53	23	74	37	0,06
Amostra 34	FTAT	0,2	29	39	41	0,02
Amostra 46	ON	41,71	104	33	15	0,82
Amostra 52	ON	29,09	73	50	22	0,23

NOTA: TAN: Índice de acidez total. AEBE: arco elétrico de baixa energia; FTBT: falha térmica de baixa temperatura (150 - 300 °C); FTAT: falha térmica de alta temperatura (> 700 °C); ON: operação normal.

Observa-se na Tabela 3 que algumas amostras (18, 20, 26, 46 e 52) apresentam fator de perdas dielétricas elevado, considerando o valor estabelecido na norma ABNT NBR 10576 para transformadores em uso (classes entre $\leq 36,2$ e ≤ 145 kV) que é de no mínimo 20%. Dentre estas, as amostras 18, 20 e 26 apresentaram valores de tensão interfacial e de acidez normais, considerando novamente os valores nas condições da norma ABNT NBR 10576, que são de no mínimo 22 mN/m e no máximo 0,15 mg KOH/g, para tensão interfacial e TAN, respectivamente. Por outro lado, a amostra 46 apresentou todos esses parâmetros diferentes dos valores considerados normais.

O fator de potência elevado pode indicar a degradação do óleo em serviço ou a sua contaminação. Como algumas das amostras não tiveram outros parâmetros físico-químicos alterados de forma a indicar extensiva degradação do óleo, há necessidade de se investigar a origem dos contaminantes das amostras.

3.3 Análise de compostos voláteis

Os resultados da análise de compostos voláteis das amostras de óleo mineral isolante de clientes anônimos são apresentados na Tabela 4.

TABELA 4. Análise de compostos voláteis de algumas das amostras de óleo mineral isolante.

Amostra	Diagnóstico por AGD	Composto detectado
Amostra 26	FTAT	Etanol Tolueno 1,3-Dimetilbenzeno
Amostra 28	FTAT	Terc-butanol
Amostra 35	FTAT	Terc-butanol
Amostra 38	FTAT	Terc-butanol
Amostra 51	ON	Tolueno

NOTA: FTAT: falha térmica de alta temperatura (> 700 °C); ON: operação normal.

As amostras 26 e 28, que tiveram diagnóstico de falha térmica, apresentaram distintos compostos voláteis em sua composição. A análise da amostra 26 apontou a presença de etanol, que pode ser um indicativo do envolvimento do papel isolante na falha. Ao se observar o valor da razão CO_2/CO desta amostra não é possível confirmar o envolvimento do papel, já que o envolvimento do papel é considerado quando a razão CO_2/CO é ≤ 5 (7). Apesar disto, o teor de CO_2 da amostra 26 foi significativamente alto (> 11000 ppm).

Em todas as amostras foram encontrados produtos originados da degradação do óleo. A presença de compostos oriundos de degradação do óleo juntamente com o elevado fator de potência revela a necessidade de análise da amostra 26 quanto as partículas. Na amostra 28, foi apontada a presença de *terc*-butanol, o que se esperava porque esta foi a amostra que teve um dos maiores teores de butano, embora os demais gases tenham se apresentado em baixos teores.

A análise por GC-MS se mostrou uma ferramenta importante para caracterização da falha, quanto ao envolvimento da celulose.

3.4 Análise quantitativa de partículas

Os dados de contagem de partículas e de índice de partículas magnéticas são apresentados na Tabela 5 e, para facilitar o entendimento, os valores de quantidade de partículas dos resultados expressos na Tabela 5 conforme a ISO 4406 são exemplificados na Tabela 6.

TABELA 5. Análise de partículas de algumas das amostras de óleo mineral isolante.

Amostra	Diagnóstico por AGD	PQI	Contagem de partículas	
			Total / 100 mL	ISO (>4 / >6 / >14 μm)
Amostra 26	FTAT	8	804600	19/18/15
Amostra 35	FTAT	8	72100	16/15/13
Amostra 38	FTAT	7	16100	14/13/10
Amostra 46	ON	7	157800	17/16/13
Amostra 51	ON	8	563100	19/18/15
Amostra 52	ON	9	58825600	26/24/17

NOTA: FTAT: falha térmica de alta temperatura (>700 °C); ON: operação normal.

TABELA 6. Quantidade de partículas por mL correspondentes ao número expresso pela ISO 4406.

ISO	10	13	14	15	16	17	18	19	24	26
Partículas/ mL	>5 e ≤10	>40 e ≤80	>80 e ≤160	>160 e ≤320	>320 e ≤640	>640 e ≤1300	>1300 e ≤2600	>2600 e ≤5000	>80000 e ≤160000	>320000 e ≤640000

Observaram-se os maiores valores de PQI e de total de partículas para as amostras 26, 51 e 52, sendo principalmente elevadas as quantidades de partículas menores, até 4 e 6 μm . Todas essas amostras apresentaram fator de potência elevado, corroborando a presença de quantidade considerável de partículas. Então, a natureza destas partículas foi investigada por meio da análise elementar e da ferrografia.

3.5 Análise elementar e ferrografia

A análise elementar (Tabela 7) apontou que os elementos encontrados nas amostras foram ferro, silício, zinco, cobre e chumbo. Uma das amostras que apresentou elevado fator de perdas é a amostra 26 e ao caracterizar essa amostra quanto às partículas, observou-se elevada concentração de partículas/100 mL de amostra, além da presença de silício e de ferro, indicando o envolvimento do núcleo na falha térmica.

A ferrografia da amostra 26 (Figura 1) apontou a presença de fibras de papel e a determinação de compostos voláteis já havia indicada a presença de etanol na mesma. A ocorrência de fibras e de etanol no óleo isolante são considerados indicativos do envolvimento do papel isolante na falha. Mesmo que, ao se observar o valor da razão CO_2/CO , não tenha sido possível correlacionar o envolvimento do papel nessa falha, com o auxílio das demais técnicas empregadas na metodologia desenvolvida (ferrografia e compostos voláteis) o envolvimento do papel foi confirmado.

TABELA 7. Análise elementar de algumas das amostras de óleo mineral isolante.

Amostra	Diagnóstico por AGD	Elemento detectado
Amostra 26	FTAT	Ferro Silício
Amostra 35	FTAT	Silício Zinco
Amostra 38	FTAT	Silício
Amostra 46	ON	Ferro Silício Zinco
Amostra 51	ON	Ferro Cobre Chumbo

Amostra 52	ON	Silício Cobre Chumbo
------------	----	----------------------------

NOTA: FTAT: falha térmica de alta temperatura (>700 °C); ON: operação normal.

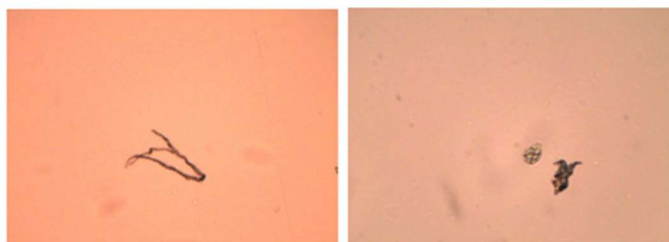


FIGURA 1. Imagens da ferrografia da amostra 26.

Nas amostras com diagnóstico de operação normal pela AGD (46, 51 e 52) foram identificados os elementos cobre, ferro, chumbo, silício e zinco. Em especial, nas amostras 51 e 52, apesar do diagnóstico pela AGD de operação normal, foi detectado cobre e partículas deste metal podem ser visualizadas na ferrografia destas amostras (Figuras 2 e 3). Estas amostras são de grande importância para este estudo, porque também apresentaram elevada quantidade de partículas e todos os parâmetros físico-químicos avaliados fora do recomendado. Estes resultados indicam a existência de falhas incipientes não diagnosticadas através da AGD, como pontos de corrosão internos no tanque ou no núcleo.

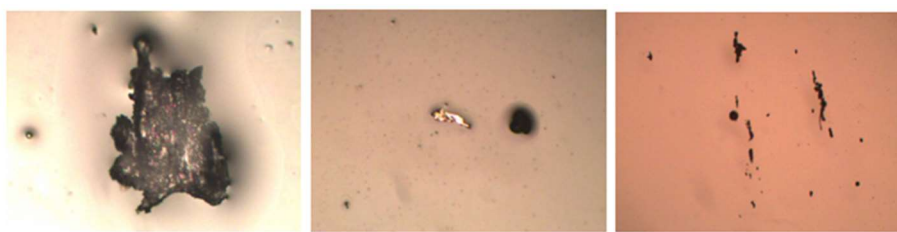


FIGURA 2. Imagens da ferrografia da amostra 51.



FIGURA 3. Imagens da ferrografia da amostra 52.

A ferrografia analítica foi uma ferramenta complementar às análises de contagem de partículas, índice de quantificação de partículas magnéticas (PQI) e detecção de metais por análise elementar, pois permitiu a observação do tamanho, formato e natureza das partículas. Além disso, a ferrografia possibilitou a identificação de fibras de papel isolante.

4.0 - CONCLUSÃO

Algumas amostras apesar de terem diagnóstico de operação normal pela AGD, podem apresentar indícios de falhas de outra natureza. Amostras com fator de perdas dielétricas elevado em relação ao esperado considerando o estágio de oxidação do óleo, por exemplo, que seriam amostras com os valores de parâmetros como tensão interfacial não alterados, independentemente de haver diagnóstico de falha ou não, pela AGD, devem ser investigadas por metodologias complementares, como GC-MS e ferrografia, uma vez que há indicação de falhas de outra natureza. Análises elementares de identificação de metais (solúveis e/ou insolúveis) e de caracterização de partículas podem fornecer informações se há algum tipo de material construtivo em degradação e que pode levar a uma falha futura e, assim evitá-la precocemente. Neste quesito, a ferrografia se mostrou uma ferramenta importantíssima nas análises realizadas. Esta metodologia possibilita a observação de fibras, de partes carbonizadas de papel, de partículas metálicas e de diversas outras partículas que podem estar presentes no óleo isolante. A identificação elementar do metal e a observação da morfologia da partícula metálica fornecem informações sobre o processo e o material que lhe deu origem.

Com base nos resultados obtidos neste estudo, sugere-se que a análise de partículas seja utilizada como ferramenta de confirmação de falha quando observadas discrepâncias entre os resultados físico-químicos e diagnóstico de falhas obtido pela AGD.

A determinação da presença de compostos voláteis (etanol e/ou *terc*-butanol) indica o envolvimento do papel celulósico isolante em falhas térmicas. Da mesma forma, a determinação dos gases C3 e C4 podem ser utilizados para confirmar a energia envolvida na falha.

5.0 - AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e a Santo Antônio Energia, pelo suporte durante a execução do projeto PD-06683-0318/2018.

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) ZHANG X., GOCKENBACH E. Asset-management of transformers based on condition monitoring and standard diagnosis [Feature Article]. IEEE Electrical Insulating Magazine, 24(4), pp. 26-40, 2008.
- (2) WANG, K., WANG, F., LI, J., ZHAO, Q., WEN G., ZHANG, T. Effect of metal particles on the electrical properties of mineral and natural ester oils. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 25(5), pp. 1621-1627, 2018.
- (3) WANG, M.H. A novel extension method for transformer fault diagnosis. IEEE Transactions on Power Delivery, 18(1), pp. 164–169, 2003.
- (4) CIGRE, TECHNICAL BROCHURE 393. Thermal performance of transformers, Working Group A2.24, 105 p., 2009.
- (5) CLARK, F.M. Insulating materials for design and engineering practice. New York: John Wiley and Sons, 393 p., 1962.
- (6) OOMMEN, T.V., PETRIE, E.M. Particle contamination levels in oil filled large power transformers. IEEE Power Engineering Review, PAS-102(5), pp. 1459-1465, 1983.
- (7) ISLAM, M.M., LEE, G., HETTIWATTE, S.N. A review of condition monitoring techniques and diagnostic tests for lifetime estimation of power transformers. Electrical Engineering, 100, pp. 581-605, 2017.

DADOS BIOGRÁFICOS



Graduada em Tecnologia em Biocombustíveis com atribuições em Tecnologia em Meio Ambiente pela Universidade Federal do Paraná (2012), Mestre e Doutora em Química Orgânica pelo programa de Pós-graduação em Química da Universidade Federal do Paraná (2015). Atualmente é Pesquisadora na VEGOOR Tecnologia Aplicada.

(2) HELENA WILHELM

Graduada em Licenciatura e Bacharelado em Química pela UFPR, mestre em Química pela UFSC e doutora em Química pela UNICAMP. É diretora da unidade de pesquisa e inovação da VEGOOR, coordenou e participou de mais de 65 projetos. Inventora de 11 pedidos de patente registrados no INPI. Tem 123 trabalhos apresentados em eventos nacionais e internacionais. Participa e coordena grupos de trabalhos técnicos, nacionais e internacionais (COBEI, CIGRE e IEC). Atua principalmente nos temas de novos materiais, degradação de materiais e manutenção preditiva (papeis, óleos mineral e vegetal isolantes e lubrificantes). É professora do curso de especialização em Fluidos Isolantes.

(3) PAULO DE OLIVEIRA FERNANDES

Engenheiro Químico pela Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Especialista em Gerenciamento de Resíduos Industriais Perigosos, pela Westinghouse Environmental Systems and Services (EUA). Especialista em Gerenciamento de Emissões Atmosféricas, pela Westinghouse Environmental Systems and Services (EUA). Mestre em Ciência e Tecnologia de Polímeros pela Universidade Federal do Rio de Janeiro. Auditor Ambiental com formação pela JPD Training Limited (Reino Unido). Diretor da Vegoor Tecnologia Aplicada.

(4) SÉRGIO MOURA PERES

Químico formado pela Universidade Cruzeiro do Sul- SP. Experiência com óleos lubrificantes e isolantes. Atualmente é supervisor de laboratório e participa da equipe de Pesquisa e Desenvolvimento na empresa Vegoor Tecnologia Aplicada.

(5) KETHLYN GHELLERE MOSCON

Química formada pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), possui curso técnico em Química também pela UTFPR. Atualmente é gerente de laboratório e participa da equipe de Pesquisa e Desenvolvimento na empresa Vegoor Tecnologia Aplicada. Membro ativo do COBEI-ABNT.

(6) VITOR CRISTIANO BENDER

Engenheiro Eletricista pela Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, em 2011, Mestre e Doutor em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Maria, em 2012 e 2015, respectivamente. Em 2014 realizou estágio doutoral na Universidad de Oviedo, Gijón, Espanha. De 2015 a 2017, foi professor da Universidade Federal do Pampa, Alegrete, Brasil. Desde 2018, é professor do Departamento de Eletrônica e Computação da UFSM, onde também é pesquisador no Grupo de Inteligência em Iluminação (GEDRE) e no Instituto de Redes Inteligentes (INRI) onde atua como Gerente do Laboratório de Engenharia Assistida por Computador.

(7) TIAGO BANDEIRA MARCHESAN

Tiago Bandeira Marchesan possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Maria (2003- with first class honours) e doutorado em Engenharia Elétrica (2007) pela mesma Universidade, com estágio na Universidad de Oviedo, España. É diretor do Centro de Tecnologia da UFSM desde 2017. Foi Coordenador de Transferência de Tecnologia da UFSM (2014-2017). Atua como Professor do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (CAPES conceito 6) e professor do Departamento de Eletromecânica e Sistemas de Potência da mesma Universidade. É Pesquisador no Instituto de Redes Inteligente e Unidade EMBRAPPII.

(8) JOSE BATISTA FERREIRA NETO

Engenheiro Eletricista com habilitação em Automação Industrial (2006) na Universidade de Uberaba - UNIUBE, Especialista em Proteção de Sistemas Elétricos (2012) na Universidade Federal de Itajubá – CEPSE UNIFEI, Gestão de Projetos e MBA Gestão de Negócios no Setor Elétrico (conclusão em 2021) na Fundação Getúlio Vargas – FGV. Experiência com projetos, comissionamentos e testes em fábrica nas áreas de Proteção, Controle, Equipamentos de Alta Tensão, Linhas de Transmissão, Subestações Convencionais (AIS), Subestações Blindadas à SF6 (GIS), Gestão de Contratos, P&D e PMP. Atualmente atuou como Coordenador de Manutenção dos Sistemas de Transmissão da Santo Antônio Energia, desde julho de 2017.

