



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

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

GRUPO - XIII

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

**ENSAIOS DE DESCARGAS PARCIAS EM TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA
ASSOCIADOS AOS ENSAIOS FÍSICO-QUÍMICOS DO ÓLEO – UM ESTUDO DE CASO**

**André Pereira Marques (*)
Cláudio Henrique Bezerra Azevedo
José Augusto Lopes dos Santos
CELG Distribuição**

**Cacilda de Jesus Ribeiro
Hudson de Paula Romualdo
Leonardo da Cunha Brito
Universidade Federal de Goiás - EMC**

RESUMO

Encontram-se na literatura várias abordagens sobre diagnósticos e estudos sobre falhas e defeitos em transformadores. Este artigo, além de focar no problema da análise de resultados de algumas técnicas preditivas, objetiva apresentar uma nova metodologia que auxilie de forma eficiente nas tomadas de decisão em manutenções preventivas. Os resultados deste trabalho são significativos e apresentados por meio de um estudo de caso de ensaios realizados em três transformadores de potência trifásicos de 33,3 MVA, e de 138 kV/13,8 kV, em serviço, cujas contribuições têm implicações práticas em situações a que estão sujeitos estes importantes equipamentos do sistema elétrico de potência.

PALAVRAS-CHAVE

Ensaio físico-químico, descargas parciais, falhas e defeitos, e transformadores de potência.

1.0 - INTRODUÇÃO

Monitorar a ocorrência de descargas parciais (DPs) em transformadores de potência é uma forma eficiente de preservar a integridade do seu sistema isolante, de forma que se possa agir preventivamente para se evitar possíveis falhas elétricas. Atualmente, têm-se utilizado vários métodos de detecção de descargas parciais: o elétrico, o químico – análise de gases dissolvidos (AGD) –, e o acústico – ensaio de emissão acústica (EA) (1) (2). O último, de EA, apresenta a vantagem de apresentar a localização das DPs sem que haja a necessidade de se retirar o transformador de operação, o que reduz custos com pessoal técnico e com recursos materiais e – principalmente – evita a descontinuidade no fornecimento da energia elétrica (3).

Nesse contexto, existem diferentes abordagens sobre o problema de diagnóstico de transformadores e estudos sobre falhas e defeitos (4). Este artigo tem como diferencial o foco no problema de análise de algumas técnicas preditivas e de apresentar uma metodologia que auxilie de forma eficiente nas tomadas de decisão em manutenções preventivas destes equipamentos. Destacando assim, um estudo de caso em que foram realizados vários ensaios, incluindo o monitoramento simultâneo de detecção de descargas parciais em três transformadores de potência trifásicos de 33,3 MVA e de 138 kV/13,8 kV em serviço, além de ensaios de análises de gases dissolvidos, físico-químicos e contagem de partículas em amostras de óleo.

Conforme o estudo realizado pelo "Working Group 12.17 do CIGRÉ – Effect of Particles on Transformer Dielectric Strength" (5), há informação de falhas em transformadores de alta e extra alta tensão, em vários países, causadas pela presença de partículas em suspensão no seu interior. Sabe-se que a presença de sujidades, tais como partículas de ferro, de alumínio, de cobre e de fibras de celulose, é inerente ao processo de fabricação destes equipamentos e, devido às suas propriedades elétricas, a contagem de partículas existentes no óleo isolante é um parâmetro importante para se avaliar as condições do dielétrico, bem como o risco de falha do equipamento (6).

Atualmente, o controle da quantidade de partícula é feito, via de regra, por meio da contagem realizada em amostras de óleo em laboratório. Neste artigo são apresentados resultados que permitem inferir a existência de

(*) CELG Distribuição, Rua 2, n° 505, Ed. Eletra, Bloco A, Sala T-14A, Setor Jardim Goiás – CEP 74.805-180, Goiânia, GO – Brasil - Tel: (+55 62) 3243 - 2553 – Fax: (+55 62) 3243-2495 – Email: andre.pm@celg.com.br

partículas em suspensão no óleo – e principalmente o efeito provocado por sua presença – por meio do ensaio de detecção de descargas parciais, pelo método de emissão acústica, em conjunto com ensaios físico-químicos. Essa metodologia permitiu verificar a existência de DPs e a necessidade de intervenção (filtragem e tratamento de óleo) no transformador, destacando as seguintes vantagens:

- Monitoramento durante vinte e quatro horas, abrangendo o ciclo completo de carregamento e demais condições operativas do transformador de potência;
- Ensaio não invasivo e permanência do equipamento em operação; e
- Análise de resultados incluindo o nível de descargas parciais e sua região de localização.

2.0 - METODOLOGIA DE MONITORAMENTO EM TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA

2.1 Ensaio

O monitoramento simultâneo de descargas parciais em transformadores de potência em serviço vem sendo realizado periodicamente como técnica preditiva já implementada na concessionária de energia elétrica CELG, e também tem proporcionado contribuições em projetos de pesquisas nesta área.

A Figura 1 ilustra o ensaio realizado com dois sistemas de detecção de descargas parciais, como estudo de caso analisado neste trabalho, por meio da metodologia empregada em três transformadores de potência trifásicos em serviço, denominados aqui de TR-1, TR-2 e TR-3.

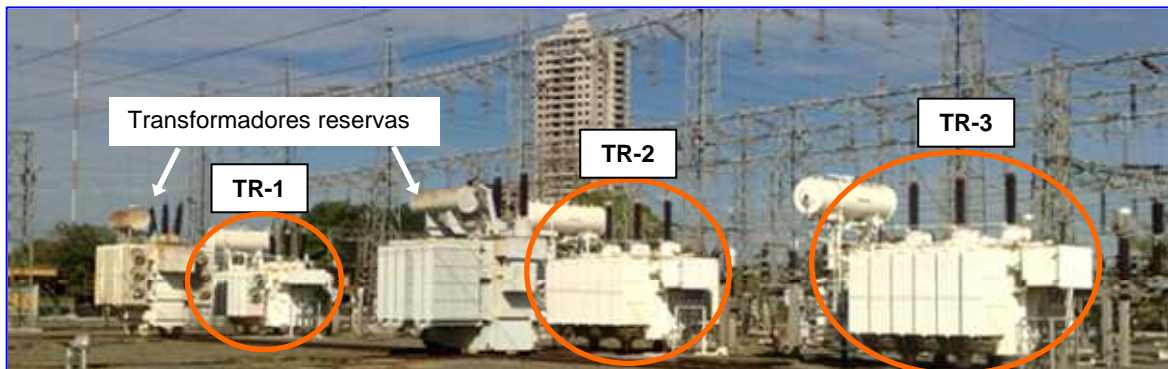
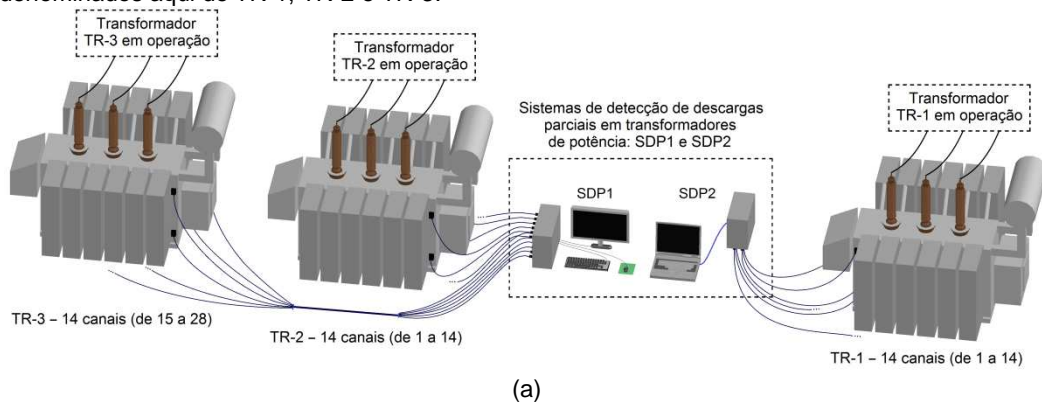


FIGURA 1 – Ensaio: (a) Sistemas de DPs - vista do lado do 138 kV; e (b) em campo - vista do lado do 13,8 kV.

Visando uma análise completa, os monitoramentos nos três transformadores de potência trifásicos foram realizados durante vinte e quatro horas (ciclo completo de carregamento), em períodos diferentes do ano de 2012, e denominados de:

- Monitoramento A: ensaios realizados em Junho;
- Monitoramento B: ensaios realizados em Outubro; e
- Monitoramento C: ensaios realizados em Dezembro.

Na metodologia, foram empregadas as seguintes análises:

- Detecção de descargas parciais pelo método de emissão acústica;
- Análise de Gases Dissolvidos (AGD) em amostras de óleo dos transformadores (cromatografia);
- Análise Físico-Química em amostras de óleo dos transformadores;
- Contagem de Partículas em amostras de óleo dos transformadores;
- Nível de carregamento dos transformadores; e
- Medições das tensões elétricas nas barras dos transformadores.

2.2 Filtragem e tratamento do óleo

Após a realização do Monitoramento A, em função da quantidade, da localização e da energia das descargas parciais (DPs) detectadas pelo método acústico, combinada com a avaliação dos parâmetros físico-químicos do óleo obtida para o transformador TR-3, associou-se os resultados à ocorrência do fenômeno de partículas em suspensão. Diante disso, tomou-se a decisão de se realizar um rigoroso processo de filtragem e tratamento do óleo no campo neste equipamento – que durou cinco dias –, com o recurso da instalação da subestação móvel no sistema, em substituição ao equipamento em questão, e com o acompanhamento de uma minuciosa avaliação das condições físico-químicas do óleo em cada etapa do processo.

Em seguida, após o tratamento citado, evidenciou-se a diminuição do fator de potência do óleo isolante e do nível de descargas parciais, proporcionando condições mais favoráveis de funcionamento para o transformador. Importante relatar que na análise dos filtros utilizados no processo de tratamento do óleo – ilustrados na Figura 2 – constatou-se a existência das seguintes partículas:

- material carbonizado;
- fibras de celulose de materiais isolantes; e
- partículas metálicas provenientes do processo fabril.



FIGURA 2 – Filtragem e tratamento: (a) filtro da máquina de tratamento do óleo; e (b) filtros do filtro-prensa.

Vale ressaltar que não houve a necessidade de realização deste processo de filtragem e de tratamento do óleo nos outros dois transformadores (TR-1 e TR-2), porque as análises dos ensaios de detecção de descargas parciais não apresentaram evidências significativas de DPs.

3.0 - RESULTADOS

3.1 Detecção de descargas parciais pelo método de emissão acústica

Nos três monitoramentos realizados, por meio dos ensaios de descargas parciais (com 42 sensores de emissão acústica, sendo 14 em cada equipamento, durante vinte e quatro horas, e simultaneamente nos três equipamentos) foram detectados sinais consideráveis de DPs somente no transformador TR-3. Dessa forma, este trabalho apresenta como foco principal as análises em relação a este equipamento. Vale dizer que o TR-3 e o TR-2 são idênticos, sendo que este último não apresentou DPs relevantes.

A Figura 3 apresenta a comparação dos resultados dos sinais de EA detectados como ruídos em geral (ruídos de fundo e de DPs), enquanto que a Figura 4 destaca somente os sinais de DPs nos monitoramentos, com os gráficos das coordenadas dos sensores (em x e y) instalados no transformador. Cabe destacar que há evidências de sinais discretos de DPs numa região bem definida (em formato de uma coluna) próxima ao enrolamento e ao comutador de derivação em carga, e somente em um curto período do ciclo de carga, no horário de pico (em torno das 19:00 horas), estando associadas ao nível de carregamento do equipamento. A Figura 5 ilustra esta ocorrência, apresentando a variação dos níveis de energia (de ruídos em geral e de DPs) ao longo do tempo, no período do monitoramento C.

Porém constata-se também nas Figuras 3 e 4 que, após o processo de filtragem e de tratamento do óleo (nos monitoramentos B e C), houve uma redução significativa de ruídos e de DPs.

Segundo (7), esclarecem-se as seguintes terminologias:

- Emissão acústica (EA): fenômeno pela qual as ondas elásticas transientes são geradas pela liberação rápida de energia de fontes localizadas em um material;
- Energia do evento de EA: energia elástica liberada por um evento de EA. *Nota:* para avaliar a magnitude do evento de EA, os sistemas de medição definem o parâmetro MARSE (*Measured Area under Rectified Signal Envelope*) como a medição da área retificada pelo envoltório do sinal de EA.
- *Hit*: detecção e medição de um sinal de EA em um canal;
- Ruído de fundo: sinais produzidos por outras causas distintas de EA ou por fontes de EA que não estão relacionadas com o ensaio. *Nota:* podem ser de origem elétrica e/ou mecânica;
- Sinal de EA: sinal elétrico gerado por um sensor como resultante de uma EA; e

- Sinal discreto: sinal de EA com um princípio e um final identificável.

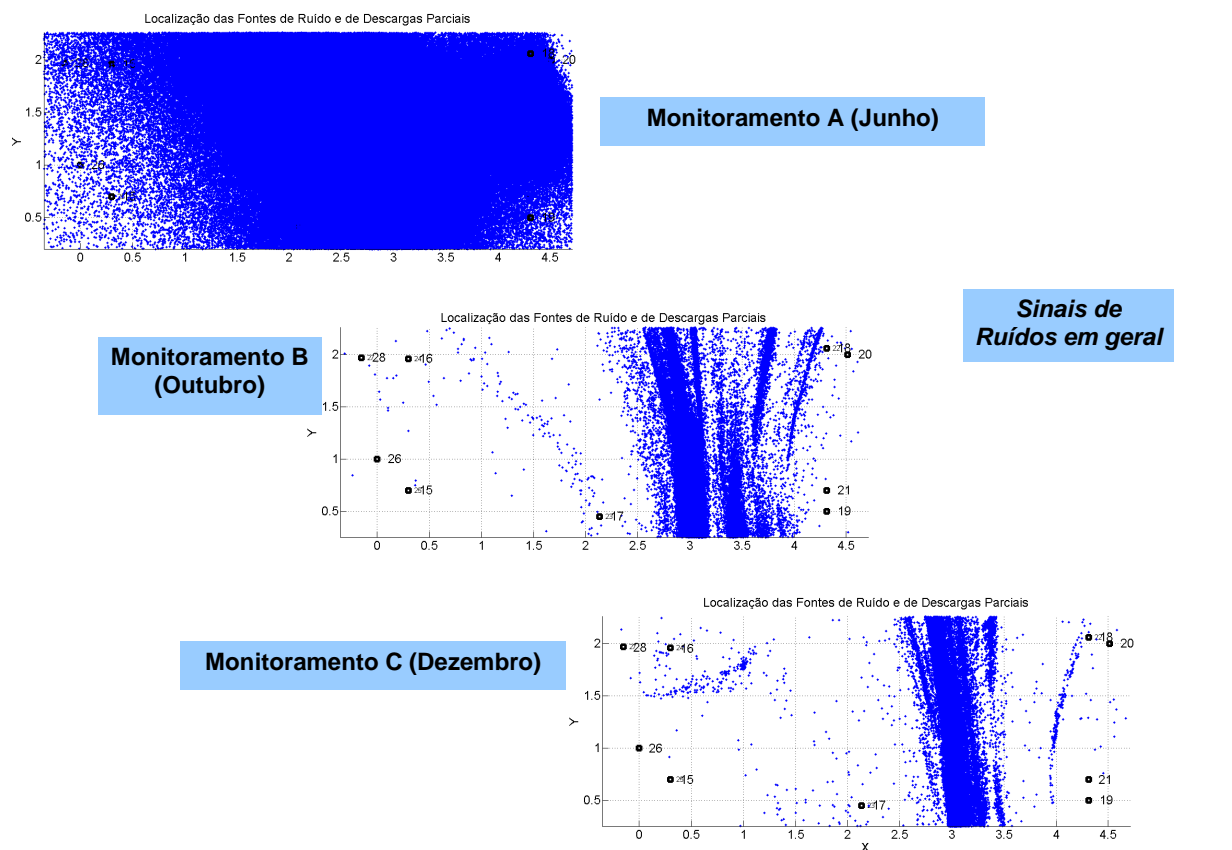


FIGURA 3 – Redução de sinais de ruídos em geral, após o processo de filtragem e de tratamento do óleo do TR-3.

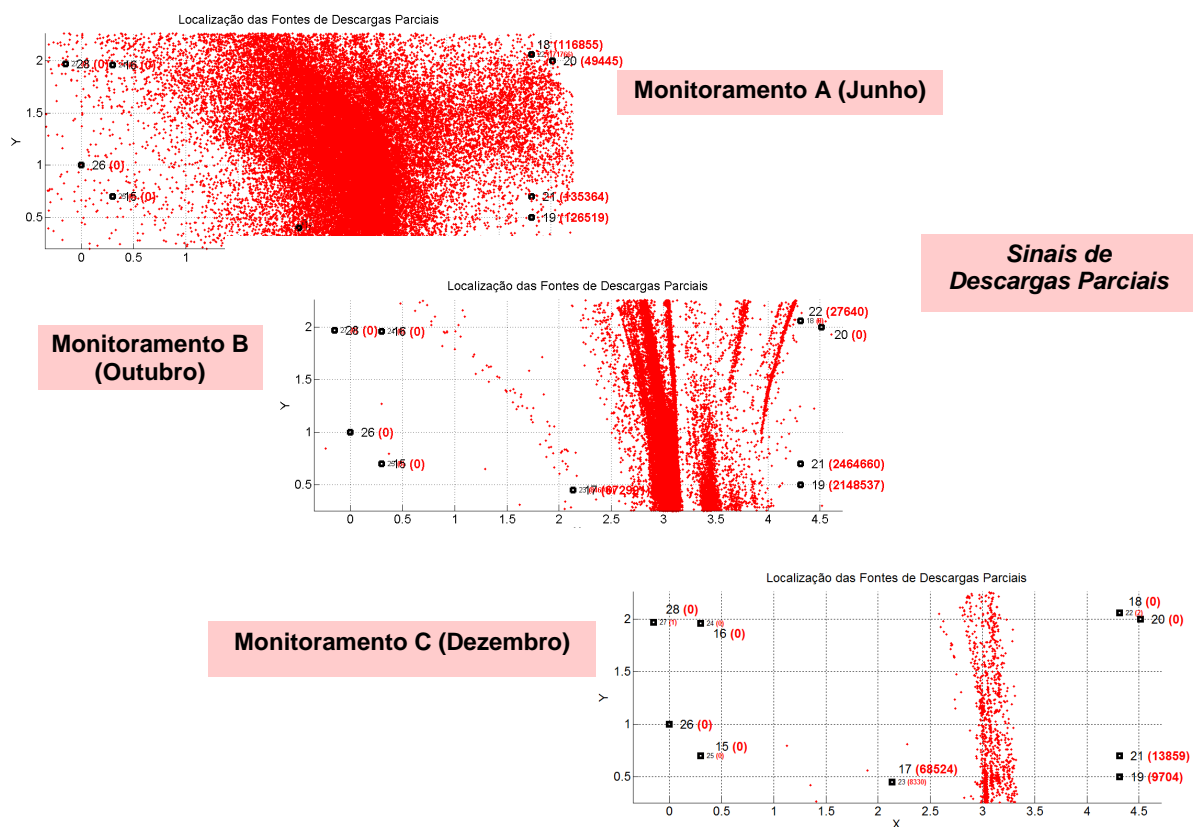


FIGURA 4 – Redução de sinais de descargas parciais, após o processo de filtragem e tratamento do óleo do TR-3.

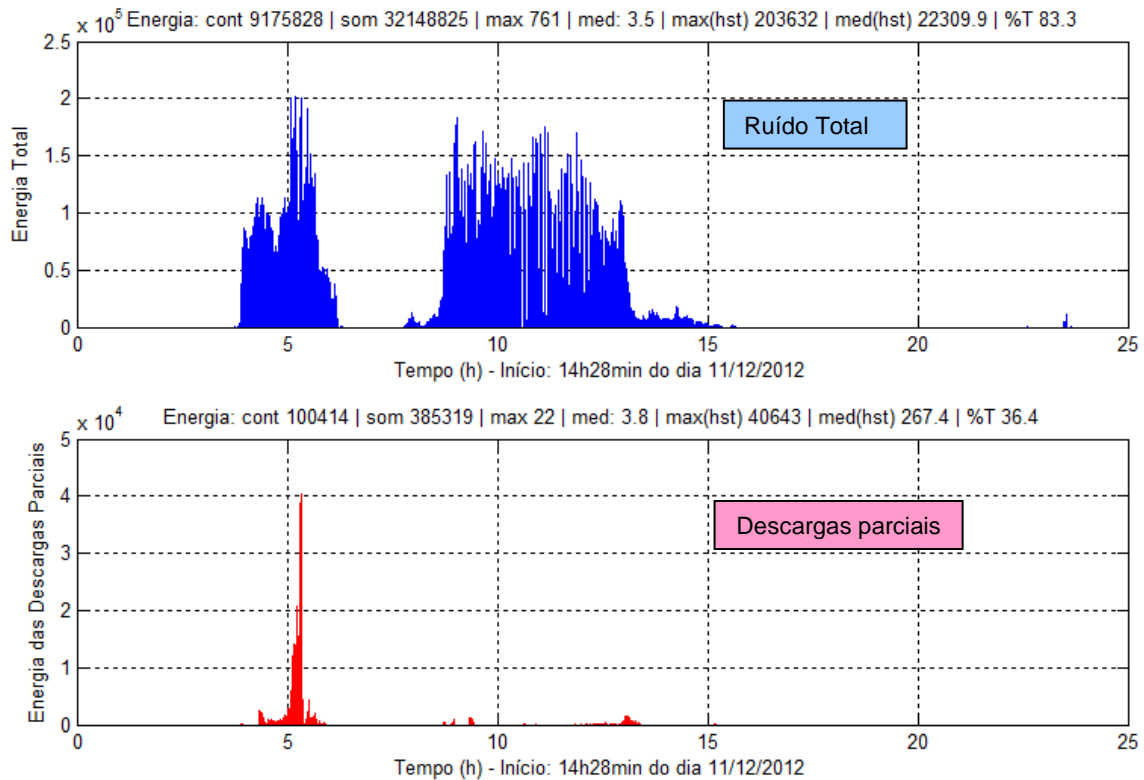


Figura 5 - Nível de energia detectado no Monitoramento C: de ruído total e de descargas parciais.

Cabe ressaltar que, os resultados apresentados nas Figuras 3, 4 e 5 referem-se ao algoritmo desenvolvido neste trabalho de pesquisa, a partir dos dados de aquisição do ensaio de emissão acústica, e considerando a Energia (ou contagem de energia) como a área medida sob a envoltória do sinal retificado de tensão.

A Figura 6 apresenta a comparação dos resultados estatísticos dos Monitoramentos A (de Junho), B (de Outubro) e C (de Dezembro) no transformador TR-3, por meio do gráfico *Boxplot*, mostrando a diminuição do valor médio da distribuição de energia do sinal de DPs, após o processo de filtragem e de tratamento do óleo.

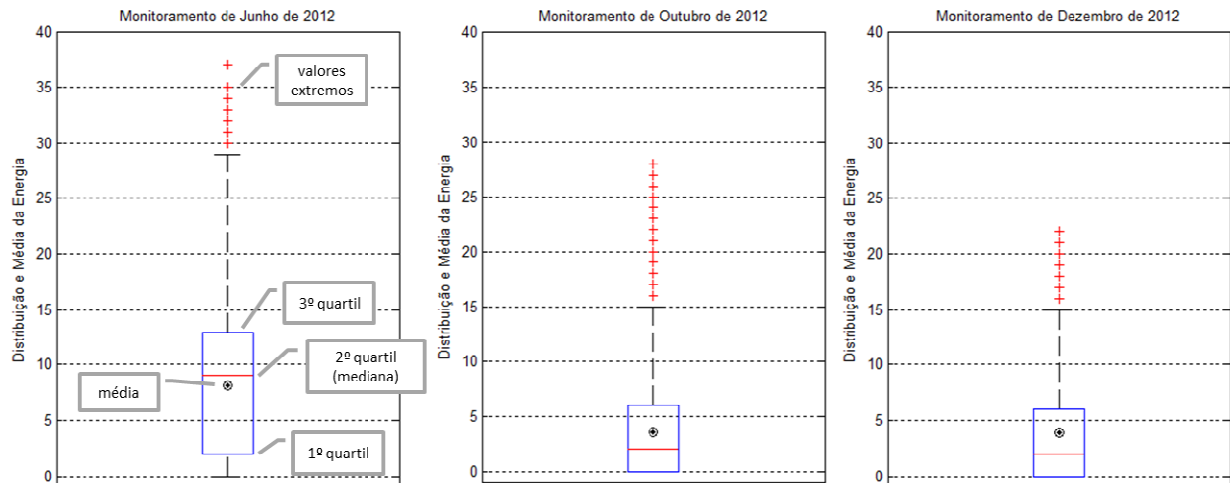


FIGURA 6 - Gráfico *Boxplot*: comparação dos resultados dos três monitoramentos: A, B e C.

Após o monitoramento B, com o objetivo de investigar as evidências de DPs que ainda permaneciam numa região bem específica de um dos equipamentos, o TR-3, porém em menor intensidade conforme ilustram as Figuras 3, 4, 5 e 6, foi realizada a contagem de partículas em amostras dos óleos isolantes. A Tabela 1 apresenta os valores acumulados dos resultados dos três transformadores, TR-1, TR-2 e TR-3, cujos valores se encontram dentro dos limites considerados normais (5; 6) e adotados por algumas concessionárias do setor elétrico.

Observa-se que, os resultados da tabela 1 são referentes ao maior valor encontrado entre as duas análises, e eles são cumulativos, ou seja, o valor de dois micrômetros é resultante da soma de todos os tamanhos medidos.

TABELA 1 – Contagem de partículas nas amostras de óleo após o Monitoramento B (valores acumulativos).

Micrômetros	Unidade	Amostras dos óleos dos transformadores		
		TR-1	TR-2	TR-3
2,00 (e acima)	Partículas / 100 ml	7.267,5	4.145	4.680
5,00 (e acima)	Partículas / 100 ml	1.252,5	780	1.827,5
15,00 (e acima)	Partículas / 100 ml	212,5	42,5	992,5
25,00 (e acima)	Partículas / 100 ml	90	2,5	215
50,00 (e acima)	Partículas / 100 ml	2,5	0	12,5
100,00 (e acima)	Partículas / 100 ml	0	0	0
Total (maior)		7.267,5	4.145	4.680
Total (menor)		2.257,5	3.540	2.772,5
Total (média)		4.762,5	3.842,5	3.726,25
Limites recomendados:				
Óleo novo antes do contato com o equipamento:	Adotado por algumas Concessionárias do Setor Elétrico: 15.000 Partículas/100 ml			
	Adotado por alguns Fabricantes: 10.000 Partículas/100 ml			
Em operação:	Adotado por algumas Concessionárias do Setor Elétrico: 50.000 Partículas/100 ml			

3.2 Análises físico-químicas dos óleos dos transformadores

Os resultados das análises físico-químicas dos transformadores TR-1 e TR-2 encontram-se dentro dos valores esperados, por isso na Tabela 2 são apresentados somente os valores dos ensaios do transformador TR-3 que apresentou valor alto de fator de potência do óleo e evidências de sinais de descargas parciais no monitoramento A, gerando a necessidade de se realizar o processo de filtragem e de tratamento do óleo.

A Tabela 2 apresenta os resultados dos ensaios antes e depois do processo de filtragem e de tratamento do óleo, destacando a contribuição deste procedimento nas propriedades do dielétrico e consequentemente no desempenho do equipamento.

TABELA 2 – Análises físico-químicas do óleo do transformador TR-3.

Datas dos Ensaios no TR-3	Ensaios	Resultados	
Ensaios realizados antes do processo de filtragem e de tratamento do óleo			
Ensaios realizados em 13/junho/2012	Ensaio de fator de potência (a 100 °C):	4,99 %	valor acima do desejado
	Ensaio de rigidez dielétrica:	85 kV	satisfatório
	Ensaio de teor de água:	7,0 ppm	satisfatório
Ensaios realizados em 17/Setembro/2012	Ensaio de fator de potência (a 100 °C):	5,47 %	valor acima do desejado
	Ensaio de rigidez dielétrica:	80 kV	satisfatório
	Ensaio de teor de água:	8,0 ppm	satisfatório
Ensaios realizados após o processo de filtragem e de tratamento do óleo			
Ensaios realizados em 22/Setembro/2012	Ensaio de fator de potência (a 100 °C):	2,72 %	valor ainda acima do desejado
	Ensaio de rigidez dielétrica:	87 kV	satisfatório
	Ensaio de teor de água:	6,0 ppm	satisfatório
Ensaios realizados em 03/outubro/2012	Ensaio de fator de potência (a 100 °C):	2,66 %	valor ainda acima do desejado
	Ensaio de rigidez dielétrica	94 kV	satisfatório
	Ensaio de teor de água	7,0 ppm	satisfatório

3.3 Análise de Gases Dissolvidos (AGD) em amostras de óleo dos transformadores

Os resultados dos ensaios de análise de gases dissolvidos em óleo (AGD), ou cromatografia, dos três transformadores, resultaram em valores satisfatórios em termos de evolução de gases e estado do equipamento.

3.4 Nível de carregamento dos transformadores

Devido às evidências de DP's se concentrarem numa região bem definida, e somente em um período curto do ciclo de carga, no horário de pico (em torno das 19:00 horas), verificou-se a necessidade de análise do nível de carregamento do transformador TR-3.

Na Figura 7 são apresentadas as variações de cargas deste equipamento, comparando os valores dos Monitoramentos A, B e C (dos meses de junho, de outubro e de dezembro de 2012, no período em que foram

realizados os ensaios de detecção de DPs). Os resultados constatarem a associação do surgimento dos sinais de DPs com o período de maior carregamento.

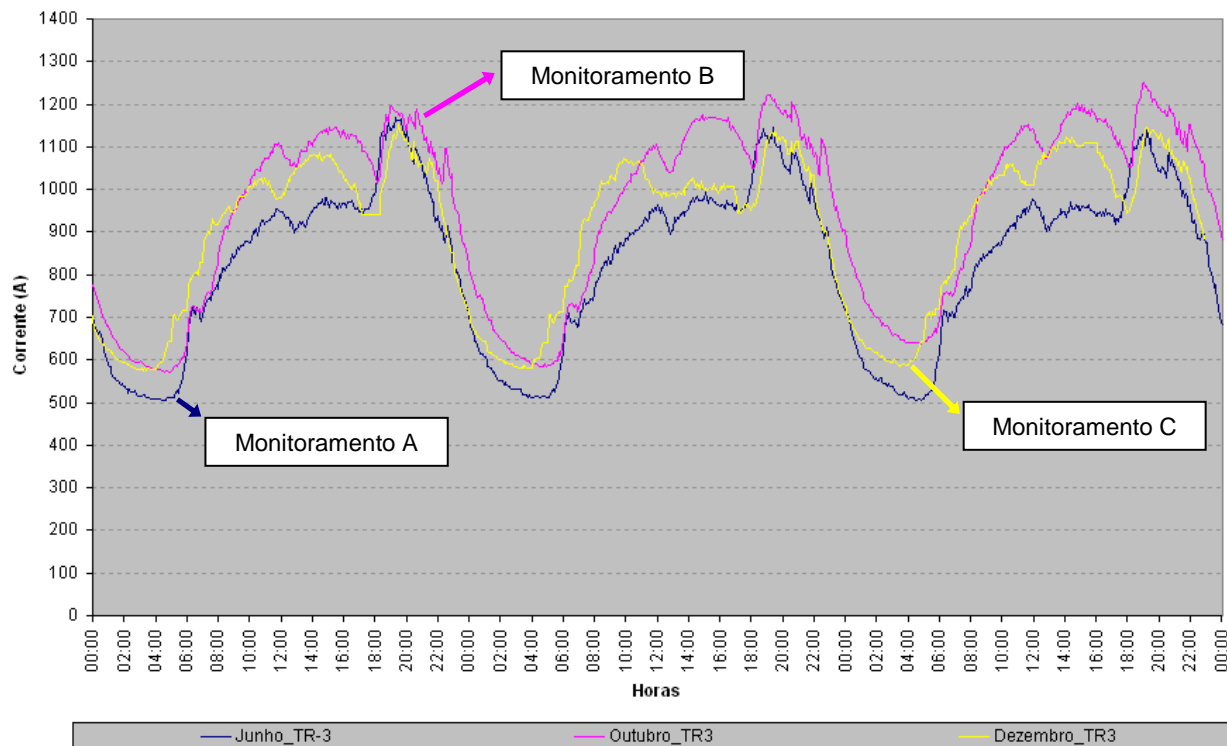


FIGURA 7 – Comparação do nível de carregamento do TR-3 durante os ensaios nos três meses referenciados.

Esta simulação de modelagem térmica referente aos ciclos de carregamento deste equipamento, apresentada na Figura 7, levou em conta todas as condições operativas ocorridas nos períodos dos três monitoramentos, de forma a se considerar o efeito da temperatura na convecção do óleo e na formação de DPs, visando a complementação da análise da metodologia apresentada neste trabalho.

3.1 Medições das tensões elétricas nas barras dos Transformadores

Visando a regulação da tensão e a melhoria do fator de potência da barra de carga da SE Atlântico, foram instalados bancos de capacitores trifásicos (um banco a mais no secundário de cada transformador), com potência de 6,3 MVar e tensão nominal de 13,8 kV, em período anterior ao da realização do monitoramento C (do mês de dezembro). Sendo assim, como análise complementar, devido a estas novas instalações, foram constatados e analisados os valores **satisfatórios** das tensões elétricas nas barras e das correntes gerais nos três transformadores, no período de ensaio de detecção de descargas parciais do monitoramento C.

4.0 - CONCLUSÃO

De um modo geral, os três transformadores de potência trifásicos encontram-se em condições favoráveis de funcionamento. Entretanto, cabe ressaltar as comparações de melhorias dos resultados de detecção de DPs associados aos ensaios físico-químicos, realizados antes e depois do processo de filtragem e de tratamento do óleo do equipamento TR-3. Sendo elas:

a) Ensaios de detecção de DPs:

- a quantidade de tempo de evidências diminuiu de 64,5% para 36,4%, como também diminuíram todos os parâmetros analisados em relação às DPs;
- a quantidade de canais que detectaram DPs permaneceu a mesma, a saber: canais 17, 19, 21 e 23, que encontram-se na região entre o comutador de derivações em carga e o enrolamento da fase C;
- a energia média das DPs permaneceu praticamente a mesma (de 3,5 para 3,8) por *hit* de DP detectado, porém, a soma de energia individual de *hits* diminuiu consideravelmente (Figura 6); e
- o valor da mediana da distribuição de energia das DPs manteve-se em 2,0 por *hit* de DP detectado, conforme apresenta a Figura 6.

b) Ensaios físico-químicos:

- redução acentuada nos valores dos resultados de ensaios de fator de potência;

- aumento da rigidez dielétrica; e
- pequena redução da umidade (H₂O).

Sendo assim, diante das análises, fica evidente a presença de descargas parciais no transformador TR-3, nível este de valor considerável, porém menos crítico do que o do ensaio anterior, do mês de Outubro (Monitoramento B). Recomenda-se, dentro do cronograma de manutenção preventiva da empresa, dar continuidade à investigação em função:

- a) da ocorrência dos sinais de DPs, em formato de coluna (Figuras 3 e 4), a qual se forma predominantemente no período de maior carregamento (horário noturno); e
- b) dos valores elevados do fator de potência do óleo.

Além dos resultados apresentados, cabe destacar que não se observaram indicativos de ataque por enxofre corrosivo.

Portanto, conclui-se neste trabalho que esta nova metodologia de monitoramento, combinando detecção de DPs pelo método acústico, análise de gases dissolvidos e análise físico-química do óleo, contribui de forma significativa para o setor de manutenção em transformadores de potência, visando a qualidade do serviço e a melhor solução técnica aplicável e economicamente viável para se evitar falhas e, conseqüentemente, indisponibilidades do equipamento, reduzindo assim o número de interrupções no sistema elétrico.

5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. *Guide for Partial Discharge Measurement in Liquid-Filled Power Transformers and Shunt Reactors*. IEEE C57.113-1991(R2002), Dec. 2002.
- (2) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. *NBR 15633 - Ensaio não destrutivo - Emissão acústica - Detecção e localização de descargas parciais e anomalias térmicas e mecânicas (DPATM) em transformadores de potência e reatores isolados a óleo*. Rio de Janeiro, 2008.
- (3) AZEVEDO, C. H. B.; MARQUES, A. P; RIBEIRO, C. J. *Methodology for the detection of partial discharges in power transformers using the acoustic method*. EUROCON 2009 Conference. Saint Petersburg, Russia, May, 2009.
- (4) KUFFEL, E; ZAENGL, W.S; KUFFEL, J. *High voltage engineering: fundamentals*. 2nd. Oxford:Newnes, 2000.
- (5) CIGRÉ. *Working Group 12.17 do CIGRÉ – Effect of Particles on Transformer Dielectric Strength*. Canada, Jun. 2000.
- (6) BECHARA, R. *Análise de falhas de transformadores de potência*. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2010.
- (7) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. *NBR NM 302 - Ensaio não destrutivo – Ensaio de emissão acústica (EA) - terminologia*. Rio de Janeiro, 2012.

6.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



André Pereira Marques, nascido em Araguari, Minas Gerais, em 25/02/1961.

Mestre (2004) em Engenharia Elétrica pela Escola de Engenharia Elétrica e de Computação (EEEC) da Universidade Federal de Goiás (UFG) e graduado (1984) em Engenharia Elétrica na EEEEC/UFG. Gerencia e atua no Setor de Engenharia de Manutenção da CELG Distribuição S.A. e também é professor do Curso de Eletrotécnica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás (IFG).



Cláudio Henrique Bezerra Azevedo, nascido em Goiânia, Goiás, em 27/05/1961.

Mestre em Engenharia Elétrica pela Escola de Engenharia Elétrica e de Computação (EEEC) da Universidade Federal de Goiás (UFG) e graduado (1983) em Engenharia Elétrica na EEEEC/UFG. Atua no Setor de Engenharia de Manutenção da CELG Distribuição S.A.



José Augusto Lopes dos Santos, nascido em Porto, Portugal, em 28/07/1954. Graduado (1982) em Engenharia Elétrica pela Escola de Engenharia Elétrica e de Computação (EEEC) da Universidade Federal de Goiás (UFG). Gerencia e atua no Setor de Manutenção de Subestações da CELG Distribuição S.A.



Cacilda de Jesus Ribeiro, nascida em Matão, São Paulo, em 08/08/1971. Doutora (2002) e pós-doutora (2004) em Engenharia Elétrica pela Escola de Engenharia de São Carlos (EESC) da Universidade de São Paulo (USP). Engenheira Eletricista graduada (1994) na UNIFEB, e Especialista em Engenharia de Segurança do Trabalho (2008) pela Escola de Engenharia Civil (EEC) da Universidade Federal de Goiás (UFG). Atua como professora adjunta na Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica de Computação (EME) da Universidade Federal de Goiás (UFG).



Hudson de Paula Romualdo, nascido em Goiânia, Goiás, em 13 de setembro de 1980. Graduado (2003) e especialista (2006) em Desenvolvimento de *Software* Orientado a Objetos e Internet pelo Centro Universitário de Goiás. Atua na área de projeto e desenvolvimento de *software* e é Mestrando na Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação (EMC) da Universidade Federal de Goiás (UFG).



Leonardo da Cunha Brito, nascido em Goiânia, Goiás, em 09/12/1975. Doutor (2003) e Mestre (2001) em Engenharia Elétrica pela Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília (UnB) e graduado (1998) em Engenharia Elétrica na EMC/UFG em Engenharia Elétrica. Atua como professor associado na Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica de Computação (EMC) da Universidade Federal de Goiás (UFG).