



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

FI/GTM/18
18 a 21 de Outubro de 2015
Foz do Iguaçu - PR

GRUPO – XIII

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

**ANÁLISE SOBRE A IMPLEMENTAÇÃO DE UM SISTEMA INTELIGENTE DE CLASSIFICAÇÃO DE
DESCARGAS PARCIAIS EM TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA**

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

Cacilda de Jesus Ribeiro
Leonardo da Cunha Brito
Murillo Antonio de Souza Carvalho
Universidade Federal de Goiás - EMC

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo apresentar as análises sobre o desenvolvimento e a implementação de um sistema inteligente para a classificação e para avaliação do nível de sinais detectados de descargas parciais pelo método de emissão acústica, em transformadores de potência, associada à técnica já consagrada de análise de gases dissolvidos em óleo.

A metodologia empregada baseou-se nos resultados de trinta e nove ensaios em transformadores, com monitoramentos em períodos de vinte e quatro horas cada, que foram realizados dentro do cronograma de planejamento da área de manutenção, durante um período de seis anos, visando eficiência nas tomadas de decisão sobre intervenções nestes equipamentos tão estratégicos do sistema elétrico.

PALAVRAS-CHAVE

Descargas parciais, manutenção preventiva, sistema inteligente, técnica preditiva, transformadores de potência

1.0 - INTRODUÇÃO

Falhas ou defeitos em transformadores de potência comprometem o adequado fornecimento de energia elétrica, e por isso, seus funcionamentos devem ser confiáveis, garantindo a qualidade de energia, que é uma das principais preocupações das concessionárias, pois a sua diminuição pode causar muitos problemas para os equipamentos conectados, tais como avaria, instabilidade e redução de vida útil. Além disso, a substituição de um transformador de potência é muito cara e demorada e sendo, portanto, é essencial detectar falhas incipientes tão cedo quanto possível, de forma que permitam a suas retificações com o mínimo de intervenções no sistema [1].

De acordo com os índices de interrupções, falhas e defeitos em transformadores e autotransformadores de potência identificados entre os anos de 1979 e 2012 na CELG-D [2], tem-se os seguintes componentes mais afetados: enrolamentos (35%), buchas (12%), comutadores de derivação em carga (10%), comutadores sem tensão (11%), e causas não identificadas devido a registros incompletos (9%).

O investimento em ativos inseridos em um ambiente competitivo impõe a busca de processos cada vez mais otimizados, maximizando resultados e minimizando o emprego de recursos. Nesse contexto, a função Manutenção assume papel relevante na medida em que contribui para o funcionamento adequado desses ativos [3].

Manutenção, disponibilidade e confiabilidade são conceitos estreitamente relacionados e o gestor de ativos deve estabelecer uma política de manutenção que maximize a disponibilidade e confiabilidade dos ativos a um custo adequado. A fim de permitir o contínuo funcionamento desses ativos, a engenharia de manutenção e os respectivos procedimentos de manutenção e operação, necessários à sua efetivação, devem ser executados de forma integrada [3].

Nesse sentido, destaca-se a técnica preditiva de detecção de descargas parciais (DPs) que é um método comprovado para avaliar a condição de um transformador de potência. Um nível muito alto de DPs em um

(*) 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

transformador pode degradar rapidamente seu sistema de isolamento e provocar danos. Se DPs são detectadas e localizadas rapidamente, em seguida, o equipamento pode ser reparado ou substituído, evitando assim interrupções significativas no sistema elétrico [4].

As descargas parciais em transformadores de potência em serviço são mais frequentemente detectadas por meio da análise de gases dissolvidos (AGD) e do método de emissão acústica (EA) que, além de mais sensível à detecção de DPs, tem a vantagem adicional de indicar suas localizações [4].

Como contribuição na área de manutenção, este trabalho tem como objetivo analisar a implementação de um sistema para a classificação e para a análise (denominado de DPTrafo), visando a eficácia de detecção de descargas parciais por emissão acústica como técnica preditiva em transformadores de potência imersos em óleo isolante, levando em conta também os resultados das análises de gases dissolvidos.

A metodologia empregada baseou-se nos resultados de trinta e nove ensaios, com monitoramentos em períodos de vinte e quatro horas cada, que foram realizados dentro do cronograma de planejamento da área de controle da manutenção, durante um período de seis anos (de 2008 a 2014).

Na tomada de decisão, também são considerados os resultados das análises físico-químicas como complemento, conforme ilustra a Figura 1.

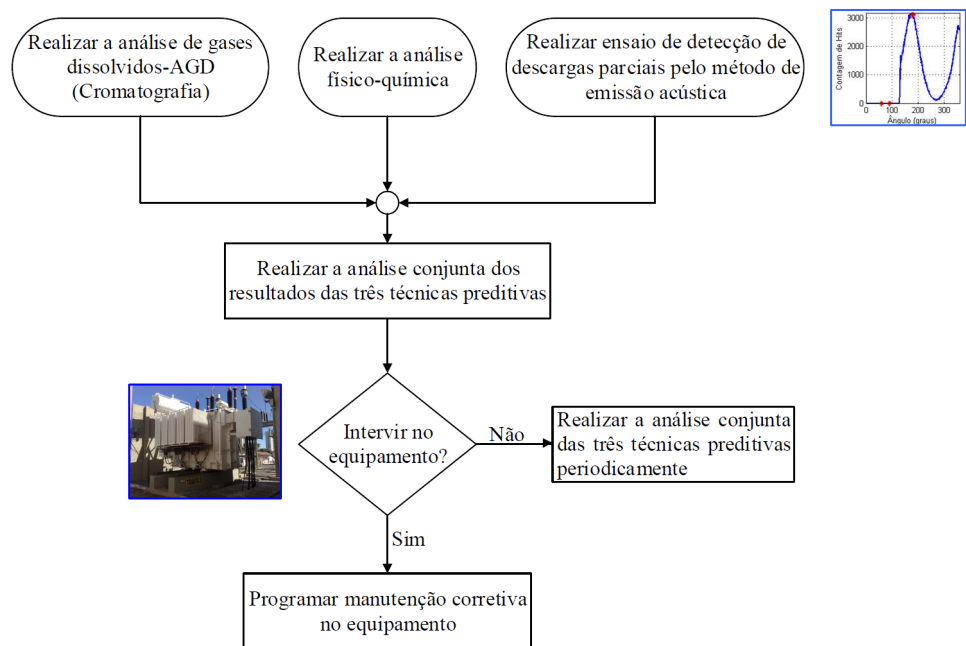


Figura 1 – Metodologia de análise dos resultados.

2.0 - DESENVOLVIMENTO

O desenvolvimento desta técnica preditiva – atualmente já implementada na concessionária de energia elétrica CELG Distribuição S.A. – é apresentado por meio das seguintes etapas, que são detalhadas posteriormente:

- a) de procedimentos da Equipe de Manutenção e interação com o Centro de Operação do Sistema (COS); e
- b) das possíveis combinações entre os resultados das duas técnicas, com as suas respectivas notas atribuídas, como apoio à tomada de decisão, por meio da relação entre os resultados da classificação dos ensaios de detecção de Emissão Acústica e das Análises de Gases Dissolvidos (cromatografia).

2.1 Procedimentos em relação ao ensaio de descargas parciais

Com a implementação do sistema de classificação de descargas parciais pelo método de emissão acústica, foram definidos os procedimentos operacionais da equipe da área de manutenção com o Centro de Operação do Sistema (COS) da empresa, conforme ilustra a Figura 2.

Neste trabalho são analisados os resultados de 20 (vinte) idas ao campo com ensaios de detecção de descargas parciais pelo método de emissão acústica, em 12 (doze) subestações de energia elétrica da empresa, num total de 26 equipamentos.

2.2 Combinação entre os resultados da classificação dos ensaios de Emissão Acústica e da Cromatografia

A Figura 3 e a Tabela 1 apresentam as combinações definidas entre os resultados dos ensaios de emissão acústica (EA) e da análise de gases dissolvidos (AGD), que são utilizadas no sistema de classificação implementado, e que variam de “A” até “D”.

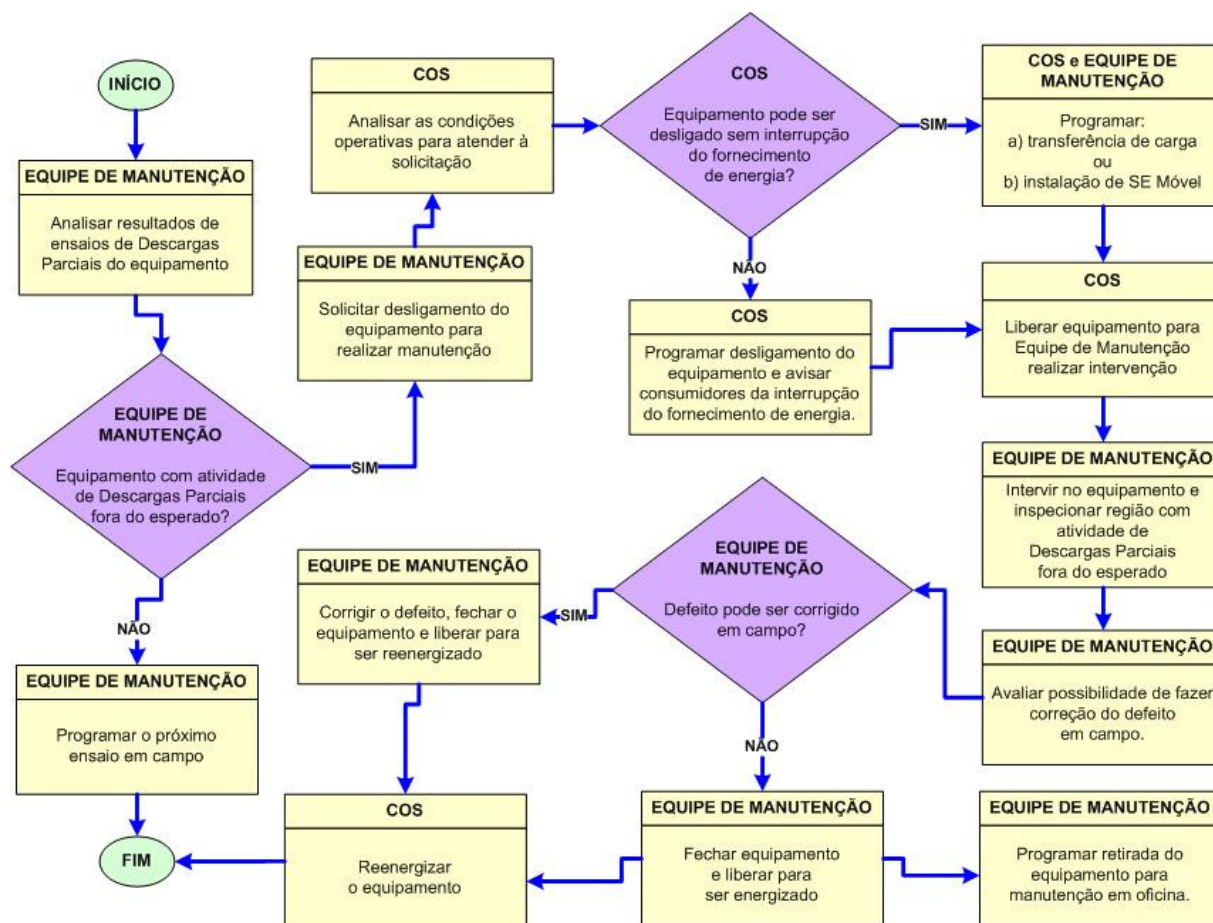


Figura 2 – Procedimentos operacionais em relação aos resultados do ensaio de descargas parciais.

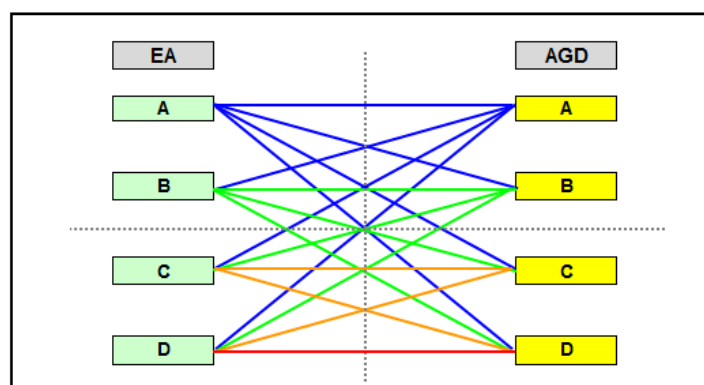


Figura 3 – Combinação de resultados dos ensaios de EA e AGD

A partir dos resultados destas combinações, as ações recomendadas correspondem aos seguintes níveis de classificação final, definidos como alerta e subsídio ao analista, identificados na Tabela 1:

- Nível 1 – Irrelevante: indícios desconsideráveis de DPs e de formação de gases dissolvidos;
- Nível 2 – Baixo: presença não significativa de DPs e/ou baixa formação de gases dissolvidos;
- Nível 3 – Mediano: presença considerável de DPs e/ou de formação de gases dissolvidos; e
- Nível 4 – Elevado: presença intensa de DPs e/ou de formação de gases dissolvidos.

Tabela 1 – Combinações.

Classificação Parcial por Técnica Preditiva				Combinação (EA e AGD)	Ponderação (%)	Classificação Final (Níveis e Descrições)	
EA		AGD					
A	Insignificante	A	Insignificante	AA	6	NÍVEL 1	IRRELEVANTE
A	Insignificante	B	Aceitável	AB	12	NÍVEL 2	BAIXO
A	Insignificante	C	Preocupante	AC	24	NÍVEL 3	MEDIANO
A	Insignificante	D	Grave	AD	53	NÍVEL 4	ELEVADO
B	Aceitável	A	Insignificante	BA	12	NÍVEL 2	BAIXO
B	Aceitável	B	Aceitável	BB	18	NÍVEL 2	BAIXO
B	Aceitável	C	Preocupante	BC	29	NÍVEL 3	MEDIANO
B	Aceitável	D	Grave	BD	59	NÍVEL 4	ELEVADO
C	Preocupante	A	Insignificante	CA	24	NÍVEL 3	MEDIANO
C	Preocupante	B	Aceitável	CB	29	NÍVEL 3	MEDIANO
C	Preocupante	C	Preocupante	CC	41	NÍVEL 3	MEDIANO
C	Preocupante	D	Grave	CD	71	NÍVEL 4	ELEVADO
D	Grave	A	Insignificante	DA	53	NÍVEL 4	ELEVADO
D	Grave	B	Aceitável	DB	59	NÍVEL 4	ELEVADO
D	Grave	C	Preocupante	DC	71	NÍVEL 4	ELEVADO
D	Grave	D	Grave	DD	100	NÍVEL 4	ELEVADO

Nota: sendo EA – ensaio de detecção de descargas parciais pelo método de emissão acústica, e AGD – análise de gases dissolvidos em óleo (cromatografia).

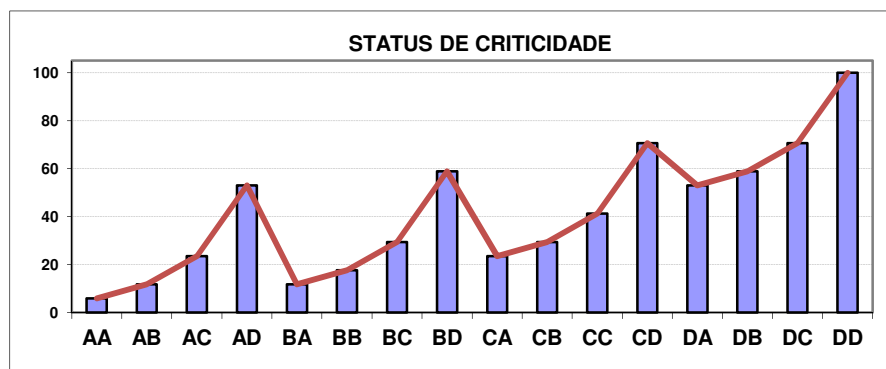
Na Tabela 2 são apresentadas as ações recomendadas em função do resultado final da combinação de detecção de descargas parciais pelo método de emissão acústica e da análise de gases dissolvidos, de acordo com a Tabela 1, com as notas calculadas de acordo com as combinações possíveis e com os níveis.

Tabela 2 – Ações recomendadas em função das classificações.

Classificação para cada técnica	Diagnóstico do nível	Ação recomendada
Nível 1	Irrelevante	Continuar a operar o equipamento normalmente
Nível 2	Baixo	Continuar a operar o equipamento, porém estando atento à evolução de DPs e/ou AGD nos próximos registros
Nível 3	Mediano	Investigar e realizar outros ensaios o mais breve possível para confirmar resultados e tendências de DPs e/ou AGD
Nível 4	Elevado	Programar retirada do equipamento de operação em caráter de urgência para inspeção interna, localização e correção de defeito

Cabe ressaltar que, nas identificações dos níveis de criticidade e da ação recomendada, foi considerada como referência predominante os resultados da cromatografia, por ela ser uma técnica já consagrada no setor elétrico [5].

As Figuras 4 e 5 apresentam: a posição (*status*) de criticidade e os níveis de criticidade em ordem crescente em função das notas encontradas para cada combinação dos resultados.

Figura 4 – Posição (*status*) de criticidade.

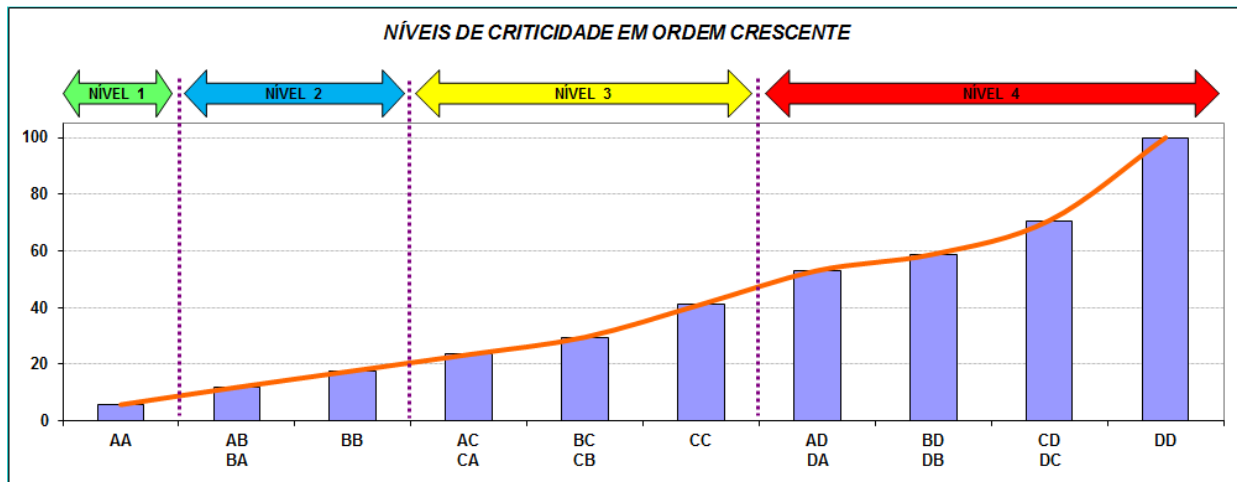


Figura 5 – Nível de criticidade em ordem crescente.

Os resultados destas combinações fazem parte do desenvolvimento do sistema especialista inteligente de gerenciamento e de apoio à tomada de decisão baseado em Redes Bayesianas [7], que possui a vantagem também de possuir um método de identificação que separa ruídos comuns daqueles resultantes de descarga parcial, possibilitando o processamento isolado de seus atributos, e permitindo o foco na informação de maior relevância.

Este sistema de apoio à decisão, denominado *DPTrafo 2.0*, que faz parte deste trabalho, contém os seguintes elementos, descritos em [6] e [7]:

- Banco de Dados que armazena adequadamente os ensaios realizados em um servidor adquirido para esse fim;
- Módulo de Processamento dos dados obtidos pelo equipamento de aquisição de sinais acústicos. Este apresenta, como resultado de processamento, os instantes e montantes de ocorrências de ruídos totais e, especialmente, de emissões acústicas referentes a descargas parciais. Apresentam-se, também, as estimativas das localizações espaciais das fontes de emissão acústica, considerando tanto os ruídos totais como os sinais acústicos gerados por descargas parciais, de forma a subsidiar as decisões preventivas; e
- Módulo de Avaliação baseado em informações de EA e de AGD, aplicando Rede Bayesiana. A inserção de novos ensaios e as respectivas classificação ("A" a "D") apresentadas pelos especialistas alimenta o classificador Bayesiano e, à medida em que a quantidade de ensaios aumentar, considerando um determinado transformador ou transformadores com idêntico projeto, o sistema inteligente implementado assimilará o conhecimento dos especialistas, podendo gerar, então, sugestões adequadas para as classificações.

3.0 - RESULTADOS

Esta pesquisa apresenta os níveis de criticidades em ordem crescente em função das notas calculadas para cada combinação dos resultados dos ensaios analisados que envolveram:

- doze subestações de energia elétrica;
- vinte idas das equipes ao campo; e
- vinte e seis transformadores de potência em operação (denominados de T1 a T26 neste trabalho), com potências variando de 32,0 MVA a 75,0 MVA, submetidos aos ensaios de detecção de DPs por EA e de AGD, conforme os resultados são apresentados na Tabela 3.

A Figura 6 ilustra a classificação dos vinte e seis equipamentos, de acordo com o ensaio realizado em cada um, destacando a repetição (duas, três ou quatro vezes) do ensaio em determinados transformadores, realizada em períodos diferentes. Porém, vale observar que, três ensaios foram realizados com dois sistemas de detecção de descargas parciais diferentes nos mesmos transformadores, o que representa um banco de dados com quarenta e duas análises.

Diante dos resultados desta pesquisa foi constatado que existem diferentes características comportamentais de descargas parciais nestes tipos de equipamentos, as quais foram categorizadas como:

- Circunstanciais: aparecem, mas logo desaparecem, como numa bolha que se extingue;
- Periódicas: aparecem em determinados períodos, como, por exemplo, em horários críticos de carregamento; e
- Persistentes: que aparecem por longos períodos, independentemente de criticidade.

Tabela 3 – Ensaios realizados no período de 2009 a 2014

Potência (MVA)	Tensão (kV)	Número de fases	Identificação dos Transformadores - códigos	Quantidade de análises	Classificação do Nível
32,0	138/13,8	3	T23	1	Nível 1
33,3	138/13,8	3	T13, T14, T15, T16, T17, T18, T19, T22, T24, T25	19	Nível 1
33,3	138/13,8	3	T21	2	Nível 2
33,3	138/13,8	3	T20	1	Nível 3
33,3	138/34,5	3	T26	1	Nível 1
33,3	138/34,5	3	T26	1	Nível 3
33,3	230/138/13,8	1	T1, T11	3	Nível 1
33,3	230/138/13,8	1	T2	1	Nível 3
50,0	138/69/13,8	3	T8	1	Nível 1
50,0	138/69/13,8	3	T7	1	Nível 4
50,0	230/138/13,8	1	T3, T4	2	Nível 1
50,0	230/13,8	3	T12	2	Nível 1
75,0	230/138/13,8	1	T5, T6, T9, T10	4	Nível 1

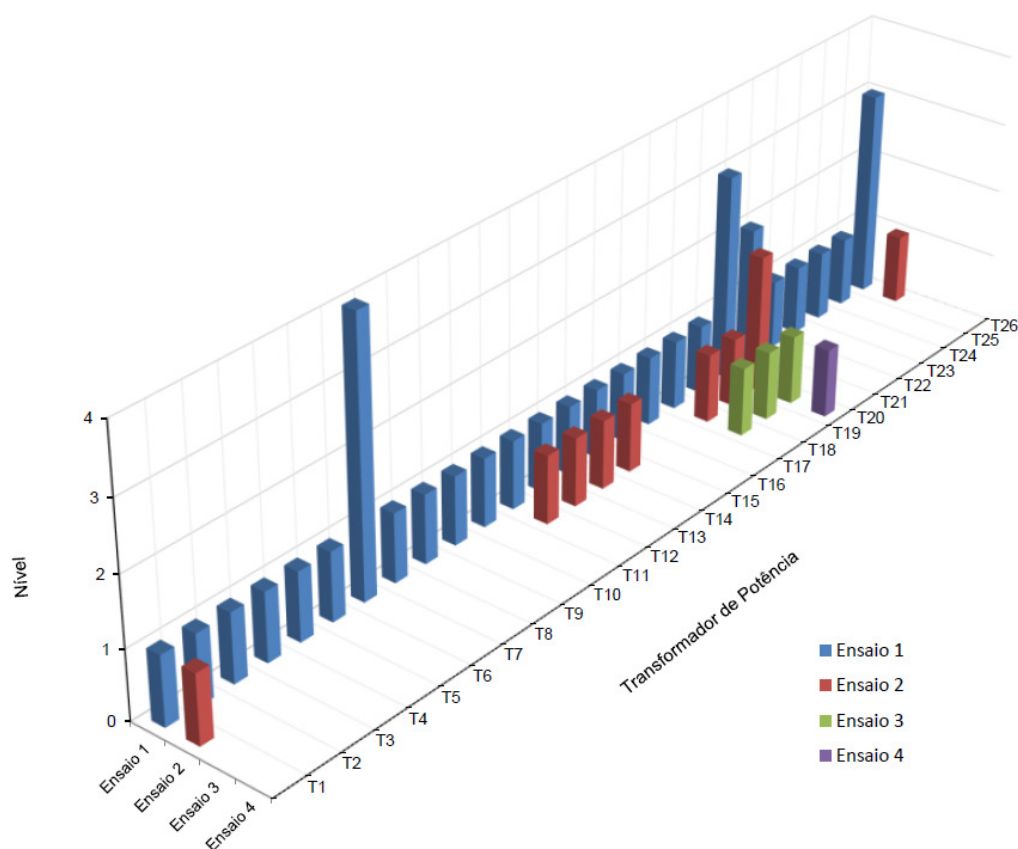


Figura 6 – Classificação dos transformadores de potência do sistema inteligente implementado.

Os resultados de um estudo de caso validando a eficiência da implementação dessa metodologia com o sistema inteligente de classificação de DPs na área de manutenção é apresentado na Figura 7, referente a quatro monitoramentos ("A, B, C e D") de detecção, realizados em períodos diferentes em um transformador de potência trifásico de 33,3 MVA e de 138 kV/13,8 kV em serviço. Observa-se que, houve uma redução de sinais de descargas parciais satisfatória, nos monitoramentos C e D, após os processos de filtragem e de tratamento do óleo isolante do equipamento (que foram realizados em consequência dessas análises).

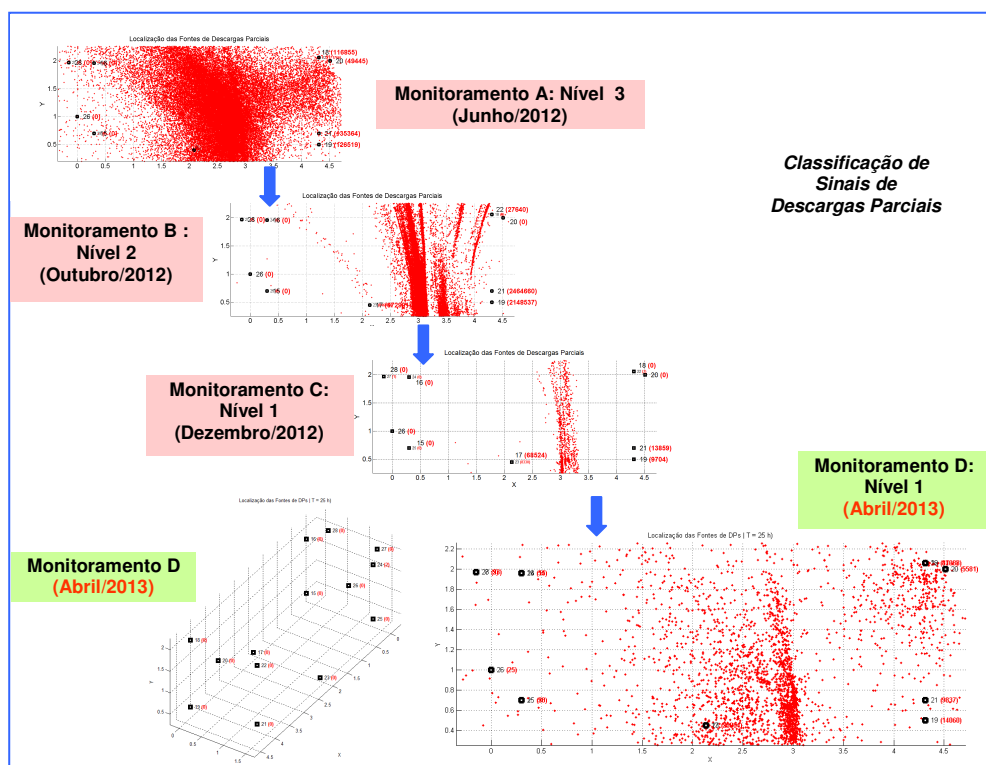


Figura 7 – Redução de sinais de descargas parciais de um estudo de caso real.

4.0 - CONCLUSÃO

Complementando as informações da Figura 7, por meio da comparação dos resultados do “monitoramento D” realizado no mês de abril de 2013 após o processo de filtragem e tratamento do óleo isolante (reparo), com as análises dos meses anteriores, verificou-se no sistema inteligente de classificação que:

- a) diminuiu a quantidade de tempo de evidências, de 36,4% para 6,6%;
- b) diminuíram os parâmetros analisados em relação a DPs, resultando na classificação de nível 1;
- b) a energia média das DPs (hits com janelamento) diminuiu muito; e
- c) apresentaram resultados satisfatórios na análise conjunta com a análise de gases dissolvidos e com os ensaios físico-químicos.

Cabe ressaltar que, atualmente, os valores estimados para aquisição destes transformadores de potência variam até quatro milhões de reais por unidade. E, quando ocorre uma falha em operação, pode-se relacionar também o acréscimo das seguintes despesas consequentes de: substituição do equipamento, lucros cessantes, possíveis multas por parte do agente regulador do sistema, indenizações por perdas e danos a consumidores, e de comprometimentos à imagem da concessionária. Sendo assim, a implementação deste sistema inteligente foi efetuada com sucesso, proporcionando contribuições significativas na área de manutenção preventiva.

Portanto, conclui-se que para a eficácia de detecção de descargas parciais por emissão acústica, torna-se necessária a padronização da análise dos resultados, por meio de uma classificação e da utilização de recursos adequados, visando a melhoria no gerenciamento da tomada de decisão sobre intervenções nestes equipamentos estratégicos do sistema elétrico.

5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) YADAIAH, N; RAVI, N. Internal fault detection techniques for power transformers. Applied Soft Computing, Vol. 11, Issue 8, 2011 Dec, pp. 5259–5269.
- (2) MARQUES, A; RIBEIRO, C. J.; AZEVEDO, C.H.B. ; SANTOS, J.A,L. ; SOUSA, F. C.; BRITO, L.C. Power transformer disruptions- a case study. In: IEEE Electrical Insulation Magazine, v. 30, p. 17-21, 2014.
- (3) CIGRÈ - Grupo de Trabalho A2.05. Guia de Manutenção para Transformadores de Potência. Brasil, nov. 2013.
- (4) SIKORSKI, W; SIODLA, K; MORANDA, H; ZIOMEK, W. Location of Partial Discharge Sources in Power Transformers Based on Advanced Auscultatory Technique. In: IEEE Transactions On Dielectrics And Electrical Insulation, 2012 Dec, Vol.19(6), pp.1948-1956.
- (5) 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.

(6) PALHARES, P. H. S. Rede Bayesiana para Estimação de Falhas Incipientes em Transformadores de Potência Utilizando Dados de Ensaios de Detecção de Descargas Parciais por Emissão Acústica. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica e de Computação) – Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2012.

(7) ROMUALDO, H. P. ; PALHARES, P. H. S. ; BRITO, L. C. ; RIBEIRO, C. J; MARQUES, A. P. ; AZEVEDO, C.H.B; SANTOS, J. A. L. Identificação, Mensuração e Localização Tridimensional de Descargas Parciais em Transformadores de Potência com base em Ensaios de Emissão Acústica. V Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos - SBSE 2014. Foz de Iguaçu, 2014.

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 EEEC/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).



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 associada na Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica de Computação (EMC) da Universidade Federal de Goiás (UFG).



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 EEEC/UFG. Atua no Setor de Engenharia de Manutenção da CELG Distribuição S.A.



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).



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.



Murillo Antonio de Souza Carvalho, nascido em Porangatu, Goiás, em 18/03/1982.

Aluno de Mestrado em Engenharia Elétrica pela Escola de Engenharia Elétrica e de Computação (EEEC) da Universidade Federal de Goiás (UFG), graduado (2004) em Internet e Redes de Computadores da Universidade Salgado de Oliveira (Universo Go) e Técnico (2000) em Eletrônica do Centro Federal de Educação Tecnológica de Goiás (CEFETGo). Atua no Setor de Tecnologia da Informação da Serviço Federal de Processamento de Dados (SERPRO/RFB).



Roberta Brandão do Nascimento, nascida em Goiânia, Goiás, em 22/08/1981.

Pós graduada em Segurança da Informação na Universidade Salgado de Oliveira (2008) e graduada (2004) em Engenharia da Computação na Universidade Católica de Goiás (UCG). Atua no Setor de Infraestrutura Computacional da CELG Distribuição S.A.