



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

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

GRUPO -XIII

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

**DESCARGAS PARCIAIS EM TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA –
DETECÇÃO E ANÁLISE POR MEIO DA TÉCNICA DE EMISSÃO ACÚSTICA**

Mauro Barbosa Trindade (*)
CEPEL

Roberto Campos de Menezes
CEPEL

RESUMO

Neste trabalho, são apresentados resultados de ensaios de Emissão Acústica realizados em transformadores de potência, no campo e em laboratório. Os ensaios consistiram de monitoramento dos sinais acústicos provenientes do interior dos transformadores, estando estes energizados. Nele são analisadas as principais características dos sinais obtidos de descargas parciais, em comparação com os de fontes mecânicas, presentes neste tipo de equipamento, em termos dos principais parâmetros de um sinal de Emissão Acústica: amplitude, energia, frequência média e taxa de ocorrência. Adicionalmente, foram incluídos os resultados de ensaios realizados, em laboratório, em um transformador de aterramento que apresentava vibração mecânica em componentes internos.

Com base nestes resultados, foram identificadas correlações entre os parâmetros de Emissão Acústica que podem contribuir na tarefa de discriminação da natureza de fontes de sinais acústicos, se elétrica ou mecânica, e possibilitar o estabelecimento de padrões de forma a identificar principalmente a ocorrência de descargas parciais em transformadores.

PALAVRAS-CHAVE

Transformadores de potência, descargas parciais, Emissão Acústica, diagnóstico, monitoramento.

1.0 - INTRODUÇÃO

Em Transformadores de Potência Isolados a Óleo, as descargas parciais são motivo de constantes preocupações, por representarem uma das maiores causas de falhas em serviço, redução de vida útil e prejuízos decorrentes de aumento de consumo e paradas para reparos. A ocorrência de descargas parciais nestes equipamentos pode provocar a destruição dos materiais dielétricos, diminuindo a sua suportabilidade elétrica, e levar à falha total do isolamento.

A menos que o defeito tenha proporções muito críticas, as descargas parciais não apresentam, em estágios ainda incipientes, características que permitam a sua localização pelos métodos de investigação normalmente utilizados em manutenções e inspeções regulares de transformadores. Estes motivos têm incentivado a busca por técnicas alternativas, de fácil aplicação e baixo custo, que além da detecção permitam a localização das descargas parciais sem a necessidade de interrupção do funcionamento do transformador.

As descargas parciais, ao ocorrerem dentro de um transformador, produzem ondas mecânicas, transientes, que se propagam através do óleo isolante e da estrutura interna do equipamento, até atingir a superfície do tanque.

O princípio básico do Ensaio de Emissão Acústica é a detecção de ondas elásticas, tais quais as geradas por descargas parciais. Estas ondas são captadas e convertidas em sinais elétricos por meio de sensores piezoelétricos, montados sobre a superfície do tanque do transformador, numa distribuição estratégica, que permite cobrir todo o seu volume. Os sinais, assim obtidos, são amplificados e transmitidos, através de cabos, a um sistema de Emissão Acústica, computadorizado, multicanal, onde são processados para identificação, quantificação e análise de suas características.

(*) Horacio de Macedo, n° 354 – sala 04 - Bloco D – CEP 21.941-911, Rio de Janeiro, RJ, – Brasil
Tel: (+55 21) 2598-6433 – Fax: (+55 21) 2598-6606 – Email: mauro@cepel.br

Descargas parciais, de uma forma geral, se manifestam como eventos acústicos de baixa magnitude. Isto, pela sua própria natureza e por, normalmente, ocorrerem em regiões dos transformadores onde a atenuação dos sinais é bastante acentuada. Este fato dificulta tanto a sua detecção quanto a sua localização e principalmente a sua identificação. Quando detectadas, as descargas parciais podem ser confundidas com outros tipos de ocorrências ou mesmo desconsideradas pelas baixas amplitudes apresentadas.

A caracterização dos sinais de Emissão Acústica (EA), com base nos seus parâmetros principais, pode permitir o estabelecimento de padrões que possibilitem a discriminação entre os sinais produzidos por fontes elétricas e mecânicas. Esta caracterização é uma necessidade fundamental para a formação do diagnóstico de transformadores avaliados pela técnica de Emissão Acústica, principalmente no que se refere à identificação da presença de descargas parciais.

2.0 - NOMENCLATURA

A seguir são apresentadas as definições dos principais parâmetros de medição utilizados neste artigo para caracterização dos sinais de Emissão Acústica.

- Amplitude – tensão de pico do sinal de Emissão Acústica, expressa em decibéis, referenciada a $1\mu\text{V}$;
- Energia – medida da área sob um envelope do sinal retificado, em coordenadas Amplitude x Tempo. Este parâmetro, da forma como é obtido, é uma medida adimensional;
- Frequência média – valor, em kHz, obtido da divisão do número de contagens pela duração do sinal de emissão acústica;
- Limite de referência – valor de amplitude, expresso em decibéis, acima do qual os sinais são detectados. Este limite é a referência fornecida ao sistema eletrônico para que este reconheça o surgimento de um sinal que deva ser considerado nas medições;
- Taxa de ocorrência – número de sinais detectados por unidade de tempo;

3.0 - ENSAIOS REALIZADOS

Ensaio 1 – Descargas parciais

Transformador subterrâneo, trifásico, Figura 1;

Potência (kVA): 500;

Classes de tensão (V): 13200 / 125;

Limite de referência utilizado (dB): 30.



FIGURA 1 – Transformador subterrâneo

O ensaio foi realizado com o transformador sendo alimentado pelo lado de baixa tensão.

Dentro do tanque, imerso no óleo, foi instalado um dispositivo, para geração de descargas parciais, constituído por um fio de cobre, capacitores limitadores de corrente e uma agulha de aço, conforme mostra a Figura 2. O fio de cobre e a agulha foram montados de forma a que houvesse um *gap* de aproximadamente 1 mm, entre eles. O dispositivo foi conectado, de um lado, ao pavio da bucha de alta tensão, permanecendo o outro lado como ponta flutuante.

Durante o ensaio, a tensão aplicada nos terminais de baixa, X_2-X_0 , foi elevada gradativamente, por meio de uma fonte variável (60 Hz), até atingir o valor de, aproximadamente, 80 V (correspondente a cerca de 8,5 kV, em H_2-H_1)

quando foi observada a ocorrência de descargas parciais (DP), no *gap* instalado. A tensão foi então mantida constante, a este nível, durante cerca de 1 minuto, sendo retirada em seguida.

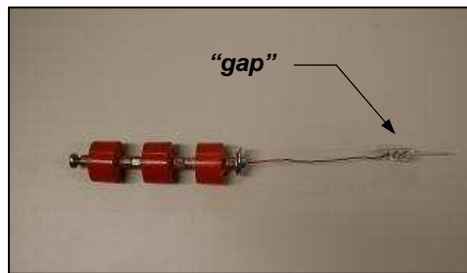


FIGURA 2 – Dispositivo gerador de DP

Na figura 3, é apresentada a localização tridimensional da fonte dos sinais de Emissão Acústica, obtida no ensaio. Esta localização corresponde à posição onde se encontrava montado o dispositivo.

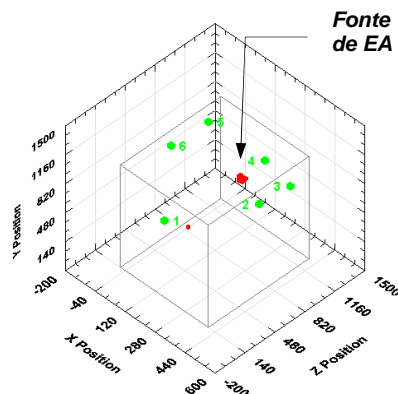


FIGURA 3 – Localização da fonte de Emissão Acústica

As distribuições das taxas de ocorrência dos sinais de Emissão Acústica, detectados pelos seis sensores de EA utilizados no ensaio, são apresentadas na Figura 4. Por ela, observa-se que os valores obtidos concentram-se em torno de 60 s^{-1} , seus múltiplos e submúltiplos, o que mostra a correspondência entre a atividade de Emissão Acústica presente, decorrente das descargas parciais, e a frequência nominal da fonte de alimentação, 60 Hz.

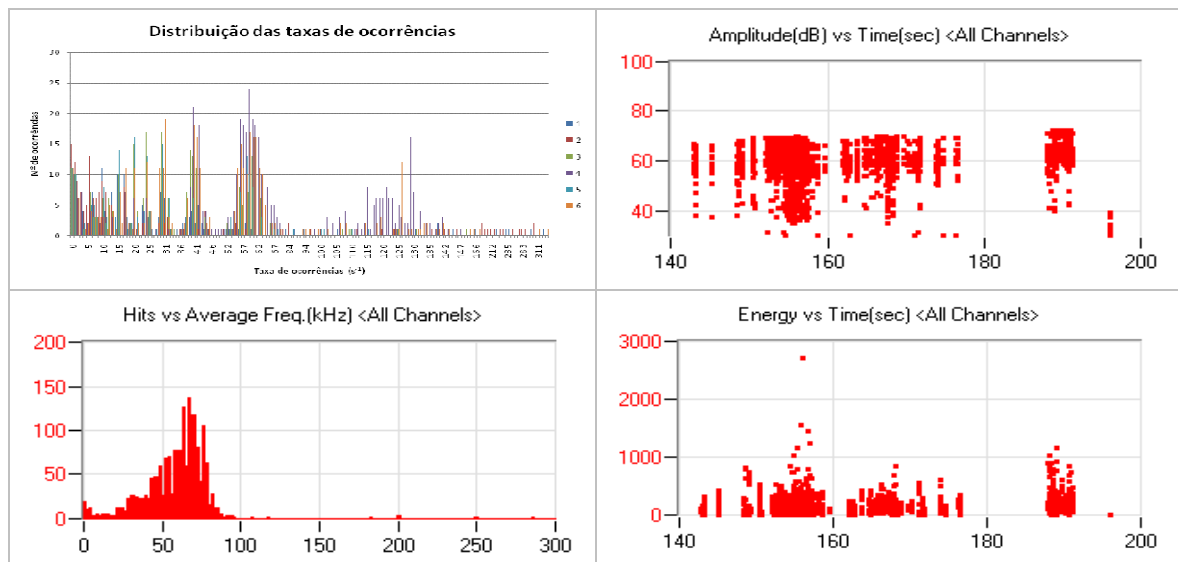


FIGURA 4 – Características dos sinais de EA

Na Figura 4, são apresentados também os resultados obtidos em termos dos principais parâmetros dos sinais de Emissão Acústica. Nela observam-se amplitudes de até 70 dB e valores elevados de Energia, que atingiram cerca

de 2700, no instante de máxima tensão aplicada, e variaram entre 500 e 1200 ao longo da elevação desta. A distribuição de frequências médias apresenta uma grande concentração de resultados entre 30 e 90 kHz, com um máximo em 66 kHz.

As reduzidas dimensões do transformador e a ausência de barreiras acústicas relevantes, no caminho da onda, entre a fonte e os sensores, proporcionando menor atenuação dos sinais, permitiram a aquisição destes com parâmetros que podem ser considerados os mais próximos das suas características originais. Contribuiu também, para este fato, o baixo limite de referência utilizado no ensaio (30 dB), o que só foi possível pela inexistência de ruídos externos e internos durante as medições.

Ensaio 2 – Descargas parciais

Transformador de teste, monofásico, Figura 5;

Potência (kVA): 1200;

Classe de tensão (kV): 600;

Limite de referência utilizado (dB): 30.

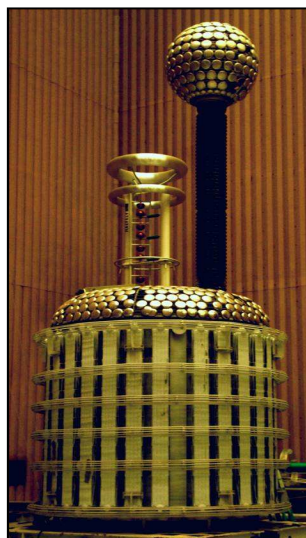


FIGURA 5 – Transformador de teste

Os ensaios consistiram de monitoramentos dos sinais de Emissão Acústica provenientes do interior do transformador, durante a sua energização. Ao longo dos ensaios, a tensão foi elevada gradativamente, chegando a atingir o valor máximo de 500 kV.

A atividade acústica mais intensa foi detectada quando a tensão atingiu valores acima de 300 kV, tornando-se mais acentuada a partir de 400 kV. Os níveis de descargas parciais (DP) presentes foram medidos pelo método eletromagnético, utilizando-se um medidor de descargas parciais, analógico, que forneceu resultados cujos maiores valores situavam-se em torno de 60 pC.

As fontes dos sinais, constituintes da atividade acústica observada, foram localizadas na região indicada na Figura 6, correspondente à base da bucha de alta tensão.

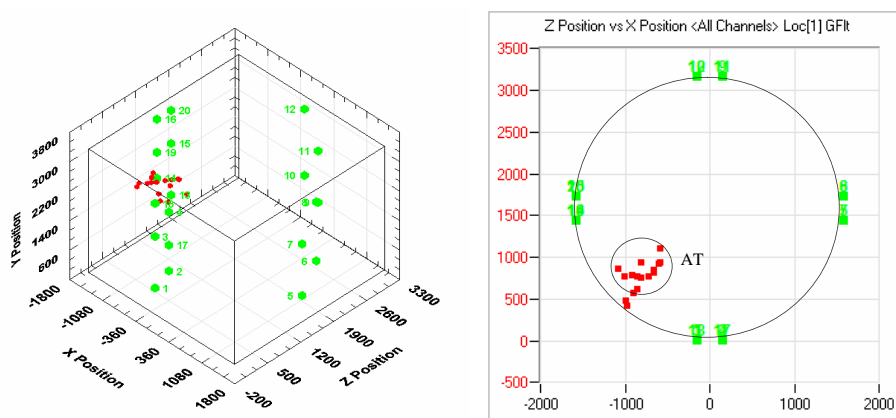


FIGURA 6 – Localização da fonte de Emissão Acústica

As distribuições das taxas de ocorrência dos sinais de Emissão Acústica, detectados pelos 20 sensores de EA utilizados no ensaio, são apresentadas na Figura 7. Observa-se que os valores obtidos concentram-se em torno de 60 s^{-1} , seus múltiplos e submúltiplos, resultado da correspondência entre a atividade de Emissão Acústica presente, decorrente das descargas parciais, e a frequência nominal da fonte de alimentação, 60 Hz.

No ensaio, foram observadas atividades acústicas: contínua e esporádica, ambas constituídas por sinais de baixa intensidade (amplitudes máximas de 55 dB e energias de até 6), Figura 7. A distribuição das frequências médias destes sinais apresenta uma maior concentração de resultados entre 33 e 150 kHz, com um máximo em 100 kHz, e outra para valores abaixo de 25 kHz, com um máximo em 12 kHz.

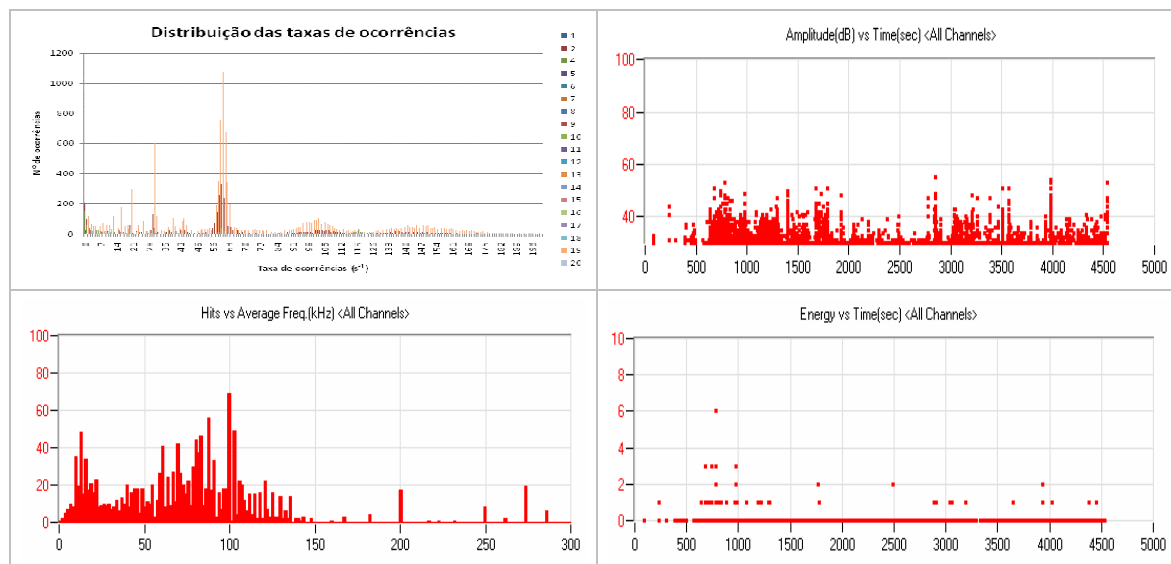


FIGURA 7 – Características dos sinais de EA

Ensaio 3 – Vibração mecânica

Transformador de aterramento, monofásico, Figura 8;

Potência (kVA): 100;

Classes de tensão (V): 69000 / 240;

Limite de referência utilizado (dB): 35.

Os ensaios consistiram de monitoramento dos sinais acústicos provenientes do interior do transformador, durante elevação gradual de tensão. A máxima tensão atingida ao longo do ensaio foi de 70 kV.

A aplicação da tensão foi feita de forma gradual, com períodos variáveis de permanência em tensões intermediárias. Para tal, foi utilizada uma fonte de 200 kV, acionada manualmente.



FIGURA 8 – Transformador aterramento

As atividades acústicas mais relevantes foram detectadas nos períodos em que a tensão aplicada atingiu valores acima de 35 kV. Para valores de tensão abaixo de 35 kV, foram detectados apenas alguns sinais esporádicos de baixas amplitudes e energias.

Na figura 9, é apresentada a localização tridimensional da fonte dos sinais de Emissão Acústica, obtida no ensaio.

A região assinalada corresponde à conexão do pavio da bucha de 69 kV com o enrolamento de AT. A atividade acústica detectada foi identificada como proveniente de vibração mecânica desta conexão.

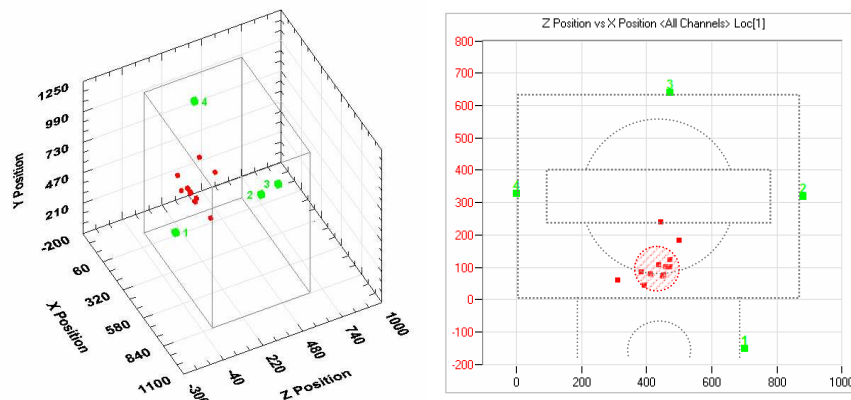


FIGURA 9 – Localização da fonte de Emissão Acústica

As distribuições das taxas de ocorrência dos sinais de Emissão Acústica, detectados pelos quatro sensores de EA utilizados no ensaio, são apresentadas na Figura 10. Observa-se que, também neste caso, os valores obtidos concentram-se em torno de 60 s^{-1} , seus múltiplos e submúltiplos, o que mostra a correspondência entre a atividade de Emissão Acústica presente, agora decorrente de vibração mecânica, e a frequência nominal da fonte de alimentação, 60 Hz.

As amplitudes dos sinais foram de até 65 dB e os valores máximos de Energia ficaram entre 50 e 80, com pico de 130, considerados baixos. A distribuição de frequências médias apresenta uma grande concentração de resultados próximos de zero, uma distribuição destes entre 3 e 67 kHz, com pico em 21 kHz, e outros valores dispersos.

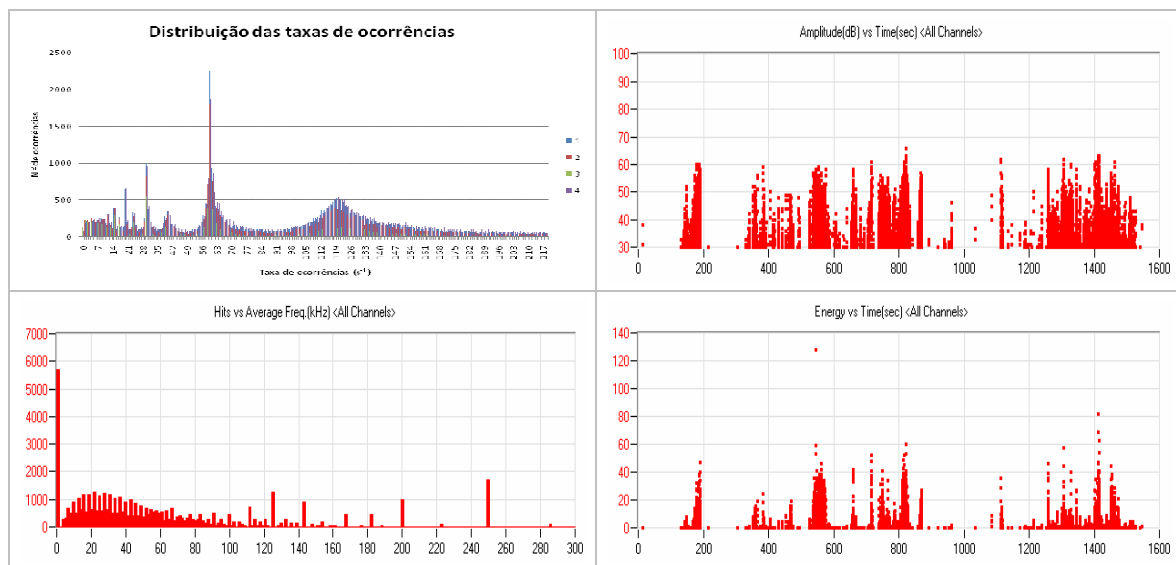


FIGURA 10 – Características dos sinais de EA

Ensaio 4 – Vibração mecânica

Transformador regulador, monofásico, Figura 11;

Potência (MVA): 200;

Classes de tensão (kV): $500/\sqrt{3} - 138/\sqrt{3} - 13,8$;

Limite de referência utilizado (dB): 40.

Os ensaios consistiram de monitoramento dos sinais acústicos provenientes do interior do transformador, com este em operação normal. Durante o período de monitoramento, os ventiladores e as bombas do sistema de circulação do óleo, permaneceram ligados.

As causas mais frequentes das atividades acústicas contínuas observadas no ensaio foram os ruídos produzidos pelas bombas e ventiladores e os decorrentes da magnetoestricção do núcleo. O fato de todos os ventiladores e bombas estarem em funcionamento, no período analisado, influenciou na localização das fontes dos sinais,

gerando uma grande quantidade de pontos dispersos que, na maioria dos casos, eram falsas localizações. A Figura 12 mostra alguns destes pontos.



FIGURA 11 – Transformador regulador

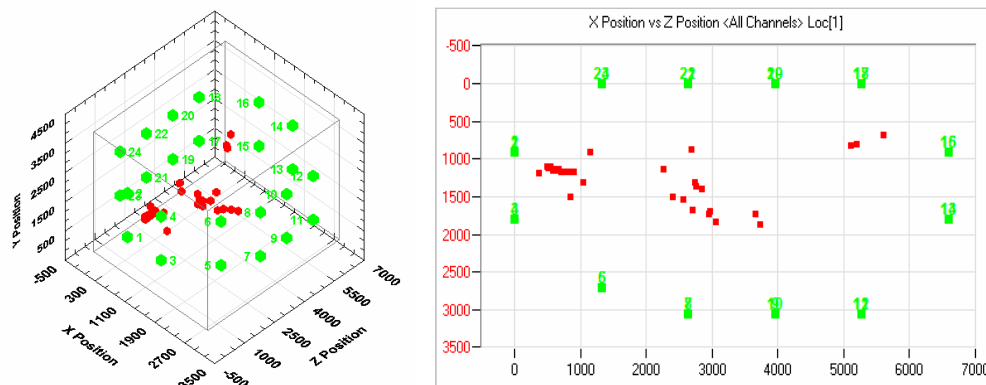


FIGURA 12 – Localização da fonte de Emissão Acústica

As distribuições das taxas de ocorrência dos sinais de Emissão Acústica, detectados pelos 24 sensores de EA utilizados no ensaio, são apresentadas na Figura 13.

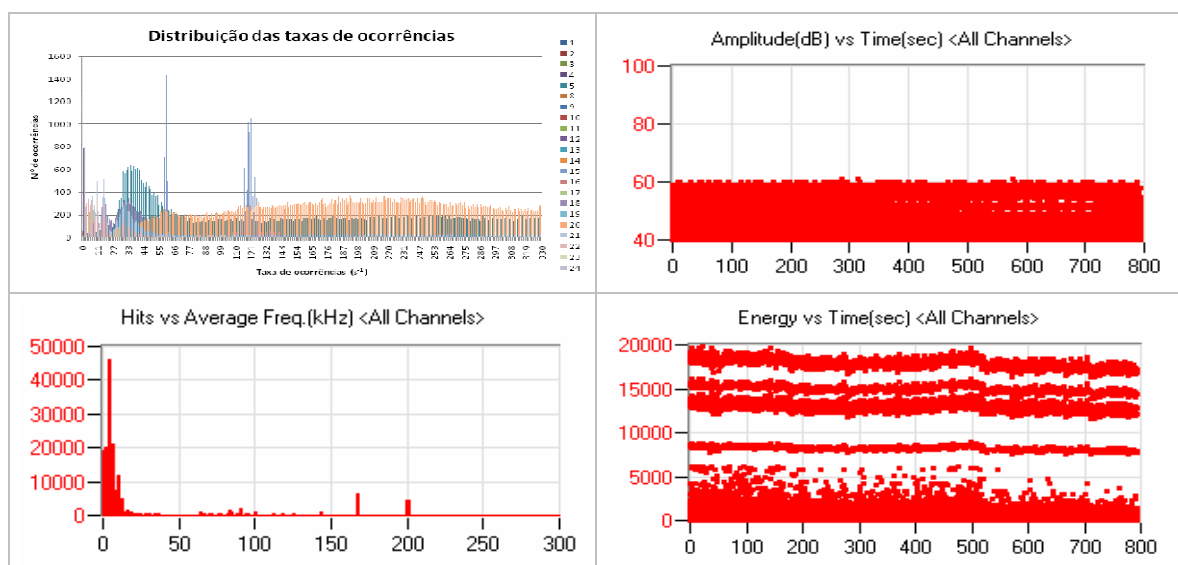


FIGURA 13 – Características dos sinais de EA

Nela observa-se a presença de pelo menos dois tipos diferentes de mecanismos causadores das atividades acústicas observadas:

- Um cujas taxas de ocorrência, em torno de 60 s^{-1} , seus múltiplos e submúltiplos, correspondem à frequência nominal do transformador, 60 Hz - magnetoestricção do núcleo;
- Outro cujas taxas de ocorrência apresentam-se com grande dispersão ou concentradas em valores baixos – funcionamento de bombas e ventiladores.

As amplitudes dos sinais detectados foram de até 60 dB. As energias apresentaram grandes diferenças, dependendo do mecanismo causador da atividade, chegando a atingir valores próximos a 20000, porém, apesar destas diferenças, o comportamento dos resultados mostrou-se bastante regular ao longo do ensaio. A distribuição de frequências médias mostra uma grande concentração de valores abaixo de 15 kHz.

4.0 - COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES

As distribuições das taxas de ocorrência possibilitam, em uma primeira análise, classificar as atividades acústicas presentes nos transformadores em: atividades cuja frequência está relacionada à frequência nominal do equipamento (descargas parciais, vibrações mecânicas em enrolamentos e magnetoestricção) e atividades de baixa frequência ou frequências dispersas (vibrações mecânicas de outros componentes e peças).

Dentre as correlações entre os parâmetros utilizados na caracterização dos sinais de Emissão Acústica, verifica-se que as distribuições das frequências médias, devido à correspondência destas últimas com as frequências dos sinais na sua origem, em conjunto com as taxas de ocorrência, costumam ser aquelas que mais contribuem na discriminação da natureza da fonte (mecânica ou elétrica) presente no equipamento. Já os valores individuais de Amplitude e Energia, medidos ao longo do tempo, têm importância maior na identificação da presença, no equipamento, de atividade acústica anormal, cuja relevância deve ser investigada.

As atenuações dos sinais, devidas à presença de barreiras no percurso destes até o sensor, e os limites de referência utilizados nas medições influenciam nos valores dos parâmetros obtidos, devendo ser levados em consideração nas análises dos resultados.

Os resultados dos ensaios realizados mostram a grande contribuição da técnica de Emissão Acústica para a localização de defeitos em transformadores. Dentre os casos apresentados, apenas no dos sinais produzidos pela operação de ventiladores e bombas, a localização das fontes foi dificultada, o que exigiu o desligamento destes equipamentos, por um intervalo de tempo, de forma a permitir a execução do ensaio.

5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) TRINDADE, M. B., MARTINS, H. J. A. Partial Discharge Detection in Power Transformers Using Acoustic Emission Technique, XVth International Symposium on High Voltage Engineering – ISH/2007, Ljubljana, Slovenia, August 27-31, 2007.
- (2) TRINDADE, M. B., MARTINS, H. J. A., MENEZES R. C. Identificação de Defeitos Elétricos e Mecânicos em Transformadores e Reatores de Potência por Emissão Acústica, V Workspot - International Workshop on Power Transformers, Belém, Pará, Brasil, 15-18 de abril de 2008.
- (3) TRINDADE, M. B., MENEZES R. C. Diagnóstico de Transformadores de Potência Utilizando a Técnica de Emissão Acústica, XXI SNPTEE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Florianópolis, Santa Catarina, Brasil, 23-26 de outubro de 2011.

6.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

Mauro Barbosa Trindade - Nascido no Rio de Janeiro - RJ, em 23 de Junho de 1954. Graduado em Engenharia Metalúrgica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1977, onde também obteve o grau de Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, 1981. Sua experiência profissional inclui a Light S.E.S.A., a Comissão Nacional de Energia Nuclear, a Nuclebrás S.A. e a Companhia Brasileira de Projetos Industriais. Desde 2001, atuando como Pesquisador no Departamento de Linhas e Estações – DLE, do CEPEL, onde desenvolve pesquisas voltadas a técnicas aplicadas ao diagnóstico de equipamentos do setor elétrico. É autor de diversos trabalhos, nacionais e internacionais, sobre a Técnica de Emissão Acústica. Suas áreas de interesse especial incluem a Técnica de Emissão Acústica.

Roberto Campos de Menezes – Nascido no Rio de Janeiro – RJ, em 07 de Junho de 1962. Técnico em Eletrotécnica em 1982 e em Telecomunicações em 1986 pelo Cefet-RJ “CSF”, no Rio de Janeiro. Sua experiência profissional no Cepel inclui os laboratórios de Média Potência, Medições de Campo Elétrico e Magnético em Linhas e Subestações, e desde 1998, no Departamento de Linhas e Estações - DLE como Técnico dando apoio ao desenvolvimento de pesquisas em laboratório e no campo. Suas áreas de interesse especial incluem a Técnica de Emissão Acústica.