



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

CB/GTM/20

22 a 25 de outubro de 2017
Curitiba - PR

GRUPO -XIII

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

**MONITORAMENTO DE COMUTADORES DE DERIVAÇÕES SOB CARGA, UTILIZANDO A TÉCNICA DE
EMIÇÃO ACÚSTICA**

Mauro Barbosa Trindade *
CEPEL

Helvio J. A. Martins
CEPEL

Roberto C. de Menezes
CEPEL

RESUMO

Neste artigo, são apresentados resultados de ensaios de Emissão Acústica realizados, em um comutador de derivações sob carga.

Nele são apresentadas as assinaturas obtidas de comutações realizadas com o equipamento em operação no campo, bem como os resultados das análises feitas nestas assinaturas quanto à repetibilidade e à capacidade de identificar os eventos envolvidos na comutação.

Este trabalho é parte do desenvolvimento de uma metodologia de ensaios que, com a utilização da técnica de Emissão Acústica, possibilite a verificação das condições e o diagnóstico de comutadores de derivações sob carga, que vem sendo realizado, pelo CEPEL.

PALAVRAS-CHAVE

Comutador, Emissão Acústica, Monitoramento, Diagnóstico, Transformador

1.0 - INTRODUÇÃO

Comutadores de derivações sob carga (CDC) são equipamentos utilizados para alterar as relações de tensões de um transformador, através de mudanças das ligações de derivações de um enrolamento, sendo adequado para operação com o transformador energizado, em carga.

Os comportamentos elétrico e mecânico destes equipamentos seguem padrões bem definidos. Característica esta que decorre da necessidade de os eventos envolvidos nas comutações se processarem com alta precisão e sincronismo, de forma a evitar riscos à integridade dos transformadores em que estiverem instalados.

Por se tratarem de dispositivos de chaveamento mecânico e automático, os CDC são componentes caros e vulneráveis. Geralmente, as falhas neles ocorridas são elétricas, mecânicas e térmicas, sendo, predominantes, as falhas mecânicas, com maior incidência nos mecanismos de contato (1). Na maioria das vezes, são estas falhas mecânicas que produzem falhas elétricas, com consequências catastróficas.

Os fatores que mais contribuem para falhas em CDC são, principalmente: envelhecimento e desgaste de componentes, condições hostis de operação e projeto e manutenção inadequados.

Atualmente, encontram-se em operação diferentes modelos de CDC, que variam de acordo com o fabricante e a aplicação a que se destinam. Eles podem ser projetados como uma unidade única, para aplicações monofásicas e trifásicas, ou, no caso destas últimas, dependendo da capacidade nominal exigida, uma unidade para cada fase.

Em geral, os intervalos de tempo, dentro dos quais se processam os principais eventos envolvidos em uma operação normal de comutação (seleção de derivações e comutação), são muito reduzidos. Uma técnica de monitoramento, para ser utilizada de forma eficaz como ferramenta no diagnóstico de CDC, deve apresentar sensibilidade suficiente para detectar, de forma clara, a ocorrência destes eventos, discriminando-os e quantificando suas intensidades, dentro dos curtos intervalos de tempo em que se processam (da ordem de

milissegundos). O fato de os CDC serem equipamentos cujo funcionamento envolve operações repetitivas e de precisão favorece a obtenção de assinaturas que podem ser utilizadas na diferenciação entre os estados de operação normal e aqueles em que haja a presença de defeitos.

Emissão acústica é uma técnica de Ensaios Não Destrutivos, não invasiva, de grande utilidade na detecção de defeitos ativos internos em materiais e equipamentos, largamente empregada em diversas áreas tecnológicas (3, 4). Estudos anteriores já indicaram a sua adequação como ferramenta para auxiliar no diagnóstico de CDC (5, 6).

Sinais acústicos, gerados no interior de equipamentos em operação ou quando submetidos a esforços programados, trazem consigo informações importantes relacionadas à integridade destes. Estes sinais, geralmente associados à presença de defeitos ou a características próprias do funcionamento dos equipamentos e de seus componentes, podem ser captados externamente, com a utilização de sensores acústicos, e analisados com base na variação de parâmetros tais como: amplitude, energia, contagens, duração e frequência média. Até o momento, estudos têm revelado que, dentre as diversas relações entre estes parâmetros, as curvas de energia acumulada ao longo do tempo de comutação se constituem nas assinaturas acústicas que melhor retratam o comportamento dos CDC durante as comutações (5).

A energia, informada pelo sistema de medições utilizado nos ensaios, corresponde à medida da área sob o envelope do sinal retificado, nas coordenadas de amplitude x tempo (4). Este parâmetro, pela forma como é medido, constitui-se em uma medida adimensional, sendo indicado apenas como unidades de energia (UE).

2.0 - PROCEDIMENTOS

2.1 Características do equipamento

O comutador de derivações sob carga, objeto deste artigo, é do tipo chave comutadora, com disponibilidade para 33 derivações, montada em compartimento próprio, externamente ao tanque do transformador e constituída, basicamente, por: um seletor de derivações, um pré-seletor, um interruptor a vácuo e chaves by-pass. A limitação da corrente circulante, durante o processo de comutação se dá por meio de um reator de transição conectado ao circuito.

O acionamento automático é feito através de uma haste de acionamento, acoplada a um motor elétrico. O motor, a haste de acionamento, as engrenagens, cames e outros dispositivos de transmissão constituem o mecanismo de acionamento, que se encontra montado em compartimento separado, localizado abaixo do comutador.

Este comutador é parte constituinte de um autotransformador, monofásico, de 45 MVA de potência e classes de tensão $330/\sqrt{3}$ - $138/\sqrt{3}$ - 13.8 kV.

2.2 Características de operação

O entendimento e a análise das assinaturas obtidas das comutações efetuadas dependem, fundamentalmente do conhecimento da sequência de eventos envolvidos na transição entre derivações. Neste modelo de comutador, os principais eventos envolvidos em um ciclo de comutação são, na ordem:

- Operação dos mecanismos de acionamento (motor, hastes de transmissão, engrenagens, etc.);
- Abertura de um conjunto de contatos das chaves by-pass, enquanto o outro permanece fechado;
- Abertura dos contatos do interruptor a vácuo;
- Movimentação de um dos contatos do seletor de derivações para a nova posição;
- Fechamento dos contatos do interruptor a vácuo;
- Fechamento do conjunto de contatos da chave by-pass.

Nesta condição, o comutador se encontra na posição de meio-ciclo, na qual o reator permanece operando, limitando a corrente circulante que flui entre as derivações conectadas. Esta posição também é utilizada como posição normal de operação juntamente com a posição de ciclo completo. Para atingir a posição de ciclo completo, a mesma sequência de eventos é repetida, apenas com a mudança da chave by-pass e do contato do seletor de derivações que são acionados.

As derivações pares correspondem às posições de meio-ciclo enquanto que as derivações ímpares correspondem às posições de ciclo completo.

Em geral, o tempo decorrido na passagem de uma posição de ciclo completo para outra de meio-ciclo é de aproximadamente 1,5 segundo.

Em determinadas comutações, ocorre também o acionamento do pré-seletor, que introduz ou retira do circuito seções do enrolamento de regulação do transformador, de forma a ampliar a faixa disponível.

A Figura 1 mostra a sequência de eventos envolvidos na transição entre derivações, para este modelo de comutador.

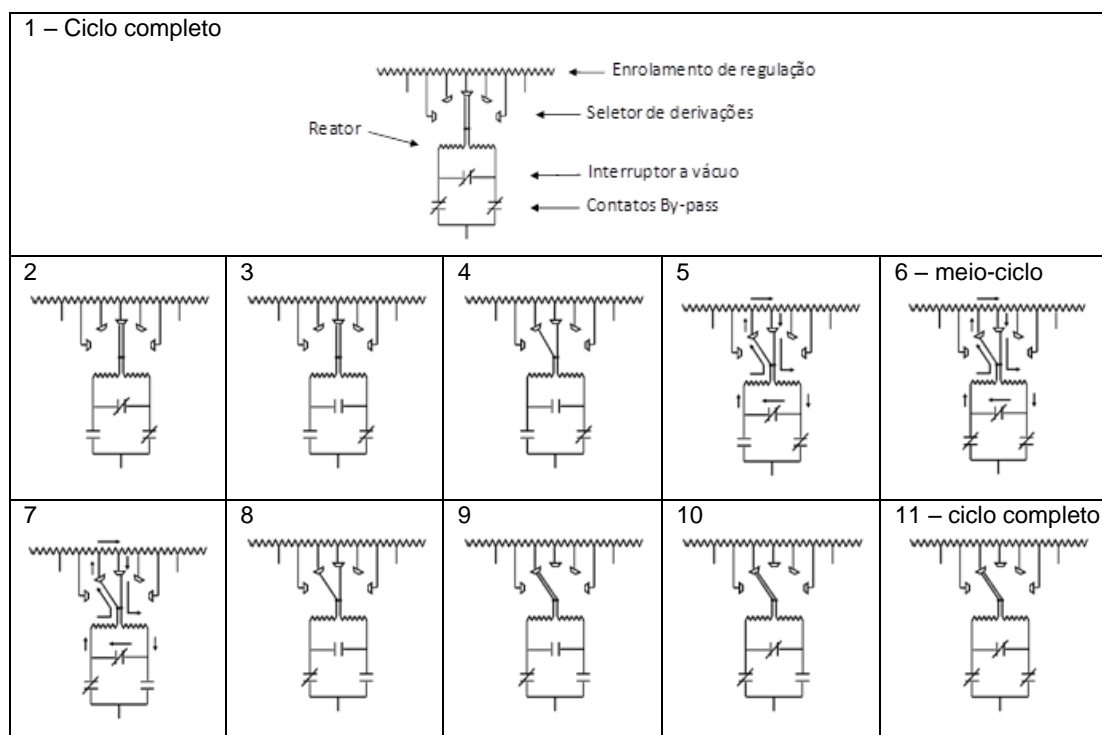


FIGURA 1 – Transição entre derivações – sequência de eventos

2.3 Ensaios realizados

Os ensaios consistiram de monitoramento dos sinais acústicos provenientes do interior do comutador, durante comutações realizadas no campo, com o equipamento em operação normal.

A quantidade de comutações foi de 16, correspondendo a duas sequências (ciclos) constituídas de: uma elevação, a partir da derivação 27, até duas posições acima, posição 29, uma descida até duas posições abaixo da inicial, posição 25, e outra subida, para retorno à posição 27.

Para os ensaios, foram utilizados quatro sensores, sendo: três (sensores 2, 3 e 4) fixados na face externa, do lado direito do compartimento do comutador, e um (sensor 1) na face inferior deste, no interior do compartimento do mecanismo de acionamento, Figura 2. A utilização desta quantidade de sensores teve como objetivo a verificação de diferenças nas assinaturas acústicas provocadas por mudanças na posição do sensor.

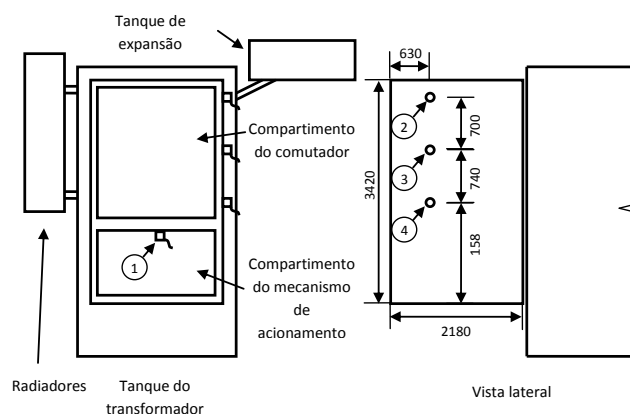


FIGURA 2 – Distribuição dos sensores

3.0 - RESULTADOS

3.1 Assinaturas acústicas

As curvas apresentadas, na Figura 3, mostram a variação dos valores de energia acumulada (E_{ac}) dos sinais detectados, pelo sensor 3, ao longo do período correspondente a uma comutação, para cada comutação realizada na 1ª e na 2ª sequências (ciclos). Estas curvas se constituem nas assinaturas acústicas do comutador.

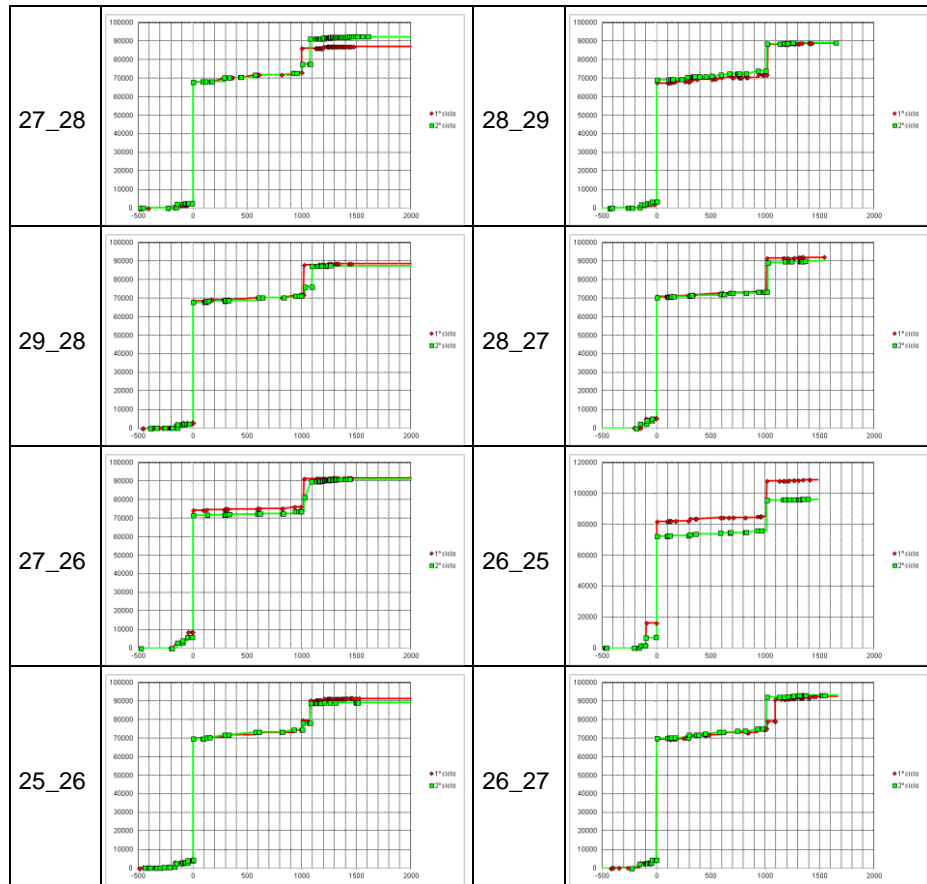


FIGURA 3 – Assinaturas acústicas – Eac x tempo – Sensor 3

Nelas os pontos assinalados correspondem aos eventos envolvidos nas comutações. A interligação destes pontos, utilizada na construção das curvas, serve apenas para melhor visualização da evolução dos valores de energia acumulada, uma vez que os eventos são discretos.

Os tempos nas figuras são apresentados em milissegundos e a origem adotada para as medições destes é o instante da ocorrência do evento de maior energia. Por este motivo, alguns tempos aparecem indicados com valores negativos.

Nas curvas, fica evidenciada a presença de dois eventos de alta energia, o primeiro deles com energia bem mais elevada que o segundo. Estes eventos, praticamente, determinam os níveis de energia acumulada total obtida ao final do processo e delimitam três estágios da comutação (degraus nas curvas). São também observados eventos de mais baixa energia, alguns destes comuns a todas as comutações e, da mesma forma que os de alta energia, ocorrendo sempre nos mesmos intervalos de tempo.

As principais características observadas nas curvas, obtidas pelos quatro sensores utilizados, são:

- A semelhança no formato, independente do sensor e da comutação efetuada;
- A semelhança nos tempos de ocorrência dos eventos indicados pelos pontos comuns das curvas;
- A repetibilidade dos valores das energias acumuladas, em cada estágio do processo de comutação, observada tanto entre diferentes comutações monitoradas por um mesmo sensor, quanto e principalmente entre comutações iguais realizadas na 1ª e na 2ª sequências;
- As diferenças nos valores de energia acumulada obtidos dos sinais detectados por cada sensor. Apesar de bem aproximados, os valores obtidos através do sensor 2 foram mais elevados que os dos sensores 3 e 4. Estes resultados indicam uma maior proximidade entre a posição ocupada pelo sensor 2 e os mecanismos responsáveis pelos eventos de mais alta energia. Já os valores obtidos do sensor 1 foram bem mais baixos que os demais.
- Algumas comutações apresentam quantidades consideráveis de sinais não detectados nas demais, que não são devidos à operação do reator, e que se repetem nas sequências realizadas. Este comportamento é indicativo de alterações nos mecanismos envolvidos nos estágios em que estes sinais são observados. Contatos desgastados e anomalias na operação dos mecanismos de acionamento são as principais causas a serem investigadas nestes casos.

Na Figura 4, é apresentada a assinatura acústica referente à comutação 27-26, da forma como foi detectada pelo sensor 2 na primeira sequência de comutações. Nela estão assinalados os pontos que são comuns a todas as outras comutações e que, a princípio, estariam relacionados aos eventos envolvidos na operação normal do comutador.

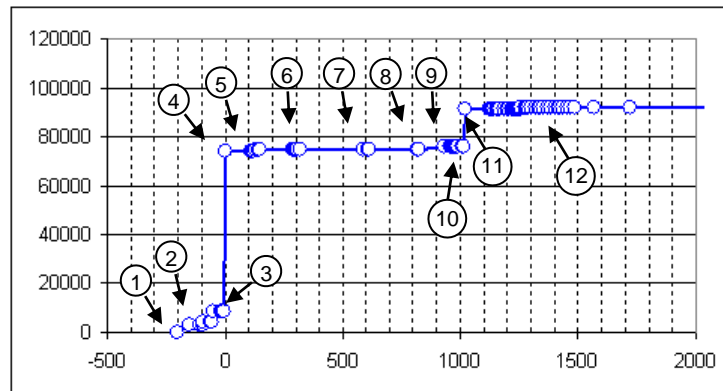


FIGURA 4 – Assinatura acústica – Comutação 27-26

As maiores concentrações de sinais observadas no início das comutações para derivações ímpares e principalmente ao final das comutações para derivações pares se devem à atividade acústica produzida pela operação do reator. Esta atividade se mantém ao longo de todo intervalo de tempo em que o comutador permanece conectado nas derivações pares (posições de meio-ciclo), Figura 4.

A Figura 5 mostra as assinaturas relativas à comutação 25-26, da 1ª sequência, levando em conta todo o intervalo de tempo decorrido desde o início desta comutação até o início da comutação seguinte. Nela observa-se que o sensor 3 foi aquele que detectou a maior quantidade de sinais acústicos decorrentes da operação do reator. Nota-se ainda que, apesar de intensa, esta atividade é constituída por sinais de baixa energia, o que é consequência da atenuação provocada pela distância do reator aos sensores e por barreiras acústicas interpostas no caminho de propagação da onda acústica.

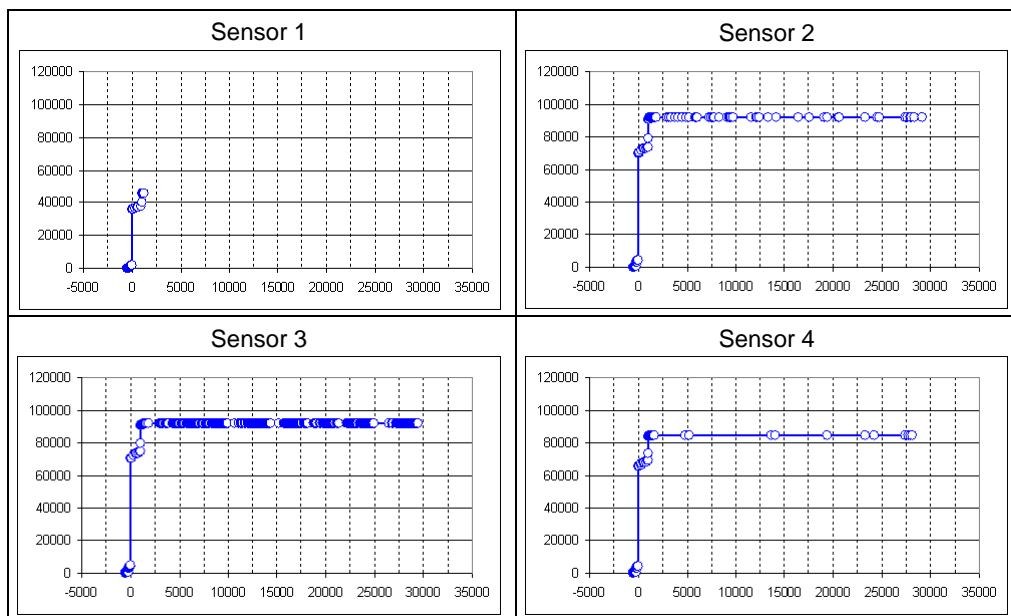


FIGURA 5 – Assinatura acústica – Comutação 25-26

3.2 Energia acumulada total

Os valores de energia acumulada total (E_{act}), obtidos dos sinais detectados de cada sensor, ao final de cada comutação, na 1ª e na 2ª (Rep) sequências de comutações realizadas, são apresentados na Figura 6.

É grande a semelhança entre os valores obtidos através dos sensores 2, 3 e 4, mesmo estando estes montados em posições diferentes na superfície externa do compartimento do comutador. Esta semelhança é maior entre os sensores 2 e 3. Apenas o sensor 1 apresentou resultados bem inferiores aos demais. Entretanto, independentemente dos valores, o comportamento das curvas obtidas é o mesmo.

Valores de Eact praticamente idênticos foram obtidos nas duas sequências de comutações, apesar destas corresponderem a momentos distintos dos ensaios.

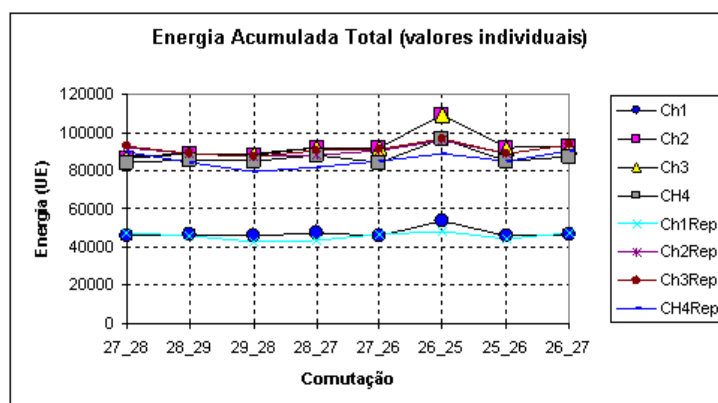


FIGURA 6 – Energia acumulada total – valores individuais

Dentre as comutações realizadas, apenas a 26-25, na 1ª sequência, apresentou valores de Eact que se diferenciam de forma mais acentuada daqueles obtidos nas demais comutações, inclusive na mesma comutação quando realizada na 2ª sequência, Figura 7.

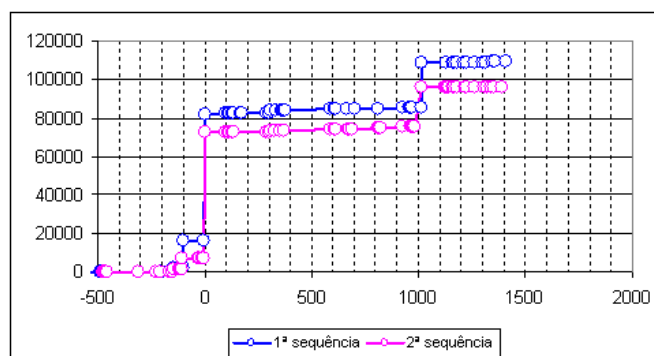


FIGURA 7 – Assinaturas acústicas – Comutação 26-25 – 1ª e 2ª sequências – Sensor 2

Quando analisada a curva de Eac x tempo desta comutação nota-se que a divergência de comportamento se dá no primeiro evento, anterior ao de maior energia, e no segundo evento de maior energia. Nestes dois casos, os valores de energia foram superiores aos das demais comutações, o que provocou as diferenças observadas.

3.3 Coeficiente de variação percentual

Para avaliação da repetibilidade dos resultados, foram calculados coeficientes de variação percentual, CV%. Os valores obtidos são apresentados na Figura 8.

A seguinte fórmula foi utilizada para o cálculo do coeficiente de variação percentual: $CV\% = (s / \bar{X}) * 100$ onde s é o desvio padrão e \bar{X} a média dos valores de Eact.

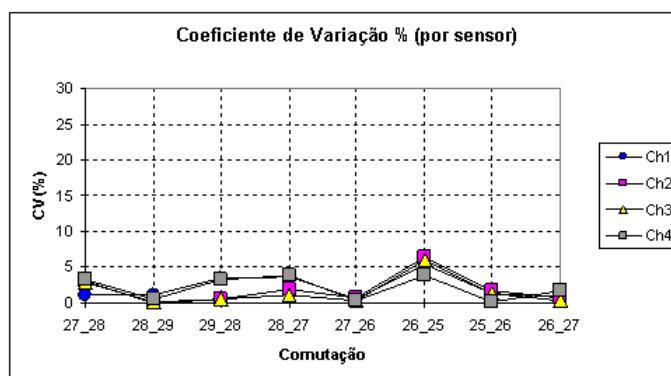


FIGURA 8 – Coeficientes de variação percentual

Os valores obtidos ficaram abaixo de 5%, à exceção do calculado a partir dos resultados da comutação 26-25, que excedeu este limite, atingindo 6,4%. Estes baixos valores refletem a semelhança dos resultados obtidos e são uma boa indicação da repetibilidade destes.

4.0 - COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES

A técnica de emissão acústica apresenta capacidade de identificar a ocorrência dos eventos envolvidos nos processos de comutação, possibilitando a avaliação das intensidades com que estes se manifestam e dos tempos em que ocorrem.

A metodologia desenvolvida pelo CEPEL para obtenção de assinaturas acústicas é não invasiva e de fácil aplicação, podendo ser empregada mesmo com o equipamento, energizado, em operação normal.

Comutadores de derivações sob carga são equipamentos cujo funcionamento envolve operações repetitivas e de precisão. Esta característica favorece o estabelecimento de assinaturas acústicas.

A partir dos resultados obtidos, verifica-se que:

- As assinaturas acústicas apresentaram formatos semelhantes em todas as comutações efetuadas;
- Os tempos de ocorrência dos eventos comuns a todas as comutações foram semelhantes;
- Apesar das diferenças entre assinaturas obtidas de sensores, em posições diferentes, não terem sido significativas, é importante que, nas análises de resultados de ensaios de emissão acústica, as comparações sejam feitas sempre entre valores obtidos de uma mesma posição;
- Sinais que não se repetem nas assinaturas acústicas e não são decorrentes da operação do reator podem indicar alterações nos mecanismos responsáveis pela operação do equipamento;
- Os valores dos coeficientes de variação percentual, dos resultados obtidos, podem orientar a investigação das causas de comportamentos divergentes, das assinaturas;
- Baixos valores dos CV% refletem a semelhança dos resultados obtidos e são uma boa indicação da repetibilidade destes.

Uma identificação precisa dos eventos relacionados a cada estágio das comutações, observado nas assinaturas acústicas, poderá ser conseguida a partir do conhecimento dos intervalos de tempo em que eles se processam. Estas informações devem ser obtidas dos dados de projeto do equipamento.

5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) KANG, P., BIRTWHISTLE, D., DALEY, J., MCCULLOCH, D. Non-invasive On-line Condition Monitoring of On Load Tap Changers, Proceedings of IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, Singapore 2000.
- (2) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Comutador de Derivações em Carga - NBR 8667, Brasil.
- (3) AMERICAN SOCIETY FOR NONDESTRUCTIVE TESTING. Acoustic Emission Testing, Nondestructive Testing Handbook, Vol. 5, 2ª Ed.
- (4) POLLOCK, A. A. Acoustic Emission Inspection, Metals Handbook, 9ª Ed., Vol. 17, American Society for Metals.
- (5) TRINDADE, M. B., MARTINS, H. J. A., CADILHE, A.F., MOREIRA, J.A.C. On-Load Tap-Changer Diagnosis Based on Acoustic Emission Technique, XIVth International Symposium on High Voltage Engineering – ISH/2005, Tsinghua University, Beijing, China, August 25-29, 2005.
- (6) TRINDADE, M. B., MARTINS, H. J. A. Avaliação de Comutadores de Derivações Sob Carga a Partir da Obtenção e Análise de Assinaturas Acústicas, XX Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica - XX SNTPEE, Recife, Pernambuco, Brasil, 22-25 de Novembro de 2009.

6.0 - REFERÊNCIAS BIOGRÁFICAS



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 e membro da Comissão Técnica de Inspeção de Transformadores de Potência e Reatores da Associação Brasileira de Ensaios Não Destrutivos – ABENDI. 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 Campos Elétrico e Magnético CA/CC em Linhas e Subestações, e desde 1998, no Departamento de Linhas e Estações - DLE como Técnico, dando apoio no desenvolvimento de pesquisas no laboratório e no campo. Foi membro da Comissão

Técnica de Inspeção de Transformadores de Potência e Reatores da Associação Brasileira de Ensaio Não Destrutivos – ABENDI. Suas áreas de interesse especial incluem a Técnica de Emissão Acústica, e Medição de Descargas Parciais pelo Método Eletromagnético em equipamentos de alta tensão no campo.

Helvio Jailson Azevedo Martins - Nascido em Nova Friburgo - RJ, em 11 de Julho de 1955. Graduado em Engenharia Elétrica (sistemas de potência) pela UFRJ, 1979, onde também obteve o grau de Mestrado em Engenharia Elétrica (Alta Tensão), 1987; e Doutorado em Engenharia Elétrica em 2007, desenvolvendo tese sobre monitoramento de deslocamentos geométricos de enrolamentos de transformadores de potência utilizando a resposta em frequência associada a algoritmos de inteligência artificial.

Sua experiência profissional inclui a ex-PTEL-Projetos e Estudos de Engenharia, onde participou de estudos de planejamento da interligação do sistema elétrico brasileiro e projetos de subestações. No CEPEL desde 1985, atua no desenvolvimento de técnicas de ensaios aplicadas na avaliação de equipamentos elétricos de AT. Atualmente desenvolve pesquisas relacionadas a métodos e técnicas para monitoramento, avaliação e diagnóstico de equipamentos elétricos. É autor de diversos trabalhos, nacionais e internacionais, participando ativamente de alguns grupos de trabalho do Cigré.