



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

Versão 1.0  
XXX.YY  
22 a 25 Novembro de 2009  
Recife - PE

## **GRUPO -XIII**

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

#### **AValiação de Comutadores de Derivações sob Carga a Partir da Obtenção e Análise de Assinaturas Acústicas**

**Mauro Barbosa Trindade \***  
**CEPEL**

**Helvio J. A. Martins**  
**CEPEL**

## **RESUMO**

Neste trabalho, são apresentadas assinaturas obtidas, com o uso da técnica de emissão acústica, de comutações realizadas em comutadores de derivações sob carga (CDC), de diferentes modelos e fabricantes, em operação normal, no campo. São apresentados também resultados das análises feitas nestas assinaturas quanto à: repetibilidade, capacidade de identificar os eventos envolvidos na comutação e aplicabilidade nos diferentes modelos de CDC existentes.

O objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de uma metodologia de ensaios adequada que, com a utilização da técnica de emissão acústica, possibilite a verificação das condições e o diagnóstico de comutadores de derivações sob carga.

## **PALAVRAS-CHAVE**

Comutador, Emissão Acústica, Monitoramento, Diagnóstico, Transformador

### **1.0 - INTRODUÇÃO**

Comutadores de derivações sob carga são equipamentos cujos comportamentos elétrico e mecânico seguem padrões bem definidos. Esta característica 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, os CDC são componentes caros e vulneráveis. Neles, as falhas são predominantemente de origem mecânica, com maior incidência nos mecanismos de contato (1). Na maioria das vezes, são estas falhas mecânicas que produzem falhas elétricas, com consequências catastróficas.

Após terem sido identificados como os responsáveis por mais de 40% das falhas ocorridas em transformadores de subestações (2), os CDC passaram a ser objeto de diversos estudos direcionados tanto ao seu desenvolvimento quanto ao de técnicas de monitoramento eficazes que propiciassem um aumento na sua confiabilidade.

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. De um modo geral, os diferentes modelos de CDC se enquadram em dois tipos básicos:

- Chave comutadora – construída em duas seções separadas: a chave desviadora montada em compartimento próprio, isolado, e o seletor de derivações que, geralmente, compartilha o óleo com o transformador;
- Chave seletora – combina as funções da chave desviadora e do seletor de derivações em uma única chave. A seleção das derivações e a comutação se processam, simultaneamente, utilizando o mesmo conjunto de contatos móveis.

Além do tipo, outras características diferenciam os modelos de CDC:

- Meio onde ocorre a interrupção do arco: óleo (tecnologia convencional) ou vácuo;
- Montagem no transformador: internamente ao tanque ou externamente, em compartimento próprio;
- Tipo de impedidor de transição: reator ou resistor;
- Tipo de ligação: comutador de neutro (classe I), para uso no neutro dos enrolamentos, ou comutador de linha (classe II), para uso em outras posições.

Ao longo do curto período em que se processa uma comutação, da ordem de uns poucos segundos, ocorrem, automaticamente, eventos de cuja precisão e sincronismo depende o correto funcionamento do CDC. Para a maioria dos modelos, a seqüência de eventos envolvidos em uma operação normal de comutação pode ser assim resumida:

- Operação dos mecanismos de acionamento (motor, hastes de transmissão, engrenagens, etc.);
- Acionamento do pré-seletor e mudança da posição dos contatos deste;
- Carregamento e liberação (disparo) da mola acumuladora de energia;
- Operação do rotor de acionamento do seletor de derivações;
- Transição dos contatos móveis do seletor de derivações e
- Comutação.

Em geral, os intervalos de tempo, dentro dos quais se processam os principais eventos (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. Apesar desta dificuldade, 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).

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

Os resultados apresentados neste trabalho foram obtidos de ensaios realizados em 14 CDC monofásicos, de fabricantes e modelos diferentes cujas características são apresentadas na Tabela 1. Os comutadores foram codificados de acordo com o fabricante, o modelo (se mais de um) e o sensor conectado (S1, S2 e S3). Cada grupo de CDC, de mesmo modelo e fabricante, encontrava-se instalado no mesmo banco de transformadores.

Tabela 1 – Características dos CDC

Fabricante / Modelo	Tipo	Desviadora	Isolamento	Montagem	Impedor de Transição	Quantidade de comutações		
						S1	S2	S3
A1	Chave Comutadora	C	Óleo	Interna	Resistor	253688	252936	252472
A2		IV	Óleo / Vácuo	Externa	Reator	38000	40436	36125
B		IV	Óleo / Vácuo	Externa	Reator	65885	64489	63331
C		C	Óleo	Interna	Resistor	154825	149165	123011
D		C	Óleo	Interna	Resistor	7944	85003	-

NOTA: Desviadora convencional (C) e Interruptor a vácuo (IV)

Os ensaios consistiram de monitoramentos dos sinais de emissão acústica emitidos durante comutações realizadas no campo, com as chaves em operação normal. Os monitoramentos foram realizados simultaneamente em cada grupo de transformadores. De um modo geral, para cada comutador, foi utilizado apenas um sensor fixado externamente ao tanque. O posicionamento dos sensores variou de acordo com as características construtivas do conjunto comutador / transformador de forma a que tanto os sinais da seleção quanto os da comutação fossem detectados com níveis de intensidade adequados. Em um dos ensaios, CDC B-S3, foi utilizado um sensor a mais, S4, posicionado à mesma altura do sensor S3, porém em uma face lateral adjacente, no compartimento do CDC. Esta montagem teve como objetivo a verificação de diferenças nas assinaturas provocadas pela mudança de posição do sensor.

As condições ambientais durante os ensaios foram consideradas satisfatórias, sendo que, apenas no caso do comutador D, a presença de ruído, proveniente do interior do transformador, interferiu nos resultados obtidos. Em nenhum dos ensaios, houve ativação de filtros de óleo dos comutadores.

A quantidade de comutações, para cada equipamento, foi de 24, correspondendo à uma elevação até tres posições acima da normal de operação, uma descida até tres posições abaixo desta e outra subida, para retorno à posição inicial. Em seguida, o ciclo era repetido uma vez.

Adicionalmente, foram incluídos resultados obtidos de um comutador trifásico, tipo chave seletora, que havia sido submetido a monitoramentos antes e após manutenção, na condição - desenergizado, e no qual havia sido identificada a presença de defeitos.

### 3.0 - RESULTADOS

#### 3.1 Assinaturas acústicas

As curvas apresentadas na Figura 1 mostram a variação dos valores de energia acumulada dos sinais detectados, ao longo do período correspondente a uma comutação, para cada comutação realizada no CDC A1-S1.

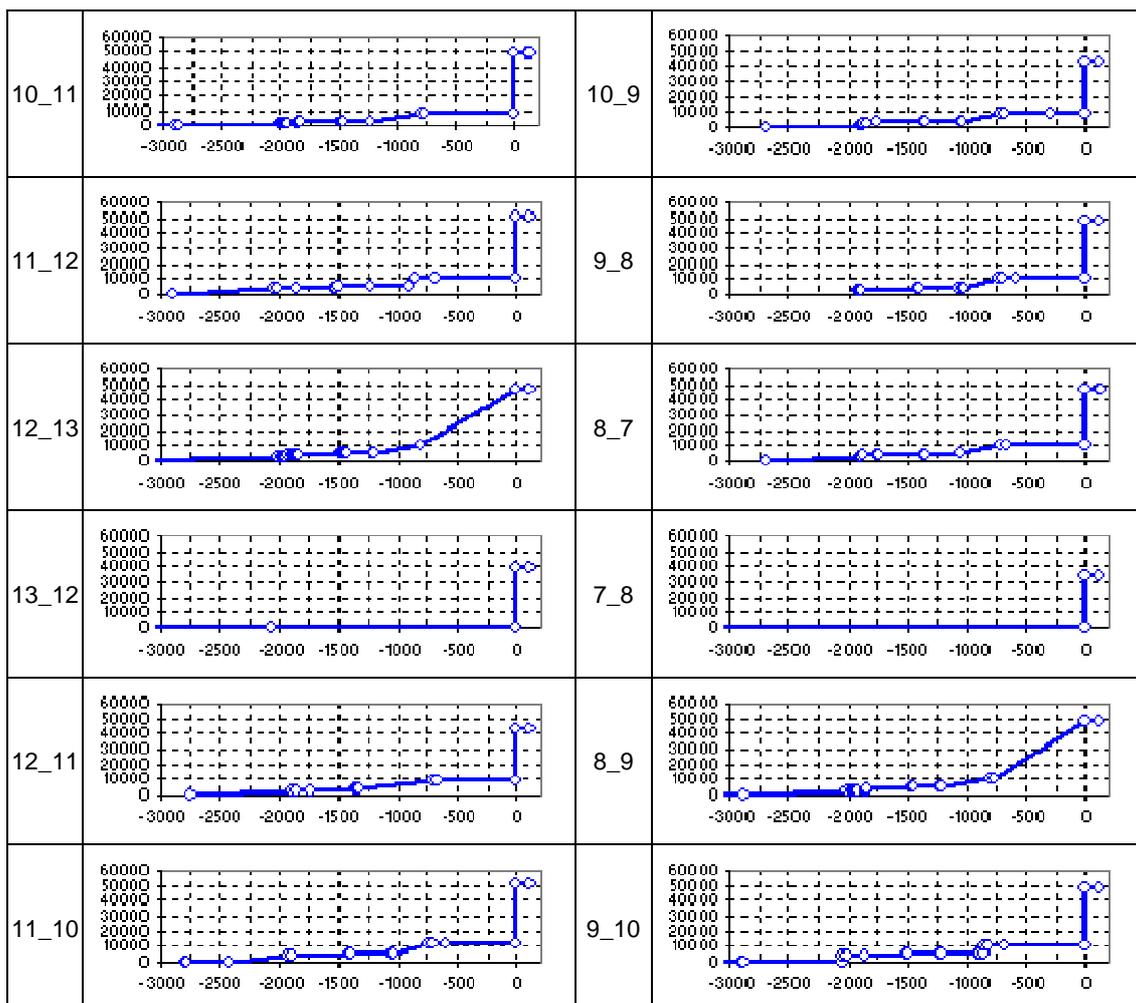


FIGURA 1 – Variação da energia acumulada (UE) com o tempo (ms) - CDC A1-S1

Nestes gráficos, 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. A origem adotada para as medições dos tempos foi o instante da ocorrência do evento de maior energia. Por este motivo, alguns tempos aparecem indicados com valores negativos.

Os principais estágios do processo de comutação podem ser identificados nas curvas da Figura 1: (a) início da operação dos mecanismos de acionamento (até  $-2000$  ms), (b) seleção de derivações (entre  $-2000$  e  $0$  ms) e (c) operação da chave desviadora, comutação, (em  $0$  ms). A ausência de sinais, entre  $-2000$  e  $0$  ms, nas curvas relativas às comutações 13\_12 e 7\_8, resulta do fato de estas terem sido apenas inversões do sentido das comutações, sem movimentação dos contatos do seletor. Esta constatação vem confirmar a indicação deste como sendo o intervalo em que se processa a seleção de derivações.

A Figura 2 mostra um quadro com assinaturas típicas obtidas de comutações realizadas nos diferentes grupos de CDC ensaiados. Nela, são apresentadas duas curvas para cada comutação obtidas de dois ciclos de comutações realizados em seqüência.

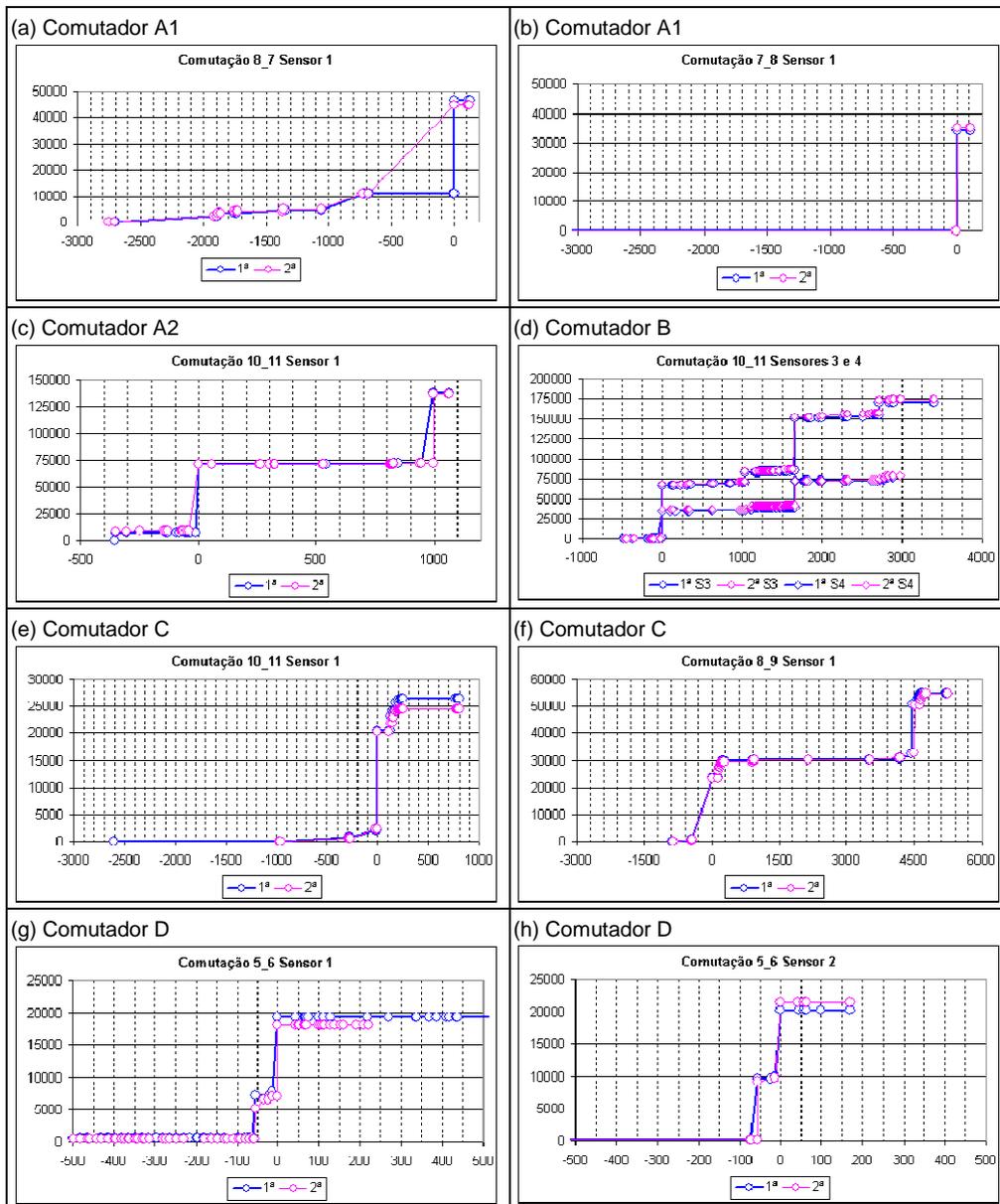


FIGURA 2 – Assinaturas típicas dos CDC ensaiados

As principais observações a respeito das curvas apresentadas na Figura 2 são:

- A repetibilidade dos ensaios verificada pela superposição das curvas, pela repetição dos pontos e pela coincidência dos tempos de ocorrência destes;
- As diferenças entre uma comutação completa, Figura 2 – (a), e uma apenas com inversão no sentido da comutação, Figura 2 – (b);
- As diferenças entre as curvas obtidas a partir dos sinais detectados por sensores em posições diferentes, Figura 2 – (d). Apesar da acentuada diferença nos valores de energia dos sinais, nota-se a manutenção do formato das duas curvas e a repetição dos pontos nos mesmos instantes de detecção;
- As diferenças entre uma comutação simples, Figura 2 – (e), e uma envolvendo posições intermediárias, Figura 2 – (f);
- Os efeitos, nas medições, da presença de ruídos no interior do transformador, Figura 2 – (g). A interferência fica mais evidente quando comparadas, as curvas, com as da Figura 2 – (h), obtidas de um CDC semelhante, sem a presença de ruídos.

Valores de energia acumulada (EAc) total média, para cada CDC em cada comutação, obtidos a partir da média dos somatórios de energia dos sinais das repetições realizadas, são apresentados na Figura 3, juntamente com os respectivos coeficientes de variação percentual, CV%, calculados pela fórmula:

$$CV \% = (s / \bar{X}) * 100$$

onde,

s é o desvio padrão e  $\bar{X}$  a média dos valores de cada conjunto de resultados obtidos nas mesmas condições.

Neste trabalho, o CV% foi utilizado como parâmetro para a avaliação da repetibilidade dos resultados.

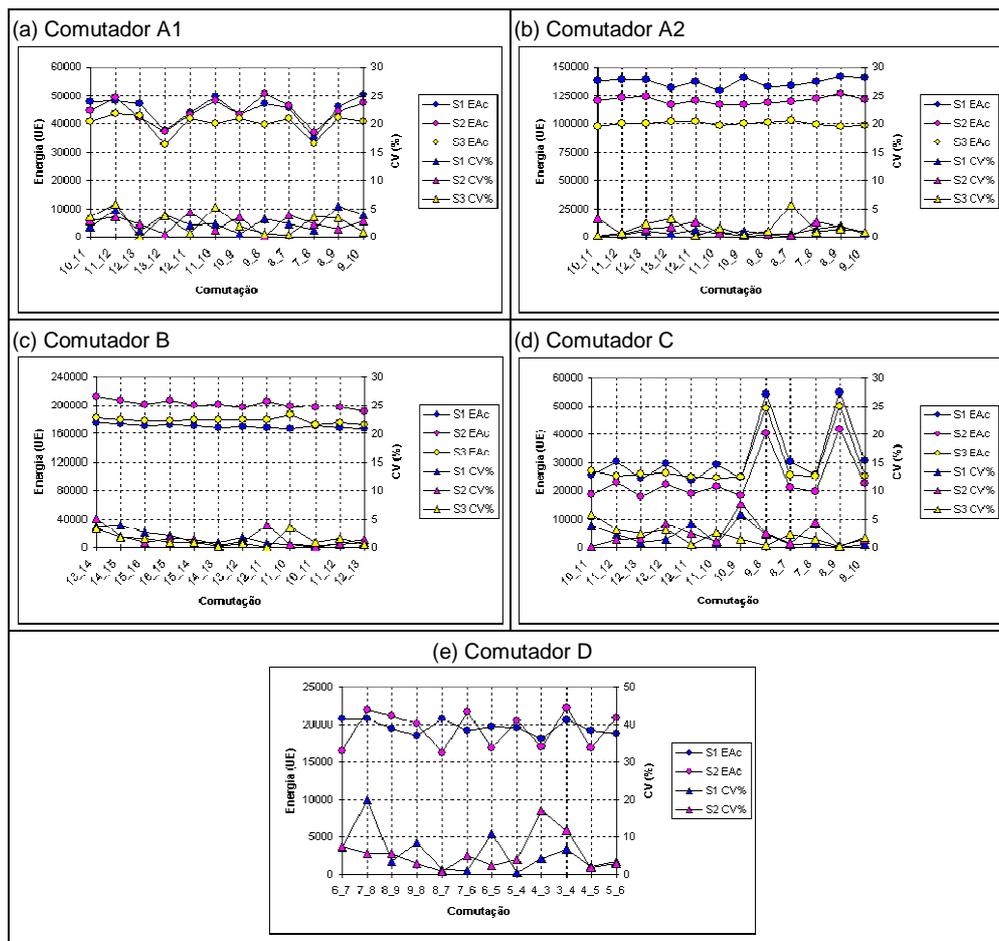


FIGURA 3 – EAc total média e CV%, por comutação, para cada CDC

Na Figura 3, observam-se as semelhanças de comportamento das curvas de energia acumulada total média para comutadores de um mesmo grupo. As ondulações em algumas destas curvas resultam da maior ou menor proximidade do sensor às derivações que estão sendo comutadas, devido à disposição circular dos contatos. No caso específico dos comutadores C-S1, C-S2 e C-S3, os picos de energia total acumulada correspondem às comutações envolvendo posições intermediárias e atuação de pré-seletor.

De um modo geral, os CV% calculados ficaram abaixo de 5%. As principais exceções a este comportamento foram os comutadores D-S1 e D-S2, para os quais os CV% chegaram a atingir valores da ordem de 20%. As razões para o primeiro caso são claras e encontram-se na interferência dos ruídos provenientes do interior do transformador, ruídos estes variáveis nas repetições efetuadas, influenciando diferentemente os resultados de cada comutação. Já para o CDC D-S2, os valores obtidos sugerem uma investigação mais apurada.

Na Figura 4, são apresentadas as médias dos valores de energia acumulada total e os coeficientes de variação percentual, calculados a partir dos valores obtidos para cada comutação, de todos os comutadores de um mesmo grupo.

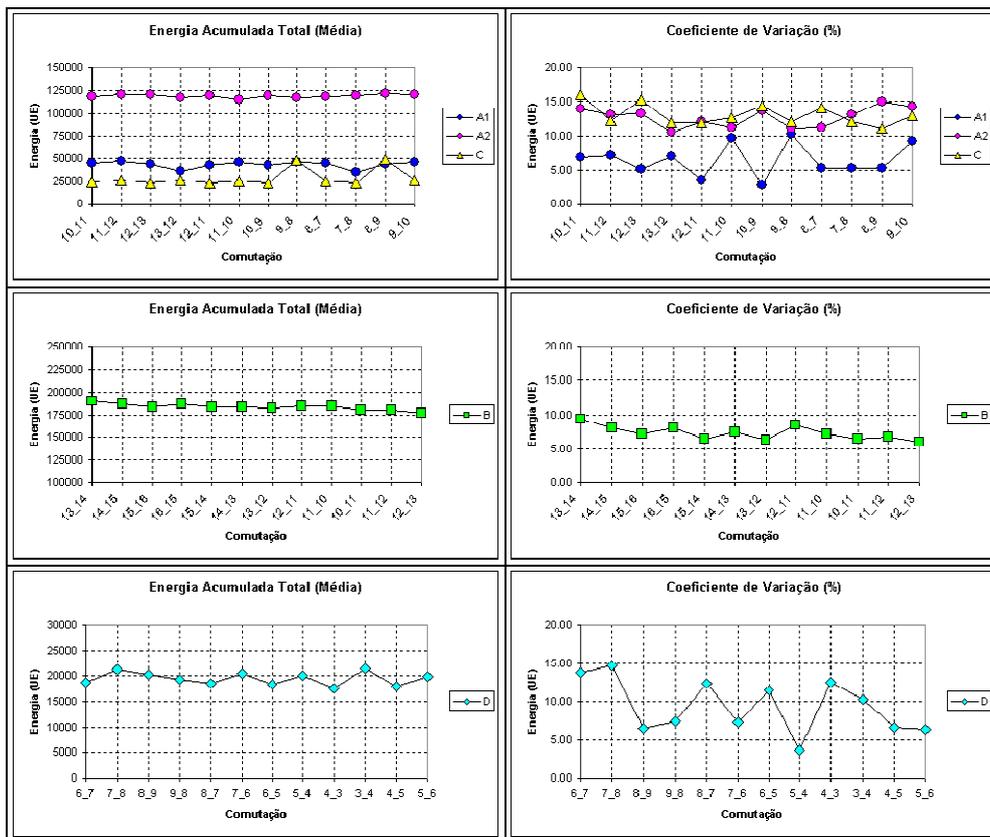


FIGURA 4 – EAc total média e CV%, por comutação, para cada grupo de CDC

Os valores dos CV% obtidos foram bastante variáveis e chegaram a atingir 15%, o que pode ser considerado um valor alto, indicativo de que os resultados quantitativos obtidos em um comutador, não necessariamente se repetirão em outro do mesmo modelo, do mesmo fabricante.

### 3.2 Identificação de defeitos

Durante manutenção de um comutador de derivações sob carga, trifásico, tipo chave seletora, verificou-se que um dos parafusos de fixação do engate superior do rotor encontrava-se partido e os demais frouxos, afetando a movimentação dos contatos. Assinaturas acústicas obtidas, com a chave desenergizada, imediatamente antes (na presença do defeito) e após revisão e reparos (na condição normalizada), são apresentadas na Figura 5.

A diferença no comportamento das curvas é bem evidente e se repetiu em todas as comutações realizadas. A variação da energia acumulada, ao final do processo de comutação, foi de 33%. Esta variação teve início no instante em que ocorreu o disparo da mola acumuladora de energia, e se propagou até o final da transição dos

contatos móveis. Estes resultados são indicativos da presença de um defeito que se manifesta de forma comum a todas as comutações, compatível com aquele identificado na manutenção do CDC.

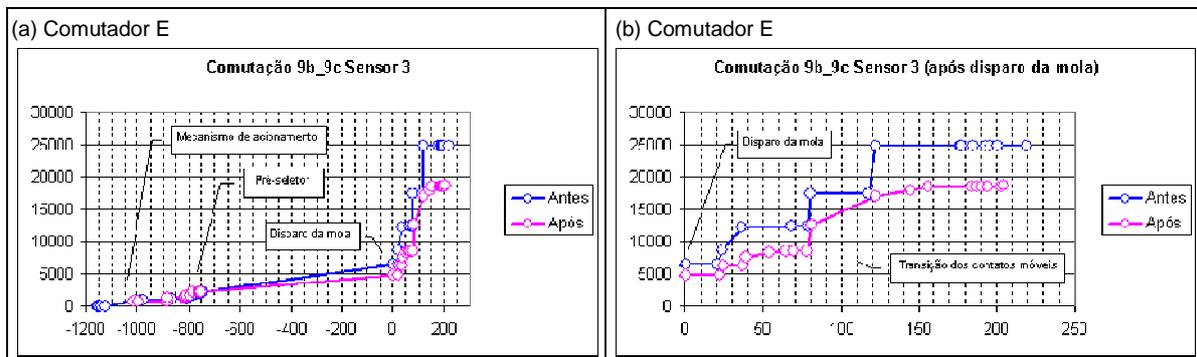


FIGURA 5 – Variação da energia acumulada (UE) com o tempo (ms), antes e após manutenção

#### 4.0 - COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES

Os resultados obtidos dos ensaios realizados demonstram que a técnica de emissão acústica apresenta capacidade de identificar a ocorrência dos diversos eventos envolvidos nos processos de comutação, possibilitando a avaliação das intensidades com que estes se manifestam e dos tempos em que ocorrem.

A repetibilidade destes resultados permitiu o estabelecimento de assinaturas acústicas para comutadores sob carga de diferentes modelos, de diferentes fabricantes.

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. A quantidade de comutadores de mesmo modelo que podem ser monitorados simultaneamente é limitada apenas pelo número de canais disponíveis no sistema de medições utilizado. A duração de um ensaio é extremamente curta, restringido-se apenas ao tempo necessário para se efetuar as comutações desejadas.

A comparação entre assinaturas acústicas obtidas antes e após manutenção de um CDC trifásico, tipo chave seletora, mostrou que a presença de defeitos pode ser identificada de forma clara, pelas alterações introduzidas nas curvas de energia acumulada.

Ruídos decorrentes da operação do transformador ou de componentes tais como, filtros de óleo, além daqueles provocados por fatores ambientais, podem interferir de forma decisiva nos resultados e devem ser considerados durante os monitoramentos.

Comparações quantitativas entre assinaturas acústicas devem se restringir ao mesmo equipamento, à mesma comutação, no mesmo sentido, mantida a posição do sensor. Assinaturas de uma mesma comutação, de comutadores de mesmo modelo porém distintos, poderão apresentar o mesmo comportamento, indicar igualmente os eventos de comutação e seus tempos de ocorrência mas com intensidades diferentes.

Para as mesmas comutações, em um mesmo CDC, e em condições ambientais isentas de ruídos, os coeficientes de variação percentual apresentaram valores, na sua maioria, inferiores a 5%, indicando uma boa repetibilidade dos resultados quando comparados com a variação de 33% na energia acumulada total, provocada pelos defeitos presentes no CDC tipo chave seletora.

Pelos resultados apresentados pode-se concluir que a metodologia em desenvolvimento, utilizando a técnica de emissão acústica, é uma ferramenta adequada para auxiliar na avaliação e no diagnóstico de comutadores de derivações sob carga.

#### 5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) KANG, P., BIRTHWHISTLE, 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) CIGRE SC 12 WG 12.05. An International Survey on Failures in Large Power Transformers in Service, ELECTRA, nº88, 1983, pp 21 –42.
- (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) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Comutador de Derivações em Carga - NBR 8667. Brasil.

## 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 e membro da Comissão Técnica de Inspeção de Transformadores de Potência e Reatores da Associação Brasileira de Ensaio Não Destrutivos – ABENDE. Suas áreas de interesse especial incluem a Técnica de Emissão Acústica.

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.