

IDENTIFICAÇÃO DE PADRÕES DE CONTAMINAÇÃO POR UMIDADE EM ÓLEO DE TRANSFORMADOR USANDO DESCARGAS PARCIAIS COMO FONTES DE SINAIS

G.F.C. Veloso, I. Noronha, L.E. Borges da Silva, G. Lambert-Torres
Universidade Federal de Itajuba
CEP 37500-903, Itajubá- MG
Brasil
e-mail: gveloso@unifei.edu.br

Resumo - Este artigo propõe uma nova técnica de detecção de contaminação por umidade em óleo isolante usando os sinais acústicos das descargas parciais (DP). Para demonstrá-la, um experimento é montado com um sensor piezoelétrico fixado na base de um reservatório que é preenchido com amostras de óleo isolante contaminadas com diferentes níveis de umidade. Um dispositivo gerador de descargas elétricas fica submerso no óleo para simular ocorrências de descargas parciais. Os sinais acústicos detectados são processados usando a Transformada Wavelet Discreta para extrair características de tempo e frequência. Em seguida, é feito um processamento usando a Análise de Componentes Principais (PCA) de modo a identificar padrões de contaminação por água no óleo de transformador. Os resultados mostram que a técnica é promissora para o desenvolvimento de um sistema de monitoramento on-line de transformadores de potência.

Palavras-Chave – Análise de Componentes Principais, Descargas Parciais, Emissão Acústica, Transformada Wavelet, Transformadores de Potência, Umidade.

IDENTIFICATION OF MOISTURE CONTAMINATION PATTERN IN TRANSFORMER OIL USING PARTIAL DISCHARGES AS SIGNAL SOURCES

Abstract – This paper proposes a new technique for detection of moisture contamination in insulating oil using the acoustic signals from partial discharges. To demonstrate it, an experiment with a piezoelectric sensor fixed on the basis of an oil reservoir is mounted. Insulating oil samples contaminated with different moisture levels are tested. A discharge-generating device, submerged in oil, simulate occurrences of partial discharges. The acoustic signals detected are processed using the Discrete Wavelet Transform to extract time-frequency features. Then, a processing using the Principal Component Analysis (PCA) is performed in such a way to identify patterns of water contamination in those oil samples. The results show that the technique is promising for the development of a system for online monitoring of power transformers.

Artigo submetido em 30/08/2010. Primeira revisão em 16/04/2011 segunda revisão em 18/06/2011. Aceito para publicação em 18/06/2011 para a Seção Especial por recomendação do editor especial Antonio J. Marques Cardoso.

Keywords – Acoustic Emission, Moisture, Partial Discharges, Power Transformer, Principal Component Analysis, Wavelet Transform.

NOMENCLATURA

DP	Descarga parcial.
PCA	Análise de componentes principais
FFT	Transformada rápida de Fourier

I. INTRODUÇÃO

No setor elétrico, transformadores de potência são componentes fundamentais, sendo sua confiabilidade um dos fatores mais importantes na operação do sistema [1]. Os altos custos de reposição de peças ou do equipamento, ou ainda das paradas não programadas, exige uma atitude pró-ativa das companhias de energia elétrica com relação à operação e manutenção de seus transformadores de potência. O desenvolvimento de programas de manutenção preditiva nas empresas de energia elétrica tem permitido a otimização de seus processos no sentido de promover não somente a redução de custos de manutenção, mas também de melhorar a produtividade, a qualidade e a eficiência [2].

Dentre diversos fatores estressantes a que o transformador de potência está submetido, aqueles relacionados ao óleo isolante, sem dúvida, representam os mais interessantes para serem monitorados [3]. Além do isolamento elétrico, o óleo também proporciona resfriamento, estabiliza o envelhecimento dos componentes e pode servir de portador de informação sobre a condição geral do equipamento. O uso de métodos de avaliação de suas condições pode prover informação para um sistema de diagnóstico e prognóstico [4], permitindo o planejamento de intervenções em momentos apropriados, evitando as indesejadas interrupções não programadas.

Uma peculiar fonte de informação relacionada ao sistema de isolamento é constituída pelos sinais gerados pelas descargas parciais. Estas descargas são minúsculos arcos elétricos que ocorrem no interior do sistema de isolamento de equipamentos de alta tensão. Podem ser causadas por problemas de construção, desgaste e envelhecimento, ou por sobrecargas [5], e sua atividade permanece em níveis aceitáveis por um longo período. Em um transformador de potência, um nível mínimo de atividade pode ser detectado imediatamente após sua entrada em operação [6]. Quando

ocorre uma descarga parcial, há a liberação de energia na forma de ondas acústicas que viajam através do isolamento e atingem a estrutura metálica e as paredes do transformador, podendo ser detectadas usando sensores piezoelétricos adequados [7]. Se o sensor for suficientemente sensível, é possível monitorar as descargas parciais a partir do início de sua atividade até o fim da vida útil do transformador. Esta disponibilidade de sinais emitidos do interior do equipamento pode ser aproveitada com o objetivo de coletar informações sobre o sistema de isolamento.

O envelhecimento normal ou acelerado do isolamento modifica as características dinâmicas do sistema composto pela estrutura metálica, tanque de óleo, papel e enrolamentos [8]. A proposta deste trabalho é a de mostrar uma técnica que é capaz de detectar a modificação da resposta dinâmica deste sistema analisando-se os sinais de emissão acústica produzidos pelas descargas parciais [9], modificação esta causada especificamente pelo aumento do teor de umidade no óleo isolante. Considerando o fato de que as descargas parciais produzem ondas acústicas que atravessam o isolamento e a estrutura até atingirem as paredes do transformador onde podem ser detectadas, os sinais obtidos deste processo podem revelar, através de uma análise de seu conteúdo de frequência e de sua variação no tempo, aquelas mudanças que se relacionarem com as modificações de umidade no isolamento. Este diagnóstico específico sobre a umidade do óleo isolante foi explorado devido à importância da medição deste parâmetro, uma vez que traz informações sobre o envelhecimento do isolamento e sobre o estado da contaminação, ambas relevantes para uma manutenção adequada do equipamento em questão. Além disso, as técnicas usuais de medição de umidade no óleo isolante, das quais, o método de Karl Fischer é considerado o padrão segundo a norma ASTM D1533, envolvem a retirada de amostra para posterior análise em laboratório, o que torna o processo de obtenção de medidas lento e não muito confiável [10, 11]. Neste contexto, uma técnica não invasiva para detectar variações de umidade no óleo seria uma grande vantagem.

A base desta técnica é formada por ferramentas de processamento de sinais e análise estatística. A Transformada Wavelet Discreta é usada para o processamento dos sinais acústicos produzidos pelas descargas parciais, que possuem a característica de serem não estacionários e, possivelmente, não lineares [12], o que torna inconveniente o uso da Transformada Rápida de Fourier (FFT) [13]. Outro método essencial para a caracterização das falhas é a Análise de Componentes Principais (*Principal Component Analysis - PCA*), pois a análise das características é de fundamental importância para a interpretação dos sinais coletados de forma a reconhecer os padrões de defeitos em evolução no interior do transformador monitorado. A mesma técnica pode ser usada para detectar outras mudanças no sistema de isolamento, construindo a base para um sistema de manutenção preditiva em tempo real para transformadores de potência.

II. BANCADA DE TESTE

Com o objetivo de obter sinais acústicos produzidos no interior do óleo isolante, foi desenvolvido um arranjo

experimental composto de um reservatório que se preenche com amostras de óleo isolante. Instalado neste reservatório, está um dispositivo para produzir descargas elétricas de modo a simular descargas parciais (DP). Um sensor piezoelétrico fica montado na plataforma metálica onde o reservatório está colocado (Figura 1). Uma característica importante do sensor é sua largura de banda relativamente grande (até 1MHz) e aproximadamente plana. O arranjo permite emular a propagação das ondas acústicas, geradas por descargas parciais, através do óleo e detectá-las externamente, como seria feito em um transformador real. As descargas elétricas geradas têm sua intensidade controlada através da variação do nível de tensão aplicados aos eletrodos, o que gira em torno de 17kV. Esta forma de gerar descargas é comum em outros trabalhos importantes da área [14, 15], produzindo níveis desde 500pC a 3000pC [16]. Apesar disso, não foram medidos neste trabalho. Nas publicações citadas, os experimentos são feitos dentro de um tanque metálico onde suas paredes protegem o sensor de interferências eletromagnéticas geradas pela emissão da descarga elétrica, o mesmo acontecendo no caso de um transformador real. Como, neste trabalho, havia a necessidade de controlar as amostras para que não sofressem contaminação, além da disponibilidade reduzida de óleo, foi usada uma câmara compacta. Isso expôs o sensor a interferências durante as experiências, daí seu posicionamento na base. Esta posição do sensor não se distancia da situação do caso real, pois, em ambos os casos, a onda acústica terá que percorrer parte da estrutura metálica do equipamento. Em experimentos em transformadores reais, as interferências eletromagnéticas nos sensores acústicos são insignificantes. Isso também é relatado em outros trabalhos, como [17, 18].

Para identificar padrões característicos relacionados à contaminação por umidade, dez amostras de óleo do mesmo tipo, NYNAS 4000A, foram testadas. Cada uma delas com um grau de umidade diferente em relação à outra. Por exemplo, a menos contaminada continha 9,8ppm de água e a mais úmida, 34,0ppm, a 20°C. Estas medidas foram obtidas no Laboratório Físico-Químico da divisão de Transformadores de Medidas da Alstom em Itajubá, MG. Segundo [19], níveis comuns de umidade num transformador novo devem estar abaixo de 20ppm. Para um transformador em serviço há algum tempo, é aceitável valores de até 35ppm. O óleo testado estava sem uso em qualquer equipamento, portanto, sem contaminantes comumente encontrados em óleos usados. Análises realizadas pelo mesmo laboratório confirmam isso e as principais características aparecem na Tabela I. Os diferentes níveis de umidade foram obtidos através da separação das amostras em recipientes. Cada uma delas foi armazenada por um tempo determinado numa câmara com um nível de umidade do ar relativamente alto. Dada as características higroscópicas do óleo, diferentes níveis de contaminação por umidade foram obtidos.

No experimento, foram produzidos 30 sinais acústicos para cada amostra de óleo. Após um pré-processamento, os sinais foram analisados com a Transformada Wavelet Discreta para obter os parâmetros que caracterizassem as condições do óleo. Estes parâmetros foram, então,

processados pela Análise de Componentes Principais (PCA) com o objetivo de encontrar padrões ocultos relacionados à contaminação por água.

TABELA I
Resultado de análise físico-química dos óleos utilizados nos experimentos

Ensaio	Método	Resultado	Unidade
Densidade	NBR7148	0,868	kg/cm ³
Enxofre corrosivo	NBR 10505	-	-
Fator de dissip.	NBR 12133	0,12	%
Rigidez dielétrica	NBR-IEC 60156	82	kV
Tensão interfacial	NBR 6234	48,35	dina/cm
H ₂	NBR 7070	2	ppm
O ₂	NBR 7070	5477	ppm
N ₂	NBR 7070	12726	ppm
CO	NBR 7070	5	ppm
CH ₄	NBR 7070	0	ppm
CO ₂	NBR 7070	38	ppm
C ₂ H ₄	NBR 7070	0	ppm
C ₂ H ₆	NBR 7070	0	ppm
C ₂ H ₂	NBR 7070	0	ppm

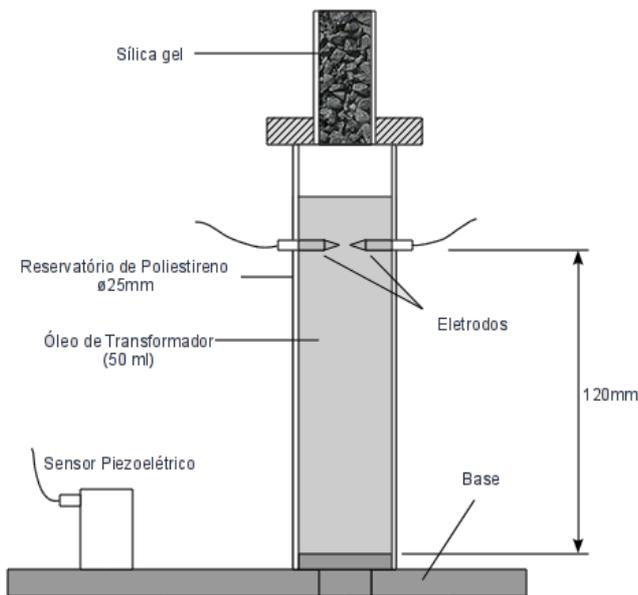


Fig. 1. O arranjo experimental.

A. Pré-processamento

O pré-processamento dos sinais acústicos tem dois objetivos: o primeiro é sincronizar os sinais, tomando apenas as amostras essenciais (do sinal), e o segundo é eliminar a influência da intensidade da descarga, que varia consideravelmente. Cada descarga elétrica ocorre num instante diferente e, para garantir o alinhamento temporal dos parâmetros, uma sincronização é necessária. Além disso, as descargas têm diferentes intensidades e, por isso, precisam ser normalizadas em energia. Isto pode ser feito calculando-se a energia do sinal usando a expressão (1). Em seguida, cada amostra do sinal deve ser dividida pela raiz quadrada do valor da energia do sinal.

$$E = \sum_i x^2(i) \quad (1)$$

Onde:

- $x(i)$ - Amostra de índice i do sinal.
- E - Energia do sinal.

Com isto, a energia total do sinal normalizado será sempre uma unidade. Por exemplo, a Figura 2 mostra dois sinais acústicos antes do pré-processamento e a Figura 3 mostra os mesmos sinais depois desta operação.

B. Transformada Wavelet Discreta

A Transformada Wavelet Discreta é uma técnica de processamento de sinais que se constitui numa alternativa à FFT. Ela possibilita a análise em multi resolução, que pode decompor um sinal em componentes de frequência mantendo a informação de tempo. A importância de se observar o sinal em diferentes níveis de resolução está no fato de que as características do sinal podem estar distribuídas nestes níveis. Separando-os, as características do sinal também serão separadas e destacadas.

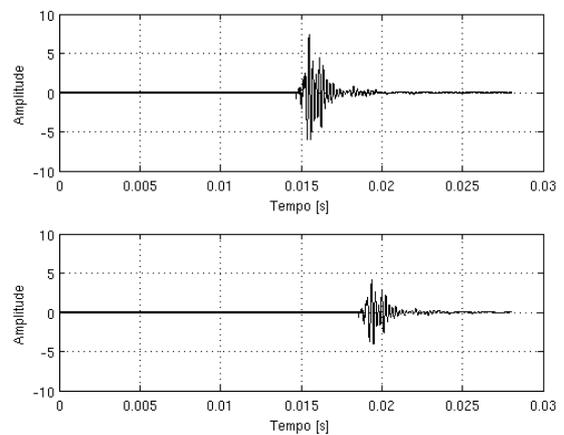


Fig. 2. Dois sinais acústicos antes do pré-processamento.

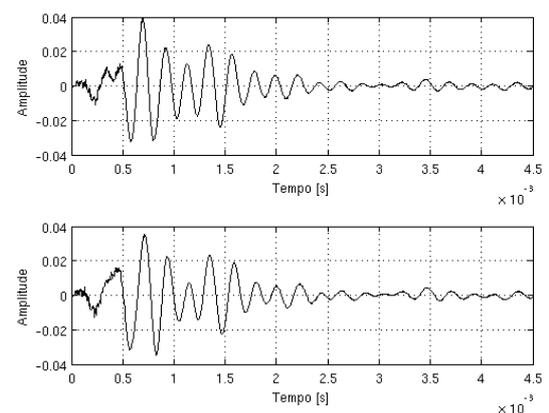


Fig. 3. Os mesmos dois sinais acústicos da Fig. 2 após o pré-processamento.

A Transformada Wavelet Discreta pode ser vista como uma forma de expansão de sinais [20]. Neste caso, o conjunto de expansão é constituído de funções wavelet e funções escalas. A expressão que descreve isto é escrita como:

$$f(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} c_{j_0,k} \cdot \varphi_{j_0,k}(t) + \sum_{j=j_0}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} d_{j,k} \cdot \psi_{j,k}(t) \quad (2)$$

Onde:

$c_{j_0,k}$ - Coeficiente relacionado às funções escalas, chamado de coeficiente de aproximação.

$d_{j,k}$ - Coeficiente relacionado às funções *wavelet*, chamado de coeficiente de detalhe.

$\varphi_{j_0,k}$ - Conjunto de expansão de funções escalas;

$\psi_{j,k}$ - Conjunto de expansão de funções *wavelet*

j - Índice da escala;

k - Índice de tempo.

Os coeficientes da Transformada Wavelet Discreta são referenciados usando duas variáveis (k e j) que varrem o conteúdo de tempo e o conteúdo de frequência do sinal. Estes coeficientes são organizados em níveis, definidos pela variável j , sendo relacionados ao conceito de escala. A escala é um parâmetro ligado à frequência, podendo ser pensado como o seu inverso. A informação temporal é representada pela variação em k . Assim, a Transformada Wavelet Discreta é o processo de se calcular os coeficientes $c_{j,k}$ e $d_{j,k}$.

Os coeficientes provêm uma representação compacta das características do sinal, mostrando sua distribuição de energia no tempo e na frequência. Ao ser decomposto pela Transformada Wavelet Discreta, um sinal é separado em níveis (sinais componentes) relacionados a diferentes bandas de frequências. Um número adequado de níveis deve ser escolhido para bem caracterizar o processo de análise. Assim, a decomposição do sinal resulta em vários níveis de coeficientes de detalhes (frequências médias e altas) e um nível de coeficientes de aproximação (frequências baixas).

Neste trabalho, a informação extraída pela decomposição com a Transformada Wavelet Discreta é usada como parâmetros para a caracterização de sinais. O sinal acústico é dividido em cinco intervalos de tempo, sendo cada um deles decomposto em nove níveis *wavelet* (9 detalhes e 1 aproximação), usando a *wavelet Daubechies 8* (db8). Em seguida, o valor da energia de cada nível é calculado de modo a construir um conjunto de 50 parâmetros. A Figura 4 mostra um exemplo de conjunto de parâmetros. Pelo Teorema de Parseval, válido para a Transformada Wavelet Discreta [20], pode-se garantir que estes parâmetros refletem a distribuição de energia nas bandas de frequências ao longo do tempo.

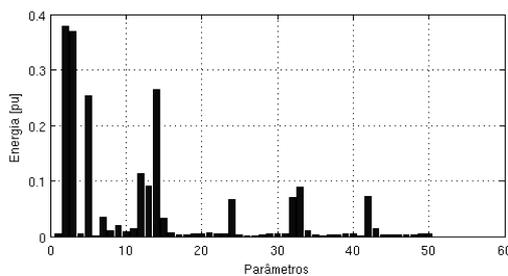


Fig. 4. Exemplo de conjunto de parâmetros de um sinal acústico gerado por descarga elétrica.

C. Análise de Componentes Principais

A Análise de Componentes Principais (PCA) é uma técnica estatística normalmente aplicada na identificação de padrões contidos em grandes conjuntos de dados. A maioria destes padrões não pode ser facilmente percebida numa análise superficial devido ao grande volume de informações. Além de revelar os padrões imersos no conjunto de dados, é possível classificá-los em termos de sua contribuição na formação do conjunto de dados.

O PCA é definido através da covariância do conjunto de dados, o qual é organizado na forma de uma matriz [21]. A covariância pode ser vista como uma medida de quanto uma dada dimensão dos dados varia em relação a outra, ou seja, ela pode ser interpretada em termos de quanto uma dimensão é similar à outra. Outro aspecto da técnica PCA é o conceito de autovetores e autovalores. Sua importância está no fato de que quando autovetores são calculados a partir de uma matriz de covariância, eles são ortogonais entre si. E a ortogonalidade é uma medida de independência de dados. Assim, ao se obter autovetores de uma matriz de covariância de um conjunto de dados, padrões imersos neste conjunto vêm à tona. Os autovalores associados a esses autovetores fornecem o nível de contribuição de cada um desses padrões na formação dos dados.

Os dados devem ser organizados na forma de matriz. Os parâmetros obtidos com a Transformada Wavelet Discreta formam as colunas, sendo as linhas correspondentes a cada sinal analisado. A covariância entre duas linhas é calculada através da expressão (3):

$$\text{cov}(X, Y) = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X}) \cdot (Y_i - \bar{Y})}{n - 1} \quad (3)$$

Onde:

X_i - Parâmetro i da linha X .

Y_i - Parâmetro i da linha Y .

n - Número de parâmetros em uma linha.

Os valores de covariância são organizados em uma matriz simétrica, a matriz de covariância, tal que:

$$C^{mn} = [c_{X,Y} \mid c_{X,Y} = \text{cov}(X, Y)] \quad (4)$$

Os autovetores e autovalores são calculados a partir desta matriz de covariância. Cada autovetor é chamado de *componente* e sua contribuição na formação dos dados é dada pelo seu respectivo autovalor. Assim, os componentes podem ser organizados por ordem de importância.

Finalmente, para encontrar os elementos relacionados com determinados padrões, são calculados os *scores* para cada um deles. Sendo os componentes vetores ortogonais que representam padrões em dados, os *scores* são projeções dos dados originais nestes vetores. Estas projeções se traduzem em quanto aqueles elementos estão relacionados a um padrão específico indicado por estes vetores.

III. RESULTADOS

Como o objetivo dos experimentos é detectar as diferenças de umidade entre as amostras, os sinais são analisados dois a dois, sempre comparando um óleo mais seco com um mais úmido. Assim, para 10 amostras de óleo, quando combinadas duas a duas, tem-se 45 experimentos. O resultado da análise para cada um deles deve indicar algum tipo de diferenciação, uma vez que todas são do mesmo tipo de óleo e a única diferença entre elas é o teor de umidade.

Para isso, tomam-se os parâmetros extraídos dos sinais acústicos e montam-se matrizes usando sempre os dados de cada par de amostras de óleo. Isso deve resultar em 45 matrizes de dimensão 60x100. Elas são submetidas ao algoritmo do PCA para obtenção dos componentes principais e seus *scores* para, em seguida, serem analisados. Por exemplo, o primeiro experimento testa amostras com 9,8ppm e 12,0ppm de teor de umidade. Tomando um componente qualquer dentre os 100 que foram obtidos, constroem-se os resultados apresentados na Figura 5. Nota-se que os *scores* não indicam nenhuma tendência de separar as duas amostras. As amostras de óleo seriam perfeitamente separadas (identificadas pelo seu teor de umidade) se os *scores* dos primeiros 30 sinais na Figura 5 apresentassem um sinal (positivo ou negativo) oposto ao dos *scores* dos 30 sinais seguintes. Portanto, este não é um bom PC.

O trabalho de análise consiste, então, em encontrar pelo menos um PC, com a maior contribuição possível, que permita identificar os dois grupos de 30 sinais das amostras de óleo. Um exemplo disso para as mesmas duas amostras de óleo aparece na Figura 6. Nela, pode-se ver que há uma separação bem evidente entre os sinais das duas amostras de óleo ao se observar seus *scores*.

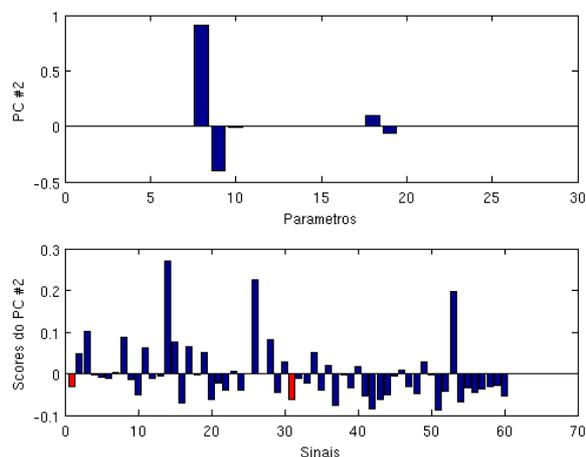


Fig. 5. Um dos componentes principais e seus respectivos *scores* para o conjunto de dados do experimento.

O gráfico que exhibe os *scores* na Figura 6 mostra que a maioria dos primeiros 30 sinais possui valores positivos. Estes sinais são provenientes da amostra de 9,8ppm de teor de umidade. Os 30 sinais seguintes, com *scores* negativos em sua maioria, foram obtidos do óleo com 12,0ppm de umidade. Pode-se dizer, então, que a análise através da metodologia apresentada foi capaz de detectar uma variação no teor de umidade dessas amostras. A análise dos outros 44 experimentos resultou em gráficos semelhantes a este, mas

não são exibidos aqui por motivos óbvios. Porém, é possível observar na Figura 6 que alguns sinais não seguem o mesmo padrão, o que pode ser considerada uma falsa identificação de variação. Assim, para medir a eficiência da metodologia, é feita uma contagem dentre os 60 sinais de cada experimento para verificar quantos correspondem ao padrão identificado. A Tabela II exhibe os resultados dos 45 experimentos quanto à contagem do número de acertos na identificação da variação de umidade. A média de acertos é 48 em 60, ou seja, 80% dos sinais, com um desvio-padrão de 5.

TABELA II
Resultados dos experimentos com óleo isolante

Experimento	Amostras	No. de Acertos
1	9,8ppm/12,0ppm	57
2	9,8ppm/20,0ppm	55
3	9,8ppm/21,0ppm	50
4	9,8ppm/22,0ppm	41
5	9,8ppm/23,5ppm	47
6	9,8ppm/25,2ppm	51
7	9,8ppm/26,0ppm	57
8	9,8ppm/27,0ppm	54
9	9,8ppm/34,0ppm	43
10	12,0ppm/20,0ppm	44
11	12,0ppm/21,0ppm	59
12	12,0ppm/22,0ppm	44
13	12,0ppm/23,5ppm	47
14	12,0ppm/25,2ppm	52
15	12,0ppm/26,0ppm	42
16	12,0ppm/27,0ppm	44
17	12,0ppm/34,0ppm	50
18	20,0ppm/21,0ppm	46
19	20,0ppm/22,0ppm	49
20	20,0ppm/23,5ppm	48
21	20,0ppm/25,2ppm	45
22	20,0ppm/26,0ppm	48
23	20,0ppm/27,0ppm	48
24	20,0ppm/34,0ppm	44
25	21,0ppm/22,0ppm	50
26	21,0ppm/23,5ppm	51
27	21,0ppm/25,2ppm	42
28	21,0ppm/26,0ppm	49
29	21,0ppm/27,0ppm	44
30	21,0ppm/34,0ppm	41
31	22,0ppm/23,5ppm	59
32	22,0ppm/25,2ppm	43
33	22,0ppm/26,0ppm	49
34	22,0ppm/27,0ppm	43
35	22,0ppm/34,0ppm	46
36	23,5ppm/25,2ppm	49
37	23,5ppm/26,0ppm	44
38	23,5ppm/27,0ppm	46
39	23,5ppm/34,0ppm	52
40	25,2ppm/26,0ppm	46
41	25,2ppm/27,0ppm	48
42	25,2ppm/34,0ppm	46
43	26,0ppm/27,0ppm	47
44	26,0ppm/34,0ppm	47
45	27,0ppm/34,0ppm	40
Média:		48

As descargas parciais não são iguais umas às outras, o que significa que os sinais acústicos podem possuir diferenças significativas entre si. Este pode ser o motivo de alguns sinais no conjunto dos 30, que foram coletados para cada amostra de óleo não, apresentarem as características indicativas de umidade detectadas nos outros. Com uma taxa de 80% de acertos, pode-se dizer que a metodologia apresenta uma chance razoável de indicar corretamente uma variação de umidade. É importante destacar que em alguns experimentos, a diferença de teor de umidade entre as amostras foi de apenas 1ppm, como no experimento 18, com 46 acertos, e no experimento 25, com 50 acertos, ou ainda menor, como no experimento 40.

Embora não seja objetivo deste trabalho explicar a natureza física da influência da umidade na propagação acústica, os efeitos observados podem ser explicados pela atenuação acústica do óleo. Tal característica deve se modificar de acordo com a contaminação por umidade.

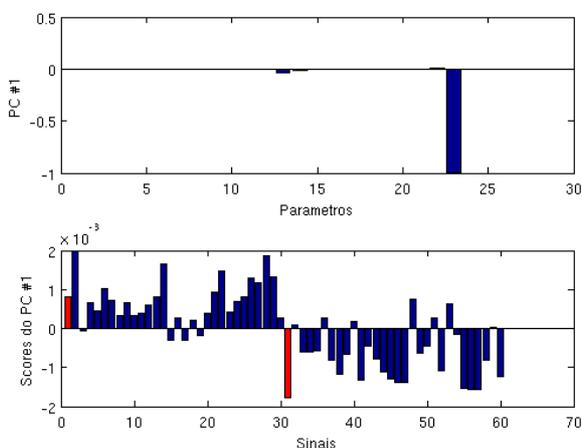


Fig. 6. Análise de um componente principal satisfatório.

IV. CONCLUSÕES

O principal tema deste trabalho é a contribuição no problema da detecção de variação do teor de umidade em óleo de transformador. O objetivo era mostrar esta possibilidade através do processamento dos sinais acústicos das descargas parciais, o que permitiria o desenvolvimento de uma metodologia totalmente não invasiva para monitoramento do isolamento dos transformadores de potência. Como discutido, este tipo de medição sempre é feita de forma invasiva, com coleta de amostras. A técnica proposta contorna estes problemas.

Os dados e resultados de análise apresentados confirmam esta possibilidade. Apesar dos experimentos não terem sido feitos num transformador de potência, eles reproduziram as principais características do caso real, as quais são a produção da descarga no interior do isolamento, a propagação acústica pelo isolamento e por uma estrutura e, finalmente, a detecção do sinal pelo lado externo do equipamento. Então, é possível detectar a modificação da resposta dinâmica do sistema formado pela estrutura metálica do transformador e seu isolamento analisando-se os sinais de emissão acústica produzidos pelas descargas parciais, modificação esta causada especificamente pelo aumento do

teor de umidade no óleo isolante. Como num curto espaço de tempo a estrutura metálica dificilmente irá apresentar modificações significativas, o que resta para ser detectado são modificações no isolamento. Portanto, seguindo-se este mesmo procedimento, abre-se um novo caminho para monitorar outros problemas no isolamento, como gases dissolvidos ou partículas em suspensão no óleo isolante, de modo a se construir um banco de dados para manutenção preditiva de transformadores de potência.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer à FAPEMIG, ao CNPq e à CAPES pelo apoio a este trabalho, bem como à subsidiária da Alstom em Itajubá, MG.

REFERÊNCIAS

- [1] S.M. Strachan; S. Rudd; S.D.J. McArthur; M.D. Judd; S. Meijer; E. Gulski, "Knowledge-based diagnosis of partial discharges in power transformers", *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol 15, no. 1, pp. 259-268, February 2008.
- [2] R. K. Mobley, *An introduction to predictive maintenance*, Butterworth-Heinemann, 2nd ed, 2002.
- [3] P.J. Baird; H. Herman; G.C. Stevens; P.N. Jarman, "Non-destructive measurement of the degradation of transformer insulating paper", *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol 13, no. 1, pp. 309-318, February 2006.
- [4] T.K. Saha, "Review of modern diagnostic techniques for assessing insulation condition in aged transformers", *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 10, no. 5, pp. 903-917, October 2003.
- [5] O. Hassan, A.A. Shyegani, H. Borsi, E. Gockenbach, E.M. Abu-Elzahab, M.I. Gilany, "Detection of oil-pressboard insulation aging with dielectric spectroscopy in time and frequency domain measurements", *Proceeding of 2004 International Conference on Solid Dielectrics*, Toulouse, France, July, 2004.
- [6] D.A. Nattrass, "Partial discharge XVII: the early history of partial discharge research", *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 9, no. 4, pp. 27-31, July/August 1993.
- [7] L.E. Lundgaard, "Partial discharge XIV: acoustic partial discharge detection – practical application", *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 8, no. 5, pp. 34-43, September/October 1995.
- [8] D. Linhjell; L. Lundgaard; U. Gäfvert, "Dielectric response of mineral oil impregnated cellulose and the impact of aging", *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 14, no. 1, pp. 156-169, February 2009.
- [9] M.L. Shai; Y.H.M. Thayoob; P.S. Gosh; A.Z. Sha'ameri; M.A. Talib, "Identification of different types of partial discharge sources from acoustic emission signals in the time-frequency representation", *Proceedings of First International Power and Energy Conference – PECon*, Putrajaya, Malaysia, 2006.
- [10] Y. Du; A.V. Mamishev; B.C. Lesieutre; M. Zahn; S.H. Kang. Moisture solubility for differently conditioned

- transformer oils. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, USA, v. 8, n. 5, October 2001.
- [11] M. Koch; S. Tenbohlen; T Stirl. Diagnostic application of moisture equilibrium for power transformers. *IEEE Transactions on Power Delivery*, USA, v. 25, n. 4, October 2010.
- [12] R.J. Van Brunt; P. von Glahn; T. Las, "Nonstationary behavior of partial discharge during discharge induced ageing of dielectrics", *IEE Proc. Sci. Meas. Technol.*, v. 142, n. 1, 1995.
- [13] N.E. Huang; Z. Shen; S.R. Long; M.L. Wu; H.H. Shih; Q. Zheng; N.C. Yen; C.C. Tung; H.H. Liu, "The empirical mode decomposition and Hilbert spectrum for nonlinear and nonstationary time series analysis", *Proc. Royal Society London*, v. 454, London, UK, 1998.
- [14] T. Sakoda; T. Arita; H. Nieda; K. Ando; M. Otsu; C. Honda. Studies of elastic waves caused by corona dischargers in oil. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, USA, v. 6, n. 6, December 1999.
- [15] R. M. Sharkawy; T.K. Abdel-Galil; R.S. Magoubi; M.M. Salama; R. Bartnikas. Particle identification in terms of acoustic partial discharge measurements in transformer Oils. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, USA, v. 15, n. 6, December 2008.
- [16] R.E. Ames; J Kurusingal; J. Unsworth. Prototype partial discharge simulator for use in transformers. *Proceedings of the 4th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials*, Australia, July 1994.
- [17] L.E. Lundgaard. Partial discharge - parte XIII: acoustic partial discharge - fundamental considerations. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, USA, v. 8, n. 4, July/August 1992.
- [18] B.R. Varlow; D.W. Auckland; C.D. Smith; J. Zhao. Non-destructive diagnostics of insulating systems: acoustic emission analysis of high voltage insulation. *IEE Proc. Sci. Measurement Technologies*, USA, v. 146, n. 5, September 1999.
- [19] T.O. Rouse. Mineral insulating oil in transformers. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, USA, v. 14, n. 3, May/June 1998.
- [20] C.S. Burrus, R. A. Gopinath, H. Guo, *Introduction to wavelets and wavelet transforms*. Prentice Hall, New Jersey, 1998.
- [21] I.T. Jolliffe, *Principal component analysis*. Springer, New York, 2002.

Giscard Francimeire Cintra Veloso, recebeu os graus de Bacharel e Mestre, ambos em Engenharia Elétrica, da Universidade Federal de Itajubá, em 2004 e 2006, respectivamente. Atualmente, está em fase de conclusão do Doutorado em Engenharia Elétrica pela mesma universidade, onde trabalha como professor assistente. Seus principais trabalhos de pesquisa estão na área de descargas parciais em transformadores de potência usando técnicas de medição acústica. Outras áreas de interesse são processamento digital de sinais e manutenção preditiva.

Ismael Noronha, recebeu os graus de Bacharel e Mestre, ambos em Engenharia Elétrica, da Universidade Federal de Itajubá (Unifei), em 1977 e 1996, respectivamente. Também é especialista em Transdução de Grandezas Biomédicas pela Universidade Estadual de Campinas. Atualmente, está concluindo seu Doutorado em Engenharia Elétrica na Unifei, onde trabalha como professor adjunto. Suas áreas de interesse de pesquisa incluem eletrônica industrial, engenharia biomédica, processamento de sinais biológicos e manutenção preditiva.

Luiz Eduardo Borges da Silva, recebeu os graus de Bacharel e Mestre da Universidade Federal de Itajubá (Unifei), e o grau de Doutor (Ph.D) da Ecole Polytechnique de Montreal, todos em Engenharia Elétrica, em 1977, 1982 e 1988, respectivamente. Atualmente, é professor titular na Unifei. Seus interesses em pesquisa estão na área de eletrônica industrial, sistemas de controle e manutenção preditiva.

Germano Lambert Torres, recebeu os graus de Bacharel e Mestre da Universidade Federal de Itajubá (Unifei), o grau de Doutor (Ph.D) da Ecole Polytechnique de Montreal, todos em Engenharia Elétrica, em 1982, 1986 e 1990, respectivamente. Também possui o grau de Bacharel em Economia da Faculdade de Ciências Econômicas do Sul de Minas (1981) e de Bacharel em Matemática da Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras de Itajubá (1981). Atualmente, é professor titular na Unifei. Seus interesses em pesquisa estão na área de operação de sistemas, inteligência artificial e planejamento de sistemas.