

Low Cost System for Partial Discharge Monitoring in Power Transformers by Piezoelectric Sensors

B. A. Castro, G. A. M. Clerice, A. L. Andreoli, *Member, IEEE*, F. S. Campos and J. A. C. Ulson

Abstract— Partial discharge damages in power transformers require high cost monitoring procedures based on corrective maintenance or even interruptions of the power system. The development of online non-invasive monitoring systems to detect partial discharges in power transformers has great relevance since it can reduce significant maintenance costs. Some critical factors in the operation of transformers such as overload, nonlinear loads, transient voltage surges by atmospheric origin and switching, can make the insulation system of transformers to lose their physical and chemical properties. Therefore, these operating conditions can cause early deterioration of the insulation, causing internal partial discharges that may develop into major defects and thus shorten the useful life of electrical equipment. This research aimed to apply a low cost piezoelectric sensors (PZTs) for partial discharge identification in power transformers and a study was conducted on the obtained a good results for identification with PZTs.

Keywords— Partial Discharge, Acoustic Emission, Piezoelectric Sensors, Mitigation.

I. INTRODUÇÃO

O CRESCENTE aumento da demanda energética no mundo suscita um significativo debate no que condiz à confiabilidade e qualidade do fornecimento de energia elétrica, seja nos setores de geração, transmissão ou distribuição de energia elétrica. Algumas falhas no sistema elétrico podem ser a causa de significativos prejuízos financeiros ao atingirem importantes centros consumidores, como a indústria, comércio e prestação de serviços. Dentre os diversos dispositivos que compõem o sistema elétrico, os transformadores de potência desempenham um papel de elevada significância operacional, pois são responsáveis pela adequação dos níveis de tensão e transferência de energia, desde as unidades geradoras até os pontos de consumo. Desta forma, mostra-se conveniente o acompanhamento contínuo das condições de funcionamento de transformadores de potência, visando evitar a ocorrência de falhas que possam privar os centros consumidores do fornecimento de energia. A aplicação de técnicas de predição de defeitos em transformadores pode, deste modo, minimizar eventuais ônus financeiros gerados por falhas nestes dispositivos elétricos, pois tornam possível a detecção de anomalias operacionais ainda em estágios iniciais, permitindo o agendamento de

manutenções pontuais e de pouca complexidade, e assim prevenindo interrupções não programadas. A integridade dos transformadores está diretamente relacionada com a confiabilidade e qualidade no fornecimento de energia elétrica. Todavia, alguns fatores críticos de operação dos transformadores, como a operação em regime de sobrecarga, ocorrência de eventos transitórios, presença de cargas de elevado conteúdo harmônico, superaquecimento, dentre outros, podem contribuir para a degradação da isolamento destes dispositivos elétricos e, então, diminuir a vida útil deste aparelho [1]. Tais operações discrepantes fazem com que ocorra uma perda precoce das propriedades físico-químicas dos materiais que compõe a isolamento do transformador culminando, então, com o surgimento de descargas parciais [1-4]. Sendo assim, é de grande relevância a detecção precoce das descargas parciais em transformadores de potência tendo em vista que o surgimento destas falhas é um indicador significativo de problemas na isolamento deste dispositivo [4]. Diversas técnicas de identificação de descargas parciais foram elaboradas; pode-se citar como as mais comuns o método elétrico, que faz uma análise de pulsos elétricos nas terminações de alta e baixa tensão dos transformadores; o método químico, que analisa a variação da composição molecular dos materiais isolantes no transformador ao longo do tempo; o método por emissão acústica, que detecta sinais de ultrassom gerados pela descarga, dentre outros métodos de identificação [5-7]. Todas estas técnicas podem diagnosticar as condições de funcionamento de um transformador de potência. Contudo, esta análise suscita a característica invasiva de alguns métodos, isto é, se valem de procedimentos que em algumas situações exigem o desligamento, remoção e desmontagem do transformador, ou mesmo se valem de uma metodologia que faz análise das tensões de entrada e saída do aparelho, expondo os operadores dos sistemas de diagnóstico a elevados níveis de tensão. A grande vantagem do método de identificação de descargas parciais por emissão acústica é de ser um método de manutenção preventiva não invasivo, permitindo que o transformador seja analisado em pleno funcionamento, sem a necessidade de desmontagem para estudo das possíveis causas de defeito [4]. Este método, por meio do emprego de sensores de emissão acústica, detecta ondas de ultrassom incidentes na parede da caixa de aço do transformador que são geradas pelas descargas parciais ocorridas no óleo isolante. Atualmente, o custo de sensores para esta aplicação situa-se na faixa de alguns milhares de Reais no mercado brasileiro. Neste contexto, o objetivo desta pesquisa é analisar a viabilidade de emprego de sensores piezelétricos de baixo custo, conhecidos como diafragmas piezelétricos ou “buzzers”, na identificação de descargas

B. A. de Castro, Univ. Estadual Paulista, bruno.castro@feb.unesp.br

G. A. M. Clerice, Univ. Estadual Paulista, marabuzzi@feb.unesp.br

A. L. Andreoli, Univ. Estadual Paulista, andreoli@feb.unep.br

F. S. Campos, Univ. Estadual Paulista, fc campos@feb.unep.br

J. A. C. Ulson, Univ. Estadual Paulista, ulson@feb.unesp.br

Corresponding author: Bruno Albuquerque de Castro.

parciais (DP) geradas em óleo mineral de um transformador. Estes sensores tem custo muito baixo em relação aos sensores de emissão acústica comercialmente disponíveis, e os resultados da investigação demonstram a viabilidade de aplicação do método não invasivo de identificação de descargas parciais por emissão acústica, fornecendo um aparato para o aperfeiçoamento da manutenção e melhoria técnica do sistema de suprimento de energia elétrica.

II. AS DESCARGAS PARCIAIS EM TRANSFORMADORES

O monitoramento de descargas parciais pelo método da emissão acústica tem como base a detecção de ondas mecânicas emitidas por uma fonte de descarga parcial. Uma descarga parcial, segundo a norma IEC 60270, é uma descarga elétrica localizada que preenche parcialmente um material isolante entre dois condutores. Nos materiais que compõe a isolação de um transformador, as descargas parciais podem ser consequências da presença de campos elétricos concentrados na superfície de uma descontinuidade presente dentro do material. Tal descontinuidade pode ser produzida por um defeito de fabricação, como uma bolha de ar, ou mesmo uma parte do material isolante que se encontra degradado. Geralmente as DPs possuem duração impulsiva de menos de μ s [2-5]. Existem dois modelos consolidados que descrevem o comportamento de descargas parciais em tensões alternadas [7-9]. O primeiro modelo conclui que, após a extinção da descarga em um local, a tensão sobre este mesmo ponto começa a aumentar novamente, dada pela superposição do campo elétrico aplicado e do campo formado pelas cargas superficiais residuais deixadas pela última descarga parcial. Portanto, quando a tensão no local for maior que a rigidez dielétrica do material que compõe o espaço isolante, ocorre novamente outra DP [9].

O segundo modelo abordado por este artigo considera um vazio esférico circundado pelo material dielétrico (também chamado de “void”), cujo campo incidente nesta superfície é aproximadamente uniforme e formado por uma tensão alternada aplicada em um eletrodo metálico. Deste modo, a intensidade do campo elétrico varia proporcionalmente à tensão alternada aplicada, e as cargas liberadas pela primeira descarga são direcionadas para as paredes do “void”. Tem-se então que o campo local é a somatória do campo aplicado no eletrodo com o campo gerado pelas cargas nas paredes da descontinuidade. Quando o campo total no interior da região não contínua for superior ao campo de ruptura, existirá então uma descarga parcial [9].

As descargas parciais estão intimamente relacionadas com as condições dos materiais isolantes de um transformador. Segundo Boczar’s [10], a degradação natural ou precoce das propriedades físico-químicas do óleo isolante, pode acarretar na formação de bolhas de gás nos meios do material isolante. Além disso, o autor define oito tipos de agrupamentos de descargas parciais:

1) Descargas parciais ponto a ponto em óleo isolante: relacionadas a defeitos de isolamento entre duas espiras adjacentes do enrolamento de um transformador;

2) Descargas ponto a ponto em óleo isolante com bolhas: este tipo de falha também é causada por DP entre duas espiras

adjacentes do enrolamento, mas a condição de degradação do isolamento permite a formação de bolhas de gás;

3) Ponto de plano em óleo isolante: defeitos no sistema de isolamento do enrolamento causam descargas parciais entre as partes ligadas à terra do tanque do transformador;

4) Descargas de superfície entre dois eletrodos: é o tipo mais comum de DP, que ocorre entre dois eletrodos isolados com papel-óleo chamado ponto triplo, onde a superfície do eletrodo está em contato com dielétricos sólidos e líquidos;

5) Descargas parciais de superfície entre um eletrodo e um eletrodo multiponto: as descargas relativas a estes elementos são diferentes da anterior no que condiz à distribuição da intensidade do campo elétrico. Ambos eletrodos são isolados com papel-óleo;

6) Múltiplas descargas no plano: vários pontos danificados no isolamento do enrolamento podem causar DP entre eles e as partes aterradas do tanque do transformador;

7) Várias descargas no plano com bolhas de gás: a DP, neste caso, ocorre em vários pontos danificados no isolamento dos enrolamentos e as partes aterradas do tanque do transformador, mas na presença de gases dissolvidos no óleo isolante;

8) Descargas provocadas por partículas: neste caso, o óleo isolante está contaminado com partículas de fibras de celulose formada pelo processo de degradação do isolamento de papel no óleo, devido ao envelhecimento do transformador de potência. Tais partículas estão em movimento constante do óleo, provocando as descargas [10].

III. EMISSÃO ACÚSTICA E AS DESCARGAS PARCIAIS

O fenômeno da descarga parcial se caracteriza por uma perturbação no meio material de um isolante gerada por uma descarga elétrica, semelhante a uma centelha, que preenche parcialmente um material isolante entre dois condutores. Este fenômeno fornece ao meio material uma perturbação caracterizada pela emissão de calor, luz, radiação eletromagnética e ondas de ultrassom na forma de pulsos que se propagam por todas as direções da fonte de descarga [1], [11]. Deste modo, a técnica não invasiva de análise de descargas parciais por emissão acústica toma como base a detecção destas ondas de ultrassom emitidas através do emprego de sensores na parede de aço do transformador. Segundo Markalous [12], as descargas emitem ondas de ultrassom do tipo longitudinais no óleo mineral dos transformadores. Este tipo de onda, presente nos materiais líquidos, se caracteriza pela oscilação na direção de propagação. Quando estas ondas atingem a parede de aço do transformador, sofrem refração e dois tipos de ondas compõe a propagação: as ondas longitudinais e as de cisalhamento. Nestas últimas, diferentemente das longitudinais, o movimento se dá de forma transversal à direção de propagação [12]. Portanto, estas ondas refratadas na parede de

ação do transformador podem ser detectadas através de sensores de emissão acústica. Segundo o estudo de [13], a faixa de frequência do fenômeno possui faixa significativa de 70 kHz a 250 kHz, porém pode chegar a 400 kHz. Sendo assim, este artigo contempla a viabilidade de um sensor piezelétrico de baixo custo na detecção de descargas parciais tendo em vista a faixa de frequência pré-determinada pela literatura.

IV. SENSORES PIEZELÉTRICOS

O efeito piezelétrico ocorre em materiais que, ao serem submetidos a uma tensão mecânica T , produzem uma tensão elétrica de saída através da formação de um dipolo elétrico no material. A polarização produzida pela tensão cria cargas e, portanto, um campo elétrico [14, 15]. Também ocorre o efeito reverso, ou seja, aplicando-se uma tensão elétrica no material piezelétrico surge uma deformação mecânica. As relações construtivas deste tipo de material podem ser determinadas a partir de um capacitor de placas paralelas, com dielétrico não piezelétrico no qual são aplicadas uma força \vec{F} e uma diferença de potencial elétrica U [V], conforme Fig. 1 [14].

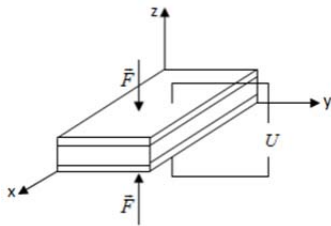


Figura 1. Capacitor plano de placas paralelas utilizado para determinar as relações construtivas de um piezelétrico [14].

A aplicação de uma força \vec{F} produz uma deformação mecânica S e uma tensão mecânica T , de acordo com a lei de Hooke, conforme equação (1).

$$S = sT \quad (1)$$

Uma diferença de potencial aplicada entre as placas do capacitor cria um campo elétrico E , que gera uma densidade de fluxo D conforme a equação (2).

$$D = \epsilon_0 E + P \quad (2)$$

Onde D é a densidade de fluxo elétrico, ϵ_0 é a permissividade no vácuo, cujo valor é 8,85 pF/m, e P o vetor polarização. Entretanto, se o material dielétrico for um elemento piezelétrico, ocorre a interação entre as grandezas elétricas e mecânicas. Desconsiderando os efeitos térmicos e magnéticos, as equações que regem o comportamento deste tipo de material podem ser escritas segundo o critério da energia livre de Gibbs, conforme as Equações (3) e (4) [14], [15].

$$S = s^E T + dE \quad (3)$$

$$D = dT + \epsilon^T E \quad (4)$$

Sendo s^E , a constante elástica do material, d a constante dielétrica e ϵ^T representa a constante de permissividade dielétrica. Por conseguinte, em um material dielétrico existe tanto carga devido a uma tensão mecânica e uma deformação devido a um campo elétrico, se traduzindo em um acoplamento eletromecânico. Estes sensores têm a propriedade de gerar uma tensão elétrica que se relaciona matematicamente com a deformação mecânica do sensor, produzida, por exemplo, pela incidência de uma onda acústica.

V. CARACTERIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO ESPECTRAL DE SENSORES

Um dos métodos mais consolidados para caracterizar a resposta em frequência de um sensor é o teste de quebra do grafite. Este método viabiliza um estudo primário da resposta em frequência de um sensor através da emissão de ondas acústicas gerado por um deslocamento microscópico de massa em um determinado material e é regulamentado pela norma E976-10 [16]. Trata-se de uma forma consolidada que reproduz sinais acústicos de amplo espectro, que utiliza a ponta de um grafite de uma lapiseira pressionada contra um material até que ocorra a quebra do grafite. A pressão exercida pela ponta provoca uma deformação instantânea na superfície do material e, conseqüente, o deslocamento microscópico de massa, emitindo ondas acústicas [16]. Sendo assim, a quebra faz com que ocorra um impulso no material, isto é, uma variação abrupta de pressão em um período infinitesimal de tempo. Teoricamente, o impulso varre um espectro de frequências infinito. Portanto, ao se aplicar uma gama infinita de frequências em um sensor, ele somente dará resposta às frequências que o caracteriza [16]. Ao se aplicar a quebra do grafite em uma chapa quadrada de aço é possível, mediante a aplicação de sensores piezelétricos na chapa, verificar a viabilidade primária do sensor na detecção de descargas parciais em comparação aos resultados obtidos na resposta gerada pelo teste.

VI. O CRITÉRIO DA ENERGIA EM SINAIS DE EMISSÃO ACÚSTICA

O critério da energia tem a finalidade caracterizar sinais de emissão acústica, cujo conteúdo energético e faixa de frequência variam. É um algoritmo sofisticado que detecta os tempos de chegadas de ondas acústicas em sensores, bem como mudanças no sinal ao longo do tempo. A curva de energia $S(i)$ do sinal adquirido x é definida como a soma cumulativa dos valores de amplitude, conforme Equação (5) [17].

$$S(i) = \sum_{k=0}^i \left(x_k^2 - \frac{i * S_N}{N} \right) \quad (5)$$

Na equação (5), i é uma variável de contagem e a curva instantânea de energia depende da energia total do sinal S_N e do número de amostras N . O mínimo global desta curva corresponde o tempo de início de um sinal, ou seja, o tempo pela qual um sensor é excitado inicialmente por ondas de ultrassom. Esta ferramenta pode ser caracterizada como uma forma de se mensurar um sinal, pois sua intensidade de energia está diretamente relacionada com a carga aplicada ao sensor [17].

VII. O CRITÉRIO RMS EM SINAIS DE EMISSÃO ACÚSTICA

O critério RMS é um dos mais importantes para que se possa avaliar o sinal a ser aplicado à saída do sensor de emissão acústica. Esta abordagem pode ser considerada como uma quantidade física de intensidade de som e está diretamente relacionada com a carga aplicada ao sensor, fazendo com que seja um valor muito interessante para ser monitorado. O valor RMS pode ser expresso pela Equação (6), sendo que T é o tempo de integração, N o número discreto de amostras no intervalo T , E é a tensão elétrica do sinal e E_i a tensão elétrica da amostra i . Para o caso de sinais acústicos, que são não periódicos, o sinal é janelado e o tempo de integração é definido como o valor da própria janela, se tratando, então, de uma abstração matemática do valor RMS verdadeiro. Trata-se de um método que avalia a carga acústica aplicada ao sensor [18].

$$V_{eficaz} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (E(t))^2 dt} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N E_i^2} \quad (6)$$

VIII. METODOLOGIA

A Fig. 2 ilustra o sensor utilizado nesta pesquisa. Inicialmente, o sensor foi acoplado em uma chapa de aço de 2 mm de espessura através de uma parafina oleaginosa. O teste do grafite foi realizado e, por meio do sinal de emissão acústica gerado pelo teste, foi realizada a análise do comportamento da densidade espectral de potência do sensor. Um oscilógrafo com a taxa de aquisição de 20 MS/s foi utilizado para aquisitar os dados do teste. O sensor teve seu sinal de saída amplificado por um circuito com frequência de operação de até 500 kHz. O teste foi executado 10 vezes e constatou-se a repetibilidade dos resultados. A partir disso, verificou-se a viabilidade do emprego do sensor para o fenômeno de descargas parciais, cuja faixa mais significativa se encontra entre 70 kHz e 250 kHz, podendo chegar a 400 kHz [13].

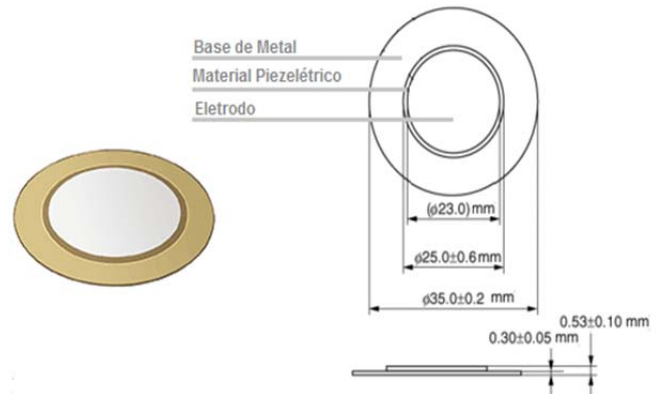


Figura 2. Sensor piezelétrico de baixo custo utilizado no estudo

Após, para a identificação do fenômeno de descargas parciais, construiu-se um simulador de descargas, composto por uma fonte de tensão aplicada a eletrodos de cobre espaçados em 0,5 mm. Como gerador de alta tensão foi empregado um transformador de potencial com relação de espiras 70:1 alimentado por um transformador variável, com a saída aplicada aos eletrodos para geração das descargas parciais. A aplicação de tensões em torno de 70 V no primário do transformador de potencial resultou na aplicação de tensões próximas a 5 kV no conjunto de eletrodos imerso em óleo mineral isolante, produzindo descargas parciais esporádicas através de seu *gap*. O sensor foi acoplado em uma das faces laterais do transformador, passando pelo mesmo processo de amplificação realizado no teste do grafite. A aquisição de dados foi realizada por um oscilógrafo cuja taxa de amostragem foi de 20 MS/s. Um filtro digital passa-faixa de 20 kHz a 400 kHz foi implementado a fim de garantir somente as frequências provenientes da descarga parcial, como também eliminar baixas frequências provenientes de vibrações externas. O sinal de tensão da fonte de DPs também foi aquisitado a fim de analisar o comportamento elétrico da descarga. O teste foi realizado para 10 descargas. A Fig. 3 ilustra resumidamente o experimento realizado.

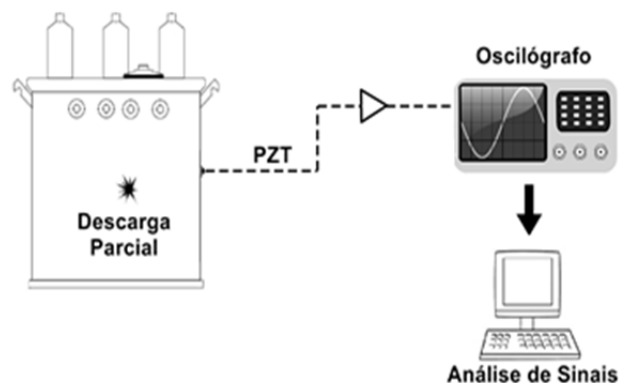


Figura 3. Experimento realizado para a identificação de descargas parciais.

Com os dados coletados foi realizada a análise de tempo e frequência dos sinais de emissão acústica gerados pela descarga parcial a fim de validar o sensor de baixo custo para tal aplicação. Na análise de tempo, verificou-se o comportamento de energia e RMS do sinal. A análise em frequência se deu empregando-se o algoritmo da

Transformada Rápida de Fourier (FFT) como também pela Densidade Espectral de Potência do sinal (PSD). Como se verificou a repetibilidade dos resultados, este artigo mostrará apenas a análise para uma descarga parcial.

IX. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Fig. 4 apresenta o resultado obtido pelo teste do grafite por meio da análise da densidade espectral do sinal. Dois pontos foram destacados: as atenuações de 3 dB e 10 dB como também a atenuação pela qual a frequência é de 400 kHz. A Tabela I mostra os valores destacados.

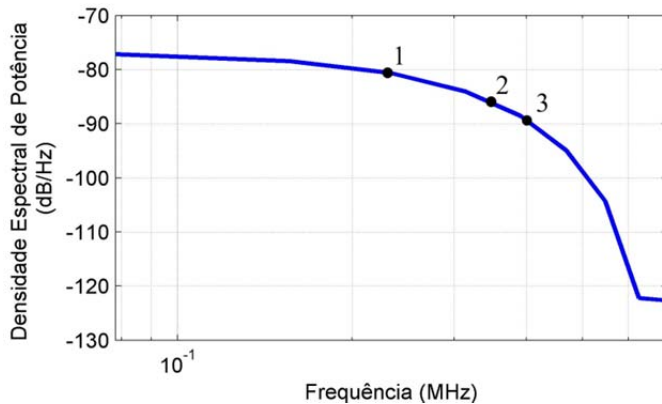


Figura 4. Densidade Espectral do teste do grafite.

TABELA I

PONTOS DESTACADOS DE DENSIDADE ESPECTRAL PARA O TESTE DO GRAFITE

Ponto	Atenuação (dB/Hz)	Densidade Espectral (dB/Hz)	Frequência (kHz)
1	3	80.48	225
2	10	87.48	350
3	12.5	90	400

Através da análise espectral, observa-se que o sensor piezelétrico de baixo custo apresenta, para o teste realizado em uma chapa de aço de 2mm de espessura, um amplo espectro cuja frequência de corte (atenuação de 3 dB) se apresentou em torno de 225 kHz como mostra a Tabela I e a Fig. 5. O sensor apresentou uma atenuação de 10 dB para a frequência de 350 kHz e, para a frequência de 400 kHz, apresentou uma atenuação de 12,5 dB. Mediante a análise do ponto 1, o sensor apresenta boa sensibilidade nas frequências mais significativas de uma descarga parcial. No ponto 3, embora a atenuação seja significativa, o sensor pode ser confirmado para a identificação de descargas parciais que, segundo a literatura pode apresentar uma faixa de até 400 kHz [13].

A Fig. 5 representa o sinal elétrico da descarga parcial proveniente da leitura da tensão no eletrodo. Através da análise da Fig. 5, observa-se que o fenômeno de descarga parcial produz um surto muito significativo de tensão em um período de tempo infinitesimal, de duração menor que 1us, conforme visto nas referências [2-5]. Inicialmente foi aplicado 5 kV no eletrodo e, na medida em que o fenômeno ocorre, 30 kV de tensão são solicitados à fonte.

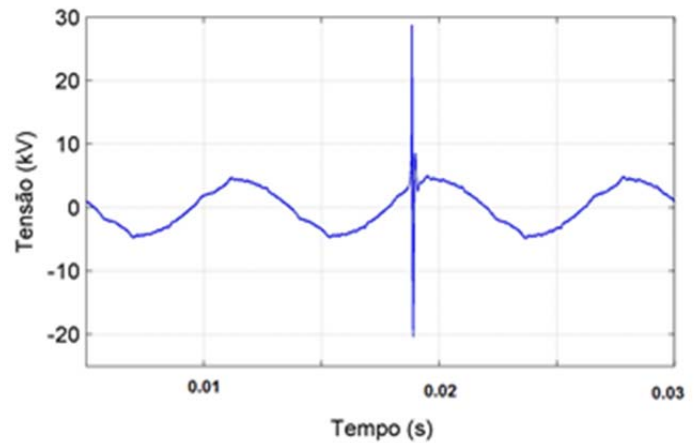


Figura 5. Tensão no eletrodo mediante descarga parcial.

Observou-se também, conforme análise das outras 9 descargas, que este surto ocorreu apenas no primeiro e terceiro semiciclos, isto é, no período de polarização do eletrodo, quando a taxa de variação do módulo da tensão é crescente. A Fig. 6 e Fig. 7 apresentam, respectivamente, o sinal de emissão acústica gerado pela descarga parcial, bem como a energia segundo o critério abordado na seção VI.

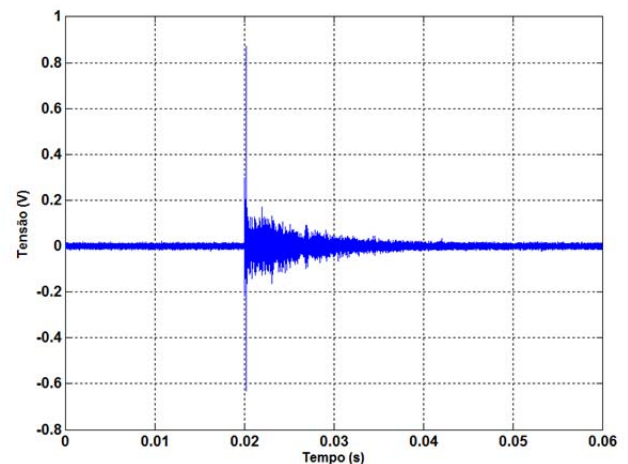


Figura 6. Sinal de emissão acústica fornecido pelo sensor.

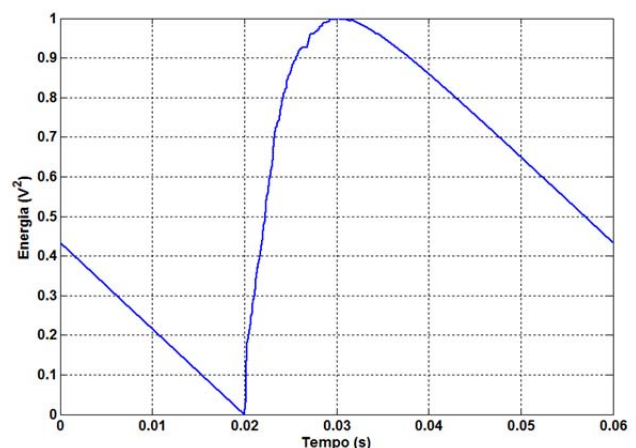


Figura 7. Comportamento da energia do sinal.

Na análise no domínio do tempo verifica-se que o sensor captou a emissão acústica gerada pela descarga parcial. Observa-se que o instante de pico da Fig. 6, que ocorreu em

0,02 s, está bem próximo do tempo que ocorre o transitório no sinal elétrico de tensão no transformador de alimentação do eletrodo, que ficou em torno de 0,019 a 0,02 s. A diferença de tempos se deve ao atraso gerado pela propagação da onda no transformador até que a mesma atinja o sensor. O critério da energia confirma o início do sinal dado em 0,02s, tendo em vista que o ponto de mínimo se deu neste tempo, indicando, então, o início da excitação do sensor pela onda acústica. Tal descontinuidade no gráfico de energia indica o tempo de chegada da onda no sensor. Já a máxima energia se dá no ponto de 0,03 segundos.

A Fig. 8 indica a análise por valor RMS para o mesmo sinal de descarga parcial. Utilizando uma janela de 1 ms, pode-se observar que o valor RMS é aproximadamente nulo até 2 ms. Neste instante, há um transitório no sinal que culmina com seu valor máximo. A curva também caracteriza a carga acústica empregada ao sensor pelo fenômeno de descarga parcial. Sendo assim, observa-se que, depois de seu pico máximo, há um decaimento até aproximadamente 4 ms, indicando que a excitação do sensor por ondas geradas pela descarga parcial durou 2 ms. A atenuação de 70,7% do valor de pico apresentado pela curva, ocorreu no valor de 0,042 V_{RMS} , indicando um instante de tempo de aproximadamente 2,4 ms. Pode-se concluir que o sinal teve uma atenuação de 3dB (70,7% do pico) em 0,4 ms depois de seu pico e teve seu valor atenuado para 10% de seu valor de pico, ou seja, 0,006 V, em aproximadamente 2 ms.

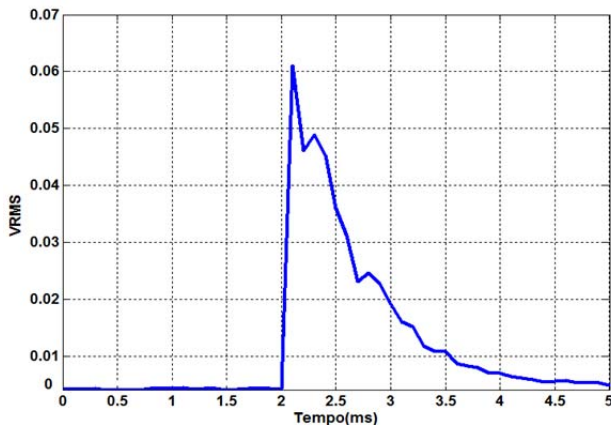


Figura 8. Valor RMS do sinal de descarga parcial.

A análise dos sinais no domínio da frequência se deu aplicando-se no sinal a Transformada Rápida de Fourier, indicada na Fig. 9, e pela Densidade Espectral de Potência, como indica a Fig. 10. Os pontos destacados na Fig. 10 estão indicados na Tabela II.

A análise de sinais provenientes do algoritmo da transformada rápida de Fourier mostrou que o sensor de baixo custo, para o fenômeno de descargas parciais, tem maior sensibilidade em frequências abaixo de 150 kHz, tendo sua resposta atenuada na faixa superior a este valor. No entanto, a densidade espectral do sinal indica um decaimento de 3 dB somente na frequência de 260 kHz, apresentando então, uma banda de corte coerente com a densidade espectral do sinal da descarga parcial visto na literatura.

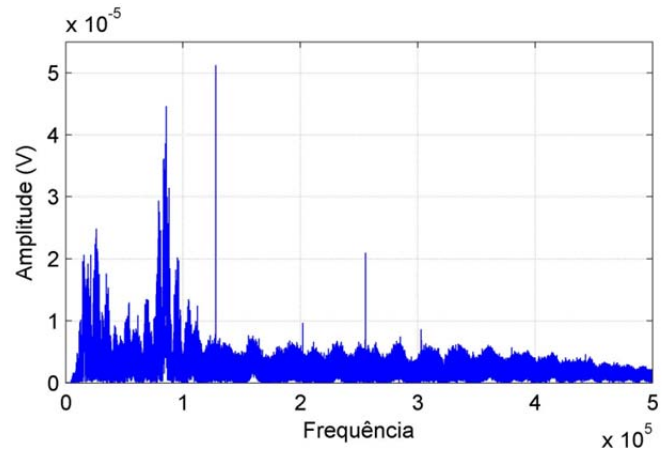


Figura 9. Espectro de frequência do sinal.

Para a faixa limite considerada também na literatura, que é de 400 kHz, a Fig. 10 indicou um decaimento de 6,4 dB, indicando que este sensor tem um grande potencial na identificação de descargas parciais.

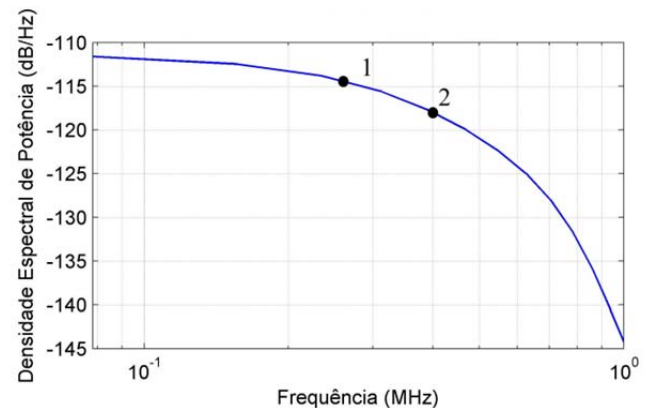


Figura 10. Densidade Espectral de Potência do sinal de descarga parcial.

TABELA II
PONTOS DESTACADOS DE DENSIDADE ESPECTRAL PARA O SINAL DE DESCARGA PARCIAL

Ponto	Atenuação (dB/Hz)	Densidade Espectral (dB/Hz)	Frequência (kHz)
1	3	114,6	260
2	6,4	118	400

IX. CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

A pesquisa em questão apresentou um sistema de baixo custo para a identificação de descargas parciais em transformadores de potência, isolados a óleo mineral.

É fato que a existência de descargas parciais está intimamente ligada à condição funcional da isolamento do transformador. Sendo assim, este trabalho abordou a técnica de utilização de sensores piezelétricos de baixo custo na identificação de descargas parciais e, através da análise abordada, pode-se concluir que o sensor possui um potencial significativo para o monitoramento de emissão acústica gerada por este defeito. Portanto, pode-se considerar que:

- i) O baixo custo e a simplicidade de utilização do sensor estudado são extremamente vantajosos em relação aos sensores consolidados no mercado;
- ii) Abre-se, então, a possibilidade de expansão de aplicações que possam utilizar este sensor, como, por exemplo, a identificação de descargas parciais em transformadores encapsulado em resina epóxi.

Para trabalhos futuros, sugere-se a possibilidade do desenvolvimento de ferramentas computacionais que permitam a localização de uma descarga em transformadores de potência, bem como outros equipamentos sujeitos a tais fenômenos.

REFERÊNCIAS

- [1] Castro, B.; Clerice, G.; Ramos, C.; Andreoli, A.; Baptista, F.; Campos, F.; Ulson, J. Partial Discharge Monitoring in Power Transformers Using Low-Cost Piezoelectric Sensors. *Sensors* (Basel), v. 16, p. 1266, 2016.
- [2] Mohammadi, E. et al (2009). Partial Discharge Localization and Classification Using Acoustic Emission Analysis In Power Transformer. In: Proceedings of the 31st International Telecommunications Energy Conference, INTELEC, 18-22 October, Incheon, Korea.
- [3] Silva, I. N. ; Gonzales, C. G. ; Flauzino, R. A. ; Silva, P. G. ; Fernandes, R. A. S. ; Silveira, E. ; Spatti, D. H. ; Ulson, J. A. C. . "Intelligent Systems for the Detection of Internal Faults in Power Transmission Transformer"s. In: Petrica Vizureanu. *Advances in Expert Systems*. Ied.Rijeka, Croácia: Intech 2012, v. 1, p. 3-27.
- [4] Danouj, B.; Tahan, S. A.; David, E. "Using a new generation of piezoelectric sensors for partial discharge detection" In: Elsevier Measurement, vol 46, n.7, pp. 660-666, 2013.
- [5] Lundgaard, L. E. "Partial discharge. XIV. Acoustic partial discharge detection-practical application", *IEEE Electrical Insulation Magazine*, Volume 8, Issue 5, Sept.-Oct. 1992, pp. 34 – 43.
- [6] IEC Publication 60270 (2000). High-voltage test techniques - Partial discharge measurement, Ed. 2.
- [7] Krueger, F. H. *Partial Discharge Detection in High-Voltage Equipment*. 1. ed. London: Butterworths, 1989.
- [8] Bartnikas, R. 2005 A Comment Concerning the Rise Times of Partial Discharge Pulses. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 12(1), 196-202.
- [9] Silva, G. C. Descargas parciais estimuladas por raios-x contínuo e pulsado em materiais dielétricos: similaridades e diferenças. 2005. 148f. Tese de Doutorado – Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2005.
- [10] Boczar, T. et al (2009). Application Possibilities of Artificial Neural Networks for Recognizing Partial Discharges Measured by the Acoustic Emission Method. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 16(1), 214-223.
- [11] Sarathi, R.; Singh, P. D.; Danikas, M. G. "Characterization of partial discharges in transformer oil insulation under ac and dc voltage using acoustic emission technique". *Journal of Electrical Engineering*. Vol. 58, pp 91-97, 2007.
- [12] Markalous, S. M. "Detection and location of partial discharges in power transformers using acoustic and electromagnetic signals". 128p. PhD Thesis – Stuttgart University. Stuttgart, 2006. ISBN 978-3-933893-97-0
- [13] Kweon, D. J.; Chin, S. B.; Kwak, H. R. "The analysis of ultrasonic signals by partial discharge and noise from the transformer", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 20, n. 6, pp. 1976-1983, 2005.
- [14] Areny, R. P.; Webster, J. G. *Sensors and Signal Conditioning*. 2ed. New York: John Wiley & Sons, 2000. 587P.
- [15] Baptista, F. G. Uma contribuição aos sistemas de monitoramento de integridade estrutural baseados na impedância eletromecânica. 2010. 91 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica). Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista. Ilha Solteira, Brasil. 2010.
- [16] Sause, M. G. R. Investigation of pencil lead breaks as acoustic emission sources. *Journal of Acoustic Emission*, 2011. 29: p.184-196
- [17] Markalous, S.; Tenbohlen, S.; Feser, K. Detection and Location of Partial Discharges in Power Transformers using Acoustic and Electromagnetic

Signals, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 15, n. 6, pp. 1576-1583, 2008

- [18] Aguiar, P. R.; Bianchi, E.C.; Canarim R. C. Monitoring of Grinding Burn by Acoustic Emission. In: Wojciech Sikorski. (Org.). *Acoustic Emission*. Ied.Rijeka, Croatia: Intech, v. 1, pp. 341-364, 2012.



Bruno Albuquerque de Castro é mestre e Engenheiro Eletricista formado pela Universidade Estadual Paulista - UNESP, campus de Bauru. Atualmente é discente do programa de doutorado em Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia da Unesp, campus de Bauru. Tem experiência profissional como colaborador das empresas Motorola do Brasil, Máquinas Agrícolas Jacto. Possui campo de pesquisa na área de sistemas inteligentes, instrumentação, predição de falhas em transformadores, monitoramento de integridade de estruturas e dispositivos pelo método da emissão acústica.



Guilherme Augusto Marabezzi Clerice nasceu em Botucatu em 1987. Graduiu-se em Engenharia de Controle e Automação pela Universidade Paulista, campus Bauru em 2012 e obteve título de mestre em engenharia elétrica em 2014 pela Unesp-Feb. Atualmente é professor adjunto do Instituto de Ciências Exatas e Tecnologia da UNIP campus Bauru. A Seu campo de pesquisa concentra-se nas áreas de sistemas inteligentes, processamento de sinais, qualidade de energia elétrica e máquinas elétricas.



André Luiz Andreoli graduou-se em Engenharia Elétrica pela FEB/UNESP em 1997, obteve o título de mestre em engenharia industrial pela UNESP em 2005, e o título de doutor em engenharia elétrica pela Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP) em 2011. Atualmente é professor assistente doutor do Departamento de Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia de Bauru, da Universidade Estadual Paulista (FEB/UNESP). Seu campo de pesquisa concentra-se nas áreas de eletrônica industrial, qualidade da energia elétrica, máquinas elétricas, acionamento de máquinas elétricas e sistemas inteligentes.



Fernando de Souza Campos nasceu em 1971. Mestre pela Universidade Federal de Santa Catarina em 1995 e um doutor pela Universidade Estadual de Campinas em 2008. Atualmente é professor assistente no Departamento de Engenharia Elétrica, UNESP. Pesquisador de design e modelagem de sensores de imagem CMOS.



José Alfredo Covolan Ulson nasceu em Bauru em 1966. Graduiu-se em Engenharia Elétrica pela Unesp – Campus Bauru em 1991 e obteve o título de mestre e doutor pela Unesp em 1997 e 2002, respectivamente. Atualmente é professor assistente doutor no Departamento de Engenharia Elétrica. Seu campo de pesquisa concentra-se nas áreas de sistemas inteligentes e identificação de sistemas aplicados à controle de processos e sistemas elétricos de potência.