

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE SENSORES DE EMISSÃO ACÚSTICA PARA DIAGNÓSTICO ANTECIPATIVO DE FALHAS EM TRANSFORMADORES POR MEIO DE TÉCNICAS DE PROCESSAMENTO COMPUTACIONAL DE SINAIS

Danilo de M. Brunini, dbrunini@gmail.com¹

Bruno A. Castro, bruno.castro@feb.unesp.br¹

Vitor P. Luiz, vitor_padovan@hotmail.com¹

José A. C. Ulson, ulson@feb.unesp.br¹

Fabrizio G. Baptista, fabriciomb@feb.unesp.br¹

André L. Andreoli, andreoli@feb.unesp.br¹

Felipe A. Alexandre, felipeapalexandre@hotmail.com¹

¹UNESP, FEB - Departamento de Engenharia Elétrica, Avenida Engenheiro Luiz Edmundo Carrijo Coube, 14-01, CEP 17033-360, Bauru, SP

Resumo: Este artigo apresenta uma avaliação de desempenho de um sensor de emissão acústica de baixo custo na identificação de descargas parciais em transformadores de potência, que utilizam óleo mineral em seu interior, através de um método não destrutivo. O sensor de baixo custo utilizado foi o MFC (Macro Fiber Composite) tipo P1, que é um sensor piezelétrico desenvolvido pela NASA em 1996. Também foi utilizado um sensor de emissão acústica comercial, o R15I-AST da PASA (Physical Acoustics South America), como referência para a avaliação do sensor de baixo custo. Foram induzidas descargas parciais em um transformador de 30kVa, por meio de um eletrodo, e os sinais de emissão acústica captados por ambos sensores foram comparados mediante o emprego de métricas de processamento de sinais, às quais são: RMS, Energia, Transformada Rápida de Fourier e Densidade Espectral de Potência. Os sinais foram analisados e constatou-se que o sensor de baixo custo do tipo MFC-P1, embora tenha uma sensibilidade menor em relação ao sensor consolidado, possui um grande potencial para o diagnóstico de descargas parciais em transformadores de potência. Sendo assim torna-se factível a ampla aplicação desta técnica de visão computacional em ambiente industrial.

Palavras-chave: diagnóstico de falhas, visão computacional, transformadores, emissão acústica, sensor de baixo custo.

1. INTRODUÇÃO

Transformadores de potência são equipamento de alto custo essenciais para a operação do sistema elétrico. Na operação de transformadores de potência, alguns fatores tais como sobrecarga, cargas não-lineares e chaveamento podem causar a degradação do sistema de isolamento o que permite a ocorrência de descargas parciais internas, de acordo com Zachariades et al (2016). Descargas Parciais (DPs) são fenômenos aleatórios que possuem influência direta nas falhas em transformadores bem como nas interrupções no sistema de potência. Neste contexto, sistemas de identificação de descargas parciais tem se estabelecido como ferramentas úteis no auxílio à manutenção corretiva em transformadores de potência e têm contribuído com a redução dos custos envolvidos nessa tarefa. Vários trabalhos (Shafiq et al, 2013; Castro et al, 2016 e Biswas et al, 2012) mostram que o monitoramento online de DP pode reduzir as falhas fatais causadas pelo dano ao sistema de isolamento.

Devido à necessidade de monitoração em transformadores, vários métodos foram desenvolvidos tais como o método elétrico, método óptico, análise química e emissão acústica, conforme mostrado por Castro et al (2016). O método acústico é baseado na detecção de ondas ultrassônicas geradas pelas DPs utilizando sensores de emissão acústica instalados na parede do transformador. A grande vantagem deste método é devido ao fato do mesmo ser não-invasivo o que permite o monitoramento de descargas parciais com o transformador de potência em serviço e também localiza o ponto onde ocorreu a descarga parcial. Como resultado, o monitoramento online e contínuo de DPs contribui decisivamente para o aumento da qualidade do fornecimento de energia elétrica e redução de gastos com manutenção corretiva devido a paradas repentinas.

Há muitos tipos de sensores de emissão acústica consolidados na indústria e no meio acadêmico. Entretanto, estes sensores possuem alto custo financeiro, o que limita o uso desta técnica no diagnóstico de falhas em transformadores, de acordo com Castro et al (2016). Neste contexto, o objetivo deste artigo é apresentar um método não-invasivo de baixo custo para detecção de descargas parciais através da aplicação de um sensor *Macro Fiber Composite* (MFC) tipo P1. O MFC é um sensor piezelétrico de baixo custo frequentemente utilizado no monitoramento da integridade de estruturas mecânicas e civis. O sensor foi conectado na parede externa do transformador a fim de detectar as ondas mecânicas geradas pelas descargas parciais. Para validar a técnica, o sinal do sensor MFC tipo P1 foi comparado com o sinal do

sensor R15I-AST, da *Physical Acoustics South America* – PASA®. Este é um sensor consolidado em aplicações acadêmicas e industriais para detecção de DPs.

Neste artigo, a viabilidade de alguns sensores de emissão acústica em identificar descargas parciais em transformadores é estudada pela análise das respostas nos domínios do tempo e da frequência quando eles são sujeitos à mesma descarga parcial. O restante deste artigo é organizado conforme a seguir: a Seção 2 apresenta a teoria básica de descargas parciais; a Seção 3 trata do sensor piezelétrico MFC; a Seção 4 trata dos materiais e métodos; a Seção 5 discute os resultados e finalmente as conclusões são apresentadas na Seção 6.

2. MEDIÇÃO ACÚSTICA DE DESCARGAS PARCIAIS EM TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA

Há uma grande preocupação a respeito da integridade dos transformadores de potência durante seu ciclo de vida porque ser o equipamento mais caro e crítico para o sistema de potência. Dessa forma, há uma importância significativa em monitor as condições de isolamento do transformador de potência. A deterioração da isolamento se inicia a partir de alguns fatores tais como sobrecarga, transientes de tensão devido ao chaveamento e fatores atmosféricos e cargas não-lineares, o que degrada material de isolamento do transformador de potência. Tais fatores criam um ambiente ideal para a incidência de descargas parciais que podem comprometer completamente a vida útil do transformador, de acordo com vários trabalhos (Zachariades et al, 2016; Shafiq et al, 2013 e Castro et al, 2016).

Um dos principais métodos para avaliar a integridade de um equipamento elétrico é através do monitoramento de descargas parciais. A norma IEC 60270 (2000) define descarga parcial como “descargas elétricas localizadas que preenchem parcialmente o isolamento entre condutores”. Vários trabalhos (Álvarez et al, 2015; Sarathi et al, 2007 e Stone et al, 2005) mostram que geralmente estes materiais (isolantes) são degradados ou possuem espaços vazios o que gera uma descontinuidade no material que sob ação de um campo elétrico significativo dá origem à DP, criando um pulso com duração menor que 1 µs que libera energia sob forma de calor, luz, radiação eletromagnética e ondas de pressão em todas as direções.

Dentro do transformador de potência, quando uma descarga parcial ocorre, as ondas longitudinais se movem através do óleo mineral e se refratam nas superfícies do tanque de aço produzindo ondas longitudinais e transversais. Consequentemente, estas ondas refratadas na superfície de aço por ser detectadas através de sensores de emissão acústica acoplados à parede de aço do transformador, conforme Markalous et al (2008).

3. PIEZOELETRICIDADE E SENSORES MFC

A propriedade que alguns dielétricos têm de criar uma polarização quando sujeitos a tensões mecânicas é chamada de piezoeletricidade. Esta polarização produz uma tensão de saída através da formação de um dipolo elétrico no material, de acordo com Meitzler et al (1988). O efeito reverso também ocorre: uma deformação mecânica surge ao ser aplicada uma tensão elétrica entre os dois lados do material piezelétrico.

Segundo Meitzler et al (1988), em piezoeletricidade, as grandezas envolvidas são tensoriais, não obstante algumas direções particulares dos cristais, os vetores estão na mesma direção. As relações das grandezas escalares são dadas por Eq. (1) e Eq. (2) respectivamente:

$$D_i = d_{ikl}d_{kl} + \varepsilon_{ik}^T E_k \quad (1)$$

$$S_{ij} = s_{ijkl}^E T_{kl} + d_{kij} E_k \quad (2)$$

onde E_k é a componente de campo elétrico, s_{ijkl}^E é a constante elástica do material em campo elétrico constante, ε_{ik}^T é a componente de permissividade dielétrica em tensão constante, d_{ikl} e d_{kij} são constantes piezelétricas, D_i é a componente de densidade de fluxo elétrico, S_{ij} é a componente de deformação mecânica, T_{kl} é a componente do vetor de tensão. Os índices i, j, k, l = 1,2,3, representam as direções de polarização do campo elétrico para o material dielétrico. Os numerais “1”, “2” e “3” indicam respectivamente as polarizações normal, transversal e longitudinal do material no plano do sensor.

As equações piezelétricas mostram que há uma carga elétrica devido a um stress mecânico e uma deformação devido à um campo elétrico. Assim pode se concluir que este acoplamento eletromecânico em sensores piezelétricos tem a propriedade de gerar uma tensão elétrica quando excitados por uma deformação mecânica causada por uma onda acústica de descarga parcial. Normalmente, os sensores industrializados possuem alto custo, tais como o R15I-AST que é um sensor consolidado para aplicações de emissões acústicas, conforme Physical Acoustics (2016). Este sensor é encapsulado em um invólucro de metal e incorpora uma entrada de baixo ruído, um pré-amplificador e um filtro, de acordo com a Fig. (1).

O sensor piezelétrico utilizado nesta pesquisa é do tipo MFC (*Macro Fiber Composite*). Segundo Smart Material (2016), o MFC é um sensor de baixo custo que foi inventado pela NASA em 1996. Ele é composto de piezelétricos retangulares com hastes de cerâmica prensados entre camadas de adesivo, eletrodos e filme de polímero como mostra a

Fig. (1). Os eletrodos são ligados ao filme por um padrão que irá transferir diretamente a tensão aplicada para as hastes em forma de fita. Por ser muito fino, pode ser utilizado em diferentes tipos de estruturas ou incorporado em uma estrutura composta. O modelo do sensor do tipo MFC utilizado nesta pesquisa é o M2814-P1, que utiliza o efeito d33 onde o material piezelétrico somente é polarizado longitudinalmente com relação ao seu plano. A capacitância deste sensor é 1.15 nF.

Os sensores piezelétricos de baixo custo têm sido aplicados em muitos estudos científicos de monitoramento de integridade de estruturas e bons resultados têm sido reportados, de acordo com vários trabalhos (Almeida et al, 2015; Ilg et al, 2013 e Baptista, 2014). Conforme proposta, este estudo apresenta a viabilidade de se utilizar o sensor MFC-P1 na identificação de descargas parciais através do método de emissão acústica. O sensor convencional (R15I-AST) e o MFC são mostrados na Fig. (1).

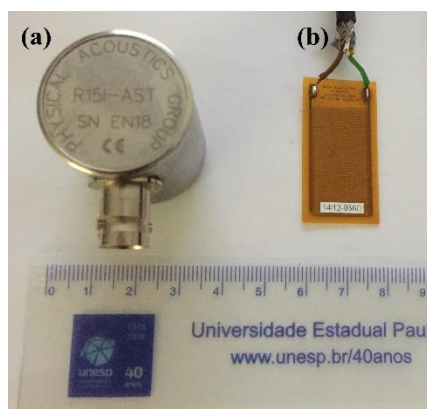


Figura 1. Sensores utilizados neste estudo: (a) Sensor convencional R15I-AST; (b) Sensor de baixo custo MFC tipo P1.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

O objetivo desta pesquisa é avaliar o desempenho de um sensor MFC de baixo custo para monitoramento descargas parciais. A Fig. (2) mostra o fluxograma desenvolvido para o comparativo entre os sensores MFC-P1 e R15I-AST.

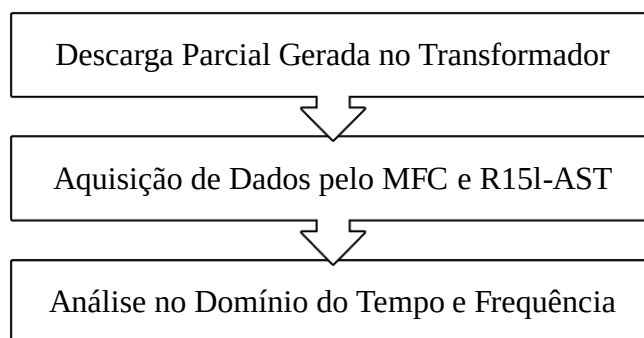


Figura 2. Fluxograma de Análise de Sinal.

4.1. Montagem e Aquisição de Dados da DP

Os sensores MFC-P1 e R15I-AST foram fixados na parede do transformador utilizando parafina líquida a fim de analisar os sinais das descargas parciais. O dispositivo é um transformador de distribuição cuja potência é 30 KVA. Descargas parciais foram geradas no óleo do tanque do transformador pela aplicação de uma tensão de 7 KV em um eletrodo de cobre. A montagem experimental é mostrada na Fig. (3).

A aquisição de dados foi realizada utilizando um osciloscópio com taxa amostragem de 10MS/s. Um amplificador de instrumentação com resposta em frequência até 500 kHz e ganho de 28 dB foi usado para amplificar o sinal do sensor MFC-P1. Além destes amplificadores, foi utilizado um filtro anti-aliasing. Em adição, um filtro passa baixa com frequência de corte de 20 kHz foi utilizado para eliminar frequência.



Figura 3. Instalação dos sensores na parede do transformador.

4.2. Parâmetros de Processamento de Sinal

Os dados de emissão acústica de DPs providos pelo osciloscópio permitem a análise no domínio do tempo e da frequência. Várias rotinas foram desenvolvidas no ambiente Matlab para a análise dos sinais, tais como critério de energia, RMS (*Root Mean Square*), FFT (*Fast Fourier Transform*) e PSD (*Power Spectrum Density*). As métricas de critério de energia, RMS e FFT foram associadas com análises básicas de estatística tais como coeficiente de correlação e aproximação linear. O sensor convencional (R15I-AST) serviu de referência para a identificação de descargas parciais.

4.2.1. Critério de Energia

Segundo Markalous et al (2008), o propósito do critério de energia é caracterizar a emissão acústica, cujo range de frequência e conteúdo energético tem variação. Este critério permite a detecção do tempo de chegada de ondas acústicas nos sensores, bem como mudanças no sinal ao longo do tempo a partir de um algoritmo sofisticado. A curva de energia S_i de um sinal amostrado x é definida como a soma cumulativa dos valores de amplitude como mostrado na Eq. (3):

$$S(i) = \sum_{k=0}^i \left(x_k^2 - \frac{i \cdot S_N}{N} \right) \quad (3)$$

onde i é uma variável de contagem e a curva de energia instantânea depende do total de energia do sinal S_N e o número de amostras N . O mínimo global desta curva corresponde ao tempo de início de um sinal, isto é, o tempo para o qual o sensor é excitado inicialmente pelas ondas de ultrassom. A intensidade do sinal de energia é diretamente relacionada à carga aplicada ao sensor e, devido a este fato, este critério pode ser qualificado como um meio de caracterizar e mensurar um sinal.

4.2.2. RMS (*Root Mean Square*)

De acordo com Aguiar (2012), RMS é um dos critérios mais importantes para avaliar o sinal adquirido pelo sensor de emissão acústica. Esta abordagem por ser considerada como uma quantidade física de intensidade de som e está diretamente relacionada à carga aplicada ao sensor, o que a torna um valor muito interessante a ser monitorado. O valor RMS pode ser expresso por Eq. (4):

$$E_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N E_i^2} \quad (4)$$

onde T é o tempo de integração (T foi considerado 1 ms neste artigo), N é o número de amostras discretas no intervalo T , E é sinal de tensão e E_i é a tensão da amostra i .

4.2.3. FFT (*Fast Fourier Transform*)

Segundo Oppenheim e Schaffer (2010), a Transformada Rápida de Fourier, ou FFT (*Fast Fourier Transform* em inglês), é um algoritmo eficiente para calcular a transformada discreta de Fourier (DFT), onde o número de processamentos necessários para N passa de $2N^2$ para $2N \cdot \lg(N)$, onde $\lg(N)$ é um logaritmo na base 2.

Existem inúmeras implementações como: mapeamento em índices multidimensionais; algoritmo Cooley-Turkey; FFT por dizimação no tempo; e FFT por dizimação em frequência.

A FFT por dizimação no tempo descompõe a sequência de tamanho N em sequências sucessivas menores.

A FFT por dizimação em frequência é a mais comum e mais eficiente entre outras implementações, a qual utiliza todas as dimensões do mesmo tamanho e calcula uma DFT de tamanho N, em termos de duas DFT's de tamanho N/2.

4.2.4. PSD (Power Spectrum Density)

Densidade espectral de potência, ou PSD (*Power Spectrum Density* em inglês), é quando o conceito de potência média é definido considerando o ruído contido em uma banda de frequência. É uma ferramenta muito útil na análise de ruídos em circuitos.

Quando um sinal com espectro $S_x(f)$ é aplicado a um sistema linear e invariante no tempo com uma função de transferência $H(s)$, então o sinal de saída do espectro será dado pela Eq. (5):

$$S_y(f) = S_x(f)|H(f)|^2 \quad (5)$$

Onde $H(f) = H(s=2\pi if)$.

4.2.5. Coeficiente de Correlação

O coeficiente de correlação, Eq. (6), é calculado usando um sinal de referência, que neste caso é o sinal do R15I-AST (x_{RS}), e um sinal de outro sensor para comparação, que é o do MFC tipo P1 (x_P), o que permite visualizar o grau de semelhança entre eles. Assim, este método é utilizado para validação do sensor MFC para identificação de descargas parciais, de acordo com Baptista et al (2011).

$$CC = \sum_{k=0}^n \frac{(x_{RS}(k) - \bar{x}_{RS}(k)) - (x_P(k) - \bar{x}_P(k))}{\sqrt{(x_{RS}(k) - \bar{x}_{RS}(k))^2} - \sqrt{(x_{RS}(k) - \bar{x}_P(k))^2}} \quad (6)$$

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção serão apresentados e discutidos os resultados do comparativo entre os sinais de emissão acústica das descargas parciais nos dois sensores, no domínio do tempo e da frequência.

5.1. Resposta no Domínio do Tempo

A resposta no domínio do tempo foi realizada através de várias rotinas de forma a comparar o comportamento acústico dos dois sensores utilizados nesta pesquisa. A análise do sinal puro não é suficiente para concluir que o sensor de baixo custo tem potencial para identificar ondas de ultrassom de descargas parciais. Os sinais de descargas parciais recebidos pelo R15I-AST e pelo MFC são mostrados na Fig. (4).

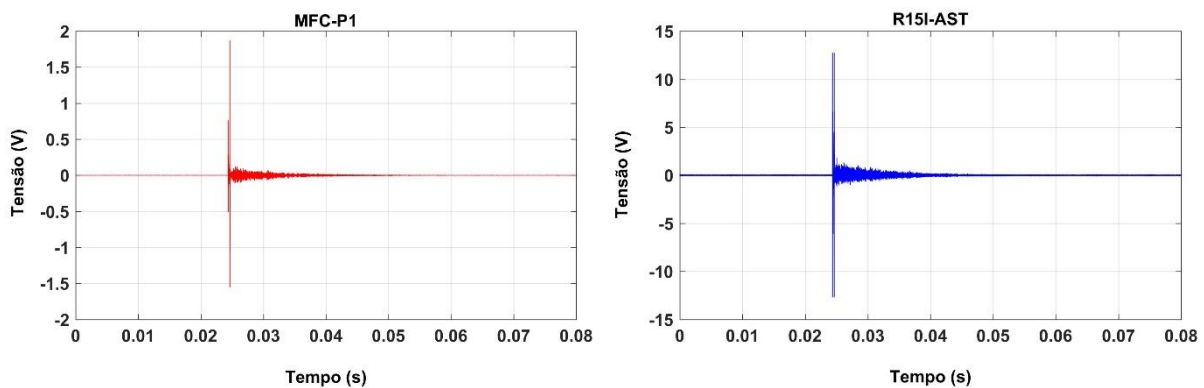


Figura 4. Sinais das descargas parciais para os sensores MFC-P1 e R15I-AST.

Há uma diferença significativa entre os dois sinais no domínio do tempo. O ganho do sensor R15I-AST, por exemplo, é maior que ganho do sensor MFC. Entretanto, os sensores foram excitados ao mesmo tempo e tiveram range de duração de 15 ms. Na Fig. (4), a amplitude do sinal começa a subir no instante de 0.024 s e começa a decair até 0.039 s para ambos os sensores. Para utilizar as métricas de RMS e Critério de Energia, os sinais foram normalizados devido à diferença de ganho entre os sensores.

A fim de avaliar os sinais dos sensores, o Critério de Energia foi aplicado como mostra a Fig. (5).

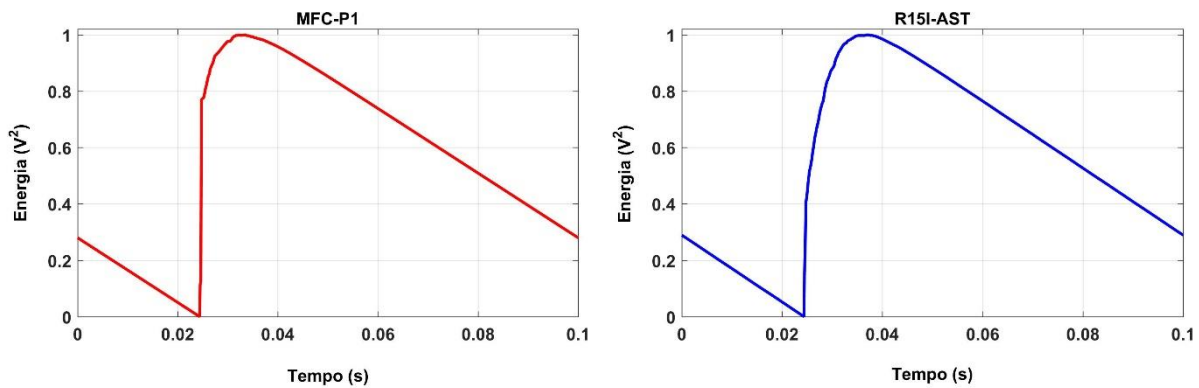


Figura 5. Critério de Energia para os sensores MFC-P1 e R15I-AST.

É possível notar que as respostas dos sinais dos sensores ao critério de energia foram muito similares. Os pontos de mínimo global no gráfico representam o tempo de chegada da excitação, que foi de 24 ms para os dois sensores e o ponto de máximo da curva de energia ocorreu em 34 ms para ambos os sensores também. Para uma melhor análise, foi utilizado o coeficiente de correlação e a aproximação linear a fim de comparar os gráficos de energia do MFC-P1 e do R15I-AST. O propósito desta comparação é mostrar a similaridade da excitação acústica entre os dois sensores. Quanto mais próxima a curva de aproximação linear estiver de 45° maior a similaridade entre os sinais. O gráfico de aproximação linear e coeficiente de correlação para o critério de energia é mostrado na Fig. (6).

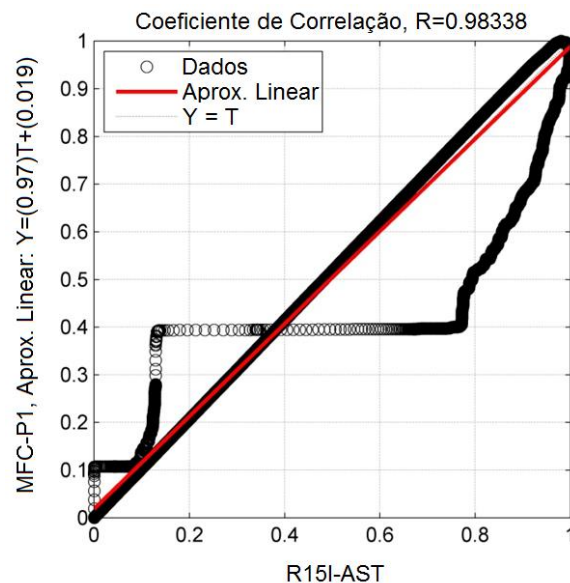


Figura 6. Aproximação linear e coeficiente de correlação para sinais de energia entre MFC P1 e R15I-AST.

O coeficiente de correlação do sensor MFC foi de 0.98338 o que representa uma alta similaridade entre o comportamento do mesmo e o do sensor convencional. O melhor ajuste linear observado está próximo de 45° o que também indica que as ondas de ultrassom das descargas parciais excitaram os sensores de forma semelhante. Outro critério de análise utilizado foi o do RMS, cuja janela de período considerada foi de 1 ms. A Fig. (7) apresenta os valores RMS para o sensor convencional e para o sensor de baixo custo. Esta abordagem pode ser considerada como uma quantidade física de intensidade de som e está diretamente relacionada à carga aplicada aos sensores assim como o critério de energia.

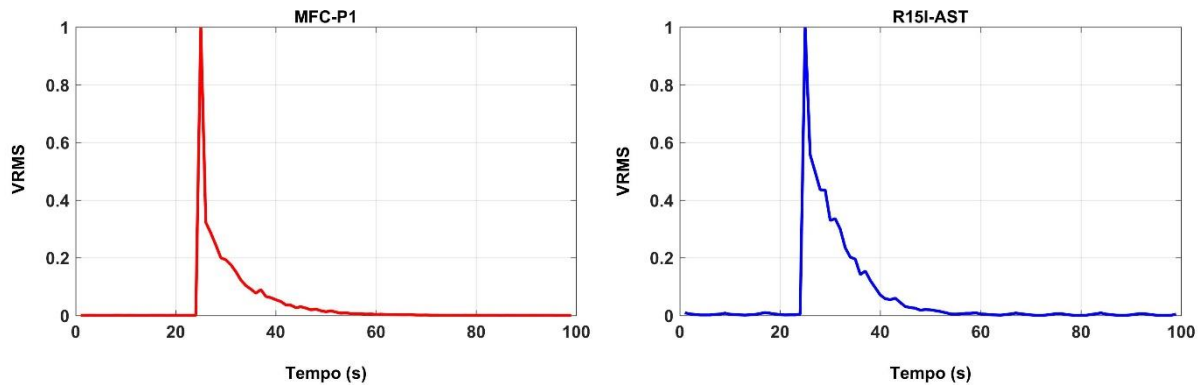


Figura 7. Gráficos RMS para os sensores MFC-P1 e R15I-AST.

Tabela 1. Valores de tempo referentes à Fig. (7).

Valor RMS / Valor de Pico (%)	Tempo (μs)	
	MFC P1	R15I-AST
100	25	25
70.7	25.43	25.66
10	34.25	38.77

Para cada gráfico RMS, três pontos foram destacados para comparar a intensidade da carga de emissão acústica, conforme mostrado na Tab. (1): o valor de pico RMS e os pontos de atenuação de 70.7% (atenuação de 3dB) e 10% do valor de pico RMS. No instante de 24 μs, a taxa de variação da amplitude do sinal RMS foi significativa para todos os sensores e o pico foi atingido após 1 μs. Como a janela foi de 1 ms no critério de RMS, o tempo de chegada foi de 0.02 s como previamente indicado pelo critério de energia. Assim, a análise RMS pode ser uma alternativa para indicar o tempo de chegada do sinal.

Há uma similaridade significativa entre as características de atenuação dos sensores, como pode ser notado pela Fig. (7) e Tab. (1). A atenuação de 3 dB ocorreu em 25.43 ms para o MFC e 25.66 ms para o R15I-AST. No caso da atenuação de 10% do valor de pico, os tempos foram de 34.25 ms e 38.77 ms para o MFC e para o R15I-AST respectivamente. Esta proximidade no comportamento dos dois sensores é confirmada pelo coeficiente de correlação do sensor MFC em relação ao sensor R15I-AST, como mostra a Fig. (8).

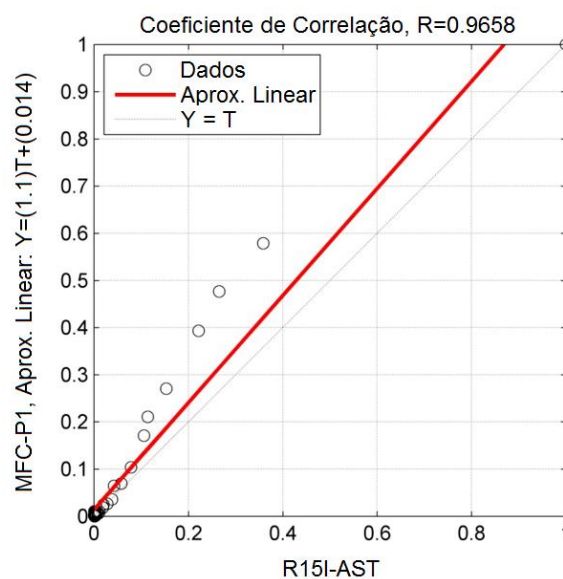


Figura 8. Gráfico da aproximação linear e do coeficiente de correlação do sinal RMS do sensor MFC-P1 em relação ao sensor R15I-AST.

5.2. Resposta no Domínio da Frequência

As análises dos sinais obtidos pelos sensores, a partir da descarga parcial no domínio da frequência, foram feitas utilizando os critérios de Transformada Rápida de Fourier (FFT) e Densidade Espectral de Potência (PSD). A Fig. (9) mostra as respostas em frequência, obtidas através da FFT, dos sensores MFC e R15I-AST respectivamente, para uma descarga parcial.

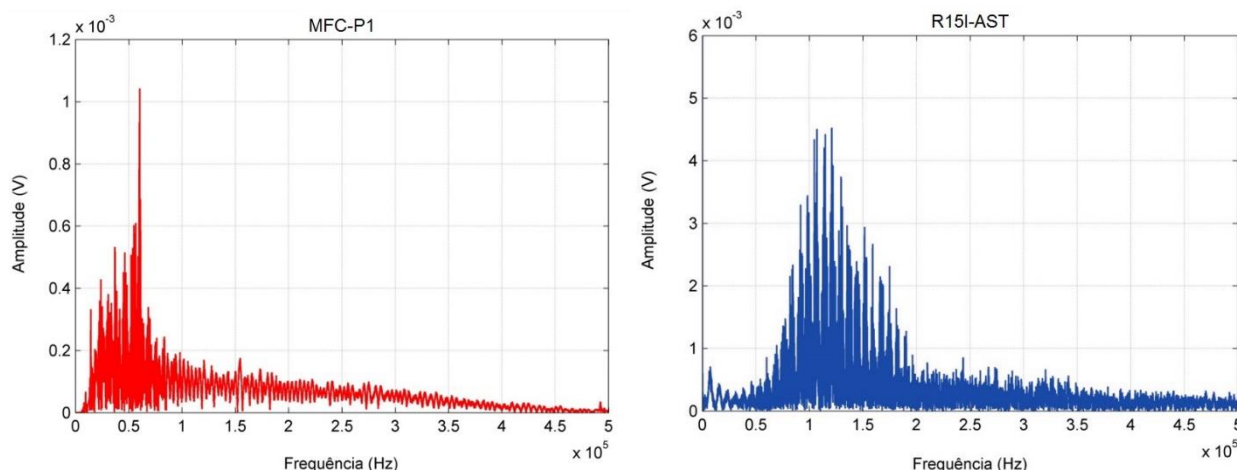


Figura 9. Resposta em frequência dos sensores MFC-P1 e R15I-AST para a descarga parcial.

No que diz respeito à análise de sinais gerados pelas descargas parciais no domínio da frequência, existe uma discrepância em relação às regiões de maior sensibilidade mostradas pelos dois sensores. O sensor MFC apresentou uma sensibilidade maior na região entre 100 kHz e frequências abaixo. O sensor R15I-AST, no entanto, mostrou um espectro mais uniforme e obteve uma melhor resposta de frequência entre 50 kHz e 250 kHz. Outro fato que pode ser fornecido através da análise FFT é onde ocorreu o pico da onda. No sensor MFC o pico ocorreu na frequência de 60 kHz e, para o sensor R15I-AST, o pico ocorreu na região em torno de 120 kHz.

Uma outra análise de sinais no domínio da frequência foi realizada utilizando a métrica de Densidade Espectral de Potência (PSD), conforme mostra a Fig. (10).

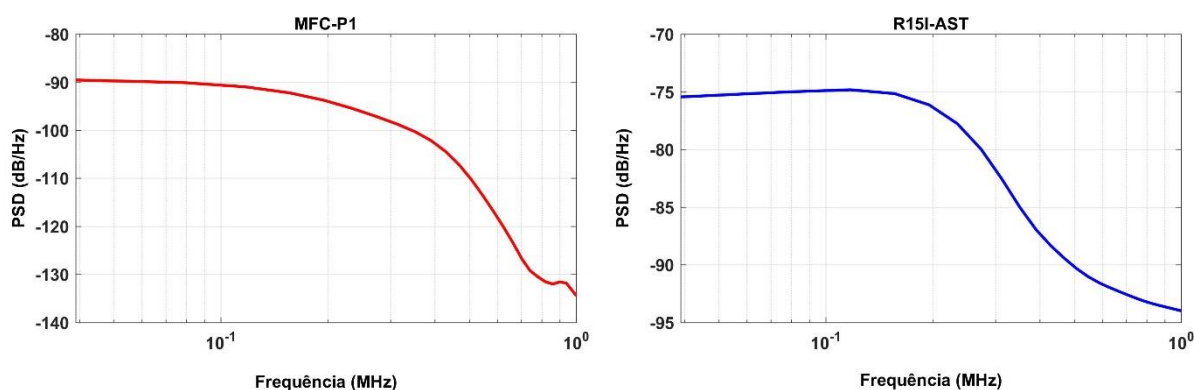


Figura 10. Critério de PSD para os sensores MFC-P1 e R15I-AST.

Tabela 2. Valores de PSD e Frequência referentes à Fig. (10).

Sensor	Atenuação (dB)	PSD (dB/Hz)	Frequência (kHz)
MFC P1	3	-92.55	163.8
	10	-99.55	333.2
R15I-AST	3	-78.43	245.6
	10	-85.43	359.6

Conforme mostrado na Tab. (2), dois valores de atenuação foram destacados para comparar os sinais dos dois sensores. Os resultados mostraram que o sensor convencional foi mais sensível que o sensor de baixo custo. A atenuação de 3dB para o sensor convencional foi de 245.6 kHz contra 163.8 kHz do MFC e a atenuação de 10dB para o sensor convencional foi 359.6 kHz contra 333.2 kHz do MFC. Mesmo que o sensor convencional seja mais sensível, devido ao ganho mais alto, o sensor MFC cobriu o range de frequência do sensor convencional. Os resultados mostraram que o espectro é mais significativo até 250 kHz e tem alta atenuação em 400 kHz.

Portanto, através também da análise PSD, o sensor MFC mostrou sua viabilidade em identificar descargas parciais em transformadores de potência. É importante ressaltar que a sensibilidade mais baixa do sensor de baixo custo, comparada ao sensor convencional, pode ser melhorada através da aplicação de um amplificador no sinal do mesmo.

6. CONCLUSÕES

O diagnóstico e a prevenção de falhas em transformadores têm grande relevância para garantir um alto grau de segurança e desempenho de sistemas elétricos. As falhas causadas por descargas parciais em transformadores podem gerar um dano financeiro significativo ao setor produtivo da economia. Dado o fato de que as DPs são parâmetros indicativos de falhas no sistema de isolamento dos transformadores, a nova abordagem apresentada por este artigo é um método não-invasivo que permite detectar descargas parciais e prover informações a fim de evitar uma parada do transformador e reduzir custos de reparo e substituição do mesmo.

O propósito deste estudo foi analisar a viabilidade do sensor MFC-P1 na detecção de descargas parciais em transformadores de potência baseado no método de emissão acústica. Vários testes foram executados a fim de comparar os dois sensores e os resultados experimentais indicaram que o sensor MFC possui um grande potencial na identificação de descargas parciais. Esse sensor, quando comparado ao sensor convencional, apresentou boa sensibilidade, fato demonstrado pelos gráficos das métricas de Energia e RMS. A sensibilidade mais baixa do sensor MFC, mostrada nos gráficos da resposta em frequência, pode ser melhorada através do uso de um amplificador mais apropriado. Por fim, o sensor MFC tem um custo mais baixo que o sensor convencional, o que torna esta técnica ainda mais atrativa para o monitoramento e prevenção de falhas em transformadores de potência.

7. REFERÊNCIAS

- Aguiar, P.R., Bianchi, E.C. and Canarim, R.C., 2012, Monitoring of grinding burn by acoustic emission. In *Acoustic Emission*, Sikorski, W. Ed.; Intech: Rijeka, Croatia, pp. 341-364.
- Almeida, V.A.D., Baptista, F.G. and Aguiar, P.R., 2015, Piezoelectric transducers assessed by the pencil lead break for impedance-based structural health monitoring. *IEEE Sensors Journal*, 15, 693-702.
- Álvarez, F., Garnacho, F., Ortego, J. and Uran, M.A.S., 2015, Application of HFCT and UHF sensors in on-line partial discharge measurements for insulation diagnosis of high voltage equipment. *Sensors*, 15, 7360-7387.
- Baptista, F.G., Budoya, D.E., Almeida, V.A.D. and Ulson, J.A.C., 2014, An experimental study on the effect of temperature on piezoelectric sensors for impedance-based structural health monitoring. *Sensors*, 14, 1208-1227.
- Baptista, F.G., Vieira Filho, J. and Inman, D. J., 2011, Transducers in Impedance-Based Structural Health Monitoring. *IEEE Sensors Journal*, vol.11, 1405-1414.
- Biswas, S., Koley, C., Chatterjee, B. and Chakravorti, S., 2012, "A methodology for identification and localization of partial discharge sources using optical sensors", *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 19, 18-28.
- Castro, B., Clerice, G., Ramos, C., Andreoli, A., Baptista, F., Campos, F. and Ulson, J., 2016, "Partial Discharge Monitoring in Power Transformers Using Low-Cost Piezoelectric Sensors," *Sensors* 16, no. 8, 1266.
- IEC Publication, 2000, IEC Standard 60270. High-voltage test techniques - Partial discharge measurement, Ed. 2.
- Ilg, J., Rupitsch, S.J. and Lerch, R., 2013, Impedance-based temperature sensing with piezoceramic devices. *IEEE Sensors Journal*, 13, 2442-2449.
- Markalous, S., Tenbohlen, S. and Feser, K., 2008, 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.
- Meitzler, A.H. et al., 1988, *IEEE Standard on Piezoelectricity: An American National Standard*. New York: IEEE-ANSI, 66 p., (Std, 176).
- Oppenheim, A. V. and Schaffer, R.W., 2010, *Discrete-Time Signal Processing*. 3. Ed. New Jersey: Prentice Hall.
- Physical Acoustics-MISTRAS Group, 2016, R15I-AST Sensor-Integral Preamplifier Sensor. Product Data Sheet.
- Sarathi, R., Singh, P.D. and Danikas, M.G., 2007, Characterization of partial discharges in transformer oil insulation under AC and DC voltage using acoustic emission technique. *Journal of Electrical Engineering*, 58, 91-97.
- Shafiq, M., Kutt, L., Lehtonen, M., Nieminen, T. and Hashmi, M., 2013, "Parameters identification and modeling of high-frequency current transducer for partial discharge measurements," *IEEE Sensors Journal*, vol. 13, no. 3, pp. 1081-1091.

- Smart Material Corporation, 2016, Macro Fiber Composite (MFC) brochure, Data Sheets.
- Stone, G.C., 2005, Partial discharge diagnostics and electrical equipment insulation condition assessment. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 12, 891-904.
- Zachariades, C., Shuttleworth, R., Giussani, R. and MacKinlay, R., 2016, "Optimization of a High-Frequency Current Transformer Sensor for Partial Discharge Detection Using Finite-Element Analysis," IEEE Sensors Journal, vol. 16, 1558-1748.

8. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

A PERFORMANCE ASSESSMENT OF ACOUSTIC EMISSION SENSOR FOR ANTECIPATIVE FAULTS DIAGNOSIS IN TRANSFORMERS BY COMPUTER SIGNALS PROCESSING TECHNIQUES

Danilo de M. Brunini, dbrunini@gmail.com¹
Bruno A. Castro, bruno.castro@feb.unesp.br¹
Vitor P. Luiz, vitor_padovan@hotmail.com¹
José A. C. Ulson, ulson@feb.unesp.br¹
Fabrício G. Baptista, fabriciogb@feb.unesp.br¹
André L. Andreoli, andreoli@feb.unesp.br¹
Felipe A. Alexandre, felipeapalexandre@hotmail.com¹

¹UNESP, FEB - Departamento de Engenharia Elétrica, Avenida Engenheiro Luiz Edmundo Carrijo Coube, 14-01, CEP 17033-360, Bauru, SP

Abstract: This article presents a performance assessment of acoustic emission sensors to identify partial discharges in power transformers, which use mineral oil inside of it, through a non-destructive method. The low-cost sensor used was the MFC (Macro Fiber Composite) P1 type, which is a piezoelectric sensor developed by NASA in 1996. It was also used a commercial acoustic emission sensor, R15I-AST model from PASA (Physical Acoustics South America), as a reference for the low-cost sensor assessment. Partial discharges were induced in a 30 kVa transformer, by means of an electrode, and the acoustic emission signals captured by both sensors were compared through the signal processing metrics, which are: RMS, Energy, Fast Fourier Transform and Power Spectral Density. The signals were analyzed and it was noticed that the MFC-P1 low-cost sensor, although it had a sensitivity lower than the commercial sensor, has a great potential to diagnose partial discharges in power transformer. Therefore, it becomes feasible the large application of this computer vision technique in industrial environment.

Keywords: Faults diagnosis, computer vision, transformers, acoustic emission, low-cost sensor.