



**XXIII SNTPEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

FI/GTM/20
18 a 21 de Outubro de 2015
Foz do Iguaçu - PR

GRUPO – XIII

GRUPO DE ESTUDO DE TRANSFORMADORES, REATORES, MATERIAIS E TECNOLOGIAS EMERGENTES - GTM

UTILIZAÇÃO DE ALGORITMOS DE TOMOGRAFIA NO PROCESSAMENTO DE SINAIS DO ENSAIO DE EMIÇÃO ACÚSTICA EM TRANSFORMADORES E REATORES

**Oswaldo G dos Santos Filho(*)
CENTRO DE TECNOLOGIA
ELETROBRAS ELETRONORTE**

RESUMO

O ensaio de emissão acústica é uma técnica que tem se mostrado eficaz para avaliar a condição de diversas estruturas e equipamentos, inclusive transformadores e reatores de alta tensão. Os algoritmos tradicionais utilizados para a localização dos eventos acústicos assumem uma velocidade de propagação uniforme para estes sinais. Isto não corresponde à realidade no caso de estruturas ou equipamentos não-homogêneos, como é o caso de transformadores de potência, que são constituídos de materiais de diferentes naturezas, como cobre, aço, óleo isolante, etc, cada qual com uma velocidade de propagação acústica diferente, limitando, assim, a precisão da localização dos eventos acústicos. Assim, é proposta a utilização de um algoritmo de tomografia por tempo de trânsito a fim de obter uma melhor precisão na localização dos eventos acústicos. Neste caso, obtém-se como resultado adicional um mapeamento dos valores estimados para a velocidade de propagação acústica nas diferentes regiões no interior do equipamento sob ensaio. Este mapeamento representa uma imagem dos seus componentes internos, possibilitando um melhor diagnóstico, já que os eventos poderiam ser melhor avaliados, correlacionando as suas localizações com a posição de componentes críticos do equipamento. Trata-se, assim de um novo modo de utilizar os dados obtidos no ensaio de emissão acústica. São descritos algoritmos de tomografia utilizados para o processamento dos sinais, bem como é apresentada a implementação do algoritmo ART (*Algebraic Reconstruction Technique*), bem como resultados obtidos a partir de ensaios em equipamentos elétricos.

PALAVRAS-CHAVE

Emissão acústica, Tomografia de Emissão Acústica, Transformadores de Potência

1. INTRODUÇÃO

Tomografia é a técnica de obtenção de imagens da estrutura interna de um objeto sem que para isto seja necessário abri-lo (1). Uma das formas de conseguir isto é iluminando o objeto sob estudo a partir de várias direções, com uma radiação adequada, capaz de atravessá-lo, e efetuar o processamento dos sinais obtidos em sensores apropriados, e modelados considerando os fenômenos de transmissão, reflexão ou difração (2). Os tipos de radiação utilizados nesta técnica são tão diversos quanto raios-X, ondas ultra-sônicas ou sinais de ressonância nuclear magnética (3). Esta é uma técnica largamente utilizada em medicina diagnóstica, mas encontra várias aplicações em engenharia, física, química e outros campos.

Em equipamentos elétricos, como transformadores de potência, sinais acústicos originados por defeitos, como descargas parciais, arcos elétricos, defeitos térmicos e outras condições propagam-se através do óleo isolante e são captados por sensores instalados na superfície do tanque. A técnica de emissão acústica apresenta uma característica muito interessante, que é possibilitar identificar a localização das fontes dos sinais a partir das diferenças de tempo registradas na detecção dos sinais pelos diferentes sensores. Assim, pode-se melhor avaliar a criticidade do defeito com base nesta informação, ou ainda, concentrar a atenção numa determinada região do

equipamento, identificada por esta localização, no caso de ser necessária a realização de uma inspeção interna no mesmo.

Os algoritmos tradicionais utilizados para a localização dos eventos que dão origem aos sinais acústicos assumem que a velocidade de propagação dos sinais no interior do sistema é uniforme. Esta é uma boa aproximação no caso de estruturas homogêneas, mas é bastante diferente da realidade, no caso de estruturas heterogêneas, como é o caso de transformadores e reatores, que são constituídos por diversos materiais, como cobre, óleo isolante, papel isolante, aço, cada um com uma velocidade de propagação acústica diferente, limitando, assim a precisão do algoritmo de localização.

Dessa forma, é proposta a utilização de algoritmos de tomografia de tempo de trânsito, que levam em conta a possibilidade de diferentes velocidades de propagação dos sinais no interior da estrutura sob análise, permitindo obter uma melhor precisão na localização dos eventos.

2. TOMOGRAFIA DE EMISSÃO ACÚSTICA

Diferentemente da tomografia acústica convencional, em que fontes externas de ultrassom são utilizadas para iluminar o objeto sob ensaio, na tomografia de emissão acústica os próprios eventos de emissão acústica são utilizados como fontes de sinais (4), (5). Após o processamento dos sinais, um mapeamento das velocidades de propagação dos sinais no interior do objeto pode ser obtido. Da mesma forma, uma melhor estimativa das localizações destes eventos pode ser obtida, já que o algoritmo para localização agora se vale de uma melhor estimativa da distribuição das velocidades de propagação dos sinais no interior do objeto sob ensaio.

A imagem obtida do interior do objeto pode ser útil para o analista, uma vez que seria possível associar a localização de eventos de emissão acústica com determinados componentes ou estruturas no seu interior, especialmente quando não se dispõe previamente de informações detalhadas sobre esta estrutura interna.

No ensaio de emissão acústica, o instante de chegada dos sinais em cada sensor é uma função da localização da fonte e da velocidade de propagação dos sinais acústicos. Para o caso de corpos não-homogêneos, esta velocidade de propagação não é constante ao longo da trajetória do sinal, uma vez que diferentes materiais entram na constituição deste objeto.

Modelando-se a região de interesse como um arranjo de células onde, cada uma delas é caracterizada por sua velocidade de propagação e assumindo trajetórias em linha reta para os diferentes raios, este sistema pode ser representado como na FIGURA 1, que mostra um modelo bidimensional por razões de simplicidade.

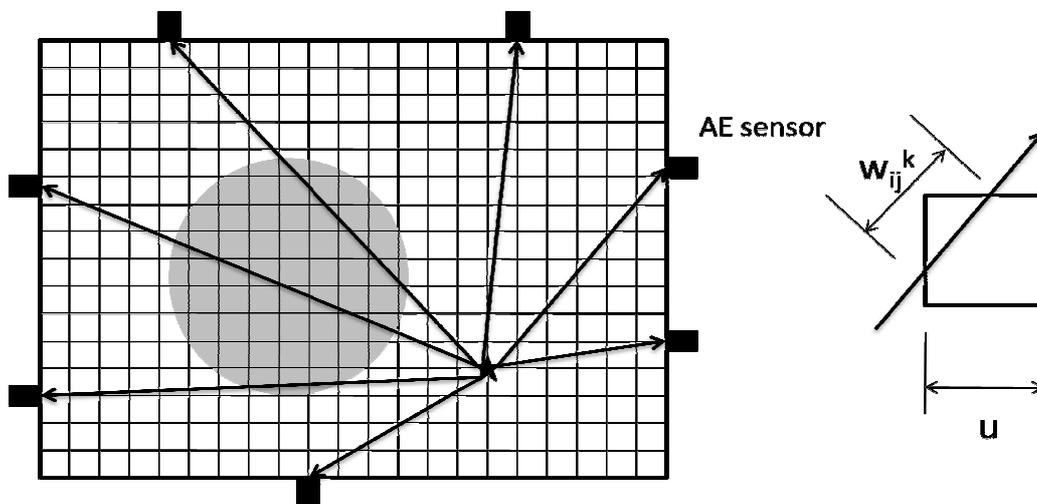


FIGURA 1 – (Esq.) – Modelo de um corpo heterogêneo para tomografia de emissão acústica. A região sombreada tem uma velocidade de propagação diferente do restante do corpo. (Dir.) – Detalhe de uma célula tomográfica (i,j) mostrando w_{ijk} na Eq. (1)

Os algoritmos de tomografia neste caso baseiam-se em dividir o corpo sob análise em um conjunto de células elementares nas quais a velocidade de propagação é ajustada em um algoritmo iterativo, a partir de uma condição inicial, que pode ser, por exemplo o caso homogêneo. A magnitude da correção aplicada em cada iteração na estimativa da velocidade de propagação em cada célula depende da diferença entre os tempos esperados para a detecção dos sinais por cada um dos sensores, e os tempos efetivamente medidos na detecção dos sinais por estes sensores. Os tempos esperados seriam calculados a partir dos valores estimados para as velocidades de propagação em cada célula e da posição estimada da fonte dos sinais.

O instante de chegada do sinal recebido em cada sensor pode ser descrito da seguinte forma:

$$T_k^A = T_k^o + \sum w_{ij}^k \cdot s_{ij} \quad \text{Eq. (1)}$$

onde,

$k = \{1, 2, \dots, s\}$ refere-se a cada raio partindo da fonte acústica até cada sensor.

$i = \{1, 2, \dots, m\}$ e $j = \{1, 2, \dots, n\}$ são índices que indicam a posição de cada célula.

$s_{ij} = 1/c_{ij}$ é a "lentidão" de propagação do sinal na célula (i,j), definida como o inverso de sua velocidade de propagação c_{ij}

w_{ij}^k representa a distância percorrida pelo k-ésimo raio na célula (i,j). Notar que a maioria destes elementos é zero, uma vez que apenas um número relativamente pequeno de células é atravessado por cada raio.

T_k^A é o instante de chegada do sinal do "k-ésimo" raio no respectivo sensor.

T_k^o é o instante da ocorrência do evento acústico que origina o "k-ésimo" raio

A solução da Eq (1) pode ser obtida iterativamente em um processo conhecido como Técnica de Reconstrução Algébrica (ART - *Algebraic Reconstruction Technique*), descrita a seguir (2), (4), (5):

1. Um valor inicial é definido para todos os s_{ij} , por exemplo, iniciando com uma situação homogênea (mesma velocidade de propagação para todas as células)
2. A localização do evento é estimada baseada nos valores atribuídos para as velocidades de propagação dos sinais de cada célula.
3. Os instantes de chegada do sinal esperados em cada sensor são calculados como:

$$t_k^A = t_k^o + \sum w_{ij}^k \cdot s_{ij} \quad \text{Eq. (2)}$$

4. Calcular correções para as estimativas de s_{ij} como:

$$\Delta s_{ij} = (T_k^A - t_k^A) \cdot \frac{w_{ij}^k}{\sum_{i,j} (w_{ij}^k)^2} \quad \text{Eq. (3)}$$

As células tomográficas terão seus valores s_{ij} atualizados como:

$$s_{ij}^{novo} = s_{ij}^{antigo} + R \cdot \Delta s_{ij} \quad \text{Eq. (4)}$$

Na expressão acima, R é um fator de relaxação da ordem de 0,01 a 0,1 usado para assegurar a estabilidade do processo iterativo (2), (4), (5).

O processo é repetido a partir do passo 2 até que a convergência seja alcançada. Ao final, serão fornecidos como saída : a) uma estimativa mais acurada da localização dos eventos acústicos e b) um mapeamento das velocidades de propagação dos sinais (c_{ij}) no interior do objeto sob ensaio.

Na modelagem descrita, a determinação de valores adequados para os pesos w_{ijk} não é facilmente obtida. Assim, em algumas implementações do algoritmo ART, os w_{ijk} são aproximados por zeros ou uns, dependendo de algum critério simples, tal como se o raio atravessa ou não a célula. Neste caso, a fórmula de correção no passo 4 se reduz para (2):

$$\Delta s_{ij} = \frac{(T_k^A - t_k^A)}{N_k} \quad \text{Eq. (5)}$$

Onde N_k é o número de células atravessadas pelo "k-ésimo" raio.

Outra aproximação sugerida para esta equação de correção é dada por (2):

$$\Delta s_{ij} = \frac{T_k^A}{L_k} - \frac{t_k^A}{N_k} \quad \text{Eq. (6)}$$

Na expressão acima, L_k é o comprimento do “k-ésimo” raio, normalizado pela dimensão da célula.

No algoritmo ART, descrito acima, os parâmetros correspondentes à velocidade de propagação de sinais das células são atualizados imediatamente após o processamento de cada raio. Desta forma, enquanto um raio é processado, pode ser alterado o parâmetro de uma célula que acabou de ser alterada no processamento do raio anterior.

No algoritmo SIRT – *Simultaneous Iterative Reconstruction Technique* – Técnica de Reconstrução Iterativa Simultânea – à medida que as correções Δs_{ij} elas não são utilizadas diretamente para atualizar as células mas, em vez disso, são armazenadas em uma matriz auxiliar para que os seus valores médios sejam calculados após todos os raios serem processados, completando uma iteração. Somente então os valores s_{ij} são atualizados e o processo se repeta até alcançar convergência. O algoritmo SIRT fornece imagens com menor ruído do que o algoritmo ART (2).

Outro algoritmo utilizado, conhecido como SART – *Simultaneous Algebraic Reconstruction Technique* – Técnica de Reconstrução Algébrica Simultânea – utiliza elementos bilineares para representar as integrais de raios, em vez de somas finitas. Da mesma forma que no algoritmo SIRT, para reduzir o ruído na imagem obtida, os termos de correção Δs_{ij} são aplicados simultaneamente sobre todos os raios após todos eles terem sido considerados no processamento, ao final de cada iteração (2).

2.1 Benefícios da Tomografia de Emissão Acústica

Além dos benefícios mais evidentes da utilização da tomografia de emissão acústica, tais como a estimação das localizações dos eventos acústicos com maior precisão em corpos heterogêneos, bem como a possibilidade de obtenção de um mapeamento das velocidades de propagação acústica no interior do objeto sob ensaio, que está diretamente associado à distribuição dos diferentes materiais no seu interior, alguns outras características interessantes surgem da aplicação desta técnica, tais como:

- Na tomografia acústica tradicional, a resolução da imagem é dependente do número de emissores e receptores, ao passo que na tomografia de emissão acústica um menor número de sensores utilizados pode ser compensado por um maior número de ocorrências de eventos de emissão acústica, que são as fontes de sinais neste caso, especialmente se estes são distribuídos ao longo do objeto sob ensaio.
- Fontes de sinais acústicos “indesejáveis” oriundos de fenômenos de atrito, vazamentos, etc. Que seriam considerados como ruído em um ensaio de emissão acústica convencional, agora passam a ser sinais úteis no sentido de melhorar a resolução da imagem tomográfica. Além disso, outras fontes de sinais, tais como a quebra de grafite, impactos e os sinais emitidos pela função “teste de sensores”, disponíveis em alguns equipamentos de ensaio de emissão acústica, podem ser utilizados para produzir artificialmente sinais que serão aproveitados pelo algoritmo de tomografia.
- A resolução da imagem obtida pelo algoritmo de tomografia torna-se melhor nas vizinhanças da região defeituosa, uma vez que um maior número de eventos acústicos é produzido ali.
- Não há necessidade do desenvolvimento de hardware específico para a tomografia de emissão acústica, uma vez que a tomografia de emissão acústica consiste apenas no processamento adequado dos sinais e utiliza os mesmos dados obtidos no ensaio de emissão acústica convencional.

3. – RESULTADOS DE ENSAIOS

Com o objetivo de demonstrar a técnica, foi realizado um ensaio de emissão acústica em um reator de uma fonte de alta tensão do tipo série-ressonante, que é parte de um sistema usado na geração de altas tensões de corrente alternada, da ordem de 800 kV, a fim de ensaiar equipamentos de alta tensão. Este reator consiste de um tanque cilíndrico, com cerca de 0,8 m de diâmetro e 3 m de altura. No seu interior, encontra-se um núcleo magnético com um entreferro com espaçamento ajustável, acionado por um mecanismo motorizado controlado remotamente. Desta forma, a indutância do reator pode ser ajustada a fim de entrar em ressonância com a capacitância externa e assim produzir tensões elevadas. Todo o conjunto é imerso em óleo isolante que tem a finalidade de garantir a isolação elétrica adequada para os componentes internos do reator. Este equipamento foi escolhido para este ensaio por ser um objeto heterogêneo, com diversos materiais constituintes, bem como pela facilidade de produção de eventos acústicos, principalmente decorrentes do acionamento do mecanismo que ajusta o espaçamento do entreferro do seu núcleo magnético. A FIGURA 2, abaixo, ilustra o aspecto do reator ensaiado. A FIGURA 3 apresenta detalhes do seu interior, evidenciando o seu núcleo magnético ajustável.



FIGURA 2. Ilustração do equipamento ensaiado, um reator série-ressonante

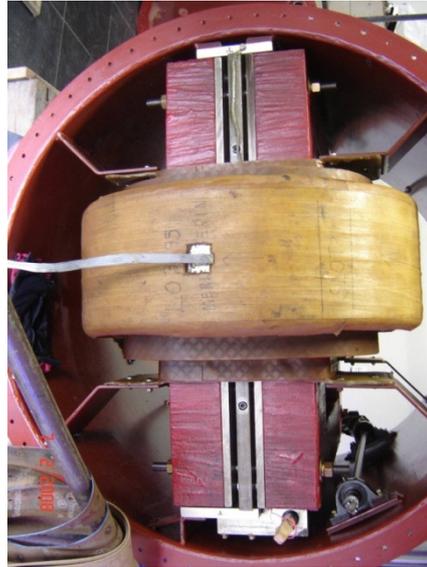


FIGURA 3. Detalhe do núcleo magnético ajustável no interior do reator.

No ensaio realizado, foram distribuídos onze sensores acústicos ao redor da circunferência do tanque, num plano horizontal, a fim de tratar o problema como bidimensional. Os sensores foram posicionados aproximadamente à mesma altura do núcleo ajustável. Sinais de emissão acústica foram produzidos decorrentes do atrito produzido nos componentes internos do reator, ao se operar o mecanismo motorizado de ajuste do entreferro. Em um determinado ensaio, cerca de 70 eventos de emissão acústica foram registrados, cujas localizações são mostradas na FIGURA 4. Os dados obtidos neste ensaio serviram de entrada para uma rotina que executa o algoritmo ART descrito acima, sendo que a área horizontal plana modelada foi dividida em uma matriz de 40 por 40 células tomográficas, com dimensões aproximadas de 2 x 2 cm cada. A FIGURA 5 mostra a imagem tomográfica obtida, em uma escala de cores que representa o inverso da velocidade de propagação dos sinais acústicos em cada célula.

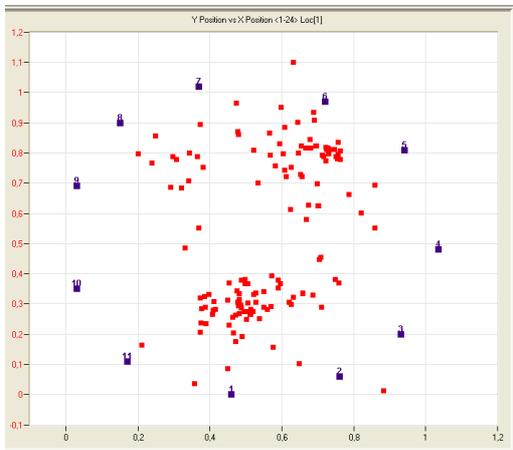


FIGURA 4. Localização dos eventos de emissão acústica registrados no ensaio.

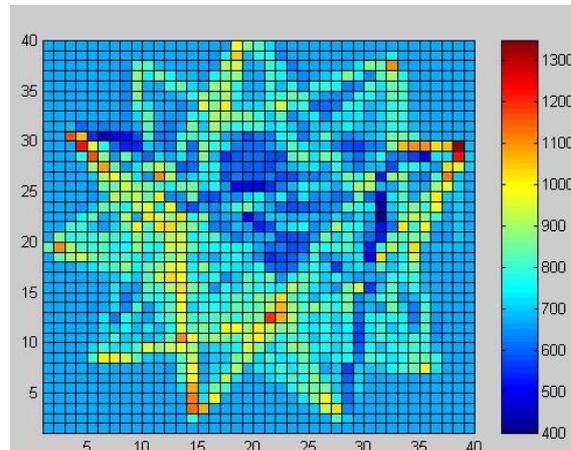


FIGURA 5. Imagem produzida pelo algoritmo de tomografia de emissão acústica.

Embora a imagem obtida apresente um aspecto “ruidoso”, é possível identificar regiões onde a velocidade de propagação dos sinais é maior, correspondendo ao núcleo magnético e outras partes metálicas. As áreas que indicam velocidade de propagação menor correspondem à região preenchida pelo óleo isolante. A qualidade da imagem deve melhorar à medida que um maior número de eventos de emissão acústica se faz presente, bem como com a utilização de algoritmos de melhor desempenho, como SIRT e SART.

4. CONCLUSÃO

A tomografia de emissão acústica pode ser uma ferramenta útil para complementar a análise dos resultados de ensaios de emissão acústica, pois fornece como resultado um mapeamento das velocidades de propagação dos

sinais no interior do objeto ensaiado. No caso de objetos não homogêneos, este mapeamento pode revelar detalhes da sua estrutura interna, uma vez que a velocidade de propagação dos sinais é dependente dos materiais presentes. A técnica é de utilidade, também, em ensaios em objetos homogêneos, no caso em que a velocidade de propagação dos sinais depende de fatores tais como tensão ou compressão, temperatura e outros, os quais poderão também ser mapeados com o auxílio de algoritmos de tomografia de emissão acústica. Melhores estimativas das localizações dos eventos de emissão acústica podem ser obtidas se a distribuição espacial das velocidades de propagação dos sinais passa a ser conhecida. Outra característica favorável reside no fato de que a tomografia de emissão acústica não requer o uso de nenhum hardware adicional, uma vez que utiliza os dados obtidos no ensaio convencional de emissão acústica que são utilizados como entrada para uma rotina de software para processamento destes dados em um algoritmo de tomografia.

5. AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi realizado com recursos da Eletrobras Eletronorte. O autor agradece a contribuição do Eng Fernando de S. Brasil, do Laboratório de Ensaios com Alta Tensão do Centro de Tecnologia da Eletronorte pela execução dos ensaios de emissão acústica.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Ling, Z.P.; Lauterbur, P.C. – “Principles of magnetic resonance imaging: a signal processing perspective” - IEEE Press, 2000
- (2) Kak, A.C., and Slaney, M., “Principles of Computerized Tomographic Imaging”, IEEE Press, New York, 1988
- (3) Van Hemelryck, T.; Wuyts, S.; Goossens, M.; Batenburg, K.J and Sijbers, J. – “The implementation of iterative reconstruction algorithms in MATLAB”, Masters Thesis, Department of Industrial Sciences and Technology, University College of Antwerp, Belgium, July 2007
- (4) Schubert, F., “Basic principles of acoustic emission tomography”, Journal of Acoustic Emission, Vol. 22, 147-158, 2004, also available on www.ndt.net, July 25, 2011
- (5) Schubert, F., “Tomography Techniques for Acoustic Emission Monitoring”, 9th European Conference on NDT - September 2006 - Berlin (Germany) - ECNDT 2006, available on www.ndt.net, July 25, 2011

7. DADOS BIOGRÁFICOS

Oswaldo Gonçalves dos Santos Filho (1957) é engenheiro eletricista graduado pela Universidade Federal do Pará (1980). Atua desde 1981 no quadro da Centrais Elétricas do Norte do Brasil S.A. – Eletronorte, onde tem exercido diversas funções técnicas e gerenciais. Atualmente é superintendente do Centro de Tecnologia da Eletronorte em Belém-Pa. É vice-presidente da International Society on Acoustic Emission – ISAE, associação de profissionais voltados para a divulgação do conhecimento na técnica de emissão acústica.