

Aplicação de Métodos Matemáticos para Análise de Resolução Espacial em Sensores BAC

Implementation of Mathematical Methods for Spatial Resolution Analysis in BAC Sensors

André Gonçalves Próspero¹, Gabriel Gustavo de Albuquerque Biasotti¹, Guilherme Augusto Soares¹, João Victor Carneiro Faria¹, Ronaldo Vitor Reis Matos¹, Leonardo Antonio Pinto¹, Rodolfo Cicolin¹, José Ricardo de Arruda Miranda¹

¹Universidade Estadual Paulista – UNESP, Instituto de Biociências, Departamento de Física e Biofísica, Botucatu, Brasil

Resumo

Neste trabalho foram analisadas as resoluções espaciais de sensores de Biosusceptometria AC (BAC) com diferentes diâmetros de bobinas e distâncias do objeto simulador. Com o uso de ferrita de manganês, como um fantoma pontual, foram adquiridas as Funções de Espalhamento Pontual dos sistemas e, através delas, foram quantificadas as resoluções dos sensores. Para isso, foram utilizados dois métodos consagrados em análise de resolução: a função de transferência modulada e a largura à meia altura. Os resultados demonstraram que para todos os diâmetros a menor distância apresentou melhores resoluções, enquanto para ambas distâncias o menor diâmetro apresentou melhores resoluções. Ao correlacionar os dois métodos para todos os casos foram obtidos perfis lineares, portanto, os métodos possuem alta similaridade quando aplicados ao sistema BAC. Com isso, podemos aferir a resolução espacial do sensor, onde foi possível realizar otimizações de geometria do sistema e posicionamentos conforme a medida a ser realizada e possíveis aplicações.

Palavras-chave: Biosusceptometria AC, resolução espacial, função de transferência modulada, largura à meia altura.

Abstract

In this work, we analyzed the spatial resolutions of AC Biosusceptometry (ACB) sensors with different coil diameters and simulator object distances. With the use of manganese ferrite as a punctual phantom, the systems' Point Spread Functions were acquired and, from this data, the sensor resolutions were quantified. For this purpose, two established resolution analysis methods were used: the modulation transfer function and the width at half height. The results showed that for all diameters the smallest distance presented better resolutions, while for both distances the smallest diameter presented better resolutions. By correlating the two methods for all cases linear profiles were obtained; therefore, the methods are high similar when applied to the ACB system. From this it was possible to evaluate the ACB sensor resolution, where it was possible to optimize the sensor according to the measurement to be performed and the application.

Keywords: AC Biosusceptometry, spatial resolution, modulation transfer function, width at half height.

1. Introdução

A Biosusceptometria de corrente alternada (BAC) é uma técnica biomagnética utilizada, principalmente, para estudos relacionados ao trato gastrointestinal. Este sistema é baseado no uso de bobinas para excitar e detectar marcadores e traçadores magnéticos de alta suscetibilidade magnética, que podem estar fixos ou distribuídos no trato gastrointestinal (TGI). A presença destes materiais próximos do sensor provoca variações de fluxo magnético e, conseqüente, diferença de potencial na saída do sistema gradiométrico. Esta técnica é empregada para monitorar alimentos e formas farmacêuticas sólidas no TGI, visto que possui alta sensibilidade a variações de distância e concentração do marcador^{1,2}.

A resolução espacial é de fundamental importância no estudo do comportamento destes sensores, pois ela mede a capacidade do sistema em diferenciar dois pontos, ou dois picos de resposta com uma pequena distância entre si. Na literatura são encontrados diversos métodos de aferição da resolução espacial de sistemas lineares, como a Largura a Meia Altura (do inglês *Full Width at Half*

Maximum - FWHM) e a Função de Transferência Modulada (do inglês *Modulation Transfer Function* - MTF). Estas metodologias foram escolhidas para este trabalho por ambas dependerem da Função de Espalhamento Pontual (do inglês *Point Spread Function* - PSF). A PSF, que é uma função de resposta do sistema a um estímulo pontual, é amplamente utilizada em análises de resolução espacial de vários sistemas, inclusive nos de diagnóstico³⁻⁸.

Como a FWHM da PSF é de simples aferição, ela é amplamente utilizada para avaliar a largura espectral de fontes de radiação e resoluções de espectrômetros. Um outra aplicação desta técnica é a quantificação da resolução espacial em sistemas utilizados em Medicina Nuclear, como a câmara gama³. Este método consiste em determinar a largura da PSF na altura que corresponde à metade de seu valor máximo, sendo a resolução do sistema inversamente proporcional a essa largura^{5,6}.

Atualmente, um dos métodos mais utilizados na análise da resolução espacial de sistemas lineares é a obtenção da MTF, definida como a Transformada de Fourier da PSF. A transformação converte o sinal do domínio espacial em domínio de frequências e,

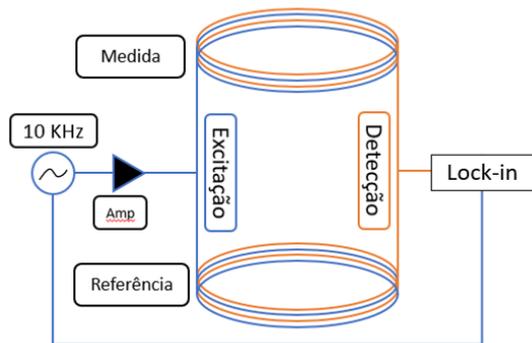
como a resolução está intimamente ligada às frequências encontradas no sinal, permite uma melhor análise da resolução^{7, 8}.

Visto que a BAC é uma técnica relativamente recente, esta carece de estudos sobre suas propriedades, como a resolução espacial. Assim, o objetivo deste trabalho foi analisar a resolução espacial em diferentes sistemas BAC e comparar os métodos de FWHM e MTF.

2. Materiais e Métodos

O sensor BAC atua como um transformador duplo de fluxo magnético, composto por dois pares de bobinas de excitação e detecção em arranjo gradiométrico. A ausência de material magnético resulta em sinal minimizado devido ao fluxo magnético nos dois pares ser o mesmo. O sinal surge quando há desbalanço no fluxo magnético devido a aproximação de material magnético no par de medida. Para todos os procedimentos a configuração eletrônica utilizada para alimentar as bobinas de excitação foram tensão alternada de 40V amplificada e frequência de 10 kHz. A alimentação das bobinas e aquisição do sinal foi feita por amplificador *lock-in* (Stanford Research Systems).

Figura 1 – Componentes básicos do sistema BAC.



Para adquirir sinais pontuais foi construído um objeto simulador cilíndrico (0,5 mm de raio e 1,5 mm de altura) contendo 20 mg de ferrita de manganês em pó compactada em um chassi acrílico cúbico (figura 2.A). Esse material foi escolhido por ser um marcador magnético já utilizado com a técnica BAC por ser barato, inerte e possuir alta suscetibilidade magnética¹. A PSF foi adquirida através do posicionamento do cubo em 20 pontos com passo de 0,5 cm ao longo dos eixos perpendiculares ao sensor, com distância de 0,5 e 1,0 cm da superfície do sensor. As aquisições foram feitas com 6 diferentes sensores BAC, com diâmetro (d) das bobinas de 3, 4, 5, 6, 7 e 8 cm. As distâncias ótimas para essa proposta foram determinadas através de avaliações computacionais, em ambiente *Python 2.7*, do alcance das bobinas de excitação dos diferentes sensores, utilizando uma corrente unitária aplicada às bobinas (Figuras 3 e 4).

Figura 2 – A) Objeto simulador pontual de ferrita de manganês em pó compactada no centro de um chassi acrílico. B) Esquema da experimentação para aquisição da PSF dos sensores.

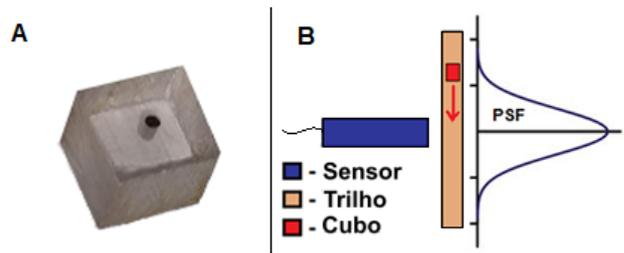


Figura 3 – Mapeamento da densidade de fluxo magnético gerada pelas bobinas de excitação (direita) de um sistema BAC virtual (esquerda).

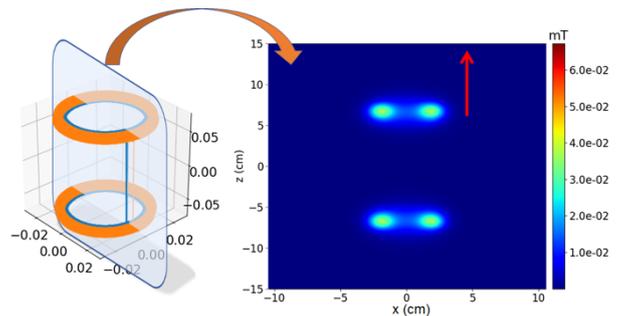
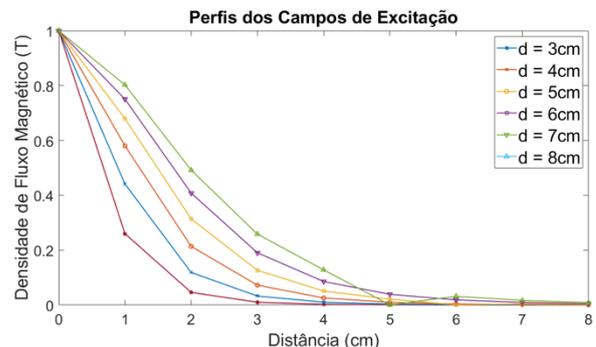


Figura 4 – Perfis de alcance dos campos de excitação das bobinas de excitação dos 6 sensores propostos.



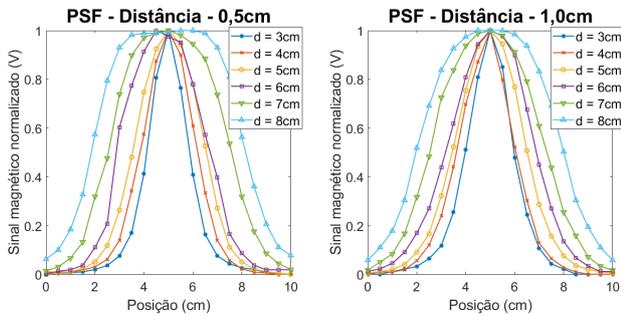
A partir do processamento das PSF foram quantificados os FWHM e determinadas as MTF. Para quantificar a resolução pela MTF foram determinados os valores correspondentes a 30 e 40% da MTF. Posteriormente foi feita uma avaliação da correlação dos valores de FWHM e MTF. Todos os dados foram processados em ambiente *MatLab@* (Mathworks, Inc., Natick, MA, EUA), sendo os principais recursos utilizados os filtros, interpolações e a Transformada de Fourier.

3. Resultados e Discussão

A figura 5 mostra as PSF adquiridas para todos os sensores nas duas distâncias. Avaliando a influência dos diâmetros, pudemos notar a relação do aumento da largura das curvas com o aumento do diâmetro das bobinas. Em relação à variação de distância, o aumento da distância provocou aumento na largura da curva para as bobinas de menores diâmetros, enquanto para diâmetros maiores as diferenças

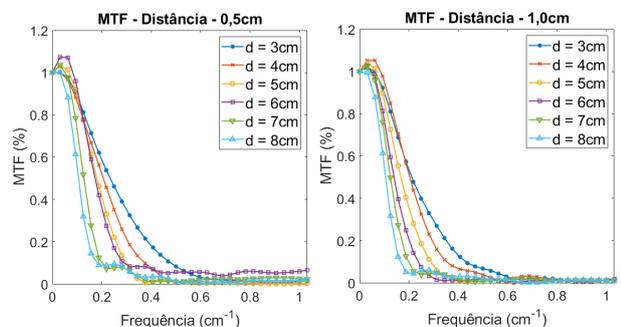
foram atenuadas. Esses dois fatores indicam que menores diâmetros resultam em melhor resolução espacial, enquanto a relação da distância com a resolução é variável de acordo com a geometria do sensor. Além disso, os perfis gaussianos das PSF indicam que ambas técnicas de FWHM e MTF resultarão em valores similares, visto que a FWHM é utilizada em perfis gaussianos.

Figura 5 – PSF dos 6 sensores nas distâncias de 0,5 e 1,0cm.



Após a aplicação da Transformada de Fourier na PSF, obtivemos as MTF dos sensores em ambas distâncias, conforme Figura 6. As análises qualitativas dos perfis de MTF podem ser feitas avaliando o alcance em frequência das curvas. O decréscimo na intensidade da MTF com o aumento da frequência é reduzido com a diminuição do diâmetro do sensor. Isso indica que os menores sensores possuem capacidade de detectar maiores frequências tendo, como consequência, melhores resoluções.

Figura 6 – MTF dos 6 sensores nas distâncias de 0,6 e 1,0cm.



Para quantificar a resolução pela MTF, foram determinadas as frequências referentes a 30% e 40% de intensidade da MTF. As Tabelas 1 e 2 apresentam os valores mínimos para os sensores resolverem duas estruturas próximas (resolução do sensor) nas distâncias de 0,5 e 1,0cm. Os dados de ambos métodos mostraram que menores diâmetros resultam em melhores resoluções para os sensores.

Tabela 1- Valores de FWHM e MTF⁻¹ em 30% e 40% a 0,5cm.

Diâmetro (cm)	FWHM (cm)	MTF ⁻¹ 30% (cm)	MTF ⁻¹ 40% (cm)
3	3,51	2,70	3,03
4	4,71	3,45	3,70
5	5,99	4,17	4,55
6	7,66	4,76	5,26
7	9,94	7,14	7,69
8	12,15	8,33	9,09

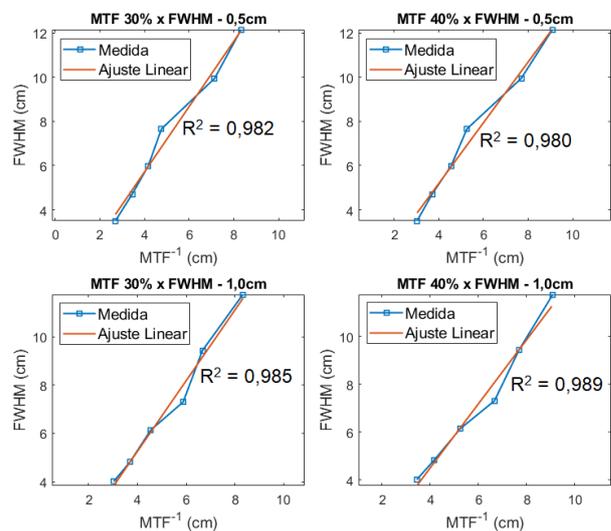
Se tratando do distanciamento, os sensores de menores diâmetros tiveram perdas maiores de resolução com o aumento da distância. Este evento já era esperado, visto que os sensores de menores diâmetros possuem menores alcances nos campos de excitação e este por sua vez caracteriza a sensibilidade do sistema.

Tabela 2- Valores de FWHM e MTF⁻¹ em 30% e 40% a 0,5cm.

Diâmetro (cm)	FWHM (cm)	MTF ⁻¹ 30% (cm)	MTF ⁻¹ 40% (cm)
3	4,01	3,03	3,45
4	4,82	3,70	4,17
5	6,14	4,55	5,26
6	7,30	5,88	6,67
7	9,43	6,67	7,69
8	11,75	8,33	9,09

Ao comparar os métodos de FWHM e MTF, a MTF quantificou melhores valores de resolução para uma mesma medida em relação a FWHM. Essa variação se relaciona com o fato de que a MTF não avalia um único ponto, como a FWHM, mas sim um espectro de frequência completo. A Figura 7 mostra a correlação da FWHM com a MTF⁻¹ em 30 e 40% para ambas distâncias. Utilizando o método de Mínimos Quadrados, os coeficientes de determinação (R²) de todos os casos foram superiores a 0,98, demonstrando que os métodos são linearmente correlacionados.

Figura 7 – Correlação entre os valores de MTF⁻¹ em 30% e 40% e a FWHM nas distâncias de 0,5 e 1,0cm.



A Tabela 3 mostra a resolução espacial de sistemas de medicina nuclear, como o SPECT (*Single Fóton Emission Computed Tomography*), e radiodiagnóstico, como radiografia digital, tomografia computadorizada e mamografia encontrados na literatura ⁹⁻¹². Comparando com o sistema BAC, essas técnicas possuem resolução espacial superior, contudo, apresentam desvantagem como o uso da radiação ionizante, e alto custo operacional e material. Além disso, estudos demonstraram que a BAC foi capaz de monitorar nanopartículas

magnéticas *in vivo* em tempo real, realçando sua boa resolução temporal¹³.

Tabela 3 – Resoluções espaciais de técnicas de medicina nuclear e radiodiagnóstico.

Técnica	Resolução Espacial (mm)
SPECT - CZT	8,83
Tomografia computadorizada	1,67
Radiografia digital	0.80
Mamografia	0,08

Outras técnicas magnéticas como o MRI (*Magnetic Resonance Imaging*) e MPI (*Magnetic Particle Imaging*) podem apresentar resoluções espaciais inferiores a 1,0mm¹⁴. Para isso, essas técnicas necessitam de ambiente eletromagneticamente blindado e tempo relativamente alto de aquisição. Esses fatores acarretam em altos custos, falta de portabilidade e baixa resolução temporal, tornando o sistema BAC uma alternativa de baixo custo, versátil, boa resolução temporal e com possíveis aplicações clínicas.

5. Conclusões

A avaliação qualitativa da PSF dos sensores demonstrou que sensores BAC com menores diâmetros possuem melhores resoluções espaciais. A avaliação quantitativa da resolução através dos métodos de FWHM e MTF indicaram valores no intervalo de 2 até 12cm de resoluções espaciais para os sensores BAC, dependendo do diâmetro do sensor, confirmando a avaliação qualitativa. Além disso, os métodos demonstraram que os menores diâmetros possuem menores alcances do campo de excitação dos sensores. Esses dados tornam possível a seleção de sensores específicos para otimizar suas aplicações de acordo com as necessidades de resolução e sensibilidade.

Apesar de ambos métodos de análise da resolução terem sido aplicados com sucesso para o sistema BAC, o FWHM é limitado a avaliação de um único ponto, assim como a necessidade do perfil da PSF ser gaussiano. Por outro lado, a MTF ofereceu a possibilidade de avaliar todo o espectro de frequência do sinal da PSF. Ao correlacionar os resultados obtidos pelos dois métodos para os sensores BAC, em todos os casos foram verificadas linearidades entre os dados. Sendo a MTF uma técnica mais robusta, eficaz e aplicável ao sistema BAC, há grandes motivações para seu uso em futuros trabalhos.

Apesar da BAC ter mostrado menor resolução espacial em relação a outras técnicas magnéticas, de medicina nuclear e radiodiagnóstico, ela é uma tecnologia recente que carece de desenvolvimento de recursos para uma melhor performance. Além disso, há grande motivação para seu uso como alternativa a outras técnicas pelo uso de radiação não ionizante, baixo custo, versatilidade, portabilidade, boa resolução temporal e aplicabilidade em ambiente clínico.

Agradecimentos

Agradecemos ao Caio César Quini e Matheus Alvarez pela ajuda e conhecimento agregado ao estudo. Este trabalho foi financiado pela FAPESP, CNPq e CAPES.

Referências

1. Cora, LA et al., *Magnetic images of the disintegration process of tablets in the human stomach by ac biosusceptometry*. Phys Med Biol, 2005. 50(23): p. 5523-34.
2. Miranda, JR et al. *An AC biosusceptometer to study gastric emptying*. Medical physics, 1992. 19(2): p. 445-448.
3. Oliveira, FRd. *Uma contribuição ao controle de qualidade de gamacâmeras*. 2000.
4. Nakaya, Y et al., *A method for determining the modulation transfer function from thick microwire profiles measured with x-ray microcomputed tomography*. Medical physics, 2012. 39(7Part1): p. 4347-4364.
5. Asuni, G, Rickey, D and McCurdy, B. *Investigation of the spatial resolution of an online dose verification device*. Medical physics, 2012. 39(2): p. 697-705.
6. Jeon, H et al. *Performance evaluation for pinhole collimators of small gamma camera by MTF and NNPS analysis: Monte Carlo simulation study*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2009. 604(1-2): p. 93-96.
7. Moy, JP. *Signal-to-noise ratio and spatial resolution in x-ray electronic imagers: Is the MTF a relevant parameter?* Medical physics, 2000. 27(1): p. 86-93.
8. Samei, E, Flynn, MJ and Reimann, DA. *A method for measuring the presampled MTF of digital radiographic systems using an edge test device*. Medical physics, 1998. 25(1): p. 102-113.
9. Zandona, EA. *Quantificação da resolução do Sistema SPECT-CZT através do uso da Função de Transferência Modulada (MTF)*. 2013.
10. Alvarez, M et al., *Comparison between subjective and quantitative methods for assessing the resolution limit of radiographic systems*. Revista Brasileira de Física Médica, 2012: p. 13-17.
11. Friedman, SN et al., *A simple approach to measure computed tomography (CT) modulation transfer function (MTF) and noise-power spectrum (NPS) using the American College of Radiology (ACR) accreditation phantom*. Medical physics, 2013. 40(5): p. 051907.
12. Smith, AP. *Fundamentals of digital mammography*. Physics, technology and practical considerations, 2003.
13. Quini, CC et al., *Real-time liver uptake and biodistribution of magnetic nanoparticles determined by AC biosusceptometry*. Nanomedicine, 2017. 13(4): p. 1519-1529.
14. Goodwill, PW et al., *X-space MPI: magnetic nanoparticles for safe medical imaging*. Advanced Materials, 2012. 24(28): p. 3870-3877.

Contato:

Autor Correspondente:
 André Gonçalves Próspero
 UNESP - Campus de Botucatu
 Instituto de Biociências
 Rua Prof. Dr. Antonio Celso Wagner Zanin, s/nº
 CEP: 18618-689, Botucatu, SP, Brasil.
 E-mail: andre.prospero@unesp.br