

TOMOGRAFIA DE IMPEDÂNCIA ELÉTRICA APLICADA A ANÁLISE DE IMAGENS – REVISÃO PRELIMINAR

González, Raul, rgonzales@usp.br¹
Caya Julio, jccava@usp.br¹
Queiroz, Jorge Luiz Lima, kairos@joinville.udesc.br²

¹Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Mecânica

²Universidade de Santa Catarina, Centro de Ciências tecnológicas

Resumo: *A tomografia de impedância elétrica (TIE) é um método de obter imagens internas de órgãos, ou qualquer outro meio condutor volume cujas imagens internas se deseja usar como objeto de pesquisa, com um algoritmo de genérico iterativo (AGI) são reconstruídas as condutividades que geram os pixels de imagem. Esta técnica teve o seu início em aplicações médica atualmente tem se difundido para os diversos ramos da engenharia. Entretanto, este é um problema não linear e mal condicionado o que torna particularmente difícil a solução do problema de tomografia de impedância elétrica exigindo um conhecimento detalhado para sua aplicação. Considera as aplicações da TIE em engenharia de processos com fluido em dutos em suas diversas fases. E avalia a simplicidade e tempo computacional reduzido do algoritmo de Newton-Raphson para a convergência. O presente trabalho faz considerações das características a serem observadas durante a aplicação da técnica, como: a padronização da corrente, a regulação, a convergência e avaliação da imagem.*

Palavras-chave: *TIE, Reconstrução de Imagens, Método de Newton-Raphson, Fluidos Multifásico;*

1. INTRODUÇÃO

As técnicas de tomografia de impedância elétrica (TIE) geram cortes de imagens da seção transversal a partir da variação espacial da condutividade gerada pelos conjuntos de voltagens medidas na fronteira. Como a impedância não é diretamente medida a partir das voltagens medidas na fronteira ela é obtida usando as equações de potencial elétrico e o método de elementos finitos. As voltagens medidas na fronteira são funções da impedância e corrente que são aplicadas no scanner TIE. Usando diferentes sequências de padrões de corrente e de voltagens injetadas, uma aproximação da distribuição espacial das alterações de impedância dentro do objeto é reconstruída.

TIE tem numerosas aplicações que podem ser categorizadas em três campos principais: 1. Industrial. Esta aplicação inclui a imagem de fluxo de fluido em linhas de dutos, medidas de distribuição de fluxo de fluidos em vasos de misturas, e testes não destrutivos tais como detecção de fissuras (Cheney et al, 1999; Dickin et al, 1996). 2. Geofísica. Estas aplicações incluem prospecção geofísica, medidas através de furos e de superfícies (Polydorides & Lionheart, 2002). 3. Medicina. TIE é usada para monitoramento pulmonar e das funções cardíacas, medidas da função cerebral, (Barber, 1984, Barber e Brawn 1989), detecção de hemorragia, medida do aparelho digestivo, detecção e classificação de tumores no tecido do seio e imagem funcional do tórax (Eyugoblu et al, ; 1989 Harris et al, 1992).

TIE possui severas limitações que podem evitar sua adoção no diagnóstico médico rotineiro. Sua maior limitação é sua baixa resolução espacial, suscetibilidade a ruídos e erros dos eletrodos. E em imagens médicas, uma grande variabilidade de imagens entre os temas. Assim TIE não é adequado para imagens anatômicas da mesma maneira que a imagem por ressonância magnética (IRM) ou tomografia computadorizada (TC). Contudo, a TIE mostra-se promissora como ferramenta para diagnósticos de médicos clínicos. Ele tem a vantagem de ser relativamente pouco dispendioso (da ordem de milhares de dólares) quando comparado a modalidades tais como IRM, TC, e Tomografia por Emissão de Pósitron (TEP). Além disso, equipamento TIE é não invasivo, seguro, e como ele é pequeno, leve e de fácil transporte pode ser facilmente deslocado e deixado por extensos períodos de tempo, com baixo custo de energia e manutenção. O seu uso pode ser viável em monitoramento contínuo ao lado do leito em patologias tais como edemas pulmonares, onde é necessário monitorar a quantidade de ar para os pulmões evitando riscos ao paciente, também na hemorragia cerebral e lavagem gástrica. Além disso, tem capacidade de produzir um alto número de imagens por segundo o que encoraja o uso na pesquisa funcional dos órgãos em contraste com a imagem anatômica. A aplicação de imagens funcionais isto pode ser considerado um passo intermediário para uma técnica que determine a alteração no volume do fluxo de ar que entra no pulmão evitando prejuízos ao paciente.

2. PROCESSO DE TOMOGRAFIA INDUSTRIAL

O termo “Tomografia do processo industrial” (IPT) refere-se a toda uma grande variação de técnicas de visualização não invasiva, que são relativamente novas (desde o final da década de 1980) e ainda esta em desenvolvimento. O objetivo da IPT é obter imagens da seção transversal da dinâmica dos processos industriais (Adler, 1996 e Adler, 2004; Asfaw e Adler, 2005). Técnicas de tomografia fornecem um novo meio de visualização do comportamento interno dos processos industriais. As imagens transversais produzida por tomografia fornecem valiosas informações do processo, que podem ser usadas para visualização, monitoramento, modelos matemáticos, verificação e possíveis controles inteligentes. Existem muitos tipos de sistema de tomografia tais como: elétrico, ultrassom, radiação, ressonância magnética nuclear (RMN), microondas e ótico.

Como os métodos de tomografia ainda estão em desenvolvimento, alguns desafios ainda precisam ser focados: melhorar a sensibilidade da resolução espacial das medidas; desenvolvimento de métodos mais precisos de reconstrução de imagens; melhorar a eficiência do processamento dos dados; projetar hardware mecânicos e eletrônicos adequados para o uso seguro e confiável em ambientes industriais severos (não somente no laboratório).

TIE é um problema mal condicionado e para encontrar resultados estáveis incorpora-se na solução alguma forma de conhecimento inicial sobre o comportamento do problema. Neste sentido, muito mais tem que ser feito para a precisão tanto da recuperação das imagens quanto para a geração de modelos diretos que descrevam com mais precisão as trajetórias feita pelos fótons nos tecidos e modelos inversos que recuperem precisamente as imagens das propriedades óticas dos tecidos (Klose, 2003). O uso dos esquemas de otimizações de Newton, por meio do jacobiano (que relaciona às medidas dos dados no contorno as propriedades óticas) estes algoritmos tem sido usado largamente porque eles são fáceis de implementar e podem ser facilmente generalizado tanto para bases de reconstrução de imagens simples quanto complexas (Dehghani et al, 2003, Yalavarthy, 2007). Outros métodos alternativos para redução do numero de parâmetros incluem o uso de base de reconstrução (Paulsen 1996) como também o uso de misturas de algoritmos adaptado ao meio específico de interesse sendo refinados para obter maior precisão numérica.

2.1. Fluidos Multifásicos

Nas aplicações IPT é comum encontrar fluidos em diferentes fases, denominados fluidos multifásicos, em uma mesma região. Estes fluidos em diferentes estados são detectados pela concentração de cada fase que é computado com base no conhecimento das condutividades elétricas de cada fase, gerando a tomografia da condutividade elétrica de cada fase. Neste caso se utiliza a tomografia de resistência elétrica (TRE), que pode ser aplicada a vários processos envolvendo fluidos condutivos na fase continua. Típicas aplicações de TRE são as visualizações de fluidos multifásicos em tubulações e tanques em agitação, para os quais dispositivos comerciais estão disponíveis para uma larga variação de tamanho e tipo do material. Recentes aplicações podem ser vistas na Tabela 1 (Giguere, R., et al., 2008).

Tabela 1. Aplicações de TRE para pesquisa de fluidos

Aplicações	Fases	Referências
Fluxo em tubulações	Sólido - Líquido	Steverson et al, 2006; Dai, 2004; Norman et al, 2005; Pullum et al, 2006.
	Gas - Líquido	Dong et al, 2006; Wang et al, 2006.
	Líquido - Líquido	Henningsson et al, 2006; Henningsson et al, 2007.
Tanque agitado	Líquido - Líquido	Ricard et al, 2005; Kim et al, 2006.
	Gas - Líquido	Ricard et al, 2005.
	Sólido - Líquido	Stanley et al, 2005.
Reator compacto de leito	Sólido - Líquido	Bolton et al, 2004.
Coluna de bolhas	Gas - Líquido	Vijayan et al, 2007; Fransolet et al, 2001; Toye et al, 2005. Fransolet et al, 2005;

3. MODELOS

3.1. Problema Direto

Seja Ω um domínio submetido a presença de um campo elétrico (Cheney et al., 1999) gerando assim uma distribuição de potencial elétrico, da equação de Maxwell,

$$\Delta \gamma(x, \omega) \Delta u = 0 \quad (1)$$

onde x é um ponto dentro de Ω , e u é o potencial elétrico e γ é a admitividade, se as correntes elétricas são injetadas na fronteira da superfície $\delta\Omega$ então temos a densidade elétrica J como

$$\gamma \delta u / \delta v = J \text{ em } \delta\Omega \quad (2)$$

As Equações (1) e (2) junto com a condição de $\int_{\delta\Omega} J = 0$; $\int_{\delta\Omega} u = 0$, and $\int_{\delta\Omega} u = 0$, (voltagem de referencia), constituem um modelo de eletrodos que é conhecido como: *Continuum Model*.

O fluxo total de corrente que passa pelo eletrodo é igual a integral da densidade de corrente, isto é:

$$\int_{\varepsilon_l} \gamma \delta u / \delta v \, ds = C_l \quad l = 1, 2, \dots, L \quad (3)$$

A matriz de condutividade local para cada elemento da malha é obtida a partir da equação (Vanegas, 2002):

$$[y_c] = \iiint_v \frac{1}{4A^2} [B]^T [D] [B] \, dV = \frac{tA}{4A^2} [B]^T [D] [B] = \frac{t}{4A} [B]^T [D] [B] \quad (4)$$

onde, y_c = Matriz local de condutividade; t: espessura; B: matriz geométrica; D: matriz de propriedades; A: área de cada elemento triangular. Para o calculo das voltagens, é usado a expressão,

$$[Y] * [V_j] = [C_j] \quad (5)$$

onde $[Y]$: é a matriz de condutividade global; e $[V_j]$ é o vetor das voltagens nos pontos da malha de elementos finitos.

$[C_j]$: é o padrão de voltagens aplicado aos eletrodos.

Então encontra-se a equação:

$$[V_j] = [Y^{-1}] * [C_j] \quad (6)$$

onde $[Y^{-1}]$: é a inversa da matriz de condutividade global.

As variações nas condutividades são funções da corrente que por sua vez são função da voltagem e assim para se conhecer as estas alterações que vão gerar a imagem é necessário resolver um problema inverso. No processo de solução é suposto uma distribuição de condutividade inicial e são calculadas as voltagens e com isto se verifica se as novas condutividades se aproximam das anteriores dentro de uma tolerância especificada.

3.2. Problema Inverso

O objetivo do contraste de imagem e reconstruir as alterações na impedância ou condutividade que ocorre em um intervalo de tempo escolhido. Entretanto não se conhece a alteração da impedância, por isto, é um problema inverso. Para resolvê-lo, se supõe um valor para a solução e baseado nas medidas e formulação teórica se calcula outro valor e verifica se a diferença entre o valor suposto e o calculado é menor que a tolerância se não se faz nova interação. O método é comumente utilizado para aplicações em fenômenos de imagens que se alteram com o tempo, tais como alteração de impedância durante a respiração (Adler et al 1996, Adler, 2004). O refinamento dos contrastes da imagem é amplamente aplicado para melhorar a reconstrução e garantir a estabilidade da imagem frente a problemas tais como contatos de impedância desconhecidas, posição inapropriada dos eletrodos, contorno insuficientemente conhecida, não linearidade e o uso de aproximações do campo elétrico 3D por 2D (Barber 1989; Harris et al, 1992).

O calculo das alterações na condutividade é realizado usando uma aproximação com operador linear. Quando se enfrenta um problema não linear a solução é interativa com o operador linearizado sendo atualizado e reaplicado a cada iteração. No entanto a maioria dos aplicativos que utilizam o contraste de imagem supõe que a variação da condutividade durante o intervalo de tempo seja pequena para que uma única etapa do operador linear seja suficiente para uma solução “boa o suficiente”. Neste sentido, deve-se buscar um algoritmo de boa convergência, o método de Newton-raphson é escolhido pela sua simplicidade e alta capacidade de convergência. O operador linear é conhecido como jacobiano ou matriz de sensibilidade. Em um modelo com E elementos e M medidas do contorno, o Jacobiano, também chamada matriz de sensibilidade, é uma matriz $M \times E$. A matriz Jacobiano é calculada coluna por coluna com o i_{th} coluna descrevendo o efeito da alteração na condutividade do i_{th} sinal do elemento medido entre os pares de eletrodos.

A matriz de sensibilidade é definida como $H_j(\sigma_0)$;

$$(\sigma_0) = Y^{-1} \frac{\partial Y}{\partial \sigma_i} Y^{-1} c_j \quad (7)$$

onde:

c_j : representa o padrão de excitação Y^{-1} é a inversa da matriz de condutividade.

$H_{j,i}(\sigma_0)$: é a matriz de sensibilidade em função da condutividade dos elementos σ_i , com i padrões de voltagens.

$\frac{\partial Y}{\partial \sigma_i}$: derivada parcial da matriz de condutividade com respeito as condutividades dos elementos, com $i = 1, a n_e$ (o numero de elementos). Então a Equação (7) é calculada com respeito a cada elemento:

$$H_{j,i}(\sigma_0) = Y^{-1} \frac{\partial Y}{\partial \sigma_1} Y^{-1} c_j - Y^{-1} \frac{\partial Y}{\partial \sigma_2} Y^{-1} c_j \dots - Y^{-1} \frac{\partial Y}{\partial \sigma_{n_e}} Y^{-1} c_j \quad (8)$$

Na formulação clássica do método de Newton-Raphson na TIE, busca-se encontrar a distribuição de condutividades σ^* que minimize a diferenças entre as voltagens calculadas através do método de elementos finitos e as voltagens medidas (ou tomadas de outros métodos),

$$\{e\} = \{V_e\} - \{V_m\} \quad (9)$$

onde $\{V_e\}$ e $\{V_m\}$ são as voltagens calculada e as voltagens medidas, respectivamente. Da formulação global do modelo de elementos finitos,

$$[Y] \times [V_c] = [C] \quad (10)$$

Então a diferença entre as voltagens

$$\{e\} = [T] \times [Y(\sigma)]^{-1} \times [C] - \{V_m\} \quad (11)$$

onde, T é a matriz de transformação, para tornar o sistema de equações dimensionalmente compatíveis, isto é, a dimensão de $\{V_m\}$ é igual ao numero de eletrodos na fronteira, enquanto a dimensão de $\{V_e\}$ é igual ao numero de graus de liberdade do modelo de elementos finitos na formulação direta. Entretanto, as voltagens são calculadas nas posições correspondentes aos pontos de medida, que são os eletrodos no modelo real,

$$\{V\}_N \Rightarrow T \Rightarrow [V_c]_L \quad (12)$$

Assim, a equação pode ser expressa $\{e\} = 0$ para cada padrão de voltagens injetadas. Para encontrar o conjunto de equações do método de Newton-Raphson, utiliza-se a serie de Taylor expandida, isto é

$$f_{(i)}(\sigma + \partial\sigma) = f_{(i)}(\sigma) + \sum \frac{\partial f_{(i)}(\sigma)}{\partial \sigma_j} \partial\sigma_j + O(\partial\sigma^2) \quad (13)$$

Os termos $\partial\sigma^2$ e de ordem superior não contribuem significativamente nos cálculos, e fazendo, $f_{(i)}(\sigma + \partial\sigma) = 0$, temos um sistema de equações lineares em $\partial\sigma$, que direciona cada função da solução para zero simultaneamente,

$$\sum_{j=1}^N J_{ij} \partial\sigma_j = -f_{(i)}(\sigma), \quad (14)$$

onde,

$$J_{ij} = \frac{\partial f_{(i)}(\sigma)}{\partial \sigma_j} \quad (15)$$

A Equação (14) define um processo iterativo para calcular a condutividade homogênea para cada elemento σ^* , a cada iteração k, e a condutividade suposta σ^k , é resolvida a Equação (15) e possibilita a atualização de σ^* to (Yorkey et al. 1987 a,b)

$$\sigma_i^{k+1} = \sigma_i^k + \partial\sigma_i, \quad i = 1, \dots, E \quad (16)$$

E temos a condutividade homogênea para cada elemento da malha de elementos finitos. Quando a iteração produz uma variação de σ^* menor que a tolerância, o método converge.

3.3. Distribuições de Corrente

Vários protocolos para injeção de corrente e coleta das medidas tem sido propostas ao longo dos anos. Com algumas exceções os protocolos podem ser categorizados como dirigidos a cada par ou a múltiplos pares de eletrodos (Borsic, 2002). Scanner de pares dirigidos tem uma única fonte de corrente onde os terminais são sequencialmente ligados a

condução de pares de eletrodos e a voltagem é medida entre os pares de eletrodos restantes. A fonte de corrente é, então, transferida para outro par de eletrodos e do processo de medição de tensão repetido até que a fonte passe por todos os eletrodos recolhendo um conjunto completo de medidas. Sistemas de várias unidades são mais complexos e caros, mas têm a capacidade de conduzir corrente em mais de dois eletrodos em um mesmo momento, enquanto a vantagem óbvia de um sistema de acionamento de um único par, que necessita apenas uma fonte de corrente é o procedimento mais comum. A corrente é aplicada e injetada através de dois eletrodos adjacentes e as tensões resultantes medidas nos sucessivos pares de eletrodos adjacentes. Ou ainda, a corrente é aplicada através do próximo par de eletrodos e as medições de tensão são repetidas. O procedimento é repetido até que cada par possível de eletrodos adjacentes tenha sido usado para injetar corrente. A estratégia de injeção adjacente exige um mínimo de hardware para implementar, ela é dirigida principalmente a região externa do objeto fotografado. A densidade da corrente é mais elevada entre os eletrodos de injeção e diminui rapidamente em função da distância. O método é, portanto, muito sensível à contrastes de condutividade, perto da fronteira e insensível à contrastes centrais. É também sensível a perturbações na forma de contorno do objeto, no posicionamento dos eletrodos e é bastante sensível a erros de medição e de ruído (Dicken, 1996). Entretanto, estes problemas podem ser minimizados através de técnicas como a regularização.

3.4. Regularização

O método da regularização consiste na determinação da solução aproximada mais suave e compatível com os dados em observação, para certo nível de ruído. A busca da solução mais suave é uma informação adicional, que transforma o problema mal-condicionado (que é o caso tratado no presente trabalho) num problema bem-posto.

Os métodos de regularização se apresentam em grandes variedades, muitas vezes é formalmente definida como um método de inversão dependendo de um único parâmetro real $\alpha \geq 0$, que produz uma família de soluções aproximadas (Karl, 2000). As técnicas de regularização como os métodos de regularização de Tikhonov, tentam de reduzir os efeitos da resolução de um sistema mal-condicionado (Cohen-Bacrie et al., 1997), restaurando a continuidade da solução sobre os dados (Cheney et al, 1990).

O mais amplamente referenciado método de regularização é o método Tikhonov ou método Tikhonov-Phillips. Com a regularização de Tikhonov informações adicionais sobre a solução, comumente referido como informação prévia, é incorporada a solução como um termo adicional na minimização dos mínimos quadrados. Se minimiza a expressão da forma:

$$\min \phi_2(\vec{\sigma}) = \frac{1}{2} (\vec{V}_m - \vec{V}_c(\vec{\sigma}))' (\vec{V}_m - \vec{V}_c(\vec{\sigma})) + \alpha (\vec{H}' \vec{H} \vec{\sigma}) = 0 \quad (17)$$

onde V_m é o vetor de voltagem medido e σ é o valor inicial da condutividade e V_c é o operador que simula a distribuição de voltagem com as condutividades iniciais. A desejada reconstrução que minimiza a distribuição das condutividades. Supõe-se σ^k uma distribuição suposta inicialmente, esta idéia foi avaliada por Vauhkonen et al (2001), a distribuição de condutividade foi aproximada como uma combinação linear de algumas bases de funções pré-selecionadas que foram construídas a partir de informações iniciais da estrutura e condutividades (Miranda, 2000).

A modelagem da impedância de contato na interface do eletrodo e o meio tem sido trabalhado por vários autores com a finalidade de obter uma maneira mais representativa do comportamento elétrico na fronteira do meio e conseguir uma estimativa mais precisa da condutividade. Neste sentido, implementou-se o modelo proposto por Hua et al(1993), que além de representar a distribuição do campo elétrico na interface de contato, considera-se os efeitos dominantes da impedância de contato no eletrodo, tais como discriminação, impedância de contato efeito *shunt* e *edge*. Os efeitos resultantes destes procedimentos são observando nos tópicos seguintes.

3.5. Resultados da análise numérica

Nas curvas de convergência apresentadas para os testes utilizou-se como parâmetro a norma euclidiana das diferenças entre as voltagens medidas e calculadas e do incremento da condutividade a cada interação (Vanegas Molina, 2002), ou seja:

$$\|\vec{V}_m - \vec{V}_c\|_1 = \left| (\vec{V}_m - \vec{V}_c)' (\vec{V}_m - \vec{V}_c) \right|^{\frac{1}{2}} \quad (18)$$

$$\|\delta\vec{\sigma}\|_2 = \left[\delta\vec{\sigma}' \delta\vec{\sigma} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (19)$$

Para obtenção dos dados teóricos foi usada uma malha de elementos finitos que contém 32 nós e 44 elementos. A distribuição de condutividade foi adotada $2,5 (\Omega m)^{-1}$ e nas demais regiões foi adotado $8,78 (\Omega m)^{-1}$ a espessura dos elementos foi de $0,1 \cdot 10^{-3}m$. O modelo foi excitado através dos padrões diametrais de injeção de corrente, sendo o valor de corrente aplicado em 16 pontos na fronteira com valor de 5 mA.

Com base na análise dos dados experimentais é visto que a abordagem clássica do método de Newton-Raphson, apresenta uma boa performance convergindo com poucas iterações (Vanegas Molina, 2002). A sua solução tem duas partes a solução direta (linear) e outra parte não linear o problema inverso a associação destas duas soluções faz com que as tensões medidas e calculadas, oscilem em torno da trajetória até a solução adequada, conforme Figura 1(a). As curvas de convergência do processo clássico de Newton-Raphson são apresentadas na Figura (1a) e (1 b).

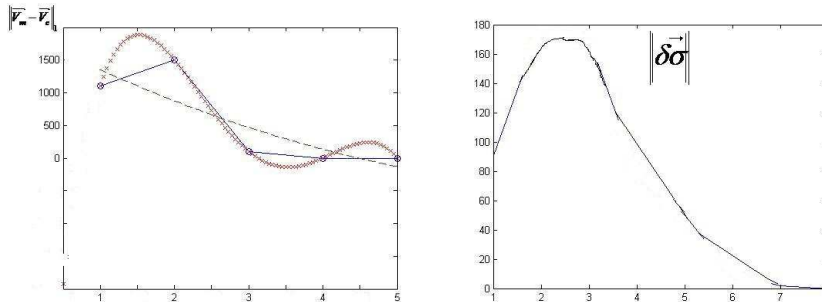


Figura 1. Convergência do algoritmo Newton-Raphson com dados teóricos: a) erro quadrático das voltagens $\|\vec{V}_m - \vec{V}_c\|_1$ e b) em relação as condutividades $\|\delta\sigma\|$ em função das iterações. (Adaptado de Miranda,2000).

As Figuras 1 (a) e (b) evidenciam a vantagem do uso do método para processar dados experimentais; e do emprego da regularização de Tikhonov que penaliza soluções com elevadas variações de condutividade em elementos vizinhos da malha. Esta metodologia tem se mostrada adequada nas pesquisas de TIE permitindo a geração de imagens.

3.5. Avaliação da Imagem

A partir um conjunto de imagem com dados ideais é possível comparar os algoritmos genéricos de reconstrução de imagem. A Figura (2) representa as tomografias reconstruídas usando Algoritmos Genéricos Iterativos (AGI). Um modelo de elementos finitos bidimensional foi utilizado para reconstruir as imagens (Giguère, R., et Al., 2008).

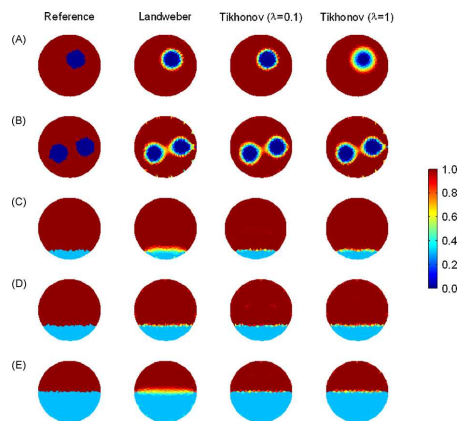


Figura 2. Reconstrução de imagens usando algoritmos iterativos genéricos.

O método Tikhonov exige a seleção da constante que é encontrada de forma heurística. Durante a seleção o investigador compara as imagens encontradas com as imagens de referencia, Figura (2) e seleciona a o valor da constante a partir das imagens encontradas. A figura (2) mostra esta seleção com base nas figuras de referencias a fim de comparar a qualidade das imagens reconstruídas. Wheeler et al (2002) revisou diversas figuras de referencia para o IET, que têm sido propostos na literatura e servem como parâmetros de comparação. Uma maneira de comparar usado preliminarmente, é usar a conhecida capacitâncias e comparar as imagens obtidas com as figuras de mérito para encontrar o melhor valor (Adler, 1996; Adler, 2004). Esta abordagem utiliza o parâmetro Tikhonov de regularização ajustável que controla o *trade-off* entre o desempenho do ruído e a resolução da imagem. Na Figura 3, obtida neste

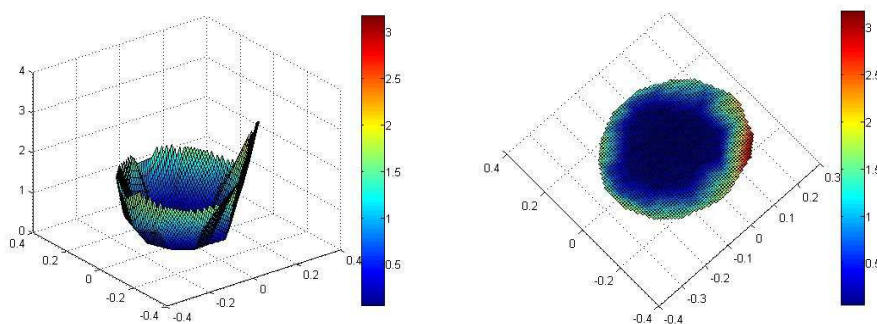


Figure 3. Distribuição da e impedância em um meio salino

trabalho com o método de Newton-Raphson foram usadas a comparação das capacitâncias obtidas para garantir que foi realizada uma boa reconstrução da imagem original. Intuitivamente a seleção deve produzir soluções que preservem o máximo dos dados na medida do possível, aplicando a menor quantidade de informação a priori necessária para obter uma reconstrução útil. Esta abordagem permite uma interpretação teórica da imagem do algoritmo de reconstrução que leva em conta de maneira natural as varias fontes de informações *a priori*: a magnitude do ruído dos equipamentos eletrônicos e a máxima resolução espacial obtida para o numero de eletrodos utilizados.

4. DISCUSSÃO

O objetivo do presente trabalho foi revisar as técnicas de tomografia de impedância elétrica elencando os tópicos mais significativos para a pesquisa de fluidos, caracterizando o algoritmo iterativo a ser utilizado e adequado as condições dos processos industriais. As indústrias no seu cotidiano precisam de ferramentas que forneçam respostas rápidas em qualquer processo que requeira gerenciamento. O algoritmo iterativo que melhor se adapta a programação e com respostas rápidas é o método de Newton-Raphson e que resolve o sistema não linear, associado a minimização do erro quadrático dado pelas diferenças entre as voltagens medidas e calculadas, de modo eficiente.

Com base nos testes com dados de simulação numérica constatou-se que o método de Newton-Raphson, na sua formulação clássica numérica, mostra um bom desempenho e converge com um baixo numero de iterações. Isto favorece o desenvolvimento futuro de ferramentas que monitorem o fluxo de fluidos em ambientes de difícil acesso, como a prospecção de petróleo e a pesquisa no interior de fornos metalúrgicos. Atualmente também surgem aplicações na indústria de alimento para se monitorar o processo de automatizado de fabricação de alimentos para garantir a eficiência com melhor aproveitamento das matérias primas e a redução de resíduos.

O tempo de convergência é um excelente atrativo para a pesquisa em dutos industriais. A Figura (3), mostra que o método de Newton-Raphson (MNR) apresenta bom desempenho, obtendo imagens com elevados índices de gradiente de condutividade. Este comportamento mostra o potencial do MNR para pesquisa de fluidos multifasicos como são a maioria dos fluidos encontrados nos processos industriais.

4. REFERENCIAS

- Adler A, Guardo R, 1996 "Electrical impedance tomography: regularized imaging and contrast detection", IEEE Trans Med Imaging, vol 15 170-9
- Adler A, 2004 "Accounting for erroneous electrode data in electrical impedance tomography", Physiol Meas, 227-238
- Asfaw Y, Adler A, 2005 Automatic Detection of detached and erroneous electrodes in electrical impedance tomography, Physiol Meas, 26 S175-S183.
- Barber, D. C.; Brawn, B.N. 1984 "Applied Potential Tomography", J. Phys. E. Sci. Instrum., vol. 17, pp 723-733.
- Barber, D.C. 1989 "a review of image reconstruction techniques for electrical impedance tomography" Med. Phys. 16 (2), Mar/Apr p.162-9.
- Bolton, G.T. Hooper, C.W. Mann, R. Stitt, E.H. 2004 "Flow distribution and velocity measurement in a radial flow fixed bed reactor using electrical resistance tomography, Chem. Eng. Sci. 59 1989-1997.
- Borsic A, 2002 "Regularisation Methods for Imaging from Electrical Measurements", PhD Thesis, Oxford Brooks Universit.
- Cheney, M., Isaacson, D. Nevell, J.C. 1999 "Eletrical Impedance tomography", SIAM J. Applied Math. Review . pp. 85-101.
- Cheney M, Isaacson D, Newell JC, Simske S, Goble JC, NOSER, 1990 "An algorithm for solving the inverse conductivity problem Internet", J Imaging Systems & Technol, 2, 66-75.
- Cohen-Bacrie C, Goussard Y, Guardo R, 1997 "Regularized reconstruction in electrical impedance tomography using a variance uniformization constraint", IEEE Trans. Medical Imaging, 1997, 16, 562-571.
- Dehghani, H. Pogue, B. W. Jiang, S. Brooksby, B. and Paulsen, K. D., 2003. "Three dimensional optical tomography: resolution in small object imaging," Appl. Opt. 42, 3117-3128.

- Dai, Y. Pachowko, A.D. Wang, M. 2004 "The control of polymer addition to raw waste sludge using electrical resistance tomography—a preliminary study", Part. Part. Syst. Charact. 21, 228–233.
- Dickin F, Wang M, 1996 "Electrical resistance tomography for process tomography", Meas Sci Tech, 1996 7 247-260.
- Eyuboglu BM, Brown BH, Barber DC, 1989 "In vivo imaging of cardiac related impedance changes", IEEE Eng Med Biol Mag, 8, 3945.
- Fransolet, E. Crine, M. L'Homme, G. Toye, D. Marchot, P. 2001 "Analysis of electrical resistance tomography measurements obtained on a bubble column", Meas. Sci. Technol. 12 1055–1060.
- Fransolet, E. Crine, M. Marchot, P. Toye, D. 2005 "Analysis of gas holdup in bubble columns with non-Newtonian fluid using electrical resistance tomography and dynamic gas disengagement technique", Chem. Eng. Sci. 60 6118–6123.
- Giguère, R. Fradette, L., Mignon, D. Tanguy, P.A. 2008 "ERT algorithms for quantitative concentration" Measurement of multiphase flows Chemical Engineering Journal 141 305–317
- Harris ND, Brown BH, Barber DC, 1992 Continuous monitoring of lung ventilation with electrical impedance tomography, Med Biol Soc, 1754-1755.
- Henningsson, M. Ostergren, K. Dejmek, P. 2006 "Plug flow of yoghurt in piping as determined by cross-correlated dual-plane electrical resistance tomography, J. Food Eng. 76 163–168.
- Henningsson, M. Regner, M. Ostergren, K. Tragardh, C. Dejmek, P. 1997 "CFD simulation and ERT visualization of the displacement of yoghurt by water on industrial scale, J. Food Eng. 80 166–175.
- Hua, P.J. Woo, J. G. Webster & Tompkins, 2001 "Finite Element Modeling of Electrode Skin Contact Impedance in electrical Impedance Tomography" IEEE trans. Biomed. 40(4) 335-343.
- Karl WC, 2000 "Regularization in image restoration and reconstruction, in Handbook of Image and Video Processing", Bovik A, Ed, chapter 3, 141-161. Academic Press, 2000.
- Klose, A. D. and A. H. Hielscher, 2003 "Quasi Newton methods in optical Tomography image reconstruction," Inverse Probl. 19, 387-409.
- Kim, S. Nkaya, A. N. Dyakowski, T. 2006 "Measurement of mixing of two miscible liquids in a stirred vessel with electrical resistance tomography, Int. Commun. Heat Mass Transfer" 33 1088–1095.
- Miranda, D.A.A. 2000 "Algoritmo da Tomografia por Impedância Elétrica Baseada em Newton Raphson" São Paulo.
- Norman, J.T. Bonnez, R.T. 2005 "Measurement of solids distribution in suspension flows using electrical resistance tomography" Can. J. Chem. Eng. 83 24–36.
- Paulsen K. D. e Jiang, H. 1996 "Enhanced frequency-domain optical image reconstruction in tissues through total-variation minimization" Appl. Opt. 35, 3447-3458.
- Polydorides N, Lionheart WRB, 2002 "A MATLAB based toolkit for three-dimensional Electrical Impedance Tomography: A contribution to the EIDORS project, Measurement Science and Technology, 13, 1871-1883.
- Pullum, L. Graham, L. Rudman, M. Hamilton, R. 2006 "High concentration suspension pumping", Miner. Eng. 19 471–477.
- Ricard, F. Brechtelsbauer, C. Xu, Y. Lawrence, C. Thompson, D. 2005 "Development of an electrical resistance tomography reactor for pharmaceutical processes", Can. J. Chem. Eng. 83 11–18.
- Soleimani, M., Gómez-Laberge, C. and Adler, A. 2006 "Imaging of conductivity changes and electrode movement in EIT" Physiol. Meas. 27 S103–S113.
- Stanley, S.J. Mann, R. Primrose, K. "Interrogation of a precipitation reaction by electrical resistance tomography" (ERT), AIChE J. 51 (2005) 607–614.
- Stevenson, R. Harrison, S.T.L. Miles, N. Cilliers, J.J. 2006 "Examination of swirling flow using electrical resistance tomography", Powder Technol. 162 157–165.
- Toye, D. Fransolet, E. Simon, D. Crine, M. L'Homme, P. Marchot, G. 2005 "Possibilities and limits of application of electrical resistance tomography in hydrodynamics of bubble columns" Can. J. Chem. Eng. 83 4–10.
- Vanegas Molina, N.A, 2002, 2002 "Redução do Erro Numérico do Filtro Estendido de Kalman Aplicado a Tomografia de Impedância Elétrica", São Paulo, 108p.
- Vauhkonen M, 1997 "Electrical Impedance Tomography and Prior Information", PhD thesis, Department of Applied Physics, Kuopio University.
- Vauhkonen M, Lionheart WRB, Heikkinen LM, Vauhkonen PJ and Kaipio JP, 2001 "A Matlab Package for the EIDORS project to reconstruct two-dimensional EIT images", Physiol Meas, 2001, 22 107-111.
- Vijayan, M. Schlager, H.I. Wang, M. 2007 "Effects of Sparger geometry on the mechanism of flow pattern transition in a bubble column" Chem. Eng. J. 130 171–178.
- Wheeler J, Wang W, Tang M, A comparison of methods for measurement of spatial resolution in two dimensional circular EIT images, Physiol Meas, 2002, 23, 169-76.
- Yalavarthy, P. K. Pogue, B. W. Deghani, H. and Paulsen, K. D. 2007 "Weight-matrix structured regularization provides optimal generalized least-squares estimate in diffuse optical tomography," Med. Phys. 34, 2085-2098.
- Yorkey, T.J., Webster, J.G. and W.J. Tompkins, 1987, "Comparison of Impedance Tomography Reconstruction Algorithms". Clin. Phys. Physiol. Meas. 8 (Suppl. A.), 55-62.
- Yorkey TJ, Webster JG, Tompkins WJ, 1987b, "An improved perturbation technique for electrical impedance imaging with some criticisms", IEEE Trans Biomed Eng. BME-34, 898-901.
- Wang, M. Lucas, G. Dai, Y. Panayotopoulos, N. Williams, R.A. 2006 "Visualisation of bubbly velocity distribution in a swirling flow using electrical resistance tomography", Part. Part. Syst. Charact. 23 321–329.

Woo EJ, Hua P, Webster JG, Tompkins WJ, 1992 "Measuring lung resistivity using electrical impedance tomography", IEEE Trans Biomed Eng, 39, 756-60.

5. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo material impresso incluídos neste trabalho.

ELECTRICAL IMPEDANCE TOMOGRAPHY APPLIED IN IMAGE ANALYSIS – PRELIMINARY REVIEW

González, Raul, rgonzales@usp.br¹

Caya Julio, jccaya@usp.br¹

Queiroz, Jorge Luiz Lima, kairos@joinville.udesc.br²

¹Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Mecânica

²Universidade de Santa Catarina, Centro de Ciências tecnológicas

Abstract: *The electrical impedance tomography has been applied to a broad range of research in medical and engineering processes. It is a method of obtaining images of internal organs, or any other volume conductor whose internal images if it wishes to use as a research subject, with a generic iterative algorithm (GIA) are reconstructed conductivities that generate the pixel image. This technique initiated in medical applications and has been now spread to the various branches of engineering. However, this is a problem non linear and ill-conditioning which makes it particularly difficult to solve the problem of electrical impedance tomography, requires a detailed knowledge for its application. It considers applications of EIT in process engineering in ducts with fluid in their various phases. And evaluates the simplicity and reduced computational time algorithm of the Newton-Raphson for the convergence. This study raises questions regarding the characteristics to be observed during application of the technique, such as the standardization of current, the regulation, the convergence and evaluation of the image.*

Keywords: *EIT, Image Reconstruction, Newton-Raphson method, Multiphase Fluid;*

6. RESPONSIBILITY NOTICE

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper.