



Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

Centro Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento de Instrumentação Agropecuária  
Ministério da Agricultura e do Abastecimento

Rua XV de Novembro, 1452 - Caixa Postal 741 - CEP 13560-970 - São Carlos - SP  
Telefone: (16) 274 2477 - Fax: (16) 272 5958 - e-mail: [postmaster@cnpdia.embrapa.br](mailto:postmaster@cnpdia.embrapa.br)

ISSN 1413-8808

# PESQUISA EM ANDAMENTO

Nº 26, ago/98, p.1-8

## TOMOGRAFIA POR IMPEDÂNCIA ELÉTRICA E SEUS POSSÍVEIS USOS NA AGROPECUÁRIA

Paulo Estevão Cruvinel<sup>1</sup>  
Ladislau Marcelino Rabello<sup>1</sup>  
Sérgio Mascarenhas<sup>2</sup>  
Ruy Alberto C. Altafim<sup>3</sup>  
Giovane E. Gigante<sup>4</sup>  
Enrico M. Staderini<sup>5</sup>  
Roberto Cesareo<sup>6</sup>

### Introdução

A tomografia por impedância elétrica é uma técnica voltada à obtenção de imagens de distribuição de propriedades elétricas de uma secção transversal de um corpo condutor .

De forma geral, obtêm-se as medidas de potenciais elétricos sobre contornos de uma secção, os quais são obtidos pela injeção de correntes elétricas. McAdms & Jossinet (1985) apresentaram uma completa revisão, inclusive histórica, sobre as variações de impedância em tecidos humanos. Entretanto, a idéia de se obter a imagem da distribuição da resistividade de uma secção, por exemplo do corpo humano, é relativamente nova. Os primeiros trabalhos neste campo foram publicados no início dos anos 80 (Barber & Brown, 1982; Jossinet, 1983; Webster et al., 1983).

Um dos primeiros tomógrafos de impedância desenvolvidos para medida em vivo constou de 16 eletrodos, com o qual Brown et al. (1982) começou a reconstruir a imagem de uma secção do antebraço imerso em uma solução salina de um recipiente cilíndrico, onde estavam dispostos os eletrodos.

Os sistemas mais recentes fazem uso de um número superior de eletrodos e de nova estratégia para a aquisição dos dados, assim como para a imersão de correntes, permitindo melhores figuras de mérito quanto à performance. Como

<sup>1</sup> Embrapa Instrumentação Agropecuária Cx. P. 741, 13560-970, São Carlos SP,  
e-mail: [cruvinel@cnpdia.embrapa.br](mailto:cruvinel@cnpdia.embrapa.br);

<sup>2</sup> IEA-USP, Cx. P. 440, 13560-250, São Carlos-SP;

<sup>3</sup> USP-EESC Campus São Carlos, Cx. P. 359, 13560-970, São Carlos-SP;

<sup>4</sup> Dipartimento de Fisica, Università degli Studi di Roma "La Sapienza" Italia;

<sup>5</sup> Centro Interdipartimentale di Ricerca per l'Ánalise dei modelli e dell' Informazione nei Sistemi Biomedici,  
Università degli Studi di Roma Italia.

<sup>6</sup> Università degli Studi di Sassari Italia.

PA/26, CNPDIA, ago/98, p.2

exemplo podemos citar o sistema ACT3 com 32 eletrodos (Jossinet, 1994), o qual foi concebido em arquitetura de terceira geração, podendo adquirir 480 imagens em apenas um segundo.

Neste trabalho são apresentados os princípios básicos de um tomógrafo por impedância elétrica e suas potencialidades de uso na agropecuária.

*O problema da reconstrução de imagem na tomografia por impedância elétrica.*

O problema teórico com o qual é necessário lidar para a reconstrução envolve a distribuição de resistividade em uma região bidimensional  $A$  com contorno  $A$ . A passagem de uma corrente elétrica através de eletrodos fixados no contorno de um corpo gera um campo elétrico que é governado pela equação de Poisson:

$$\nabla \rho^{-1} \nabla V = f \quad (1)$$

com a seguinte condição de contorno:

$$\rho^{-1} \frac{\partial V}{\partial \eta} = J_0 \quad ; \quad \text{sobre } A \text{ com } I_0 = 0, \text{ onde } J_0 = J_{\text{(imersa ou injetada)}} \quad (I_0 = \text{Corrente}$$

Injetada;  $J_0$  = Densidade de corrente e  $V$  = Tensão lida.

-  $(X, y)$ ,  $V(x, y)$  e  $f(x, y)$  são respectivamente a resistividade, o potencial e a fonte de corrente,  $\nabla$  é o operador de Poisson dado por:

$$\nabla = \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y}$$

Em tomografia por impedância faz-se uso de corrente com frequência de 50kHz para a determinação da distribuição de resistividade. Nesta frequência é possível minimizar efeitos de polarização (Todor et al. 1994). Para o caso de um sistema onde não há corrente com frequência nesta sintonia pode-se escrever que ( $f(x, y) = 0$ ):

$$\nabla \cdot \rho^{-1} \nabla V = 0 \quad (2)$$

Para um meio homogêneo a equação (2) pode ainda ser simplificada e obtém-se daí a equação de Laplace, ou seja:

$$\Delta V = 0 \quad (3)$$

onde  $\Delta$  é o operador de Laplace, dado por:

$$\Delta = \nabla \cdot \nabla = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}$$

Para uma distribuição particular de corrente, o potencial sobre o contorno da secção dependerá da distribuição da resistividade no seu interior. A medida do potencial por uma simples injeção de corrente, entretanto, não fornece informação suficiente para reconstruir a distribuição de resistividade. São necessárias, assim, outras medidas do potencial aplicando-se novas distribuições de corrente de forma que os dados possam ser suficientes para o cálculo de uma distribuição aproximada.

PA/26, CNPDIA, ago/98, p.3

Por outro lado, ao procurar-se calcular uma solução com método do tipo iterativo depara-se com três problemas diversos a saber (Hun & Woo, 1990):

- O problema direto: dada uma distribuição de resistividade, com uma densidade de corrente no contorno, observa-se ser necessário calcular o potencial e a distribuição de corrente no interior da superfície;
- O problema inverso: dadas as distribuições do potencial e da corrente, calcular a distribuição da resistividade no interior da superfície;
- O problema do valor no contorno: dadas as distribuições de corrente e do potencial no contorno, calcular a distribuição da resistividade.

Os programas que fazem uso de algoritmos de reconstrução baseados em elementos finitos são muito complexos de serem implementados, seja pelo tempo necessário para desenvolvê-los ou porque necessitam de computadores velozes para operações matemáticas em ponto flutuante. Por esta razão os algoritmos baseados em técnicas de retroprojeções de linhas equipotenciais têm sido largamente utilizados na técnica de tomografia por impedância (Barber et al. 1983). Esta modalidade algorítmica de reconstrução não oferece boa qualidade de imagens, porém são velozes na reconstrução e não são complexas de serem implementadas.

#### *Software para reconstrução.*

O software para reconstrução de imagens é concebido pelo cálculo de linhas equipotenciais baseado na fórmula de Poisson com solução do problema de Dirichlet sobre o círculo unitário, Alessandrini (1998), ou seja:

$$\Phi(\sigma, \nu) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{(1-\sigma^2)F(\phi)d\phi}{1-2\sigma \cos(\theta - \phi) + \nu^2} \quad (4)$$

onde C é o círculo unitário,  $|Z| = 1$  e  $\mathcal{R}$  é a região interna do mesmo.  $\Phi(\sigma, \nu)$  exprime o potencial no interior desse círculo, é uma função harmônica em cada ponto  $(\sigma, \nu)$  de  $\mathcal{R}$  assume sobre C o valor  $F(\Phi)$ , de forma que  $\Phi(\sigma, \theta) = F(\Phi)$ . Para obter-se o valor de  $F(\Phi)$ , o qual é o potencial no contorno, faz-se uso de valores de potenciais sobre o contorno do círculo, calculados entre pontos equi-espaciais por eletrodos adjacentes. Em termos operativos, faz-se a injeção de corrente no primeiro par de eletrodos e lê-se seqüencialmente a diferença de potencial de todos os outros pares de eletrodos. Após os cálculos obtidos a partir da equação (4) faz-se a retroprojeção na região do círculo unitário. Assim, considerando-se N eletrodos, tem-se a resistividade que será dada por:

$$\rho(x, y) = \frac{1}{N} \sum_1^n k\rho_0 \frac{(\Delta V_{x,y}^k)_{medido}}{(\Delta V_{x,y}^k)_{inicial}} \quad (5)$$

onde  $(\Delta V_{x,y}^k)_{medido}$  é a diferença de potencial da região quadrada com coordenadas  $(x, y)$  quando a corrente é injetada no K-ésimo par de eletrodos;  $(\Delta V_{x,y}^k)_{inicial}$  é a mesma diferença de potencial, mas no instante em que somente a

PA/26, CNPDIA, ago/98, p.4

solução salina estava presente na câmara de medida, com resistividade igual a  $\rho_0$ . Na prática essas diferenças são adquiridas levando-se em conta o mesmo fator de amplificação e a mesma posição dos eletrodos, o que garante que a eficácia do algoritmo de reconstrução permanece inalterado.

*Potencialidade do uso da tomografia por impedância no estudo de fluxo de água no solo.*

O uso da técnica de tomografia de impedância elétrica em aplicações geofísicas é muito semelhante ao seu uso em medicina. A diferença agora é que a amostra não mais é um corpo humano e sim uma amostra de solo, por onde o fluxo de corrente circulará. Após a análise desse fluxo, processam-se os dados e forma-se uma imagem.

As variações de resistividade dos componentes do solo permitem, com a passagem da corrente, obter informações que possibilitem a reconstrução da imagem. Isto, porque a resistividade dos componentes do solo é muito influenciada pela quantidade de água e por suas propriedades químicas.

A determinação da resistividade é conseguida fazendo-se circular um determinado valor de corrente entre dois eletrodos, um de emissão e outro de recepção, espaçados de uma certa distância fixa, onde então é medida a diferença de potencial, resultando em um valor médio de resistividade na região da medida.

O resultado de uma tomografia resistiva é conseguido alinhando-se os eletrodos de injeção em uma barra, o mesmo para os eletrodos de recepção, fixando-os na região de análise, conforme pode-se observar na figura 1.

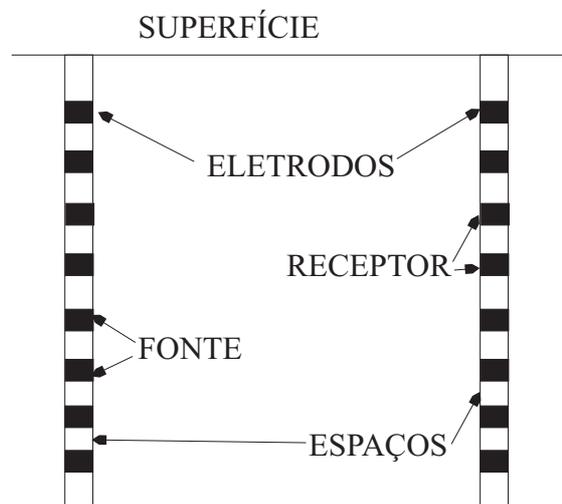


Figura 1 Representação de eletrodos imersos no solo.

*Exemplo de aplicação e Tomografos de Impedância Elétrica (EIT).*

As imagens da figura 2 ilustram a injeção de um fluxo de água na superfície do solo em duas profundidades e monitoradas através da técnica de tomografia por resistência. As imagens ilustram uma secção do solo analisadas em função do tempo de injeção do fluxo de água. Conforme a água vai penetrando no solo lentamente, altera-se a resistividade da região de análise.

PA/26, CNPDIA, ago/98, p.5

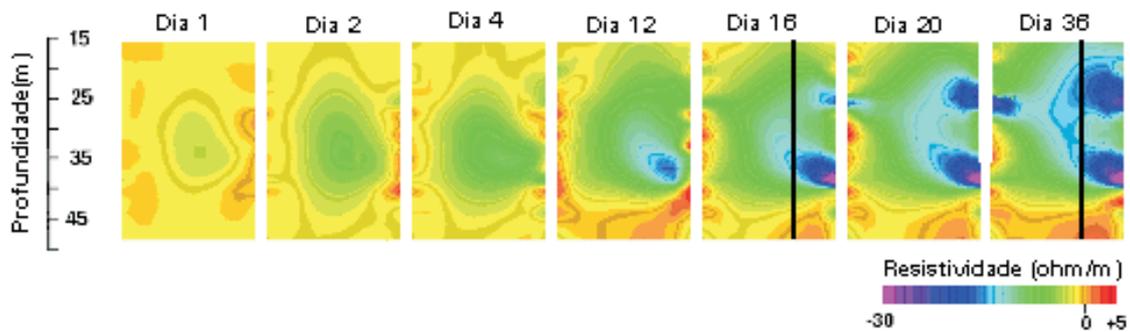


Figura 2: Fluxo de água avaliada pelo processo de tomografia, (Lawrence, 1998, p2).

Na figura 3 mostra-se outro experimento com a injeção de água em solo não saturado, com a diferença de que a água foi injetada por um orifício na região de análise, identificado na figura pelo traço preto. Observa-se pela tonalidade de amarelo a saturação e a propagação da água no solo com a mudança da resistividade na região por onde ela se propaga.

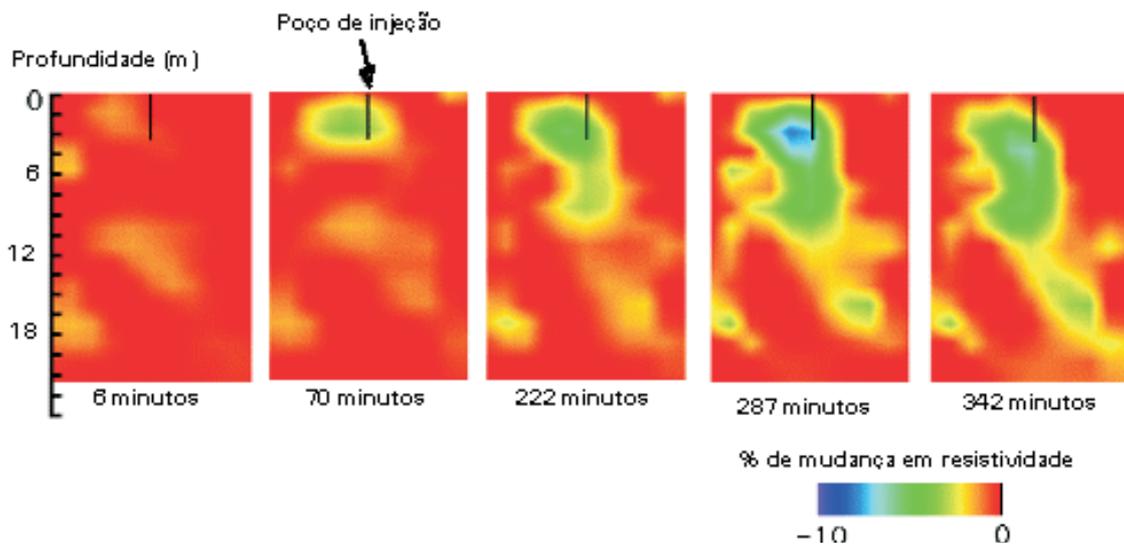


Figura 3: fluxo de água analisado pela tomografia de resistência, injetada em um ponto (poço de injeção), (Lawrence 1998, p2).

Outro exemplo de tomografia por resistência pode ser observado na figura 4, para imagens tridimensionais. O experimento foi realizado com uma amostra de solo dentro de um tanque de metal. Primeiramente na figura 4a, as medidas foram realizadas com o solo normal, mostrando a resistividade inicial da estrutura desse solo. Em seguida, na figura 4b, foi adicionada, solução salina, até a saturação, no solo, mudando completamente a densidade resistiva, mostrando assim a versatilidade e o grande potencial de aplicação do uso de tomografia por impedância em aplicações e estudos no ambiente agropecuário.

PA/26, CNPDIA, ago/98, p.6

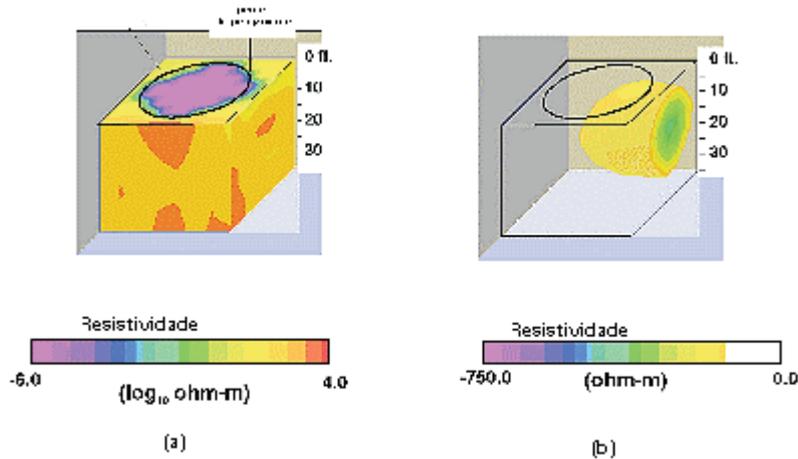


Figura 4: Tomografia para solo: a) normal, e b) mesmo solo saturado com solução salina. Verifica-se a completa mudança com relação à condutividade (Lawrence, 1998, p2).

O diagrama de bloco de um sistema de tomografia por impedância pode ser observado na figura 5, onde, nota-se a localização da amostra, representada por "objeto", uma fonte de corrente, responsável pela injeção do sinal que atravessará o objeto e após lido por um voltímetro. Controlando esses dois sistemas, injeção e leitura está o bloco "circuito de controle", que, através de um computador, sincroniza o sinal de entrada com o sinal de leitura.

O computador coleta o sinal lido pelo voltímetro e o processa através de um algoritmo de reconstrução de imagem, para em seguida mostrar na tela o resultado do experimento.

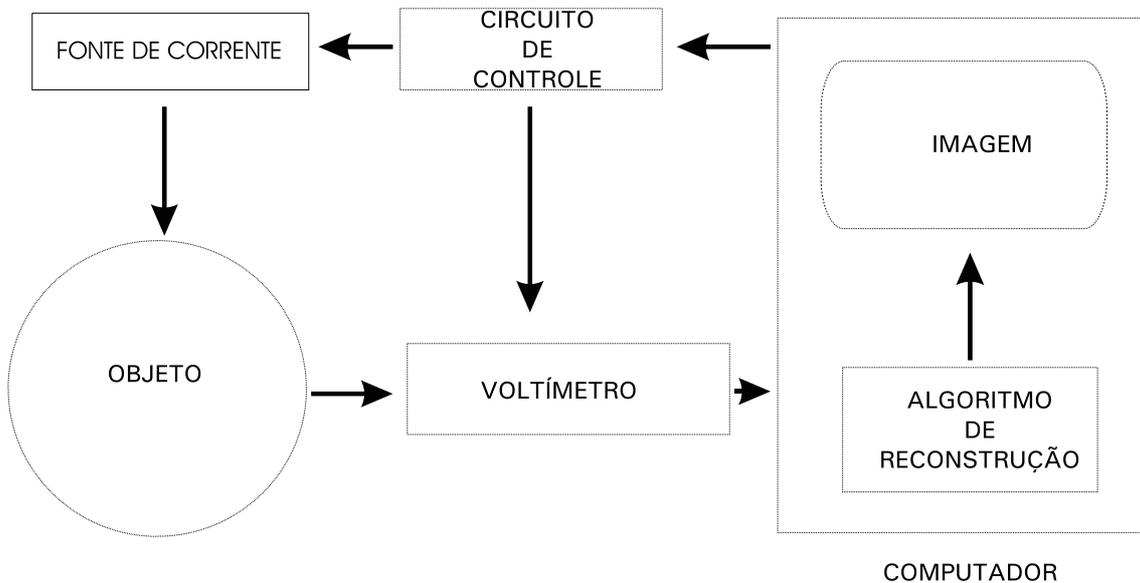


Figura 5 : diagrama geral de um sistema de tomografia por impedância elétrica.

O sistema em desenvolvimento na Embrapa Instrumentação Agropecuária está sendo utilizado atualmente para a medida da concentração da herbicida atrazina no solo.

PA/26, CNPDIA, ago/98, p.7

Com a Introdução e o uso de herbicidas na agricultura estabeleceu-se um compromisso entre a garantia de produtividade com a qualidade ambiental, onde o excesso no uso tem representado um risco potencial à saúde humana. Um exemplo disto é o uso da herbicida atrazina, a qual é constantemente utilizada em lavouras brasileiras, sendo entretanto também considerada uma substância cancerígena. Têm-se encontrado concentrações de atrazina em águas superficiais e águas profundas, o que tem sido objeto de preocupação, tendo em vista principalmente o desconhecimento da complexidade de seus processos de interação com o meio ambiente. A herbicida atrazina, só nos EUA, é usada num total de 40.000 toneladas/ano, aproximadamente.

Um dos métodos para a medida da atrazina no solo foi desenvolvido a partir de amostragem no campo e análise em laboratório. Entretanto, métodos para uso direto no campo passam a ser de grande importância para o monitoramento em tempo real dos processos de interação no sistema água-solo-atmosfera. Assim é que a técnica da tomografia por impedância elétrica vem sendo investigada para a avaliação da concentração e da difusão de atrazina em solos. A figura 6 ilustra imagens de amostras de solo onde são apresentados resultados decorrentes com a alteração de contrastes devido à presença do herbicida atrazina comercial em concentrações de 1% e 10%.

Pode-se observar que o método permite calibração com representatividade uma vez que para as concentrações ensaiadas obteve-se tons de cinzas respectivamente de 18 e 215. Todas as medidas foram efetuadas alimentando-se a câmara de ensaio com corrente senoidal de 50.0 0.1kHz e tensões de 2.0 0.2V. As diferenças de potenciais observadas nos pares de eletrodos estiveram na ordem de 50 $\mu$ V.

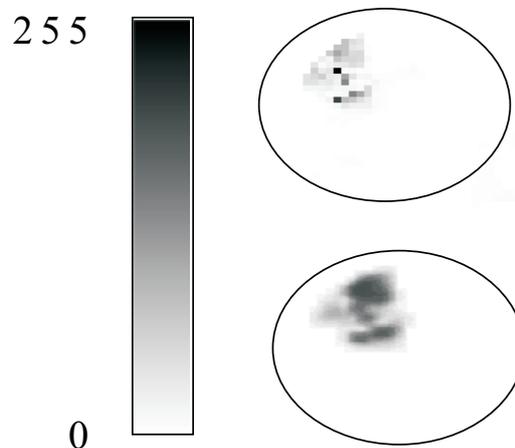


Figura 6: imagens diferenciais detectadas por tomografia por impedância elétrica de solos com o herbicida atrazina com subtração do solo, nas concentrações de a)1% e b)10%.

As imagens apresentadas foram filtradas com filtros passa-baixas para minimização do ruído com vista a uma relação sinal/ruído maior ou igual a 20.

Este exemplo apresentado ilustra as potencialidades da técnica para o monitoramento de solos agriculturáveis bem como indica sua capacidade para o monitoramento de água potável para uso humano e animal.

PA/26, CNPDIA, ago/98, p.8

### Referências Bibliográficas

- ALESSANDRINI, G.; Stable determination of conductivity by boundary measurements. **Aplicable analysis**, v.27, p.153-172, 1998.
- BARBER, D.C.; BROWN, B.H. Applied potential tomography, *J. Phys. E: Sci. Instrum.* 17, pp. 723-733.
- BARBER, D.C.; BROWN, B.H. Applied potential tomography, **Proc. Of Hospital Physicists Association**, Annul Conf. Sheffield.
- BARBER, D.C.; BROWN, B.H. Imaging spatial distributions of resistivity using applied potential tomography, **Elec. Lett.** 19, pp. 933-935.
- BROWN, B.H.; SEAGER, A .D. Applied potential tomography: data collection problems, **Proc. IEEE Int. Conf. On Electric and Magnetic Fields in Medicine and Biology**, pp79-82 1985.
- BROWN, B.H.; SEAGER, A .D. The Sheffield data collection system, **Clin. Phys, Physiol. Meas.**, 8 Suppl. A 91-97.
- JOSSINET J.J.; Volumetric field distribution and 2D measurement in impedance imaging, **Proc. 5<sup>th</sup> Int. Conf. Electrical Bioimpedance (ICEBI)** Tokyo, pp. 83-86, 1983.
- LAWERENCE LIVERMORE NATIONAL LABORATORY, Electrical resistance tomography for subsurface imaging. Disponível Electrical Resistance Tomography site.: <http://www-ep.es.llnl.gov/www-ep/esd/ert/ert.html>, consultado em 7 mar. 1998.
- McADAMS, E.T.; JOSSINET, J.J.; Tissue impedance: a historical overview, **Clin. Phys. Physiol. Meas.**, 16 Suppl. A 1-13, 1985.
- WEBSTER, J.D.; KIM, Y. ; TOMKINS, W.J.: Electrical impedance imaging of the thorax, **J. Microwave Power** 18, pp. 245-247, 1983.
- WEBSTER, J.D.; YORKEY, T.J.; TOMKINS, W.J. : Comparing Reconstruction Algorithms for EIT **Trans. On Biomed. Eng. Vol BME-34**, No 11, pp. 843-852, 1987.
- WEBSTER J.G.: *Electrical Impedance Tomography*, **Adam Hilger**, 1990.