

# II SIMPÓSIO NACIONAL DE INSTRUMENTAÇÃO AGROPECUÁRIA



**Embrapa**

*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: (016) 274 2477 - Fax: (016) 272 5958 - [postmaster@cnpdia.embrapa.br](mailto:postmaster@cnpdia.embrapa.br) - <http://www.cnpdia.embrapa.br>

## 2 a 4 de dezembro de 1998

### **Comissão Organizadora:**

Dr. Paulo Estevão Crivini (Presidente)  
Dr. Alvaro Macedo da Silva  
Dr. André Torre Neto  
Dr. Luciano Martin Neto  
Dr. Luiz Alberto Colnago  
Dr. Luiz Henrique Capparelli Mattoso  
Dr. Ricardo Yassushi Inumasa  
Francisco de Jesus Alves Antonio  
Ana Maria Felizon

### **Apoio:**



### **Comitê Científico:**

Dr. Luiz Alberto Colnago (Coordenador)  
Dr. Paulo Estevão Crivini  
Dr. Luciano Martin Neto  
Dr. Luiz Henrique Capparelli Mattoso  
Dr. Odílio Benedito Garoto da Assis  
Dr. Cláudio Isidoro Biscaglia

# TOMOGRAFIA POR IMPEDÂNCIA ELÉTRICA E SUAS POTENCIALIDADES NA AGROPECUÁRIA

C957X

Cruvinel, P.E.<sup>(1)(\*)</sup>; Rabello, L.M.<sup>(1)</sup>; Mascarenhas, S.<sup>(2)</sup>; Altafim, R.<sup>(3)</sup>; Gigante, G.E.<sup>(4)</sup>; Staderini, E.M.<sup>(5)</sup>; Cesareo, R.<sup>(6)</sup>

(1) EMBRAPA - CNPDIA, Cx. Postal 741, 13560-970, São Carlos-SP ✓

(2) IEA-USP, Cx. Postal 440, 13560-250, São Carlos-SP

(3) USP-EESC Campus São Carlos, Cx. Postal 359, 13560-970, São Carlos-SP

(4) Dipartimento de Fisica, Università degli Studi di Roma "La Sapienza" Italia

(5) Centro Interdipartimentale di Ricerca per l'Ánalisi dei modelli e dell'Informazione nei Sistemi Biomedici, Università degli Studi di Roma Itallia

(6) Univ. degli Studi di Sassari, Italia

(\*) e-mail: cruvinel@cnpdia.embrapa.br

## ABSTRACT

*Electric impedance tomography (EIT) (Barber et al., 1983; Edic et al., 1995 et al.; Yorkey et al., 1987) is a new technique to be explored for obtention and visualisation of images with great potentialities for the applications in agricultural studies. Compared to the other techniques, such as gamma and X-rays tomography on, a) it is much cheaper than others b) the apparatus are small and do not require ionizing-radiation c) It is possible to obtain dozens of images per second. The images are generally obtained applying a current to the system in test, through of a set of electrodes and measuring the voltage between a pair of electrodes.*

*Key Words: electric; impedance; tomography; image; EIT*

## RESUMO

*A tomografia por impedância elétrica (Barber et al., 1983; Edic et al., 1995 et al.; Yorkey et al., 1987), aplicada atualmente em ramos da medicina, é uma técnica nova a ser explorada para a visualização de imagens com potencialidades para aplicações no ramo da agropecuária. Comparada à outras técnicas, como tomografia de raio X e de emissão radioativa, a) é significativamente mais barata, b) os equipamentos são de pequeno porte e não requerem radiação ionizante, c) além de produzir dezenas de imagens por segundo. As imagens são geralmente feitas aplicando-se uma corrente no sistema em teste, através de um conjunto de eletrodos e medindo-se a tensão entre pares de eletrodos. Posteriormente, utiliza-se essa informação na reconstrução de imagens das seções de interesse.*

*Palavras-chave: Elétrica; impedância; tomografia; imagens; EIT*

## 1 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 oportuna de correntes elétricas. McAdams e Jossinet em 1995 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, como por exemplo do corpo humano, é relativamente nova. O primeiro trabalho neste campo foi publicado no

|             |         |
|-------------|---------|
| SYSNO       | 1013757 |
| PROD        | -002136 |
| ACERVO EESC |         |

início dos anos 80 (Barber e Brown, 1982; Jossinet, 1983; Webster et al, (1983).

Um dos primeiros tomógrafos de impedância realizados 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 container 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, o que permite assim melhores figuras de mérito quanto a performance. Como exemplo podemos citar o sistema ACT3 com 32 eletrodos publicado por Jossinet em 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.

## 2 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  $\partial A$ . 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:

- $\rho^{-1} \frac{\partial V}{\partial \eta} = J_0$ ; sobre  $\partial A$  com  $I_0=0$ , onde

$J_0=J$  (imersa ou injetada)

- $\rho(x,y)$ ,  $V(x,y)$  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 se faz uso de corrente 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:

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

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.

Por outro lado, ao procurar-se calcular uma solução com método do tipo iterativo depara-se com três problemas diversos a saber (Hun e 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: dado a distribuição do potencial e da corrente, calcular a distribuição do potencial e da resistividade no interior da superfície;
- O problema do valor no contorno: dada a distribuição de corrente e do potencial no contorno, calcular a distribuição da resistividade ou da corrente ou do potencial.

Os programas que fazem uso de algoritmos de reconstrução baseados em elementos finitos são muitos trabalhosos de serem implementados, seja pelo tempo necessário para escrevê-los ou porque necessitam de computadores velozes para operações matemáticas em ponto flutuantes. Por esta razão o uso de algoritmos baseados em

técnicas de retroprojeções de linhas equipotenciais tem sido largamente utilizados na técnica de tomografia por impedância (Barber et al 1983). Esta modalidade algorítmica de reconstrução não oferece boas qualidades de imagens, porém são velozes na reconstrução e não são complexas de serem implementadas.

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

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

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 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.

### 4. Exemplos da 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 a de seu uso em medicina. A diferença agora é que a amostra não mais é um corpo e sim uma amostra de solo, por onde o fluxo de corrente circulará e após a análise desse fluxo, processa-la e formar uma imagem.

As variações de resistividade de pedra ou massa de solo permite, com a passagem da corrente, fazer uma imagem. Isto, porque a massa resistiva de uma pedra ou do solo ser muito influenciada pela quantidade de água e por propriedades químicas, sendo facilmente detectada.

A determinação da resistividade é conseguida fazendo 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 de 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, espaçados de uma determinada distância, conforme pode-se observar na figura 4.1.

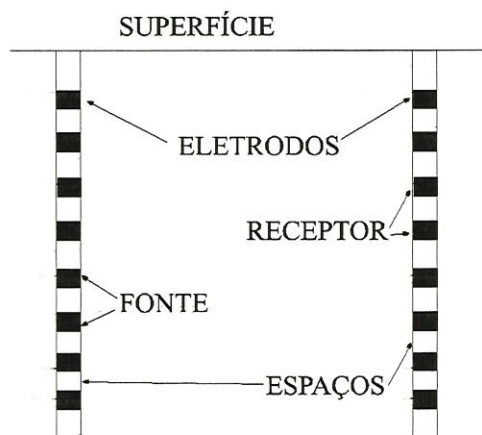


Figura 4.1 Representação de eletrodos imersos no solo.

#### 4.2 Exemplo de aplicação e EITs.

As imagens da figura 4.2.1, 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 vai mudando a resistividade da região de análise.

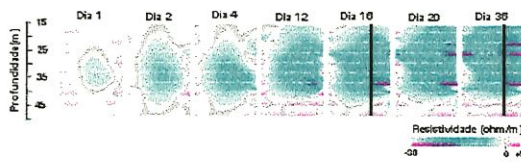


Figura 4.2.1: Fluxo de água avaliada pelo processo de tomografia, Laurence(1998,p2).

Na figura 4.2.2 mostra-se outro experimento com a injeção de água em solo não saturado, com a diferença que a água foi injetada por um orifício na região de análise, identificado na figura pelo risco preto. Observa-se pela tonalidade de cinza a saturação e a propagação da água no solo com o mudança da resistividade na região onde ela caminha.

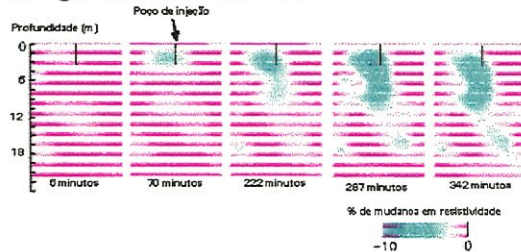


Figura 4.2.2: fluxo de água analisado pela tomografia de resistência, injetada em um ponto (poço de injeção), Laurence(1998,p2).

Outro exemplo de tomografia por resistência pode ser observado na figura 4.2.3, para imagens tridimensionais. O experimento foi realizado com uma amostra de solo dentro de um tanque de metal. Primeiramente na figura 4.2.3a, as medidas foram realizadas com o solo normal, mostrando a resistividade inicial da estrutura desse solo. Em seguida, na figura 4.2.3b, 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.

## 5 Material e método

O diagrama de bloco de um sistema de tomografia por impedância, pode ser observado na figura 5.1, onde, pode-se observar a localização da amostra, representada por "objeto", uma fonte de corrente, responsável pela injeção do sinal que atravessará o objeto e após

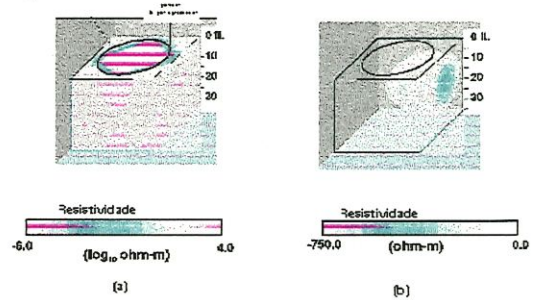


Figura 4.2.3: Tomografia para solo: a)normal, e b) mesmo solo saturado com solução salina. Verifica-se a completa mudança com relação a condutividade.

lido por um voltímetro. Controlando esses dois sistema, 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.

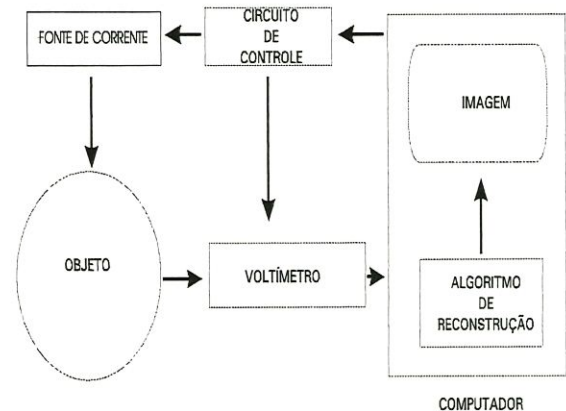


Figura 5.1 : digrama geral de um sistema de tomografia por impedância elétrica.

### 5.2 Porta amostra

A definição aqui de porta amostra, consiste de uma cuba onde será colocada a amostra para o experimento. A cuba, consiste de um tubo de PVC cortado com uma espessura de 5cm, tendo

a sua base fechada com um material plástico, não condutor, conforme pode ser observado na figura 5.2.1.. Acoplado a cuba estão os eletrodos

### 5.3 Eletrodos

Os eletrodos conforme visto atrás são transdutores que convertem a corrente eletrônica de um fio em corrente iônica no eletrólito. A impedância de contato entre o eletrodo e a amostra deve ser pequena e conhecida para permitir a leitura e posterior reconstrução de imagem.

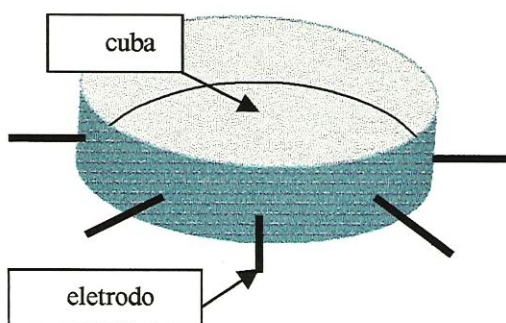


Figura 5.2.1: esquema do sistema porta-amostra.

#### 5.3.1 Tipos de materiais do eletrodo

Vários materiais podem ser usados como eletrodo, tendo a característica de baixa resistividade e resistência a oxidação.

A maioria dos eletrodos são feitos de metal, devido a facilidade de conexão de fios com o pente de eletrodos. O eletrodo fica em contato direto com o eletrólito e geralmente acontece reações químicas que afetarão na resistência de contato.

O eletrodo utilizado consiste de um fio de aço inox de diâmetro 1 mm, e comprimento de 6 cm, colado e vazado na parede da cuba, perfazendo o contato físico com o eletrólito.

Outros tipos de metal podem ser utilizados tal como: prata; ouro; platina.

A quantidade de eletrodos utilizados consiste de 16 eletrodos ao redor da cuba, espaçados simetricamente.

#### 5.4 Injeção e leitura de sinal.

A injeção do sinal consiste de uma fonte de corrente alternada com frequência variável, injetada em um par de eletrodos e o sinal é lido através de um voltímetro em outro par de

eletrodos que não os adjacentes, conforme mostrado na figura 5.4.1.

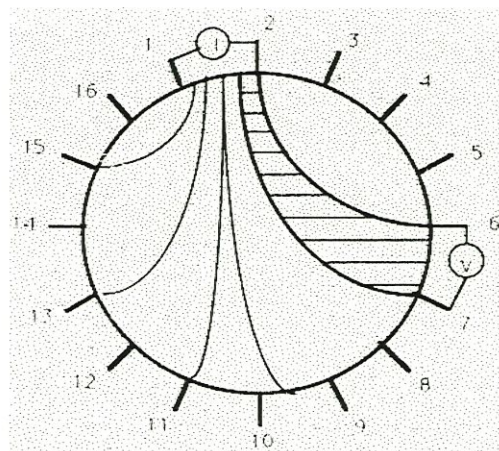


Figura 5.4.1: Esquema da injeção de corrente e leitura do sinal.

Ao se injetar a corrente esta segue um caminho de um eletrodo a outro, no caso, mostrado na figura 5.4.1, injeção no par de eletrodo 1 e 2, percorre toda a amostra formando as linhas equipotenciais, que são as linhas internas a cuba mostrada na figura 5.2.1.

A leitura do voltímetro é feita nesta linhas equipotenciais, a diferença de potencial entre uma linha e outra no par de eletrodos, resulta em um valor de tensão que com o valor de corrente injetada, fornece o respectivo valor de resistência na região hachuriada mostrada na figura 5.4.1, (valor médio).

A medida de tensão é feita nos outros pares de eletrodos com exceção dos eletrodos adjacentes aos de injeção de corrente. Uma vez completada a leitura, muda-se o par de eletrodos de injeção e faz novamente a medida nos outros pares de eletrodos, conforme pode ser observado na tabela 5.4.1.

| Eletrodos de injeção (Ampère) | Eletrodos de leitura (volts)            |
|-------------------------------|-----------------------------------------|
| 1-2                           | 3-4; 4-5; 5-6; 6-7;.....; 14-15; 15-16  |
| 2-3                           | 4-5; 5-6; 6-7; 7-8;.....; 15-16; 16-1   |
| 3-4                           | 5-6; 6-7; 7-8; 8-9;.....; 16-1; 1-2     |
| .....                         | .....                                   |
| .....                         | .....                                   |
| 15-16                         | 1-2; 2-3; 3-4; 4-5;.....; 12-13; 13-14. |

Tabela 5.4.1: Arranjo de eletrodos de injeção e de leitura

## 6 Interfaces com computadores

As técnicas de tomografia por impedância requerem um sistema computacional, o qual pode rapidamente coletar a informação de corrente e tensão e usar essas informações para calcular a distribuição da resistividade na região de pesquisa. O computador controla o hardware para a coleta de dados, processa esses dados para reconstruir a imagem através de métodos numéricos e apresenta a imagem processada na tela.

A figura 5.1, mostrada no início dessa discussão, mostra como os vários estágios, desde a geração de corrente até imagem mostrada na tela, são todos controlados por computador. O computador também tem um decodificador de matriz, o qual coleta e depois a processa, não mostrado na figura 5.1. O gerador gera um sinal AC.

A figura 6.1, mostra um esquema de um hardware mais completo, utilizado. A magnitude do sinal de corrente AC no gerador é controlado pelo conversor Digital/Analogico. As portas digitais de I/O selecionam um D/A através do endereço do multiplexador e calibra a amplitude de sinal do gerador de corrente. A tensão é medida nos eletrodos por um voltímetro de precisão e depois digitalizada por um A/D (conversor analógico digital). Ou seja, o computador controla a corrente e a aquisição da informação de tensão pela programação de suas portas de comunicação de I/O.

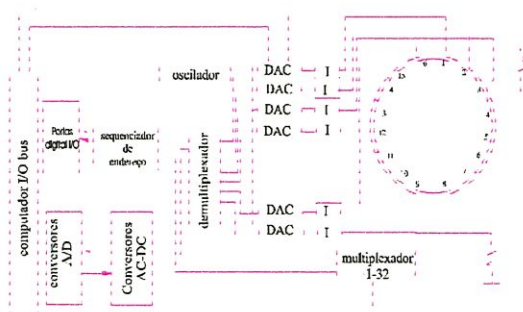


Figura 6.1:- Diagrama de controle de um sistema EIT.

O sistema de controle de aquisição de dados é mostrado na figura 6.2,

O voltímetro de precisão inclui amplificadores, demoduladores e filtros passa-baixa. O amplificador aumenta o sinal até a faixa desejada, após o qual é demodulado. Um filtro passa-baixa de boa qualidade é necessário

para a redução do ruído. O conversor A/D tem que ter um número suficiente de bit para assegurar uma melhor relação sinal/ruído. A informação então é digitalizada e armazenada, para a reconstrução da imagem.

Na figura 6.3 é mostrado uma vista geral de todo o sistema de tomografia de impedância elétrica.

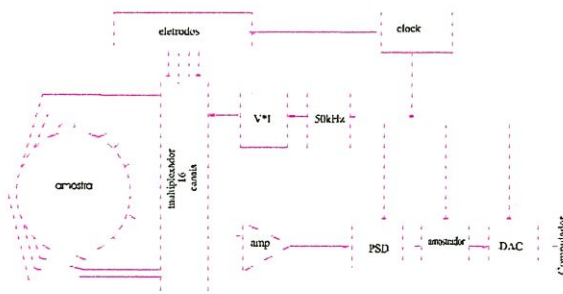


Figura 6.2:- sistema de coleta de dados

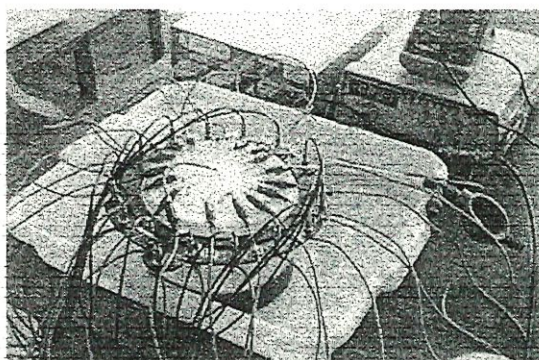


Figura 6.3: Vista geral do sistema de tomografia de impedância elétrica.

## 7 Resultados e Conclusões

A aplicação desenvolvida na Embrapa Instrumentação Agropecuária foi para a medida da concentração da herbicida atrazina no solo.

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 complexo de seus processos de interação com o meio ambiente. A herbicida atrazina, só nos EEUA é usado em torno de 40.000 toneladas/ano.

Um dos métodos para a medida da atrazina no solo é 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 7.1 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 repetibilidade 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  $50.0 \pm 0.1$  kHz e tensões de  $2.0 \pm 0.2$  V. As diferenças de potenciais observadas nos pares de eletrodos estiveram na ordem de  $50 \mu\text{V}$ .

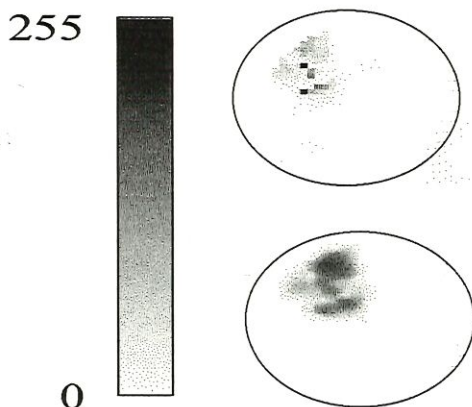


Figura 7.1: imagens diferenciais detectadas por tomografia por impedância elétrica de solos com o herbicida atrazina com subtração do solo.

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 capacidade para o monitoramento de água potável para uso humano e animal.

## 8 Referências Bibliográficas

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.

BARBER D.C.; BROWN B.H. **Applied potential tomography**, J. Phys. E: Sci. Instrum. 17, pp. 723-733.

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.

CLEGG J.S. **Am. J. Physiol.** 246 R 133-151 1984.

GISSER G. D. et al. **Act3: A high-speed, high-precision electrical impedance tomography**, IEEE Trans on Biomed. Eng. Vol. 14, nr. 8, 713-721, 1994.

GISSER G.D.; ISSACSON D.; NEWELL J.C. **Current topics in impedance imaging**, Clin. Phys. Physiol. Meas., 8 Suppl. A 39-46, 1987

GHAHARY A. **Electrical Impedance tomography**, edited by Webster J., pp58, 1990.

HUA P.; WEBSTER J.G.; TOMPKINS W.J. **Effect of the measurement method on noise handling and image quality of EIT imaging**, Proc. Ann. Int. Conf. IEEE Eng. In Medicine and Biology, 1987.

HUA P.; WOOE.J. **Electrical Impedance Tomography**, edited by Webster J., pp. 97, 1990.

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.

McADAMS E.T.; JOSSINET J.J.; **Tissue impedance: a historical overview**, Clin. Phys. Physiol. Meas., 16 Suppl. A 1-13, 1985.

PETHING R. KELL D.B. **The passive electrical properties of biological systems**, Phys. Med. Biol. Vol. 32, No 8, pp. 933-970, 1987.

PETHING R.; **Dielectric and Electric Properties of biological materials**, (Chichester: John Wiley).

SAKAMOTO K.; YORKEY T.J.; WEBSTER J.G.; **Some physical results from an impedance camera**, Clin. Phys. Physiol. Meas., 8 Suppl. A 71-76, 1987.

SCHWAN H.P. **Electrical properties of tissue and cell suspension**, Adv. Biol. Med. Phys. 5, pp. 147-209, 1957.

TODOR D.; CHERAN L.: **Na introduction to Electrical Impedance Tomography**, College on Medical Physics: Imaging and Radiation Protection, 5-23 September 1994.

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.

YORKEY T.J.; WEBSTER J.G.; TOMKINS W.J. : **Errors caused by contact impedance in impedance imaging**, Proc. Ann. Int. Conf. IEEE Eng. In Medicine and Biology Society 7, pp. 632-637, 1985.

ZHENG E.; SHAO S.; WEBSTER J.G.; **Impedance of skeletal muscle from 1 Hz to 1 Mhz**, IEEE Trans. Biomed. Eng. BME-31, pp. 477-481, 1984.

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>, capturado em 7 mar. 1998.