

## UMA NOVA ESTRATÉGIA DE SENSORIAMENTO POR IMPEDÂNCIA ELÉTRICA PARA TOMOGRAFIA DE ESCOAMENTOS BIFÁSICOS

**T.P. Figueroa** – teodora@sc.up.br

**P. Seleglim Jr.** – [seleglim@sc.usp.br](mailto:seleglim@sc.usp.br)

Núcleo de Engenharia Térmica e Fluidos

Departamento de Engenharia Mecânica

Escola de Engenharia de São Carlos

Universidade de São Paulo

Av. Dr. Carlos Botelho, 1465

CEP 13560-970 São Carlos – SP - Brasil

**Resumo.** *Este trabalho apresenta um estudo de sensibilidade das estratégias de sensoriamento elétrico para aplicação em tomografia de escoamentos bifásicos. Resultados foram obtidos para a estratégia clássica tipo Dirac e para uma estratégia de excitação otimizada, baseada na produção de um campo elétrico que favoreça a formação de linhas de campo cruzando o volume de medição. A sensibilidade foi quantificada pela inclusão e movimentação de regiões de alto contraste de permissividade representativas da mistura ar-água. Os resultados demonstram que, no caso da estratégia clássica, a variação do posicionamento da inclusão influi muito pouco na distribuição perimetral de cargas e a reconstrução da imagem com base nesses dados fica seriamente prejudicada. Já no caso da estratégia otimizada proposta o mesmo não ocorre. Os resultados indicam uma grande sensibilidade da distribuição perimetral de cargas elétricas em relação a alterações no posicionamento da inclusão, mesmo na região central do volume de medida. Isso ocorre em função da escolha do perfil triangular de excitação em que eletrodos vizinhos são mantidos a potenciais elétricos muito próximos, variando gradativamente de um valor máximo no ponto de injeção até um valor mínimo no ponto diametralmente oposto a ele. Abre-se, com isso, a perspectiva de se desenvolver métodos de reconstrução menos restritivos, especificamente adaptados ao sensoriamento por campos elétricos.*

**Palavras chave.** *Tomografia, Escoamentos multifásicos, Visualização, Instrumentação*

## 1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de técnicas de visualização de escoamentos tem se apresentado como uma alternativa extremamente interessante para a otimização de processos e equipamentos envolvendo o transporte e a manipulação de fluidos multifásicos. A razão pode ser atribuída a diversos fatores, dentre eles a necessidade de satisfazer normas de qualidade mais estritas, otimização de custos e do uso de insumos energéticos, redução de emissões de poluentes, melhoria das condições de segurança, etc. Também se deve ao know how adquirido em aplicações das ciências médicas, e ao exemplo do extraordinário avanço que o emprego de técnicas de visualização proporcionou ao diagnóstico clínico.

Evidente o potencial, foi lançado no *Energy Technology Center, Morgantown, WV - USA*, no final dos anos 70, um intenso programa de pesquisas na área de combustíveis fosseis, abordando os problemas ligados aos processos de combustão em leito fluidizado. Especificamente na área de instrumentação, os esforços foram concentrados no desenvolvimento de sistemas de visualização e de reconstrução tomográfica através de medidas capacitivas. Destes trabalhos resultaram numa série de publicações cujo conjunto é descrito em Halow, 1995. Paralelamente, por volta de meados dos anos 80, iniciou-se no *Institut of Sciences and Technology, University of Manchester - England*, um projeto voltado ao desenvolvimento de técnicas de tomografia elétrica para aplicação em escoamentos multifásicos em poços de petróleo e sistemas de transporte pneumático de sólidos particulados. Com estas iniciativas, ambos os grupos demonstraram por volta do início dos anos 90 não somente a viabilidade da técnica tomográfica, mas também seu grande potencial de aplicação em processos industriais (Beck e Williams, 1996).

Contrariamente à área médica na qual o sensoriamento tomográfico é baseado no uso de radiações eletromagnéticas de alta energia como raios X e  $\gamma$ , a aplicação desta técnica em problemas e processos industriais baseia-se em princípios mais variados, incluindo ultrasonoros (Hoyle, 1996), elétricos (Gisser *et al.*, 1990) e ópticos (Wedberg e Stamnes, 1996). Especificamente no contexto das aplicações envolvendo escoamentos multifásicos, os princípios de sensoriamento baseados em medidas elétricas (resistivos, capacitivos e magnéticos) destacam-se das outras alternativas em razão de seu baixo custo e confiabilidade. Nesta linha podemos citar o desenvolvimento de uma sonda de medidas vetoriais de impedância elétrica utilizada com grande sucesso na visualização de escoamentos horizontais ar-água (Selegim & Hevieu, 1998), além do trabalho de Dyakowski, 1996, no qual se pode encontrar uma extensa revisão sobre o assunto.

## 2. MOTIVAÇÃO E DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

A motivação fundamental deste trabalho reside no fato dos principais métodos de reconstrução tomográfica terem sido desenvolvidos para estratégias de sensoriamento baseadas em campos duros (raios X e  $\gamma$ , e também emissão de fótons ou pósitrons), e não para campos moles como no caso do sensoriamento por impedância elétrica. Mais precisamente, a aplicação de tais métodos numéricos a dados provenientes de medidas de impedância elétrica tem como hipóteses subjacentes o confinamento e o paralelismo do campo de sensoriamento. Esta hipótese é tanto melhor satisfeita quanto menor for o contraste entre as propriedades elétricas (permissividade e condutividade) das fases constituintes do escoamento. Por outro lado, quanto menor for o contraste, menor é a distinção entre as fases e o problema numérico torna-se extremamente mal condicionado. Nestas condições, não é surpreendente o aparecimento de artefatos, como frações de vazios negativas ou maiores que 1 no caso de escoamentos bifásicos.

Uma alternativa a ser explorada no sentido de corrigir esse tipo de problema foi viabilizada com o desenvolvimento do chamado método de visualização direta (Seleglim & Hervieu, 1998). Este método permite obter uma imagem inicial significativamente próxima da imagem real e, em consequência, métodos de reconstrução menos restritivos quanto ao campo de sensoriamento podem ser empregados. A compatibilização de técnicas de visualização direta com métodos numéricos não restritivos e estratégias de sensoriamento otimizadas pode contribuir em muito para o desenvolvimento de dispositivos de visualização robustos e confiáveis apropriados para aplicações industriais.

Nesta linha, o presente trabalho focaliza-se no problema de se maximizar a sensibilidade da distribuição perimetral de capacitâncias (ou corrente no caso de se tratar de um meio condutivo) pela manipulação do perfil de tensões elétricas aplicadas ao contorno. Isto por que, publicações recentes têm apontado a falta de sensibilidade intrínseca das estratégias tradicionais de sensoriamento (Lemonnier e Peytraud, 1998) relativamente a modificações na distribuição interna das propriedades físicas ligadas à propagação do campo eletromagnético no fluido multifásico. Em específico, as estratégias usuais de sensoriamento correspondem a medir a capacitância entre dois eletrodos e manter os demais aterrados ou medir a capacitância intereletrodo mantendo os demais flutuantes, conforme indicado na Fig. 1.

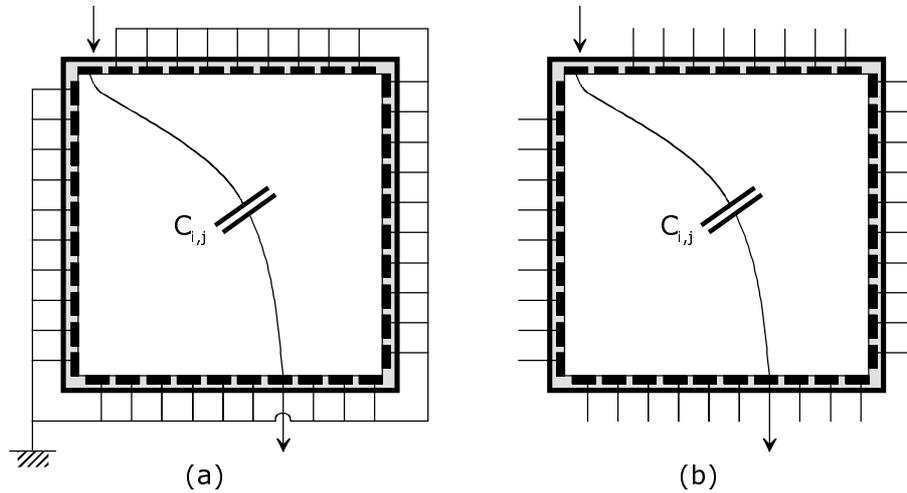


Figura 1 – Estratégias tradicionais de excitação/medição (a - com eletrodos vizinhos aterrados e b - com eletrodos vizinhos flutuantes)

Em termos matemáticos, e considerando por simplicidade um problema capacitivo bidimensional, a equação que descreve o problema em estudo é dada por

$$\frac{1}{\Phi_0 \epsilon_0} \vec{\nabla} \cdot [\epsilon(x,y) \vec{\nabla} \phi] = 0 \quad (x,y) \in \Omega = (0,1) \times (0,1) \quad (1)$$

Nesta expressão,  $\phi(x,y,z)$  denota o potencial elétrico convenientemente adimensionalizado,  $\epsilon(x,y,z)$  denota a permissividade e  $\Phi_0$  e  $\epsilon_0$  respectivamente uma tensão de referência e a permissividade do vácuo. Em aplicações práticas o contorno  $\partial\Omega$  é geralmente mantido a tensões e/ou correntes elétricas conhecidas, i.e.

$$\begin{cases} \phi = F_0(s) & \text{com } s \in \Gamma_0 \\ \vec{\nabla} \phi \cdot \vec{n} = F_1(s) & \text{com } s \in \Gamma_1 \end{cases}, \text{ e } \partial\Omega = \Gamma_0 + \Gamma_1 \quad (2)$$

na qual  $s$  representa a coordenada de contorno (comprimento do arco). Assim, as condições de contorno correspondentes às estratégias tradicionais podem ser explicitadas para o caso (a) da Fig.1 como

$$\phi(s) = \begin{cases} \phi_0, & s \in \Gamma_{0,exc} \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (3)$$

com  $\Gamma_0 = \partial\Omega$  e  $\Gamma_{0,exc}$  representando a região de excitação, e para o caso (b) da Fig. 1

$$\begin{cases} \phi(s) = \phi_0, & s \in \Gamma_{0,exc} \\ \vec{\nabla}\phi \cdot \vec{n} = 0 & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (4)$$

### 3. SIMULAÇÕES NUMÉRICAS

Os problemas de sensibilidade associados às estratégias tradicionais de sensoriamento podem ser acessados com auxílio de simulações numéricas da Eq. (1) relativamente a diferentes condições contorno. Neste trabalho utilizou-se o método da diferenças finitas implementado em ambiente Matlab. O domínio considerado constituiu-se de uma seção quadrada de lados unitários e dotada de um total de 16 eletrodos uniformemente distribuídos no contorno. A permissividade do meio foi fixada em um valor unitário. A sensibilidade do sensoriamento foi quantificada pela inclusão e movimentação de regiões em que a permissividade local foi fixada em um valor 80 vezes superior (aproximadamente a relação entre as permissividades do ar e da água). A figura seguinte mostra a malha considerada bem como as diferentes inclusões.

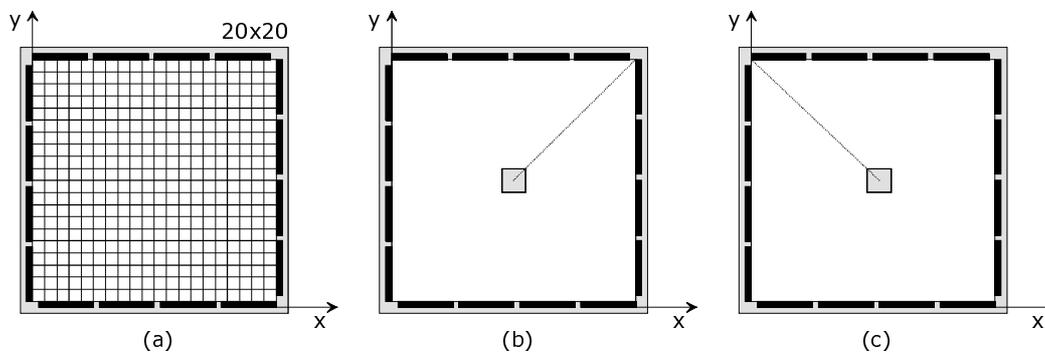


Figura 2 – Discretização do domínio em 20x20 sub-regiões (a) e posicionamento das regiões com permissividade diferente da permissividade de meio homogêneo (uma única inclusão sendo deslocada pela semidiagonais superior direita (b) e pela semidiagonal superior esquerda (c))

Associados aos dois problemas descritos acima, foram adotados também dois tipos de condições de contorno. No primeiro tipo, simulando a estratégia tradicional expressa por (3), a tensão no eletrodo superior direito foi fixada em 10V enquanto os demais foram aterrados (i.e. 0V). No segundo tipo de condição de contorno adotou-se uma distribuição de tensões no contorno variando linearmente de um máximo de 10V no eletrodo superior direito até 0V no eletrodo inferior esquerdo. Estas distribuições são indicadas na figura abaixo, na qual a coordenada perimetral é centrada no ponto  $(x=0,y=0)$  e segue em sentido anti-horário.

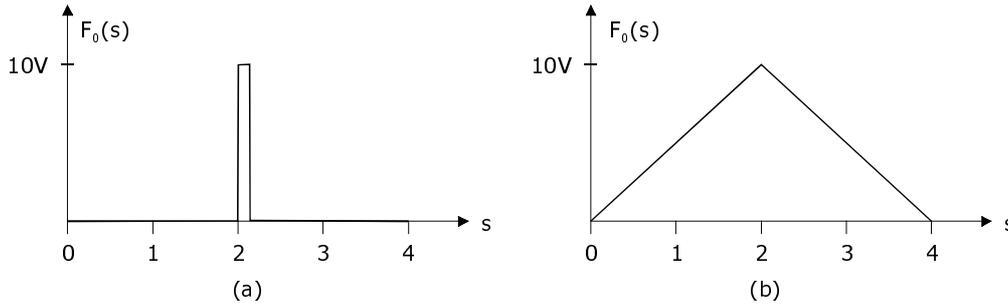


Figura 3 – Condições de contorno utilizadas para simular condições experimentais da estratégia clássica (a) e de uma estratégia otimizada de sensoriamento (b)

Os efeitos observáveis relativamente às diferentes posições das inclusões e condições de contorno são variações na distribuição perimetral de cargas elétricas. Na terminologia empregada aqui isto se expressa por

$$Q(s) = \varepsilon(x, y) \vec{\nabla} \phi \cdot \vec{n} \quad (5)$$

O método de reconstrução baseia-se na medição experimental da quantidade de cargas elétricas distribuídas no contorno e posterior comparação com distribuições construídas numericamente. É portanto crucial que  $Q(s)$  apresente grande sensibilidade vis-à-vis de modificações na permissividade do meio  $\varepsilon(x, y)$ . As simulações numéricas apresentadas têm por objetivo evidenciar este comportamento, cujos detalhes são discutidos a seguir.

#### 4. RESULTADOS

Os resultados apresentados na seqüência correspondem a simulações numéricas da Eq. (1), conforme discretização definida na Fig.2, com condições de contorno correspondentes à estratégia clássica, Fig. 3(a), e condições de contorno referentes a uma estratégia de sensoriamento otimizada, Fig. 3(b). Especificamente, são apresentadas as distribuições perimetrais de carga elétrica  $Q(s)$  para o primeiro e segundo casos, respectivamente nas figuras 4 e 5.

Como se pode concluir da Fig. 4, a maior parte da corrente elétrica injetada em  $s = 2$  deixa o volume de medida pelas regiões imediatamente vizinhas. Conseqüentemente, a variação da posição da inclusão influi muito pouco na distribuição perimetral de cargas e a reconstrução da imagem com base nesses dados fica seriamente prejudicada. Isto ocorre por que, segundo a estratégia usual de excitação do tipo Dirac, o gradiente de tensão no ponto de injeção é virtualmente infinito e, portanto, a quase totalidade do fluxo se estabelece nesta região. Em termos mais simples, pode-se dizer que isso ocorre em razão de se ter eletrodos aterrados vizinhos ao eletrodo de excitação, o que tem como efeito sua blindagem parcial e conseqüente perda de sensibilidade em relação às perturbações não circunscritas à região onde a tensão é injetada.

Este problema pode ser evitado adotando-se uma estratégia de sensoriamento que resulte num fluxo preferencial de corrente cruzando o volume de medida, sendo portanto coletado pelos eletrodos opostos ao eletrodo de injeção. Para isso, é necessário que eletrodos vizinhos estejam, tanto quanto possível, a potenciais elétricos próximos. Uma maneira de produzir esse efeito consiste em aplicar tensões periféricas que variem gradativamente de um valor máximo no ponto de injeção ( $s = 2$ ) até um valor mínimo no ponto diametralmente oposto a ele. O perfil triangular mostrado na Fig.3(b) satisfaz esta exigência. Efetivamente, os

respectivos resultados mostrados na Fig. 5 permitem concluir que a distribuição de cargas apresenta alterações significativas, mesmo para pequenos deslocamentos das inclusões.

A constatação destes fatos abre a perspectiva de se desenvolver métodos de reconstrução adaptados ao tipo de dado que pode ser obtido por intermédio de estratégias de sensoriamento alternativas. Um exemplo das dificuldades inerentes a esse desenvolvimento diz respeito à interpretação das capacitâncias intereletrodo, no caso de uma distribuição perimetral diferente de uma função Dirac, quando da aplicação de algoritmos de reconstrução do tipo “backprojection” por exemplo.

## 5. CONCLUSÕES

Neste trabalho é apresentado um estudo de sensibilidade das estratégias de sensoriamento elétrico para aplicação em tomografia de escoamentos bifásicos. A motivação principal surge da necessidade de se desenvolver métodos numéricos de reconstrução menos restritivos quanto ao campo de sensoriamento, passíveis de serem aplicados a campos ditos moles, i.e. que se deformam em função da constituição do meio, como é o caso de campos elétricos, acústicos, térmicos, etc. A oportunidade do trabalho deriva do desenvolvimento do chamado método de visualização direta (Seleglim & Hervieu, 1998), com o qual se pode obter uma imagem inicial significativamente próxima da imagem real. Em consequência, métodos de reconstrução menos restritivos podem ser empregados. Resultados são apresentados para a estratégia clássica tipo Dirac e para uma estratégia de excitação otimizada, baseada na produção de um campo elétrico que favoreça a formação de linhas de campo cruzando o volume de medição. A sensibilidade do sensoriamento foi quantificada pela inclusão e movimentação de regiões em que a permissividade local contrasta significativamente com a permissividade do meio contínuo ( $1/80$ , aproximadamente a relação entre as permissividades do ar e da água).

No primeiro caso os resultados (Fig. 4) demonstram que a maior parte da corrente elétrica injetada deixa o volume de medida pelas regiões imediatamente vizinhas ao eletrodo de excitação. Conseqüentemente, a variação da posição da inclusão influi muito pouco na distribuição perimetral de cargas e a reconstrução da imagem com base nesses dados fica seriamente prejudicada. Isto ocorre por que, segundo a estratégia usual de excitação do tipo Dirac, o gradiente de tensão no ponto de injeção é virtualmente infinito e, portanto, a quase totalidade do fluxo se estabelece nesta região. Em outras palavras, pode-se dizer que isso ocorre em razão de se ter eletrodos aterrados vizinhos ao eletrodo de excitação, o que tem como efeito sua blindagem parcial e conseqüente perda de sensibilidade em relação às perturbações não circunscritas à região onde a tensão é injetada.

O mesmo não ocorre no caso da estratégia de excitação otimizada. Os resultados apresentados na Fig. 5 indicam uma grande sensibilidade da distribuição perimetral de cargas elétricas em relação a alterações no posicionamento da inclusão, mesmo na região central do volume de medida. Isso ocorre em função da escolha do perfil triangular de excitação em que eletrodos vizinhos são mantidos a potenciais elétricos muito próximos, variando gradativamente de um valor máximo no ponto de injeção até um valor mínimo no ponto diametralmente oposto a ele. Abre-se, com isso, a perspectiva de se desenvolver métodos de reconstrução menos restritivos, especificamente adaptados ao sensoriamento por campos elétricos (moles).

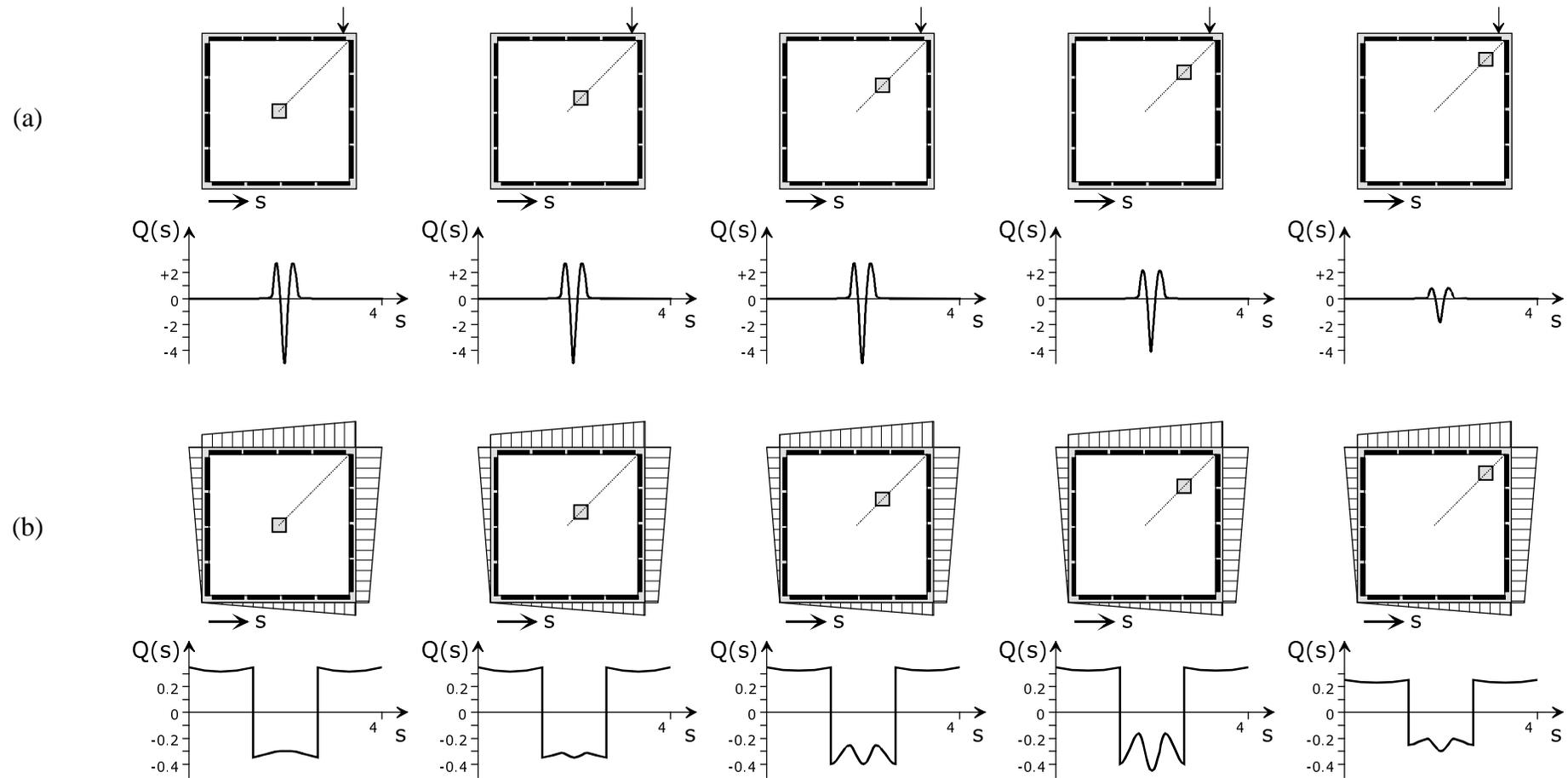


Figura 4: Distribuição de cargas no contorno para as condições expressas na figura 3(a) e para uma inclusão deslocando-se na semidiagonal superior direita

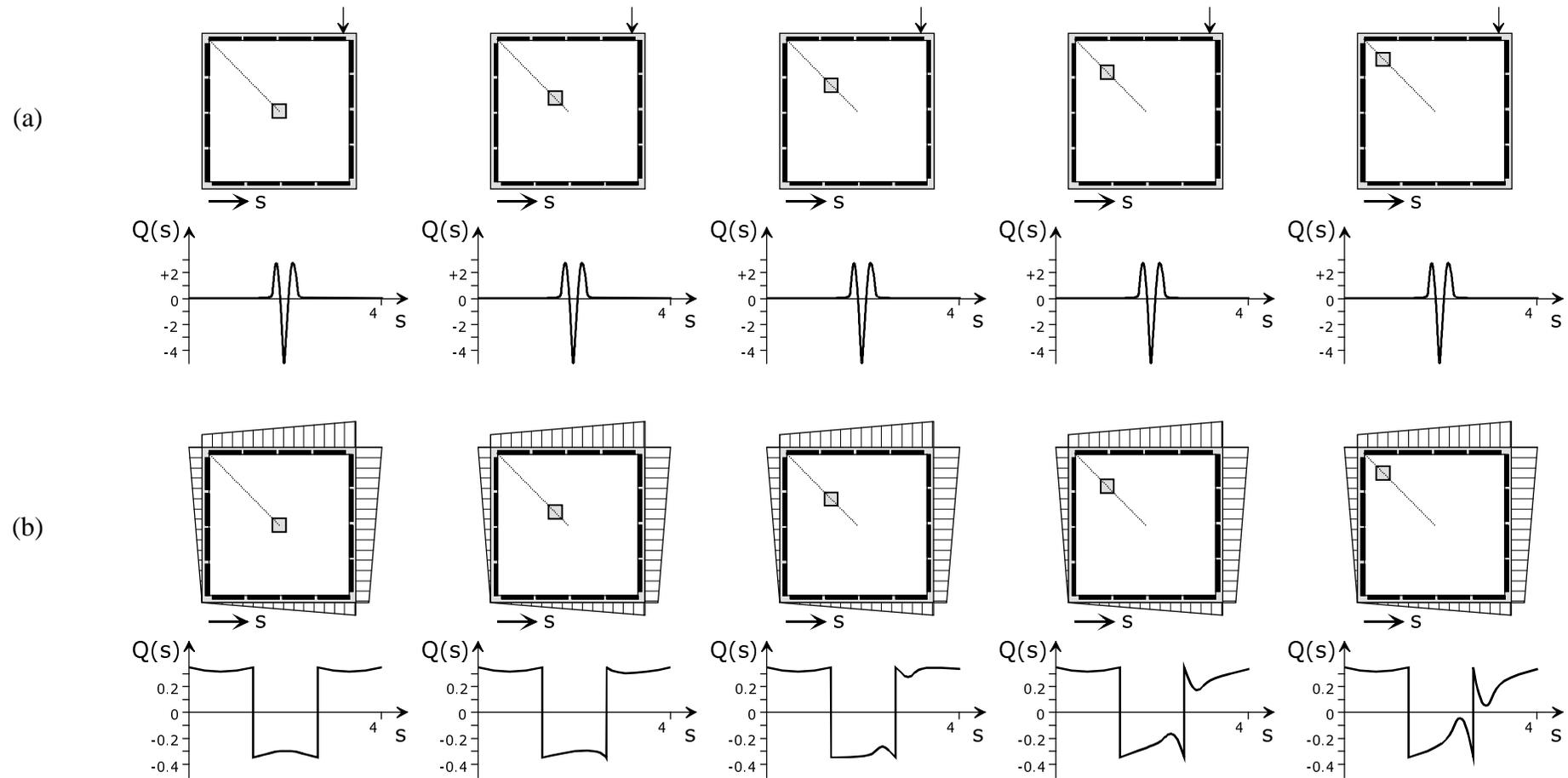


Figura 5: Distribuição de cargas no contorno para as condições expressas na figura 3(b) e para uma inclusão deslocando-se na semidiagonal superior esquerda

## 6. REFERÊNCIAS

- Beck M.S. and Williams R.A., 1996, Process Tomography, Butterworth-Heinemann Publishing Co. 581p.
- Dyakowski, T., 1996, Process tomography applied to multi-phase flow measurements. Measurement Science & Technology, Vol.7, No.3, p.343-353.
- Gisser D.G. , D. Issacson & J.C. Newell, 1990, Electric current computed tomography and eigenvalues SIAM J. Appl. Math. Vol.50, No.6, p.1623-1634.
- Halow, J.S., 1995, Capacitance imaging of fluidized beds, Process Tomography, Principles, Techniques and Applications, Williams, R.A. & Beck, M.S. ed's, p.447-486.
- Hoyle B S, 1996, Process tomography using ultrasonic sensors Meas. Sci. Technol. Vol.7, No.3, p272-280.
- Lemonnier H., Peytraud J. F., 1998, Is 2D impedance tomography a reliable technique for two-phase flow Nuclear Engineering and Design, Vol. 184, pp.253-268.
- Selegheim Jr. P. and Hervieu E., 1998, Direct imaging of horizontal gas-liquid flows by means of impedance measurements. Measurement Science & Technology, Vol.9 No.8, pp. 1492-1500.
- Wedberg T. C. and Stamnes J J, 1996, Recent results in optical diffraction microtomography Meas. Sci. Technol. Vol.7, No.3, p414-418.

### **A NEW ELECTRICAL IMPEDANCE SENSING STRATEGY FOR THE TOMOGRAPHY OF TWO-PHASE FLOWS**

The basic motivation of this work comes from the fact that most of the numerical reconstruction algorithms were developed for hard sensing fields, i.e. they have the underlying assumption that the sensing field is two-dimensional and parallel. When using soft sensing fields, such as in electrical capacitance tomography of two-phase flows, these conditions are barely satisfied, unless in the situation of a poor contrast between the electrical properties of the flowing phases for which the ill-conditioned nature of the problem will be much more critical anyway. The development of a less restrictive method can be achieved by refining the qualitative images produced by a direct imaging probe, by means of the minimization of a conveniently defined error functional reflecting the difference between experimental and numerical values calculated at the boundary of the sensing volume. However, in order to do this, it is required that these boundary values be sufficiently sensitive to changes in the distribution of the electrical properties of the flow. This paper presents a sensitivity analysis of different excitation strategies and their applicability in a reconstruction algorithm such as described above. More precisely speaking, two classical excitation profiles are compared to a proposed one in what regards the sensitivity of the resulting measured profile at the boundary to changes in the positions of inclusions in the sensing volume. The results confirm that classical strategies suffer from a major lack of sensitivity and that new ones must be developed, possibly based on the optimization of the excitation profiles or on multi-sensing techniques.