



OTIMIZAÇÃO DE UM SENSOR DE CAPACITÂNCIA ATRAVÉS DE SIMULAÇÃO NUMÉRICA PARA USO EM TOMOGRAFIA EM PROCESSOS DE ENGENHARIA

Luiz F. M. de Moura

Flávio Tambellini

Azamor C. de Azevedo Filho

Universidade Estadual de Campinas

Faculdade de Engenharia Mecânica - DETF

CEP 13083-970 - Unicamp - SP - Brasil

Caixa Postal: 6122

***Resumo.** Este trabalho tem por objetivo descrever o comportamento da capacitância através de um processo de simulação numérica, variando-se os principais parâmetros constituintes de um sensor com oito eletrodos dispostos externamente ao tubo, ou seja, de maneira não invasiva e não intrusiva.*

Neste processo de simulação foram variados os seguintes parâmetros: espessura da parede do tubo; permissividade do material componente do tubo; distância entre a parede externa do tubo e a blindagem. Todas essas simulações numéricas foram realizadas supondo o tubo cheio de ar e cheio de água, usando-se diferentes tipos de malhas. Foram também analisadas situações com eletrodos aterrados, flutuantes, posicionados na superfície interna e na superfície externa do tubo.

Fazendo-se uma análise dos valores extremos de capacitância, foi possível escolher os melhores parâmetros para a construção de um sensor a ser utilizado em tomografia de processo.

***Palavras chave:** Tomografia, Sensor de capacitância, Simulação numérica*

1. DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE TOMOGRAFIA

Segundo Isaken (1996), a tomografia pode ser definida como a construção da imagem da seção transversal de um objeto, sendo a imagem chamada de tomograma e o equipamento que gera a imagem chamado de tomógrafo.

Conforme Dyakowski (1998), não é novo o uso de técnicas tomográficas em processos de engenharia, mas o seu recente desenvolvimento tem se dado através do melhoramento dos modelos dos transdutores de medida e de um avanço da eletrônica digital e dos métodos computacionais. Devido a esses avanços, a tomografia está se tornando bastante popular no controle e monitoramento de processos industriais.

A variação da permissividade relativa do meio é o parâmetro medido na tomografia elétrica por capacitância. Essa variação é provocada pela inserção de um ou mais componentes em um meio de baixa permissividade e, a partir dessas medidas, pode-se reconstruir a imagem da seção transversal (Yang & Conway, 1998).

A tomografia de processo fornece meios de visualização em duas ou três dimensões do comportamento interno de processos industriais tais como fluxos de gás/óleo, óleo/água em tubulações, gás/sólido em transporte pneumático, processos de fluidização em leitos fluidizados. As imagens produzidas por um sistema de tomografia de processo fornecem valiosas informações para a construção e para o monitoramento de processos industriais (Yang, 1996).

A capacitância entre dois eletrodos é uma função da permissividade relativa do meio entre eles. Segundo Reinecke & Mews (1997), a desvantagem da tomografia por capacitância, comparada a outras técnicas tomográficas como, por exemplo, a tomografia médica através de Raios-X, está na não linearidade do campo elétrico provocada pela deflexão das linhas de campo, causada pela diferença de permissividade e disposição espacial dos componentes, o que afeta os valores da capacitância.

Dentre as diferentes técnicas tomográficas existentes, tais como: nucleônica (Raios-X, Raios Gama), ótica e ultrassom, destaca-se a tomografia elétrica por capacitância como sendo a mais utilizada em processos industriais, por possuir as seguintes vantagens: ser não invasiva e não intrusiva; apresentar baixo custo e proporcionar respostas rápidas. Além disso, conforme Xie et alli (1995), a tomografia elétrica por capacitância possui uma alta resolução temporal, é isenta dos riscos de radiação e fácil de ser implementada.

A tomografia de processo pode ser dividida em três principais blocos: o sensor; o circuito eletrônico; e o computador para a reconstrução, interpretação e disposição da imagem (Huang et alli, 1992; Dickin et alli, 1992) (Fig. 1).

De acordo com Yang (1997) um sensor de capacitância consiste de um conjunto de eletrodos simetricamente montados interna ou externamente em um tubo constituído de material isolante, encontrando-se, no interior desse tubo, o objeto a ser medido.

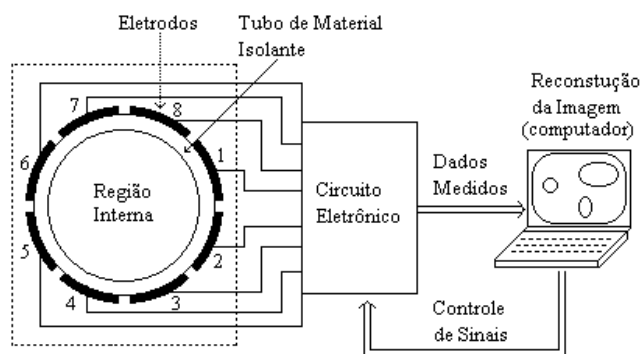


Figura 1 – Sistema de tomografia com o uso de um sensor de capacitância.

A Fig. 1 mostra um sensor de capacitância sem blindagem com oito eletrodos posicionados externamente ao tubo e ligados ao circuito eletrônico controlado por computador.

2. PRINCÍPIOS DE MEDIDA DE CAPACITÂNCIA

Um sensor de capacitância pode ser constituído com diferentes quantidades de eletrodos, sendo que os casos mais comuns são de sensores de 2, 4, 8, 12 ou 16 eletrodos.

As medidas de capacitância são obtidas para cada par de eletrodo, então, para um sensor com n eletrodos pode-se obter $n(n-1)/2$ combinações independentes de medidas de capacitância, para uma dada distribuição (Xie et alli, 1992), conforme esquematizado na Fig. 3.

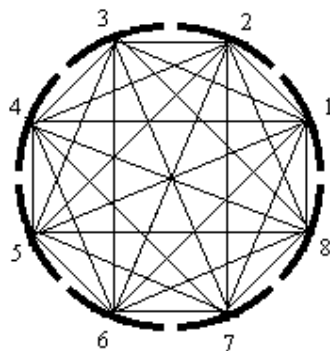


Figura 3 – Medidas de capacitância para um sensor com 8 eletrodos.

Essas medidas de capacitância são obtidas da seguinte maneira: para um sensor de capacitância com oito eletrodos elege-se um dos eletrodos como sendo o eletrodo ativo e os outros sete restantes (eletrodos receptores) serão combinados com o eletrodo ativo formando sete pares. Para cada par será efetuada uma medida de capacitância. Elegendo-se, a cada vez, um eletrodo como sendo o ativo e procedendo-se da maneira descrita anteriormente obtém-se um total de 28 medidas independentes de capacitância (Fig. 3).

Na obtenção das medidas de capacitância ao eletrodo ativo é atribuído um potencial V_i diferente de zero e ao eletrodo receptor atribui-se um potencial V_j igual a zero.

O procedimento para a determinação da capacitância de um meio consiste na obtenção do potencial elétrico para cada nó do domínio através de simulação numérica. Neste trabalho, o potencial elétrico para cada nó do domínio foi determinado através do método de elementos finitos onde se usou o pacote numérico, ANSYS versão 5.4.

A determinação dos valores das capacitâncias se faz necessária apenas para os pares 1-2, 1-3, 1-4 e 1-5 e a determinação dos outros valores pode ser conseguida por simetria e com rotações de 45° .

O campo eletrostático bidimensional é representado através da equação de Laplace (Khan e Abdullah, 1993):

$$\nabla \cdot [\epsilon_0 K(x, y) \nabla V(x, y)] = 0 \quad (1)$$

onde $V(x, y)$ é o potencial eletrostático bidimensional; $K(x, y)$ é a distribuição da permissividade relativa bidimensional e ϵ_0 é a permissividade absoluta do vácuo.

O cálculo da capacitância para cada par de eletrodo foi obtido para dois casos diferentes de acordo com a situação em que se encontram os eletrodos que não são nem o emissor nem o receptor.

Quando o eletrodo i ($i = 1, n-1$) é o eletrodo emissor, o eletrodo j ($j = i+1, n$) é o eletrodo receptor e os eletrodos que não são nem emissor nem receptor se encontram aterrados, tem-se o caso aterrado e a condição de contorno é a seguinte:

$$\begin{cases} V_i = 1 & , \quad (x, y) \in \Gamma_i \\ V_j = 0 & , \quad (x, y) \in \Gamma_j \quad (i \neq j) \end{cases} \quad (2)$$

Quando o eletrodo i ($i = 1, n-1$) é o eletrodo emissor, o eletrodo j ($j = i+1, n$) é o eletrodo receptor e o fluxo elétrico na direção radial dos eletrodos que não são nem emissor nem receptor é zero, o caso é dito flutuante e tem-se a seguinte condição de contorno:

$$\begin{cases} V_i = 1 & , \quad (x, y) \in \Gamma_i \\ V_j = 0 & , \quad (x, y) \in \Gamma_j \end{cases} \quad e$$

$$\frac{dV_k}{dr} = 0, \quad (x, y) \in \Gamma_k \quad (k \neq i, j) \quad (3)$$

Obtido o potencial elétrico para cada nó do domínio, a capacitância pode ser determinada através da seguinte equação:

$$C_{i,j} = \frac{\epsilon_0}{(V_i - V_j)} \int_{(x,y) \in \Gamma_j} K(x, y) \nabla \vec{V}_i(x, y) \cdot d\vec{\Gamma}_j, \quad (4)$$

Nas expressões acima, $V_i(x, y)$ é a distribuição do potencial eletrostático quando o eletrodo i é o eletrodo emissor; Γ_i é a área do eletrodo emissor; Γ_j a área do eletrodo receptor e Γ_k representa a área dos eletrodos que, à cada medida, não estão na função de emissor nem de receptor; V_i é o potencial elétrico no eletrodo emissor; V_j é o potencial elétrico no eletrodo receptor e $C_{i,j}$ é a capacitância entre o par de eletrodos i - j .

3. DESCRIÇÃO DA MALHA UTILIZADA

Para a simulação numérica todo o domínio foi discretizado em elementos triangulares de três nós conforme a Fig. 6.

A malha foi dividida em oito setores onde cada setor compreende um ângulo de 45° e em cada um desses setores está localizado um eletrodo. Cada setor foi dividido no sentido radial em três regiões: uma região interna onde se encontra o objeto a ser medido; uma região intermediária que compreende a parede do tubo, sendo que os eletrodos se encontram na parede externa do tubo e uma região externa entre a blindagem e a parede externa do tubo. Cada uma dessas regiões é composta de diversas camadas que são fatias concêntricas de elementos finitos (Fig. 4).

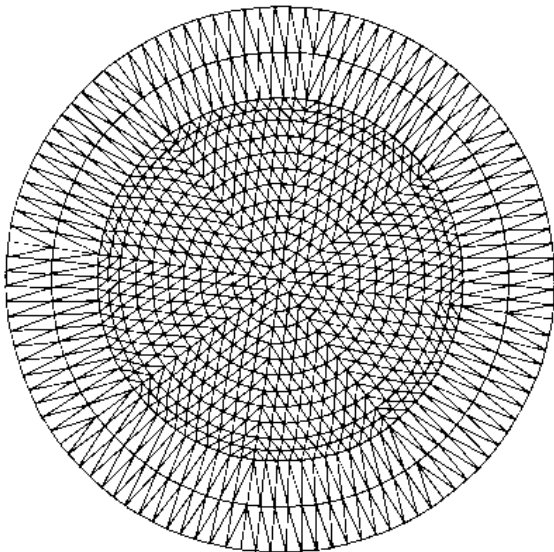


Figura 4- Malha discretizada

Cada uma dessas regiões é constituída de diversas camadas que são fatias concêntricas compostas de elementos finitos. Nesta figura observa-se um exemplo típico de uma malha discretizada em elementos triangulares de três nós contendo 14 camadas. As 14 camadas estão distribuídas do centro para a periferia do seguinte modo: a região interna do tubo é composta de dez camadas, as duas camadas seguintes são a parede do tubo e em seguida tem-se as duas últimas camadas situadas entre a parede externa do tubo e a blindagem.

4. SIMULAÇÃO NUMÉRICA

O sensor padrão simulado tem as seguintes características:

Raio interno do tubo = 26,35 mm;

Espessura do tubo = 3,65 mm;

Número de eletrodos = 8;

Permissividade relativa do ar = 1;

Permissividade relativa do acrílico (tubo) = 3.

Raio externo do tubo = 30 mm;

Raio da blindagem = 45 mm;

Ângulo do eletrodo = $41,25^\circ$;

Permissividade relativa da água = 80

Comprimento do eletrodo = 60 mm

Nas simulações numéricas verificou-se o comportamento dos valores das capacitâncias usando-se o procedimento descrito a seguir. Primeiramente, manteve-se constante todas as propriedades do sensor, onde refinou-se a malha. Em seguida, escolheu-se uma das malhas e variou-se a distância da blindagem em relação à parede externa do tubo, mantendo todas as outras propriedades constantes. Escolhendo-se uma das malhas, estudou-se também o comportamento da capacitância para o sensor padrão variando-se a espessura e a permissividade relativa do tubo.

As simulações numéricas foram feitas em um computador Pentium 166 MHz com 32MB de memória RAM

4.1 Refinamento da malha

Foram efetuadas cinco simulações para o sensor padrão sem blindagem com a malha de 1152, 4608, 10365, 18432 e 28800 elementos. Como se pode observar na Fig. 5, os valores das capacitâncias tendem a convergir. Não foi possível refinar mais a malha devido à limitação do computador. As Figs. 5(a) e 5(b) mostram os resultados da capacitância em função do número de elementos para os pares de eletrodos 1-2, 1-3, 1-4 e 1-5, para o tubo cheio de ar e cheio de água, respectivamente.

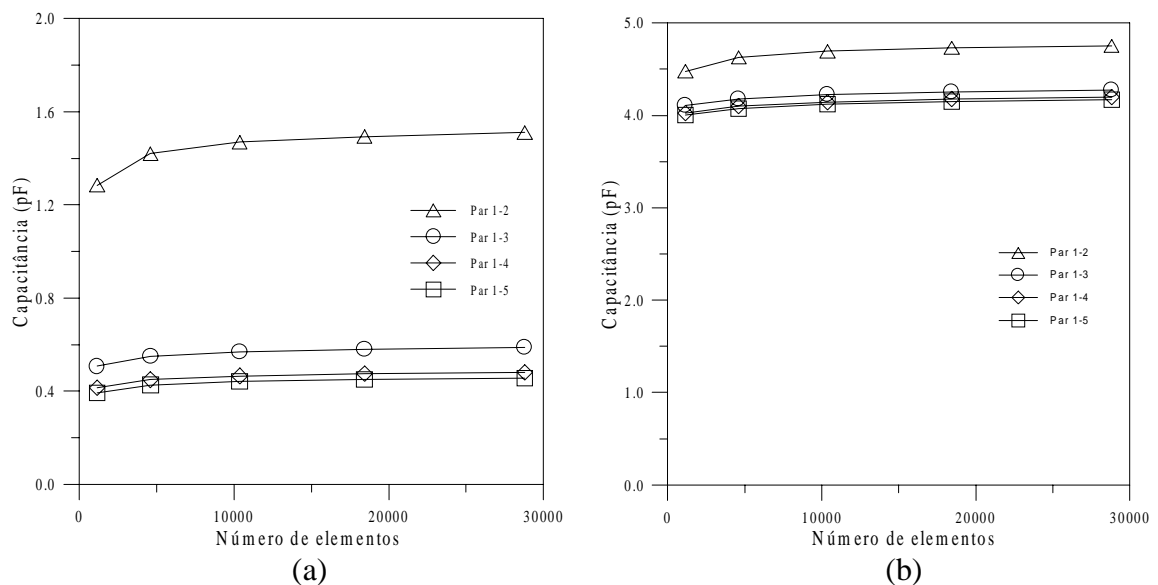


Figura 5 – Capacitância em função do número de elementos: (a) para o tubo cheio de ar e (b) para o tubo cheio de água.

Em todos os casos há um crescimento dos valores das capacitâncias com o aumento do número de elementos e uma tendência para a convergência.

Em ambos os casos, a capacitância entre o par de eletrodos 1-2 apresentou uma convergência mais lenta, pois é o caso em que existe um menor número de nós entre eletrodos (este é o par adjacente). Para os cinco casos simulados, tem-se 0, 1, 2, 3 e 4 nós entre os eletrodos, respectivamente. Já para os outros pares de eletrodos, a convergência é mais rápida.

4.2 Distanciamento da blindagem

Utilizando-se a malha com 8712 elementos e o sensor padrão verificou-se o comportamento dos valores das capacitâncias apenas variando a distância da blindagem em relação à parede externa do tubo de 5, 10, 15, 20 e 25 mm. As Figs. 6(a) e 6(b) mostram o comportamento da capacitância em função da distância da blindagem em relação à parede externa do tubo, para o tubo cheio de ar e cheio de água, respectivamente.

Observou-se também o valor da capacitância para um caso sem blindagem que é equivalente ao caso da blindagem se situar no infinito. A Tabela 1 mostra os valores das capacitâncias entre os pares de eletrodos para uma distância de blindagem de 25 mm e para o caso sem blindagem, tanto para o tubo cheio de ar como cheio de água, verifica-se que os valores das capacitâncias são maiores para o caso sem blindagem. Em todos os casos há um crescimento dos valores das capacitâncias com o distanciamento da blindagem.

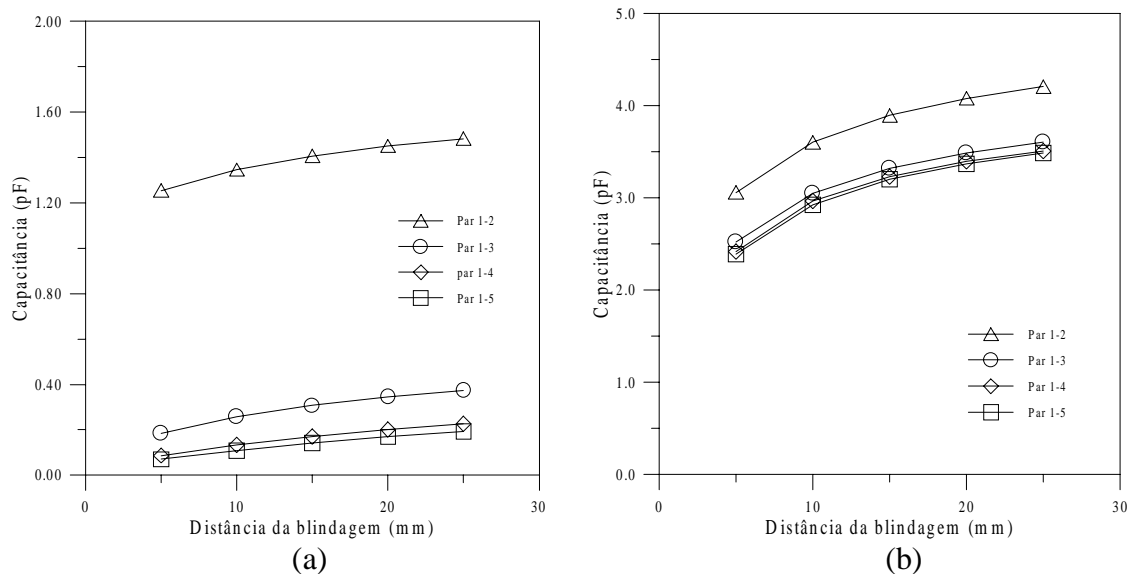


Figura 6 – Capacitância em função da distância da blindagem: (a) para o tubo cheio de ar e (b) para o tubo cheio de água.

Tabela 1 – Capacitância para a blindagem situada a 25 mm da parede externa do tubo e para o caso sem blindagem.

Par	Distância da Blindagem = 25 mm		Sem Blindagem	
	Ar	Água	Ar	Água
1-2	1,48	4,20	1,81	5,09
1-3	0,37	3,60	0,69	4,40
1-4	0,22	3,51	0,55	4,30
1-5	0,19	3,48	0,52	4,27

4.3 Influência da permissividade relativa do material da parede do tubo

Para a malha com 8712 elementos e para o caso padrão observou-se o comportamento dos valores das capacitâncias para os quatro pares de eletrodos variando-se a permissividade relativa do tubo de: 2, 3 e 5. Na Fig. 7 observa-se aumento dos valores das capacitâncias para todos os casos, o que é facilmente justificável com o aumento da permissividade relativa do material constituinte do tubo. A capacitância aumenta com o aumento da permissividade como pode ser prevista a partir da Eq. (4).

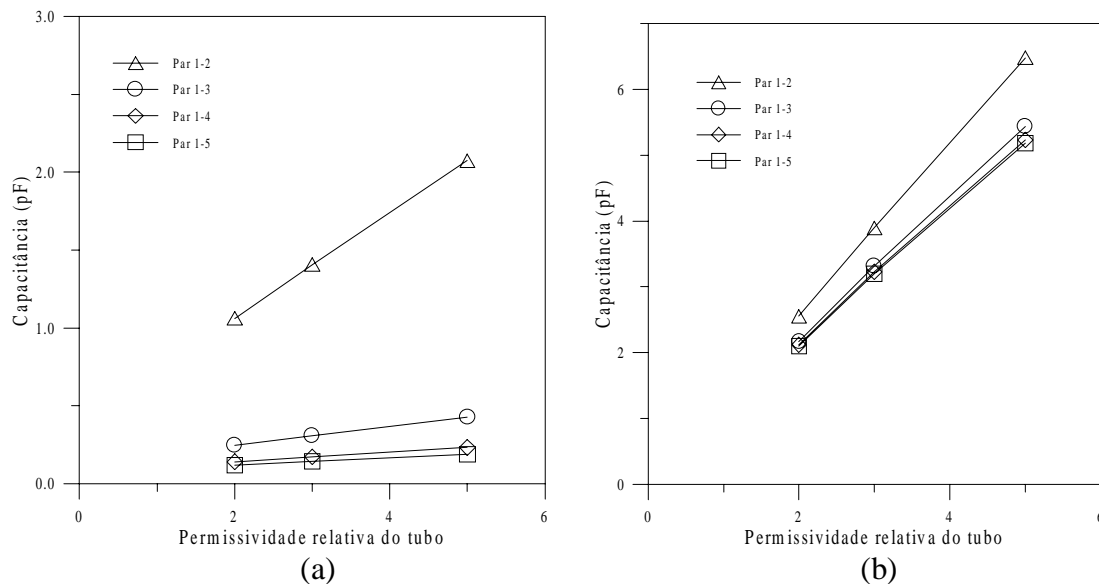


Figura 7 – Capacitância em função da permissividade relativa da parede do tubo: (a) para o tubo cheio de ar e (b) para o tubo cheio de água.

4.4 Influência da posição do eletrodo

Com a malha de 8712 elementos e para o sensor padrão obteve-se os valores das capacitâncias para os eletrodos situados na parte externa do tubo (de maneira não invasiva e não intrusiva) e para os eletrodos situados na parte interna do tubo (de modo invasivo e não intrusivo). Observa-se na Tabela 2 que a diferença entre os valores extremos das capacitâncias, ou seja, quando o tubo se encontra cheio de ar e cheio de água é bem menor quando os eletrodos se encontram situados na parte externa do tubo. Quando os eletrodos se posicionam na parte interna do tubo, o fluxo elétrico não é atenuado devido à baixa permissividade da parede. Este fato se torna evidente quando o tubo se encontra cheio de água devido à grande permissividade deste meio.

Tabela 2 – Capacitância em função do posicionamento do eletrodo.

Par	Eletrodo Externo		Eletrodo Interno	
	Ar	Água	Ar	Água
1-2	1,40	3,89	1,24	55,23
1-3	0,30	3,31	0,31	30,67
1-4	0,17	3,22	0,18	26,59
1-5	0,16	3,20	0,15	25,61

4.5 Influência da espessura da parede do tubo

Para a malha com 8712 elementos e o sensor padrão manteve-se o raio interno e observou-se o comportamento dos valores das capacitâncias para três diferentes espessuras da parede do tubo: 2; 3,65 e 5 mm. A Fig. 8 mostra os valores das capacitâncias para o tubo cheio de ar e cheio de água em função da variação da espessura do tubo.

Quando o tubo contém ar no seu interior e varia-se a espessura da parede do tubo mantendo-se constante a sua permissividade relativa, tem-se um aumento da permissividade do meio e consequentemente um aumento dos valores das capacitâncias medidas. Se o tubo contém água no seu interior ocorre o fenômeno inverso, pois diminui a permissividade do meio já que a permissividade relativa da água é maior do que a do tubo.

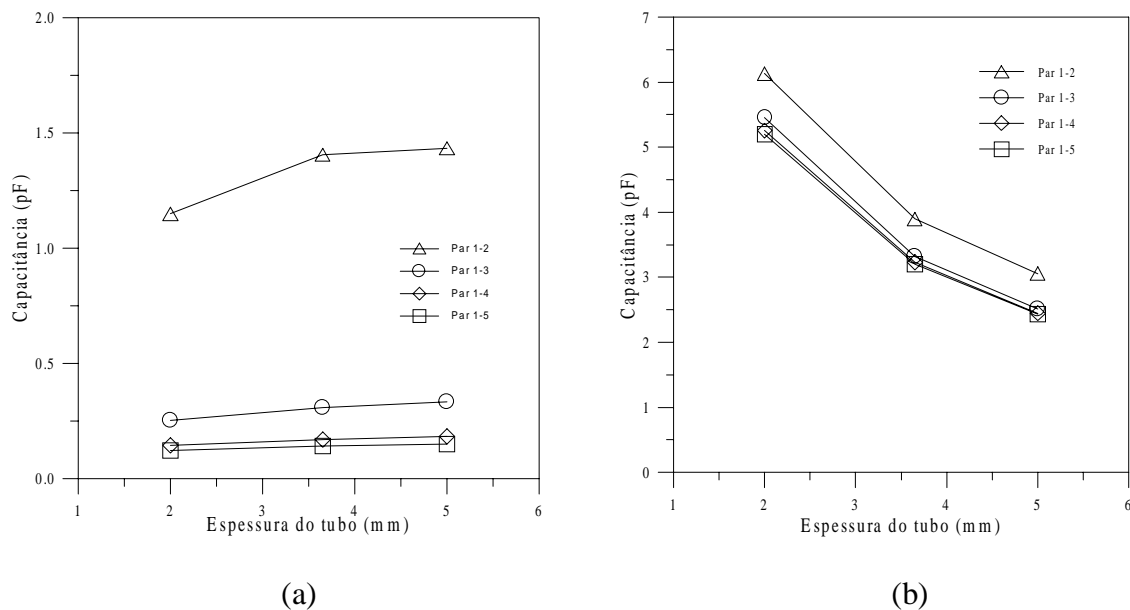


Figura 8 – Capacitância em função da espessura do tubo: (a) para o tubo cheio de ar e (b) para o tubo cheio de água.

4.6 Comparação entre os valores de capacitância obtidos com os eletrodos livres flutuantes e com os eletrodos livres aterrados.

As simulações foram realizadas com a malha de 8712 elementos e para o sensor padrão. Na Tabela 3 pode-se observar uma menor razão entre os valores máximo e mínimo de capacitância para o caso de eletrodos livres flutuantes.

Tabela 3 – Valores das capacitâncias para o caso de eletrodos livres flutuantes e para o caso de eletrodos livres aterrados.

Par	Eletrodos Livres Flutuantes		Eletrodos Livres Aterrados	
	Ar	Água	Ar	Água
1-2	1,40	3,89	1,33	1,84
1-3	0,30	3,31	0,05	0,95
1-4	0,17	3,22	0,03	0,83
1-5	0,16	3,20	0,02	0,80

4.7 Razão entre os valores máximo e mínimo das capacitâncias

Os valores máximo e mínimo de capacitância bem como a razão entre o máximo e o mínimo constituem parâmetros importantes na construção de um sensor.

A razão entre o valor máximo (capacitância para o tubo cheio de água para o par 1-2) e o valor mínimo (capacitância para o tubo cheio de ar para o par 1-5) é um parâmetro importante, pois serve para verificar a faixa de variação da capacitância e conseqüentemente de como se vai projetar um sistema eletrônico que consiga medir tal variação. O importante é conseguir valores não muito baixos de capacitância e nem razão muito alta entre o valor máximo e o valor mínimo. A Tabela 4 mostra valores máximo e mínimo de capacitância e a razão entre o valor máximo e o valor mínimo para algumas simulações numéricas.

Tabela 4 – Razão entre os valores máximo e mínimo de capacitância.

Parâmetros Variantes nas Simulações	Valor Mínimo	Valor Máximo	Razão
Distância de blindagem = 5 mm	0,07	3,06	43,57
Distância de blindagem = 10 mm	0,11	3,60	33,29
Distância de blindagem = 15 mm	0,14	3,89	27,60
Distância de blindagem = 20 mm	0,17	4,08	24,10
Distância de blindagem = 25 mm	0,19	4,21	21,73
Caso sem blindagem	0,53	5,09	9,68
K = 2	0,12	2,55	21,75
K = 5	0,19	6,48	34,32
Espessura do tubo = 2mm	0,12	6,13	50,37
Espessura do tubo = 5mm	0,15	3,06	20,39
Eletrodos livres aterrados	0,03	1,85	72,38
Eletrodos posicionados no lado Interno do tubo	0,15	55,24	361,04

Fazendo uma análise em relação ao sensor padrão que teve uma razão de 27,60, percebe-se que no tocante à distância da blindagem em relação à parede externa do tubo, é preferível trabalhar com sensores sem blindagem, que fornecem uma razão menor, 9,68, ou utilizar uma distância de blindagem grande. Em relação à permissividade relativa do tubo, quanto menor, melhor, pois isto tende para razões menores e em relação à espessura do tubo, melhor trabalhar com tubos mais espessos, que fornecem razões menores, por exemplo, para o tubo de espessura de 5 mm, a razão foi de 20,39, enquanto que a de 2 mm foi de 50,37. Também é preferível trabalhar com eletrodos flutuantes (razão = 27,60) do que com eletrodos aterrados (razão = 72,38), além deste último fornecer valores de máximo e mínimo menores em relação ao caso flutuante. Observa-se que eletrodos posicionados no lado externo do tubo (razão = 27,60) fornecem razões menores do que eletrodos posicionados no lado interno do tubo (razão = 361,04).

5. Conclusão

Na obtenção dos dados experimentais em um processo de tomografia o sensor se encontra associado a um circuito eletrônico e quanto mais elevado forem os valores das capacitâncias para serem medidos e menor for a razão entre os valores máximos e mínimos dessas capacitâncias mais fácil se torna a construção do circuito.

As simulações numéricas desenvolvidas neste trabalho permitem a otimização de um sensor atendendo a esses requisitos.

Analisando os resultados dessas simulações pode-se tirar as seguintes conclusões: quanto mais distante for a blindagem do tubo, maiores são os valores da capacitância e a razão entre os valores extremos se torna menor. O caso ideal é o sensor sem blindagem.

Observa-se que quanto mais baixa for a permissividade e maior for a espessura do tubo, maiores são os valores das capacitâncias e menor se torna a diferença entre esses valores extremos.

Os eletrodos livres flutuantes apresentam uma grande vantagem em relação aos livres aterrados e o posicionamento dos eletrodos na parte externa do tubo deve ser preferido em relação ao posicionamento invasivo.

Para trabalhos futuros pode-se investigar o comportamento dos valores de capacitância para um sensor com 12 ou 16 eletrodos, usando uma malha mais refinada, assim como investigar a influência do ângulo do eletrodo.

REFERÊNCIAS

- Isaken, O., 1996., A review of reconstruction techniques for capacitance tomography, Meas.Sci. Technol., Vol. 7, pp. 325-337.
- Dyakowski T., Mann, R. and Williams, R. A., 1998, Application of electrical tomography for multiphase flow measurements, Third International Conference on Multiphase Flow, Lyon, France.
- Yang, W. Q., 1996, Hardware design of electrical capacitance tomography systems, Meas. Sci. Technol., Vol. 7, pp. 225-232.
- Yang, W. Q. and Conway, W. F., 1998, Measurement of sensitivity distributions of capacitance tomography sensors, Rev. Sci. Instrum., Vol. 69, No. 1.
- Reinecke, N. Mewes, D., 1997, Multielectrode capacitance sensors for visualisation of transient two-phase flows, Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 15, No. 3, pp. 253-266.
- Xie, C. G., Reinecke, N., Beck, M. S., Mewes, D. and Williams, R. A., 1995, Electrical tomography techniques for process engineering applications, The Chemical Engineering Journal, Vol. 56, pp. 127-133.
- Huang, S. M. et alli., 1992, Design of sensor electronics for electrical capacitance tomography, IEE Proceedings-G, Vol. 139, No. 1, pp 83-88.
- Yang, W. Q., 1997, Modelling of capacitance tomography sensors, IEE Proc. - Sci. Meas. Technol., Vol. 144, No. 5, pp. 203-208.
- Xie, C. D. et alli., 1992, Electrical capacitance tomography for flow imaging: system model or development of image reconstruction algorithms and design of primary sensors, IEE Proceedings-G, Vol. 139, No. 1, pp. 89-98.
- Khan, S. H. and Abdullah, F., 1993, Finite element modelling of multielectrode capacitive system for flow imaging, IEE Proceedings-G: Circuits, Devices and Syst., Vol. 140, No. 3, pp. 216-222.

OPTIMIZATION OF A CAPACITANCE SENSOR THROUGH NUMERICAL SIMULATION FOR USE IN INDUSTRIAL PROCESS TOMOGRAPHY

Abstract. This work aims at describing capacitance variation, through a numerical simulation process, by ranging the main parameters of a sensor with eight electrodes placed outside the tube, that is, in a non invasive and non intrusive position. In the simulation process, the following parameters were varied: thickness of the tube wall, relative permittivity of the tube component material, distance between the tube external wall and the screen. All the numerical simulations were accomplished by supposing the tube full of air and full of water and using different types of grids. We also analysed situations with the electrodes earthed, floating, positioned on the interior and exterior surface of the tube. Through an analysis of the extreme capacitance values it was possible to choose the best parameters for the construction of a sensor to be used in industrial process tomography .

Keywords: Tomography, Capacitance sensor, Numerical simulation