

ANÁLISE DA RESPOSTA DE UM SENSOR CAPACITIVO PARA MEDIÇÕES EM ESCOAMENTOS BIFÁSICOS AR-ÁGUA EM TUBULAÇÕES POR ELEMENTOS FINITOS UTILIZANDO O SOFTWARE COMSOL MULTIPHYSICS

LUIS FELIPE M. ROSA¹, EMERSON DOS REIS ²

¹Graduando em Engenharia de Controle e Automação, IFSP, Câmpus São João da Boa Vista, felipe.machado@aluno.ifsp.edu.br.

²Professor do IFSP, Campus São João da Boa Vista, emersonr@ifsp.edu.br

Área de conhecimento (Tabela CNPq): 3.04.02.00-0 Medidas Elétricas, Magnéticas e Eletrônicas; Instrumentação.

RESUMO: Os escoamentos bifásicos gás-líquido em tubulações estão presentes em muitos processos industriais. Em geral, as fases que o compõe possuem permissividades elétricas distintas e, por isso, há interesse em se utilizar sensores capacitivos para medir grandezas relacionadas a esse tipo de escoamento, os quais tem sua resposta influenciada pela permissividade efetiva da mistura e também pela distribuição das fases. Trata-se, portanto, o campo elétrico que acopla as partes metálicas, inclusive os eletrodos do sensor, e permeia os materiais dielétricos pode se arranjar de maneira bastante complexa, afetando a resposta do sensor. A proposta deste trabalho é de colaborar com o estudo dos fenômenos elétricos que ocorrem nos sensores capacitivos aplicados à medição de grandezas relacionadas ao escoamento gás-líquido em tubulações. Para isso, o estudo foi realizado por meio de Análise de Elementos Finitos (AEF), utilizando como ferramenta o *software* COMSOL *Multiphysics* na versão 4.4, e o objetivo principal foi o de validar este software a partir de dados da literatura, conforme verificado. Para isso, foi adotado em par de eletrodos côncavos montados na parede externa de um tubo de acrílico, e no seu interior foi assumido um escoamento ar-água estratificado.

PALAVRAS-CHAVE: Capacitância; Análise por Elementos Finitos, Escoamento Bifásico; Sensor.

ANALYSIS OF THE RESPONSE OF A CAPACITIVE SENSOR FOR MEASUREMENTS IN BIPHASIC AIR-WATER FLOWS IN PIPELINES BY FINITE ELEMENTS USING COMSOL MULTIPHYSICS SOFTWARE

ABSTRACT: Two-phase gas-liquid flows in pipelines are present in many industrial processes. In general, such components have distinct electrical permittivities and, therefore, capacitive sensors can be used for measuring quantities related to this type of flow. However, the response of capacitive sensors is influenced by the effective permittiveness of the mixture and also by the spatial distribution of phases. It occurs due to the electric field, which couples the metallic parts including the electrodes of the sensor, and permeates the dielectric materials, it can be arranged in a very complex way, affecting the response of the sensor. The purpose of this work is to collaborate with the study of electrical phenomena that occur in capacitive sensors applied to the measurement of quantities related to gas-liquid flow in pipes. For this, the study was carried out by the Finite Element Analysis (FEA), using COMSOL Multiphysics software in version 4.4 as a tool, and the main objective was to validate this software from literature data, as verified. For this, a pair of concave electrodes were assumed as mounted on the external wall of an acrylic tube, and inside of it, a stratified air-water flow.

KEYWORDS: Capacitance; Finite Element Analysis; Biphasic Flow; Sensor.

INTRODUÇÃO

Escoamentos gás-líquido ocorrem frequentemente nas indústrias de alimentos, indústrias químicas e na geração de energia, como em geradores a vapor, gasodutos, condensadores, sistemas de refrigeração e outras. Podem estar presentes tanto em tubulações verticais como horizontais, ou mesmo

inclinadas, e com diferentes regimes de escoamento, os quais estão relacionados ao arranjo espacial das fases (HUALLPACHOQUE, 2011). As fases ou componentes, em Fenômenos de Transporte, são as regiões do espaço onde as características físicas de um material podem ser separadas por processos mecânicos quando em composição homogênea, tendo propriedades de estado definíveis (ROSA, 2012).

Para a medição das grandezas relacionadas ao escoamento gás-líquido, são frequentemente utilizados sensores capacitivos, os quais podem ser não-intrusivos instalados ao redor da tubulação. Os sensores capacitivos possuem seu funcionamento baseado na geração de um campo elétrico entre os eletrodos, cuja distribuição depende da quantidade das fases no interior do sensor, já que cada qual deve possuir permissividade dielétrica distinta. Em suma, as mudanças na permissividade além da condutividade elétrica das fases, assim como o raio da blindagem, espessura da parede da tubulação e o ângulo e configurações geométricas da sonda, todos eles podem afetar a resposta (dos REIS, 2003).

Portanto, este trabalho tem como objetivo colaborar com o estudo da resposta do sensor capacitivo por meio de Análise de Elementos Finitos, visando à validação por meio de comparação com os valores da literatura, em específico com o trabalho de dos Reis (2011).

MODELAGEM E ESTRATÉGIA DE SOLUÇÃO

O sensor capacitivo é composto por dois eletrodos côncavos montados sobre a parede externa de um tubo de material dielétrico (acrílico), como mostrado na Fig. 1. Trata-se da mesma configuração geométrica descrita por dos Reis (2011). Ao redor do conjunto composto pelo tubo de acrílico e os eletrodos, há uma blindagem eletromagnética que delimita o domínio matemático do modelo 2D.

Na Fig. 1, R_i é o raio interno do tubo de acrílico, R_e é o raio externo, R_b é o raio da blindagem eletromagnética, θ é o ângulo dos eletrodos, β demarca a posição do centro dos do eletrodo sensor (da direita) em relação à gravidade, e é a distância entre os eletrodos e h_L é a altura da camada estratificada de água de acordo com a aceleração da gravidade.

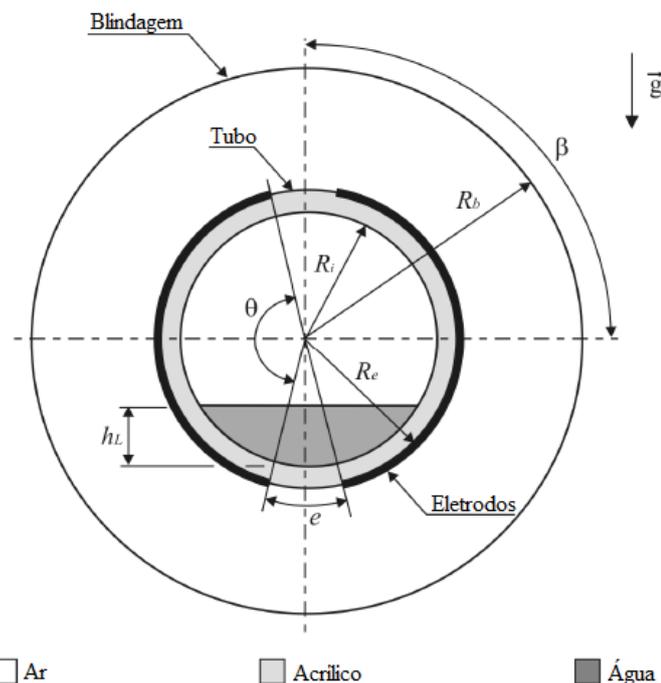


FIGURA 1. Domínio matemático do modelo do sensor capacitivo (DOS REIS, 2011).

A partir das equações de deslocamento elétrico e do campo elétrico, de forma a facilitar os cálculos, pode ser obtida a Eq. (1), chamada de equação de Poisson, que deve ser resolvida com potencial elétrico ϕ , e assumindo que como o sinal de excitação junto ao eletrodo fonte é de 1.0 MHz, o problema pode ser tratado como estático (XIE *et al.*, 1990).

$$\vec{\nabla}[\varepsilon_0 \varepsilon(x, y) \nabla \phi(x, y)] = 0 \quad (1),$$

onde $\varepsilon(x,y)$ é permissividade dielétrica relativa ao meio em (x,y) , ε_0 é a permissividade dielétrica absoluta do vácuo, e $\phi(x,y)$ é o potencial elétrico escalar em (x,y) , sendo que as condições de contorno são de potencial especificado ou de Dirichlet como na Eq. (2).

$$\phi(x,y) = \begin{cases} V_f & \forall(x,y) \in \Gamma_f \\ 0 & \forall(x,y) \in \Gamma_s \\ 0 & \forall(x,y) \in \Gamma_b \end{cases} \quad (2),$$

onde V_f potencial elétrico no eletrodo fonte, que é igual a 4 V; Γ_f é o contorno ao redor do eletrodo fonte; Γ_s é o contorno ao redor do eletrodo sensor, com potencial elétrico igual a 0 V; e Γ_b o contorno delimitado pela linha que demarca a posição da superfície interna blindagem eletromagnética, também a 0 V.

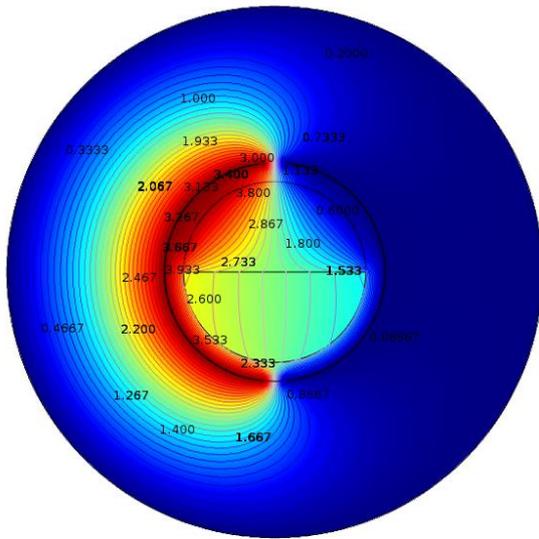
A permissividade absoluta do vácuo é $\varepsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12}$ F/m, assim como as permissividades relativas ao ar, água e acrílico, respectivamente, são $\varepsilon_{\text{ar}} = 1.0$, $\varepsilon_{\text{água}} = 80.0$ e $\varepsilon_{\text{acrílico}} = 3.3$. O tubo de acrílico possui $R_e = 20.55$ mm, $R_i = 17.00$ mm, e a blindagem $R_b = 50.00$ mm. Os valores da altura da camada de água no tubo foram $h_l/D_i = 0.0, 0.25, 0.50, 0.75$ e 1.0 , sendo que 0.0 representa o tubo cheio de ar e 1.0 cheio de água, com $D_i = 2R_i$. Também foram adotados dois valores do ângulo de construção dos eletrodos idênticos, sendo $\theta = 120^\circ$ e 170° . Assim como dois valores de ângulo de giro dos eletrodos em relação ao tubo, sendo $\beta = 0^\circ$ e 90° , colocando os eletrodos na horizontal e na vertical, respectivamente. Portanto, cerca de 20 simulações foram realizadas visando à comparação da resposta do sensor, representado pelo gráfico da capacitância por metro C_x versus h_l/D_i nas duas configurações com diferentes β . Portanto, foram realizadas 20 simulações.

A Análise por Elementos Finitos (AEF) compreendida pelas etapas de pré-processamento, processamento e pós-processamento com o cálculo das capacitâncias por metro, foi realizada no *software* COMSOL *Multiphysics*, versão 4.4. Inicialmente, foi realizado teste de refinamento de malha, a fim de limitar a influência do grau de refinamento sobre a solução. No geral, foram cerca de 49556 elementos triangulares de três nós, 2160 elementos de borda e 22 elementos de vértice.

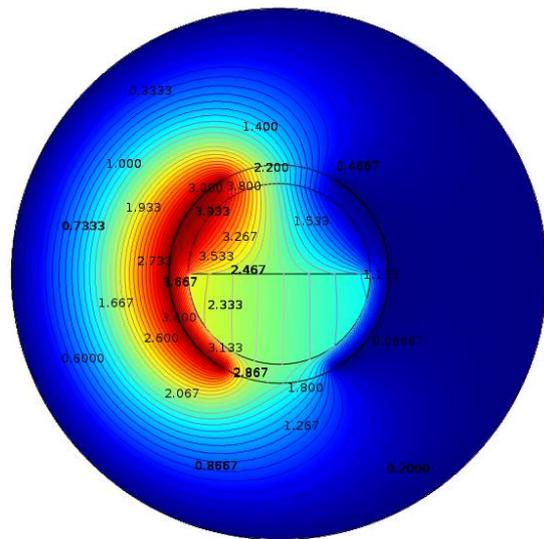
RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Fig. 2 apresenta a distribuição do potencial elétrico ϕ para quatro combinações de β e θ , considerando o mesmo valor de $h_l/D_i = 0.5$ que é equivalente ao tubo com 50% de água e 50% de ar. A distribuição do potencial elétrico na imagem ocorre a partir do eletrodo fonte para o eletrodo sensor, sendo a área com vermelho mais intenso indicando o potencial máximo, igual 4.0 V, e a área azul mais intensa o menor potencial, igual a 0.0 V. Também são apresentadas as linhas equipotenciais. As linhas de campo elétrico, $\vec{E} = -\nabla\phi$, são perpendiculares às linhas equipotenciais. Assim como observado por dos Reis (2011), houve uma maior concentração de linhas equipotenciais na parede do tubo onde havia contato com a água nos casos de $\beta = 90^\circ$.

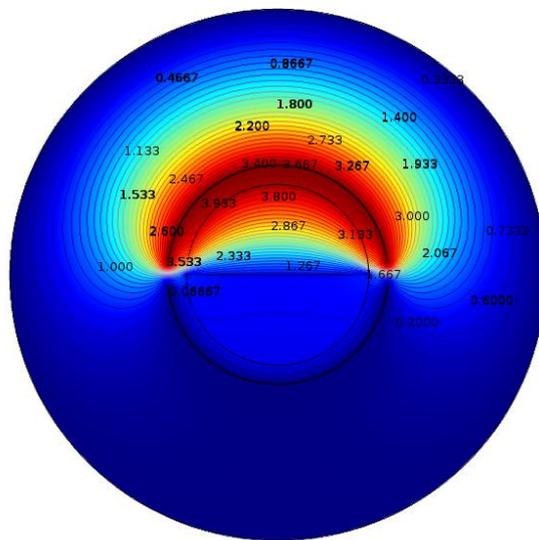
Também é possível perceber que os valores de capacitância C_x para h_l/D_i igual a 0.0 e 1.0 são os mesmos independentemente dos valores de β para valores de θ iguais. Portanto, quando há valores de h_l/D_i diferentes de 0.0 e 1.0 com ar e água no interior do tubo, o campo elétrico se comporta de maneira diferente para os diferentes ângulos de β , pois a permissividade dielétrica da água e do ar são diferentes. Isso pode ser mais bem observado na Fig. 2 (a) e (b), principalmente nas configurações onde $\beta = 90^\circ$, onde a distribuição das linhas equipotenciais se agrupa de forma diferente na água e no ar, e o mesmo ocorre com o campo elétrico.



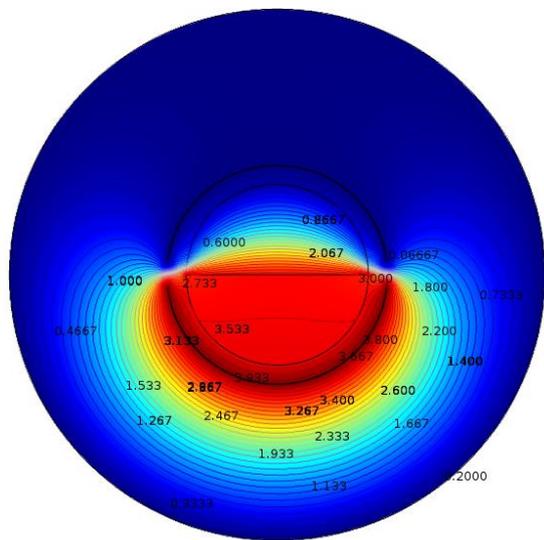
(a) $\beta = 90^\circ$, $\theta = 170^\circ$ e $h_L/D_i = 0.5$



(d) $\beta = 90^\circ$, $\theta = 120^\circ$ e $h_L/D_i = 0.5$



(b) $\beta = 0^\circ$, $\theta = 170^\circ$ e $h_L/D_i = 0.5$
Eletrodo fonte em cima



(c) $\beta = 0^\circ$, $\theta = 170^\circ$ e $h_L/D_i = 0.5$
Eletrodo sensor em cima

FIGURA 2. Distribuição do potencial elétrico para diferentes configurações de θ e β e mesmo h_L/D_i

Na Fig. 3, se compara os valores de C_x versus h_L/D_i do artigo por dos Reis (2011) e os obtidos neste trabalho, utilizando os mesmos valores de θ e β para os mesmos valores de h_L/D_i .

Os dois gráficos na Fig. 3 (a) e (b) foram concebidos para valores de $h_L/D_i = 0.0, 0.25, 0.50, 0.75$ e 1.1 , respectivamente. Os valores de capacitância na Fig. 3 (a) tiveram variação de cerca de 200 pF para $\theta = 170^\circ$ e 150 pF para $\theta = 120^\circ$, enquanto as capacitâncias em (b) tiveram variação de 164 pF para $\theta = 170^\circ$ e 127 pF para $\theta = 120^\circ$. Os valores de capacitância máxima entre (a) e (b) tiveram um erro percentual de cerca de 11.39% para $\theta = 170^\circ$ e 2.19% para $\theta = 120^\circ$. Como os dois modelos foram realizados com as mesmas configurações geométricas e propriedades dos materiais, possivelmente a disparidade percentual dos valores obtidos neste trabalho em relação aos obtidos por dos Reis (2011), se deve pela diferença entre os softwares utilizados. Entretanto, apesar da disparidade entre os valores totais de capacitância, as curvas de (a) e (b) apresentaram um comportamento semelhante durante a variação de h_L/D_i de 0.0 a 1.0 para $\theta = 170^\circ$. Para $\theta = 120^\circ$ houve uma pequena variação entre as curvas, sendo que a curva de (a) apresentou tendência a linearidade entre h_L/D_i de 0.25 a 1.0 e (b) tendência a linearidade de 0.0 a 0.75.

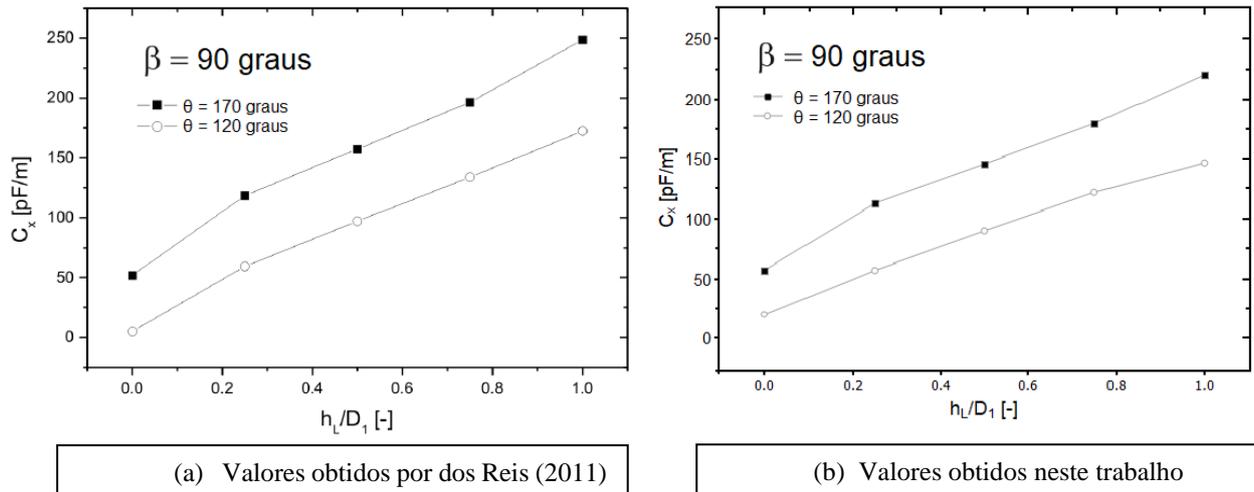


FIGURA 3. Comparação entre o gráfico de C vs h_L/D_1 obtido por dos Reis (2011) e neste trabalho

CONCLUSÕES

Este trabalho apresenta uma análise de simulação baseada na Análise por Elementos Finitos de um sensor capacitivo para medição de vazão volumétrica em escoamentos bifásicos ar-água. As configurações geométricas e propriedades dos materiais foram baseados nos mesmos valores trabalhados por dos Reis (2011), a fim de comparar os resultados.

A partir dos resultados obtidos, é possível concluir que os valores de capacitância apresentaram uma melhor resposta quando $\beta = 90^\circ$, pois evita desvios de linearidade pela influência da parede do tubo, como foi mostrado na Fig. 3 (a) e (b), assim como observado por dos Reis (2011). É possível também concluir que os eletrodos de $\theta = 170^\circ$ apresentaram uma resposta mais estável, comparando as curvas da Fig. 3 (a) e (b), por manter o mesmo comportamento da curva de capacitância nos dois gráficos, enquanto com $\theta = 120^\circ$ houve uma mudança no comportamento das curvas.

Com os resultados obtidos neste artigo conclui-se a validação da utilização do *software* COMSOL *multiphysics* em modelos de sensores capacitivos, contribuindo com sua utilização em estudos futuros.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Professor e Orientador Emerson dos Reis pela ajuda e apoio durante toda a realização deste projeto, além da contribuição com o conhecimento adquirido. Também agradeço ao Instituto Federal de Educação, Ciências e Tecnologia de São Paulo, campus em São João da Boa Vista, pela oportunidade de realizar este trabalho.

REFERÊNCIAS

DOS REIS, E. Desenvolvimento de Um Medidor Eletrodinâmico E Capacitivo de Descarga de FCC Para Operar Em Altas Temperaturas. 2003. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, 2003.

DOS REIS, E. Numerical Modeling of A Capacitive Probe For Measuring The Water Layer Thickness In Horizontal Air-Water Twophase Flows. 21st Brazilian Congress of Mechanical Engineering. Natal, RN, 2013.

HUALLPACHOQUE, R. C. C. Análise Numérica do Escoamento Bifásico Horizontal Em Padrão de Golfadas Estatisticamente Permanente. 2010. 116 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2010.

ROSA, E. S.; FLORA, B. F.; SOUZA, M. A. S. F. Design and performance prediction of na impedance void meter applied to the petroleum industry. Measurement Science and Technology, v. 23, n.5, 2012.

XIE, C. G., STOTT, A. L., PLASKOWISKI, A., BECK, M. S. Design of Capacitance Electrodes For Concentration Measurement of Two-phase Flow. Measurement Science and Technology, v. 1, p. 65-78, 1990.