



15º Congresso de Inovação, Ciência e Tecnologia do IFSP - 2024

MODELAGEM DE SENSORES CAPACITIVOS DE ELETRODOS CÔNCAVOS E DUPLO ANEL PARA MEDIÇÕES EM ESCOAMENTOS BIFÁSICOS AR-ÁGUA

HENRIQUE S. L. MACHADO¹, EMERSON DOS REIS²

¹ Graduando em Engenharia de Controle e Automação, Bolsista PIBIFSP, IFSP, Campus São João da Boa Vista, <u>machado.henrique@aluno.ifsp.edu.br</u>.

² Docente em Engenharia de Controle e Automação, IFSP, Campus São João da Boa Vista, <u>emersonr@ifsp.edu.br</u>.

Área de conhecimento (Tabela CNPq): 3.04.05.01-7 Eletrônica Industrial

RESUMO:

Este trabalho analisa o uso de sondas capacitivas para medir, em especial, a fração volumétrica em escoamentos bifásicos ar-água, como os encontrados em indústrias químicas e petroquímicas. A dificuldade na aplicação dessas sondas é devido a desafios na escolha da geometria e no projeto dos sensores, que afetam a precisão das medições. A abordagem utilizada envolve a simulação por elementos finitos com o software COMSOL Multiphysics para comparar a performance de sondas capacitivas com diferentes geometrias - duplo anel e côncavo - e verificar a precisão dos resultados em relação aos dados experimentais. Os resultados indicam que a simulação reproduziu os dados com erros entre 0,66% e 20,71%, apresentando comportamentos semelhantes. Revelando como as geometrias e a rotação do eletrodo côncavo influenciam a capacitância medida, e validando a eficácia da análise por elementos finitos para investigações futuras sobre novas configurações de eletrodos, tipos de escoamentos e diferentes condições de operação.

PALAVRAS-CHAVE: sondas capacitivas; análise por elementos finitos; escoamento bifásico; COMSOL Multiphysics;

MODELING OF CAPACITIVE SENSORS WITH CONCAVE AND DOUBLE-RING ELECTRODES FOR MEASUREMENTS IN AIR-WATER TWO-PHASE FLOWS

ABSTRACT:

This work analyzes the use of capacitive probes to perform measurements in air-water two-phase flows, such as those found in chemical and petrochemical industries. The challenge in applying these probes arises from difficulties in selecting the geometry and designing the sensors, which affect measurement accuracy. The approach involves finite element analysis using COMSOL Multiphysics software, for comparing the performance of capacitive probes with different geometries - double ring and concave - and assess the accuracy of the results against experimental data. The results indicate differences among theoretical and experimental data ranging from 0.66% to 20.71%. It reveals how geometries and the rotation of the concave electrode influence the measured capacitance, and validates the effectiveness of finite element analysis for future investigations into new electrode configurations, types of flows, and varying operational conditions.

KEYWORDS: capacitive sensor; finite element analysis; two-phase flow; COMSOL Multiphysics;

INTRODUÇÃO

Escoamentos bifásicos são aqueles que ocorrem na presença de duas fases como, por exemplo, gás-líquido, gás-sólido e líquido-sólido. Estes escoamentos são comumente encontrados nas indústrias química, alimentícia e de petróleo, e são caracterizados principalmente pelo arranjo espacial das fases no interior da tubulação ou equipamento, chamado de padrão ou regime de escoamento (Cunha, 2012).

Sondas capacitivas são constituídas, basicamente, de duas partes: uma seção de sensoriamento com eletrodos que formam um capacitor montado ao redor do tubo com guardas e blindagem, e um circuito transdutor de capacitância. Estas sondas são equipamentos utilizados na medição de grandezas associadas aos escoamentos multifásicos, com destaque para fração volumétrica de uma das fases. São robustas, simples de manusear, não requerem segurança especial como no caso de sondas de raios X ou raios gama, e são relativamente baratas. Entretanto, há vários desafios que, ainda, requerem investimento em pesquisa para que passem a ser amplamente utilizadas na indústria (Dos Reis, 2003 *apud* Cunha, 2012), sendo um deles a escolha da forma geométrica e o projeto adequado dos sensores de capacitância.

No estudo conduzido por Cunha e Dos Reis (2014), foram desenvolvidas e analisadas sondas capacitivas com três geometrias distintas: helicoidal, duplo anel e côncavo, com o objetivo de medir a fração volumétrica de um escoamento bifásico ar-água em regime estratificado. Este trabalho busca reproduzir os resultados obtidos nesse estudo original por meio de análise por elementos finitos, utilizando o software COMSOL Multiphysics.

Neste estudo, são analisadas as configurações de sondas de duplo anel e côncavo, variando a altura da água em relação ao diâmetro interno do tubo e avaliando o valor da capacitância do sistema. Além disso, para o eletrodo côncavo, também é avaliada a rotação do sensor ao redor do tubo. Em todas as situações, o trecho de tubo que envolve a região de sensoriamento é feito de material não condutivo (Plexiglas).

MODELO MATEMÁTICO DOS SENSORES CAPACITIVOS

De acordo com Alme e Mylvaganam (2006 *apud* Félix, 2015), a modelagem de sondas capacitivas que operam com fluidos não condutivos começa a partir de um modelo eletrostático definido no domínio Ω , que é delimitado pela blindagem da sonda. Neste estudo, a Equação 1 será utilizada para a resolução do modelo.

$$\vec{\nabla} \left(\varepsilon_0 \varepsilon_r \vec{\nabla} \varphi \right) = 0 \tag{1}$$

Em que, φ é a distribuição espacial do potencial elétrico em (V), ε_r representa a distribuição da permissividade dielétrica relativa de cada material no domínio matemático, e ε_0 é permissividade dielétrica do vácuo em (F/m). A Tabela 1 mostra as dimensões fixas do sistema simulado no software, já a Tabela 2 mostra as dimensões dos eletrodos côncavo e duplo anel representados nas Figuras 1 e 2, respectivamente.

Tabela 1. Dimensões fixas do sistema.		
Parâmetro	Valor (mm)	Símbolo
Comprimento do tubo	500	L_t
Diâmetro externo do tubo	40,20	D_e
Diâmetro interno do tubo	33,85	D_i
Comprimento da blindagem	170	L_b
Diâmetro externo da blindagem	100	D_b
Espessura da blindagem	0,5	E_b
Diâmetro do limite do domínio	300	D_d
Comprimento do limite do domínio	500	L_d
Espessura do eletrodo	0,06	E_e



Figura 1. Sensor com eletrodos côncavo.



Figura 2. Sensor com eletrodos em duplo anel.

Parâmetro	<i>L</i> [mm]	<i>w</i> [mm]	<i>g</i> [mm]	A [mm ²]
Côncavo	98	61	2,1	5978
Duplo Anel	105	47	11	5935

A Figura 3 mostra as regiões que foram aplicados os materiais, sendo a permissividade relativa da água (a) igual a 1, do ar (b) igual a 78,86 e do Plexiglas (c) igual a 2,76. Já a Figura 4 mostra as condições de contorno aplicadas para o eletrodo duplo anel, sendo em (a) o eletrodo sensor (0 V), em (b) o eletrodo fonte (1 V), e em (c) o aterramento. Por fim, a Figura 5 mostra as condições de contorno aplicadas para o eletrodo em (a) o eletrodo sensor (0 V), em (b) o eletrodo fonte (1 V), e em (c) o aterramento. Por fim, a Figura 5 mostra as condições de contorno aplicadas para o eletrodo côncavo, sendo em (a) o eletrodo sensor (0 V), em (b) o eletrodo fonte (1 V), e em (c) o aterramento.



Figura 3. Materiais aplicados: água (a), ar (b) e Plexiglas (c).



Figura 4. Condições de contorno duplo anel: eletrodo sensor (a), eletrodo fonte (b) e aterramento (c).



Figura 5. Condições de contorno côncavo: eletrodo sensor (a), eletrodo fonte (b) e aterramento (c).

ESTRATÉGIA DE SIMULAÇÃO

Para se alinhar com a abordagem utilizada por Cunha e Dos Reis (2014), o eletrodo côncavo foi posicionado em três ângulos diferentes: -90° , 0° e 90° . A configuração apresentada na Figura 5 corresponde ao ângulo de 0° . Dessa forma, o eletrodo fonte é posicionado em três locais distintos: na parte superior do tubo, na lateral e inferior, respectivamente. Já o eletrodo duplo anel não houve rotação visto que isso não interfere nos resultados. Para todos os casos, foi variada a fração volumétrica de água em relação ao escoamento bifásico ar-água, assim como mostrado nos resultados.

Foi realizado o teste de malha para os dois modelos com o objetivo de garantir duas casas decimais depois da virgula, e para isso, foi utilizado elementos mínimos de 0,1 e máximos de 20. Para o duplo anel teve 4271412 graus de liberdade, e para o côncavo foi 2394776 graus de liberdade.

Para realizar as simulações foi utilizado o software COMSOL Multiphysics em uma máquina com 16 GB de RAM, processador Intel I5-4660 e placa de vídeo NVIDIA GeForce GTX 980 com 4 GB de memória. Para essa configuração, foi necessário cerca de 2 minutos e 30 segundos cada simulação do eletrodo duplo anel, e cerca de 1 minuto e 15 segundos para cada simulação do eletrodo côncavo. Essa diferença de tempo é justificada pois foi simulada metade da geometria do eletrodo côncavo devido ao seu espelhamento

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 3 mostra a tabela obtida por Dos Reis e Cunha (2014). Já a Tabela 4 mostra os resultados obtidos através da análise por elementos finitos, e a Tabela 5 mostra a diferença percentual entre os resultados obtidos pela simulação em comparação com os resultados da Tabela 3.

φ (m ³ /m ³)	Concave		Double ring	Double ring		
	C _{min} (pF)	C _{max} (pF)	ΔC (%)	C _{min} (pF)	C _{max} (pF)	ΔC (%)
0.000	6.02	6.06	0.7	1.66	1.72	3.6
0.126	6.04	10.2	51.2	3.46	3.57	3.1
0.232	6.09	11.02	57.6	4.17	4.30	3.1
0.324	6.21	11.82	62.2	4.88	5.00	2.4
0.430	6.53	12.51	62.8	5.53	5.67	2.5
0.554	9.07	13.51	39.3	6.10	6.22	1.9
0.686	11.70	14.51	21.1	6.76	6.88	1.8
0.773	13.79	15.45	11.9	7.38	7.49	1.5
1.000	18.35	18.32	0.2	9.20	9.21	0.1

Tabela 3. Dados experimentais.

Fonte: Dos Reis e Cunha (2014).

Os valores apresentados dos eletrodos côncavos na Tabela 4 foram multiplicados por 2, visto que a simulação considera apenas metade do domínio. Observa-se que os resultados obtidos pela análise por elementos finitos (EFA) estão próximos dos dados experimentais, e que mesmo que em algumas situações houveram erros de até 20%, os dois sistemas apresentam comportamentos semelhantes. Isso válida a análise por EFA e abre caminho para estudos futuros.

	Côncavo (-90°)	Côncavo (0°)	Côncavo (90°)	Duplo Anel
ø	C [pF]	C [pF]	C [pF]	C [pF]
0,000	6,19	6,20	6,20	1,40
0,126	10,06	10,74	6,28	2,95
0,232	11,16	10,86	6,38	3,75
0,324	11,94	11,02	6,45	4,34
0,430	12,70	11,44	6,94	4,95
0,554	13,60	13,18	8,62	5,61
0,686	14,62	16,14	11,50	6,32
0,773	15,38	18,02	13,32	6,81
1,000	19,19	19,18	19,18	8,87

Tabela 4. Resultados obtidos por meio de análise por elementos finitos.

Tabela 5. Comparação dos dados.

	Côncavo C _{min}	Côncavo C _{max}	Duplo Anel C _{media}
ф	ΔC [%]	∆C [%]	∆C [%]
0,000	2,75	2,26	20,71
0,126	3,82	5,03	19,15
0,232	4,55	1,25	12,53
0,324	3,72	1,01	13,82
0,430	5,91	1,50	13,13
0,554	5,22	0,66	9,80
0,686	1,74	10,10	7,91
0,773	3,53	14,26	9,18
1,000	4,33	4,53	3,78

CONCLUSÕES

Os resultados obtidos demonstraram que a simulação foi capaz de reproduzir com precisão os dados experimentais de Cunha e Dos Reis (2014), tendo erros de 0,66 a 20,71 %. A comparação entre as diferentes geometrias revelou como elas afetam a capacitância medida, permitindo entender como a rotação dos eletrodos côncavos influenciam no resultado para um escoamento estratificado. Esse trabalho contribui para a melhoria das técnicas de medição de escoamentos bifásicos e abre caminho para pesquisas futuras, como outros tipos de escoamento ou a utilização de fluidos condutivos, destacando a importância da análise por elementos finitos como ferramenta crucial para o desenvolvimento e aprimoramento de sensores industriais.

CONTRIBUIÇÕES DOS AUTORES

H.S.L.M e E.D.R contribuíram no planejamento e construção dos modelos, além da elaboração do resumo. Os resultados e tabelas foram obtidos por H.S.L.M.

AGRADECIMENTOS

A todos que participaram, direta ou indiretamente do desenvolvimento deste trabalho de pesquisa, enriquecendo o meu processo de aprendizado. Sendo meu orientador e o Instituto Federal de São Paulo (IFSP).

REFERÊNCIAS

CUNHA, D. S. Sonda capacitiva para medição da vazão volumétrica de escoamentos bifásicos: análise das características de diferentes configurações geométricas do sensor. 2012. Relatório Final de Iniciação Científica – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, São João da Boa Vista, 2012.

DOS REIS, E; CUNHA, D. S. Experimental study on different configurations of capacitive sensors for measuring the volumetric concentration in two-phase flows. Flow Measurement and Instrumentation, v. 127, n. 134, p. 127-134, 2014.

FÉLIX, B. P. G. **Controle automático aplicado a escoamentos multifásicos através de tubulações: uma contribuição baseada na literatura**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, São João da Boa Vista, 2015.