Desenvolvimento de um sensor para medição de velocidade e fração de uma bolha de gás escoando em líquido estagnado

Development of a sensor for measuring the velocity and fraction of a gas bubble flowing in stagnant liquid

Johnny Joelson Rodrigues de Andrade *, Luiz Eduardo Melo Lima†

RESUMO

O presente trabalho refere-se a análise e o desenvolvimento de um sensor destinado à determinação das frações das fases e da velocidade de uma bolha de gás escoando em líquido estagnado. As frações das fases, assim como a velocidade de bolhas em escoamentos gás-líquido, têm grande importância no estabelecimento de parâmetros operacionais em diversas aplicações industriais. Um sensor capacitivo não intrusivo foi dimensionado a partir da utilização de faixas condutoras, colocadas em torno de um tubo. Estas coletam os sinais e os convertem em dados legíveis em um circuito de processamento. As frações das fases e a velocidade da bolha são identificadas por meio do uso de dois pares de anéis capacitivos, que estão ligados aos circuitos de conversão. Por meio de um circuito integrado, os dados de capacitância coletados são convertidos em frequência e, por consequência, em período. Variando o valor do capacitor 1 (de 2), foi possível observar um perfil linear na variação dos períodos, que ocorre de maneira semelhante independentemente da mistura gás-líquido ou das dimensões do tubo. Sendo assim, quanto maior o diâmetro da tubulação e os valores dielétricos, maiores devem ser os valores de capacitância. As simulações e cálculos realizadas demonstram a viabilidade técnica do projeto desenvolvido para aplicação em trabalhos futuros.

Palavras-chave: Escoamento multifásico. Projeto experimental. Circuitos elétricos.

ABSTRACT

The present work refers to the analysis and development of a sensor for the determination of phases' fractions and the velocity of a gas bubble flowing in a stagnant liquid. The phases' fractions, as well as the velocity of bubbles in gas-liquid flows, are of great importance in establishing operational parameters in various industrial applications. A non-intrusive capacitive sensor was designed using conductive strips placed around a tube. These collect the signals and convert them into readable data in a processing circuit. The phases' fractions and bubble velocity are identified through the use of two pairs of capacitive rings, which are connected to the conversion circuits. Through an integrated circuit, the capacitance data collected is converted into frequency and, consequently, into period. By varying the value of capacitor 1 (of 2), it was possible to observe a linear profile in the variation of the periods, which occurs in a similar way regardless of the gas-liquid mixture or the dimensions of the tube. Therefore, the larger the pipe diameter and the dielectric values, the higher the capacitance values must be. The simulations and calculations carried out demonstrate the technical feasibility of the project developed for application in future works.

Keywords: Multiphase flow. Experimental project. Electric circuits.

* Bacharelado em Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, Paraná, Brasil; johnny.joelson.jr@gmail.com.
† Departamento Acadêmico de Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, Paraná, Brasil; lelima@utfpr.edu.br; https://orcid.org/0000-0002-3084-5720.

1 INTRODUÇÃO

Escoamentos multifásicos podem ser observados em diversas aplicações industriais. Por exemplo, escoamentos gás-líquido ocorrem em tubulações de transporte de petróleo e gás natural. Três classificações principais são frequentemente adotadas para os padrões das fases: disperso, separado e intermitente. Este último é subclassificado em golfadas e golfadas instáveis, sendo formados por pistões de líquido aerados, seguidos por bolhas de gás em paralelo com um filme de líquido fino. Deste modo, torna-se importante mensurar parâmetros destes escoamentos, como frações e velocidades das fases (FALCONE; HEWITT; ALIMONTI, 2009).

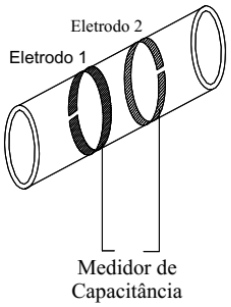
Há diversas maneiras de se realizar medições das frações das fases. Dentre estas, tem-se o uso de sensores capacitivos, que apresentam diversas configurações dos eletrodos, como placas côncavas, helicoidais e em anéis. Sendo este último, objeto de estudo neste trabalho. O eletrodo em anel tem como característica possuir anéis que são colocados próximos uns aos outros, em torno de um duto não condutivo. Quanto menor a distância entre os anéis, maior deve ser a detecção de sinal pelo sistema (SILVA, 2008).

Baseado em estudos já realizados e disponíveis na literatura, o objetivo deste trabalho é a construção de um sensor de anéis capacitivos que permita realizar a medição das frações das fases e da velocidade de uma bolha de gás escoando em líquido estagnado.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Iniciou-se este projeto com a pesquisa de estudos sobre sensores aplicáveis na análise de escoamentos gás-líquido. Em indústrias onde existe a ocorrência destes escoamentos, observa-se que a utilização de sensores capacitivos não intrusivos é mais comum. Deste modo, o sensor capacitivo em anéis foi escolhido para esse estudo. Este possui uma configuração que apresenta um comportamento mais linear na resposta. No modelo de sensor proposto por Ahmed e Ismail (2008), pode-se observar este tipo de configuração, conforme Fig. 1.

Figura 1 – Configuração dos eletrodos em anéis.



Fonte: adaptada de Ahmed e Ismail (2008).

Ahmed e Ismail (2008) citam que para relacionar os valores de capacitância e de fração da fase gasosa (também denominada de fração de vazio), necessitam-se das características dielétricas das fases, além de parâmetros como a área de seção transversal (A_e) e o distanciamento entre as placas de eletrodos (L_e). Faz-se necessário o isolamento dos anéis para que a interferência de leitura seja miníma. Tem-se que em torno das placas forma-se um campo elétrico E. Considerando que o material dielétrico compreenda todo espaço entre os eletrodos, pode-se considerar que este campo é definido pela Eq. (1):

$$E = \frac{\rho_f + \rho_P}{\varepsilon_0} \tag{1}$$

Onde ρ_f é a densidade da carga, ρ_P densidade da carga polarizada e ε_0 é a constante de permissividade do vácuo, sendo seu valor $\varepsilon_0 = 8{,}854 \times 10^{-12}$ $C^2N^{-1}m^{-2}$. Quando não há um meio dielétrico, $\rho_P = 0$. Como este não é o caso, obtém-se seu valor por meio da Eq. (2):

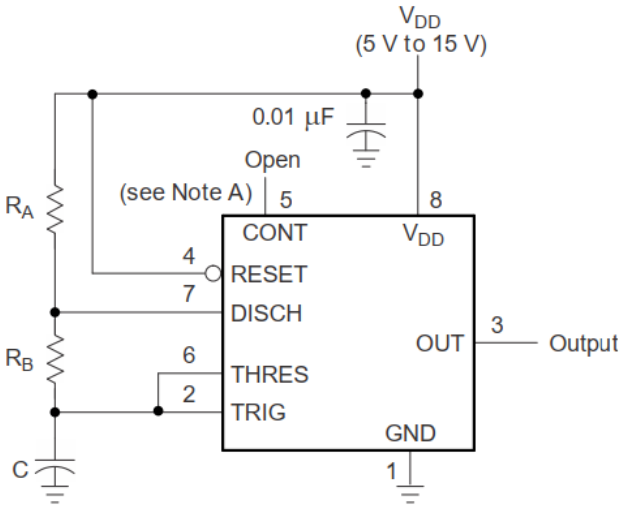
$$\rho_P = \varepsilon_0 \chi E \tag{2}$$

Sendo χ a suscetibilidade elétrica, tal que a capacitância C é obtida por meio da Eq. (3):

$$C = \frac{\varepsilon_0 (1 - \chi) A_e}{L_e} = \frac{\varepsilon A_e}{L_e} \tag{3}$$

A fim de se realizar as análises e de se obter os dados de fração de vazio em escoamentos gás-líquido, é preciso considerar a capacitância como uma associação em série ou paralelo, de forma que apresentem diferentes constantes dielétricas (AHMED; ISMAIL, 2008). Deste modo, considera-se o uso de dois sensores, cada um ligado a seu respectivo circuito. Para tratar os dados coletados utiliza-se o circuito integrado (CI) TLC555 (TEXAS INSTRUMENTS, 2019), cuja configuração é mostrada na Fig. 2.

Figura 2 – Circuito integrado TLC555 no modo astável.



Fonte: Texas Instruments (2019).

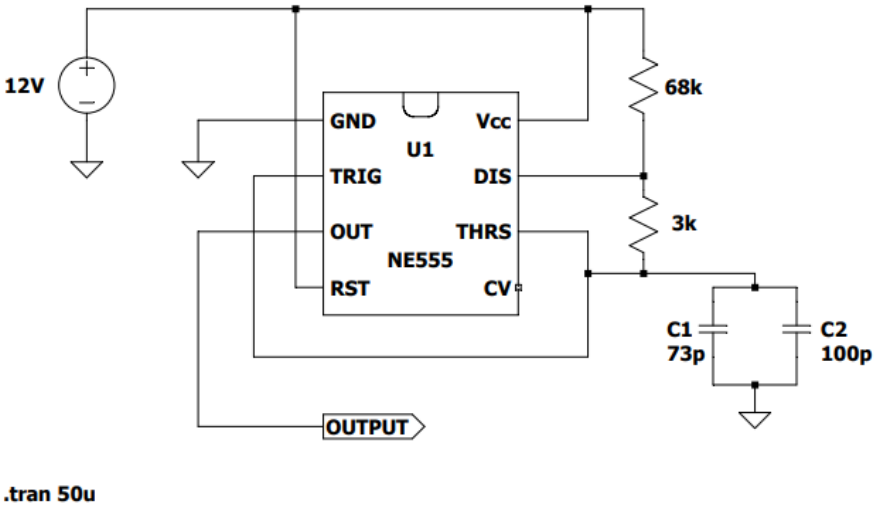
O capacitor C relaciona-se aos pares de eletrodos, que estão envoltos ao tubo. O resistor R_B aliado a esse capacitor, faz com que o temporizador se ative. O capacitor se carrega por R_A e R_B e descarga em R_B. A partir destas relações, pode-se calcular a frequência pela Eq. (4):

$$f = \frac{1{,}443}{C\,(R_A + 2R_B)} \tag{4}$$

A Figura 3 representa esquematicamente o circuito que deve ser montado para medir o escoamento. Onde C_1 representa o par de eletrodos do sensor. Este é importante para determinar a fração de vazio. Para velocidade, faz-se necessário uma associação de dois sensores.

Necessitam-se conhecer algumas características, tais como constantes dielétricas (k), dimensões dos tubos (diâmetro interno, DI, e diâmetro externo, DE) e distância dos sensores (L_e = 2 mm) (ROSA; FLORA; SOUZA, 2012). Foram consideradas diferentes dimensões de tubos: Tubo A (DI = 16 mm, DE = 20 mm), Tubo B (DI = 24 mm, DE = 30 mm), Tubo C (DI = 26 mm, DE = 30 mm). Utilizaram-se também diferentes substâncias, apresentadas na Tab. 1.

Figura 3 – Circuito integrado TLC555 dimensionado neste trabalho.



Fonte: autoria própria (2021).

Tabela 1 – Constantes dielétricas das substâncias analisadas neste trabalho.

Fluidos	Ar	Água	Glicerina	Gás	Óleo
k	1,0006	80,4	53	1,0057	3,1

Fonte: autoria própria (2021).

A partir desses dados utilizou-se o aplicativo MATLAB®, para realizar os cálculos e determinar as faixas de capacitância. Utilizaram-se também os limites de fração de vazio ($0 \leq \alpha \leq 1$), que correspondem às frações de cada um dos fluidos no tubo. Realizado este cálculo, obtiveram-se os valores apresentados na Tab. 2.

Tabela 2 – Faixas de capacitância (em pF) de acordo com a mistura gás-líquido e dos tubos analisados neste trabalho.

Mistura	Tubo A			Tubo B			Tubo C		
	$\alpha = 1$		$\alpha = 0$	$\alpha = 1$		$\alpha = 0$	$\alpha = 1$		$\alpha = 0$
Ar-água	0,334	à	72,78	0,751	à	163,7	0,334	à	196,6
Ar-glicerina	0,334	à	48,39	0,751	à	108,8	0,334	à	127,2
Gás-óleo	0,334	à	3,988	0,751	à	8,973	0,334	à	9,983

Fonte: autoria própria (2021).

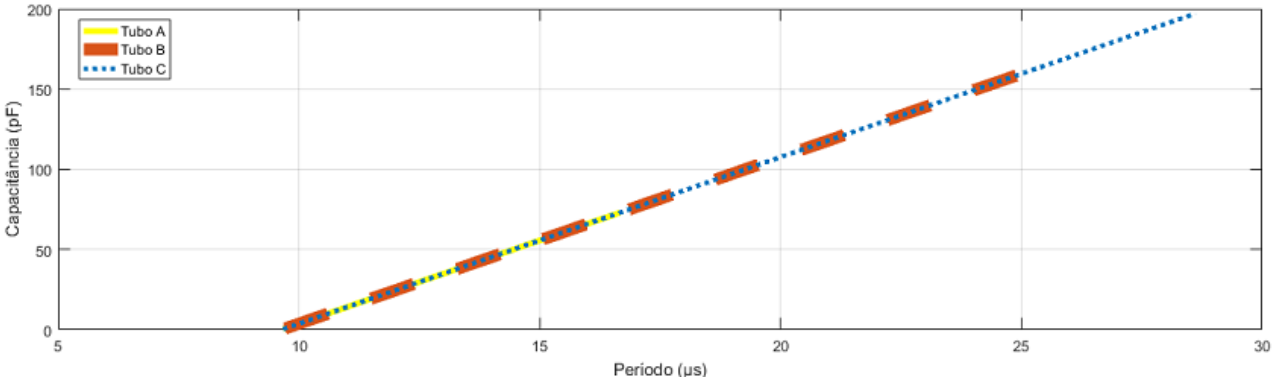
Baseado no trabalho desenvolvido por Ahmed e Ismail (2008), determinou-se um valor de frequência de 100 kHz. Utilizou-se a Eq. (4) para determinar os valores de resistência. Considerou-se $R_B = 68$ kΩ e, como demonstrado pelo *Datasheet* do circuito (TEXAS INSTRUMENTS, 2019), R_A deve ser muito menor. Sendo $C_2 = 100$ pF, chegou-se a um valor de $R_A = 3$ kΩ.

3 RESULTADOS

A partir dos dados apresentados na Tab. 2 têm-se diversas possibilidades de realização de alguns testes, fazendo variações nos valores do capacitor C_1. Permitindo a obtenção de diversos resultados para ajuda na compreensão dos comportamento das misturas gás-líquido. Os gráficos apresentados nas Figs. 4 e 5 referem-se

às variações de capacitância em função do período. O gráfico apresentado na Fig. 4 corresponde à mistura ar-água, analisada no presente trabalho e mostra a influência de cada tubo (A, B e C) na relação funcional entre capacitâncias e períodos. O que pode ser observado nas relações funcionais apresentada na Fig. 4 é um padrão linear desta mistura analisada. Com o aumento dos valores de período ocorre um crescimento linear nos valores da capacitância, inciando-se em um valor mínimo, comum entre as três misturas, e finalizando-se nos respectivos valores máximos para cada um dos tubos. Sendo o maior valor limite máximo para o Tubo C, seguido do Tubo B e, finalmente, o do Tubo A.

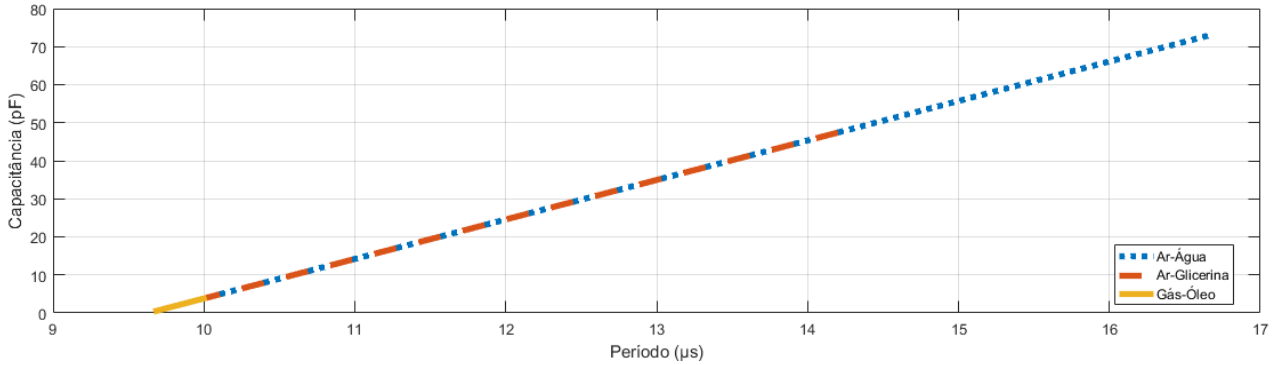
Figura 4 – Capacitância em função do período: ar-água.



Fonte: autoria própria (2021).

O gráfico apresentado na Fig. 5 corresponde ao tubo A, analisado no presente trabalho e mostra a influência de cada mistura (ar-água, ar-glicerina e gás-óleo) na relação funcional entre capacitâncias e períodos.

Figura 5 – Capacitância em função do período: Tubo A.



Fonte: autoria própria (2021).

De forma análoga à analise de influência dos tubos, observa-se também um comportamento semelhante quando analisa-se a influência das misturas. Verifica-se novamente que o aumento dos valores de período resultam em um crescimento nos valores de capacitância, seguindo um perfil linear acompanhando os valores de C_1. É possível observar que este comportamento ocorre independentemente das características do tubo (A, B ou C) ou das misturas gás-líquido (ar-água, ar-glicerina e gás-óleo) utilizadas, principalmente, devido à ocorrência de uma variação da capacitância quando o tubo está 100% preenchido por um dos fluidos da mistura. Ou seja, quanto maior for o diâmetro da tubulação e os valores das constantes dielétricas das substâncias, maiores devem ser os valores de capacitância obtidos pelo sensor, seguindo o perfil linear que demostrem uma tendência de crescimento da capacitância com o aumento do valores de período.

Outro meio de verificar estes dados de saída obtidos nestas análises é por meio de simulações realizadas utilizando o aplicativo LTspice®. O circuito apresentado na Fig. 3 foi implementado neste aplicativo para se obter as relações funcionais entre capacitância e período, a partir da inversão do sinal de frequência de entrada, sendo assim obtidas as repostas de saída geradas pelo sensor. A comparação entre os resultados, simulados no LTspice® e calculados no MATLAB®, foi realizada por meio do cálculo dos desvios relativos.

Deste modo, foi possível observar que os desvios mínimos e máximos entre valores simulados e calculados para os períodos considerando o Tubo A são: 0,10% e 1,49%, para mistura ar-água; 0,10% e 1,04%, para mistura ar-glicerina; 0,10% e 0,71%, para mistura gás-óleo. Estes resultados são semelhantes aos obtidos para os Tubos B e C. Isto mostra que há uma satisfatória concordância entre resultados simulados e calculados, demonstrando assim a viabilidade técnica do circuito dimensionado para permitir a realização de medições das frações das fases e da velocidade da bolha em escoamentos gás-líquido.

4 CONCLUSÕES

Devido aos problemas causados pela pandemia da doença COVID-19 resultante do novo coronavírus (SARS-CoV-2), não foi possível a completa realização de algumas atividades previstas no plano de trabalho da Iniciação Tecnológica e Inovação. Na atividade de "Projeto e construção do sensor de medição e cálculos de dimensionamento", não foi possível a construção do sensor. Na atividade de "Análise teórica e verificação dos resultados obtidos com dados experimentais", não foi possível a verificação com dados experimentais. As demais atividades foram concluídas com exito. Apesar disso, as simulações e cálculos realizados demonstram a viabilidade técnica para aplicação do projeto desenvolvido em trabalhos futuros.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação Araucária (FA), pela bolsa de Iniciação Tecnológica e Inovação (Edital PROPPG 04/2020 — PIBITI) concedida ao acadêmico Johnny Joelson Rodrigues de Andrade.

REFERÊNCIAS

AHMED, Wael H.; ISMAIL, Basel I. Innovative techniques for two-phase flow measurements. **Recent Patents on Electrical Engineering**, v. 1, n. 4, p. 1–13, 2008. DOI: 10.2174/1874476110801010001.

FALCONE, Gioia; HEWITT, Geoffrey F.; ALIMONTI, Claudio. **Multiphase Flow Metering: Principles and Applications**. 1. ed. Amsterdam, Netherlands; Boston, MA, USA: Elsevier Science, 2009. 328 p. (Developments in Petroleum Science).

ROSA, E. S.; FLORA, B. F.; SOUZA, M. A. S. F. Design and performance prediction of an impedance void meter applied to the petroleum industry. **Measurement Science and Technology**, v. 23, n. 5, 055304:1–14, abr. 2012. DOI: 10.1088/0957-0233/23/5/055304.

SILVA, Marco José da. **Impedance Sensors for Fast Multiphase Flow Measurement and Imaging**. Dresden, German: TUDpress, 2008. 154 p.

TEXAS INSTRUMENTS. **TLC555 LinCMOS™ Timer datasheet**. Versão Rev. 1. Dallas, TX, USA, 2019. 42 p. Disponível em: <https://www.ti.com/lit/gpn/TLC555>. Acesso em: nov. 2020.