

## Desenvolvimento de um sensor para medição da velocidade de uma bolha de gás em um líquido estagnado

### Development of a sensor for measuring the velocity of a gas bubble in a stagnant liquid

#### RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo para o desenvolvimento de um sensor capacitivo não intrusivo, aplicável à determinação da velocidade de uma bolha de gás alongada escoando em um líquido estagnado. O sensor foi projetado a partir da utilização de fitas condutoras, instaladas ao redor de um tubo, que transmitem sinais a um circuito conversor. A velocidade da bolha é obtida a partir da utilização de dois pares de eletrodos são utilizados, onde cada par de eletrodos é ligado ao seu respectivo circuito conversor. Cada circuito conversor recebe as informações em capacitância das fitas, o qual converte por meio de um circuito integrado, gerando uma frequência inversamente proporcional e, por consequência, um período diretamente proporcional. A partir da análise dos períodos e conhecendo a distância entre os pares de eletrodos, é possível obter experimentalmente a velocidade da bolha alongada. A determinação deste parâmetro é bastante relevante na modelagem dos escoamentos multifásicos e em suas aplicações industriais.

**PALAVRAS-CHAVE:** Escoamento multifásico. Projeto experimental. Circuitos elétricos.

#### ABSTRACT

This work presents a study for the development of a non-intrusive capacitive sensor, applicable to the determination of the velocity of an elongated gas bubble flowing in a stagnated liquid. The sensor was designed using conductive tapes, installed around a pipe, which transmits signals to a converter circuit. The bubble velocity is obtained from the use of two pairs of electrodes, where each electrodes pair is connected to its respective converter circuit. Each converter circuit receives the capacitance information from the tapes, which converts employing an integrated circuit, generating an inversely proportional frequency and, consequently, a directly proportional period. From the analysis of the periods and knowing the distance between the pairs of electrodes, it is possible to obtain the elongated bubble velocity from experimental data. The determination of this parameter is very relevant in the modeling of multiphase flows and their industrial applications.

**KEYWORDS:** Multiphase flow. Experimental design. Electric circuits.

Anyele Seifert

[anyeleseifert19@gmail.com](mailto:anyeleseifert19@gmail.com)

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, Paraná, Brasil

Luiz Eduardo Melo Lima

[lelima@utfpr.edu.br](mailto:lelima@utfpr.edu.br)

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, Paraná, Brasil

**Recebido:** 19 ago. 2020.

**Aprovado:** 01 out. 2020.

**Direito autoral:** Este trabalho está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.



## INTRODUÇÃO

Escoamentos multifásicos ocorrem em muitas aplicações práticas, por exemplo, durante a produção e o transporte de petróleo e gás natural. Já em reatores nucleares, a sua ocorrência é de extrema importância por motivos de segurança, para evitar situações como inundação e possível fusão do núcleo do reator. Por isso, torna-se bastante importante seu estudo (SHOHAM, 2006).

Os padrões de escoamento multifásico correspondem às diferentes configurações que as fases podem assumir, levando em consideração seu formato e comportamento. O escoamento em golfadas é aquele em que ocorre uma alternância entre pistões de líquido aerados e bolhas de gás alongadas em paralelo com um filme de líquido fino, que se repetem em determinada frequência (CORRÊA, 2009).

Há diversos métodos de aquisição de dados para análise de escoamentos, por exemplo, utilizando sensores de ultrassom, não intrusivos, que geram imagens tomográficas da seção transversal a partir da aplicação de transdutores (HOYLE, 1996). Há também sensores óticos, que são intrusivos, onde um feixe de radiação é produzido por fibras óticas e atingem hastes de vidros, ocorrendo reflexão dos raios incidentes (JONES; DELHAYE, 1976). Já os sensores de impedância elétrica são inovadores e permitem identificar as variações do escoamento quando ocorre alteração na permissividade das fases, podendo ser intrusivos ou não (SHU; WEINBERGER; LEE, 1982).

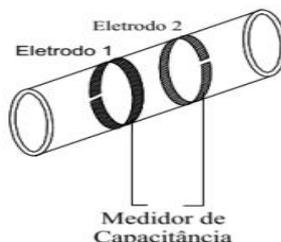
Ofuchi (2011) apresentou uma metodologia que utiliza um sensor *wire-mesh*, que é formado por dois planos de eletrodos ortogonais, permitindo visualizar imagens do que está sendo medido. Aliado a isso, utilizou-se um transdutor infravermelho para obter o sinal por meio da correlação cruzada, baseada no método de Bendiksen (1984), que fez análises de correlação cruzada utilizando tal transdutor em conjunto com um estroboscópio. Ahmed e Ismail (2008) propuseram a utilização de sensores capacitivos não intrusivos, sendo eles no formato em anel e côncavo, onde os dados coletados são devidos a um circuito conversor analógico-digital, operando com uma faixa de frequência de 1 MHz. Na literatura, têm sido desenvolvidos diversos sensores capacitivos (ANDREUSSI; DI DONFRANCESCO; MESSIA, 1988; LOWE; REZKALLAH, 1999; FLORA, 2011).

O presente trabalho tem por objetivo demonstrar o desenvolvimento de um sensor capacitivo não intrusivo para realizar medições da velocidade de uma bolha de gás alongada escoando em um líquido estagnado.

## MATERIAL E MÉTODOS

A metodologia utilizada para o desenvolvimento deste projeto se iniciou a partir do estudo sobre sensores que são aplicáveis para análise deste tipo de escoamento. Para sensores capacitivos, há distintas configurações que envolvem os eletrodos em torno de um tubo: placas côncavas, helicoidais e em anel. No presente trabalho, aborda-se sobre a configuração dos eletrodos em anel, que é uma configuração que apresenta um comportamento mais linear na resposta, além de possuir maior sensibilidade em relação a outros sensores. No modelo de sensor proposto por Ahmed e Ismail (2008), é possível observar esta configuração, conforme mostrado na Figura 1.

Figura 1 – Configuração de eletrodos em anel de um sensor capacitivo



Fonte: adaptada de Ahmed e Ismail (2008).

Ahmed e Ismail (2008) afirmam que os dados de capacitância dependem das propriedades dielétricas de cada fase que compõem o escoamento, além da distribuição das mesmas. O campo elétrico uniforme  $E$  entre as duas placas capacitivas, com um meio dielétrico preenchendo totalmente o espaço entre os eletrodos, pode ser definido pela Eq. (1):

$$E = (\rho_f + \rho_p) / \epsilon_0 \quad (1)$$

Sendo  $\rho_f$  a densidade de carga,  $\rho_p$  a densidade de carga polarizada e a constante de permissividade do vácuo é dada por  $\epsilon_0 = 8,854 \times 10^{-12} \text{ C}^2\text{N}^{-1}\text{m}^{-2}$ . No vácuo sem um meio dielétrico, a densidade de carga polarizada é desconsiderada, ou seja,  $\rho_p = 0$ . Do contrário,  $\rho_p$  é dada em termos da suscetibilidade do material  $\chi$ , de acordo com a Eq. (2):

$$\rho_p = \epsilon_0 \chi E \quad (2)$$

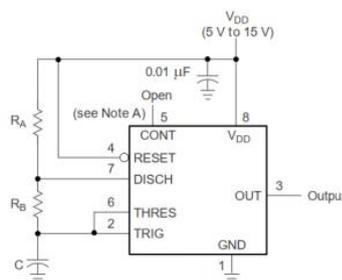
Por sua vez, a capacitância  $C$  pode ser definida pela Eq. (3):

$$C = \epsilon_0 (1 - \chi) A_e / L_e \equiv \epsilon_0 \kappa A_e / L_e \equiv \epsilon A_e / L_e \quad (3)$$

Onde  $A_e$  é a área dos eletrodos,  $L_e$  é a distância entre os eletrodos,  $\kappa (\equiv 1 - \chi)$  é a constante dielétrica e  $\epsilon_0 (\equiv \epsilon_0 \kappa)$  é a permissividade, usualmente utilizada para caracterizar o comportamento dielétrico do material.

Para a determinação da velocidade da bolha alongada, consideram-se dois pares de eletrodos (ou seja, dois sensores), onde cada par precisa ser conectado a um circuito próprio para aquisição dos dados necessários. Para o tratamento dos dados brutos obtidos pelos sensores, optou-se pela utilização do circuito integrado (CI) TLC555 (TEXAS INSTRUMENTS, 2019), que possui algumas vantagens como menor consumo de energia e maior precisão na leitura dos dados. Quando no modo astável (conforme Figura 2), este circuito se comporta como um oscilador e, por isso, esta é a configuração escolhida neste trabalho.

Figura 2 – Configuração do circuito astável do TLC555



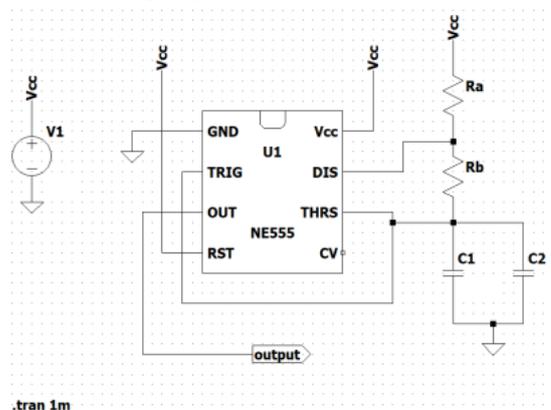
Fonte: Texas Instruments (2019).

De acordo com a Figura 2, o capacitor  $C$  está relacionado aos dados obtidos do par de eletrodos, que está em torno do tubo. O resistor  $R_B$ , aliado a esse capacitor, faz com que o temporizador se ative. O capacitor  $C$  se carrega por  $R_A$  e  $R_B$ , mas sua descarga se dá somente pelo  $R_B$ . O período é calculado pela Eq. (4):

$$T = t_H + t_L = 0,693(R_A + 2R_B)C \quad (4)$$

O primeiro sensor utilizado para as análises do escoamento é indicado por  $C_1$  na Figura 3, que está conectado nas portas 2 e 6 do CI e ao  $R_B$ . O componente  $C_1$  representa um par de eletrodos, sendo necessária a utilização de dois circuitos com o TLC555, pois cada par de eletrodos corresponde a um sensor. O sinal de saída resulta em uma onda quadrada devido ao arranjo de resistor e capacitor.

Figura 3 – Configuração do circuito oscilador com TLC555



Fonte: autoria própria (2020).

No escoamento em golfadas, a velocidade de translação da bolha alongada  $U_T$  é normalmente modelada pela lei cinemática proposta por Nicklin (1962), conforme a Eq. (5):

$$U_T = C_{0T}J + V_{\infty T} \quad (5)$$

Sendo  $J (\equiv J_g + J_l)$  a velocidade superficial de mistura e as velocidades superficiais das fases, representadas por  $J_g$  e  $J_l$ , correspondem às vazões volumétricas das fases,  $Q_g$  e  $Q_l$ , divididas pela área de seção transversal do tubo  $A$ , ou seja,  $J_k = Q_k/A$  com  $k = g, l$ .  $C_{0T}$  é um parâmetro de distribuição, que é aproximadamente igual à razão entre a velocidade máxima e a velocidade média da mistura à frente da bolha alongada.  $V_{\infty T}$  expressa a velocidade de deslizamento local da bolha alongada devido à força de empuxo, ou seja, representa a velocidade da bolha alongada escoando em líquido estagnado, conforme expressa pela Eq. (6):

$$V_{\infty T} = C_{\infty T} \sqrt{gD(1 - \rho_l/\rho_g)} \quad (6)$$

Sendo  $g$  a aceleração gravitacional,  $\rho_g$  e  $\rho_l$  as massas específicas do gás e líquido, respectivamente, e  $C_{\infty T}$  a velocidade de deslizamento local adimensional, obtida normalmente de forma empírica.

Por meio de dois sensores, é possível obter dados para determinação da velocidade da bolha alongada. Para o modelo proposto, as capacitâncias obtidas pelos dois pares de eletrodos no tubo possuem seus valores convertidos em um período diretamente proporcional, conforme as Eqs. (7) e (8):

$$t_{s1} = 0,693(R_A + 2R_B)C_{s1} \quad (7)$$

$$t_{s2} = 0,693(R_A + 2R_B)C_{s2} \quad (8)$$

Onde  $t_{s1}$  e  $C_{s1}$  estão relacionados aos dados obtidos pelo primeiro sensor, assim como  $t_{s2}$  e  $C_{s2}$  referem-se ao segundo sensor. A velocidade de translação da bolha alongada é dada em função da diferença entre os períodos obtidos pelos dois sensores  $\Delta t_s (\equiv t_{s2} - t_{s1})$  e da distância entre os dois sensores  $L_s$ , conforme indicado pela Eq. (9):

$$U_T = L_s / \Delta t_s \quad (9)$$

Para o desenvolvimento do projeto, é necessário conhecer alguns parâmetros, como os diâmetros interno (DI) e externo (DE) do tubo. No presente estudo, utilizam-se três tubos de acrílico transparente cristal, todos com 2 m de comprimento: Tubo A (16 mm de DI e 20 mm de DE), Tubo B (24 mm de DI e 30 mm de DE) e Tubo C (26 mm de DI e 30 mm de DE).

Para a construção do sensor, Ahmed e Ismail (2008) propuseram a utilização de eletrodos com 5 mm de espessura, espaçados com uma distância de 2 mm, num tubo com 12,7 mm de DI e 15,8 mm de DE. Além das dimensões dos eletrodos, o tipo de fluido de trabalho precisa ser conhecido. Ahmed e Ismail (2008) trabalharam com o escoamento ar-óleo (sendo um óleo de 973,05 kg/m<sup>3</sup> de massa específica e 0,026 Pa de viscosidade dinâmica), que possui constante dielétrica  $\kappa = 5,46$ , resultando em uma capacitância de  $C = 12,24$  pF. Porém, devido a presença de bolhas de ar na mistura, assim como a parede do tubo, a faixa de valores experimentais trabalhada por eles foi de 0,1 pF a 15 pF. Após conhecida a faixa de valores operacionais do sensor, é possível realizar cálculos para o dimensionamento do circuito com o TLC555. Com o objetivo de trabalhar com uma frequência abaixo de 100 kHz, obteve-se os seguintes valores:  $R_A = 470$  k $\Omega$ ,  $R_B = 1$  M $\Omega$  e  $C = 100$  pF (em paralelo ao sensor). A tensão de alimentação do CI é de 12 volts, para que o componente trabalhe na sua tensão linear. Para o desenvolvimento desse tipo de sensor, devem ser utilizados os seguintes materiais:

- Fitas capacitivas condutoras;
- Circuito integrado (CI) TLC555;
- Resistores comerciais de 470 k $\Omega$  e 1 M $\Omega$ ;
- Capacitor comercial de 100 pF.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

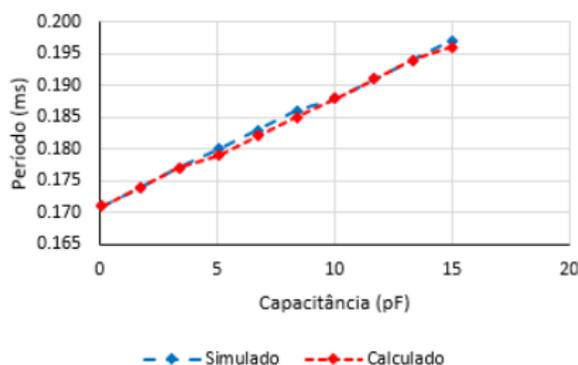
Uma análise teórica foi realizada com o aplicativo MATLAB® e, em seguida, a montagem do circuito foi realizada no aplicativo LTspice®, para que se pudesse realizar simulações. Os componentes calculados e a faixa de capacitância que o sensor deve trabalhar foram inseridos na simulação, a qual apresentou uma resposta esperada conforme descrito na literatura. Com os resultados obtidos pela simulação, foi possível fazer um comparativo com os dados calculados na análise teórica, conforme valores mostrados na Tabela 1 e na Figura 4, sendo possível observar que o máximo desvio relativo obtido entre os valores simulados e calculados para o período foi de 0,56%.

Tabela 1 – Resultados simulados e calculados para o sensor proposto

Capacitância (pF)	Período (ms)	
	Simulado	Calculado
0,1	0,171	0,171
1,76	0,174	0,174
3,41	0,177	0,177
5,07	0,180	0,179
6,72	0,183	0,182
8,38	0,186	0,185
10,03	0,188	0,188
11,69	0,191	0,191
13,34	0,194	0,194
15	0,197	0,196

Fonte: autoria própria (2020).

Figura 4 – Comparativo entre resultados simulados e calculados para o sensor proposto



Fonte: autoria própria (2020).

## CONCLUSÃO

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 Científica. Na atividade “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 êxito. Apesar disso, as simulações e cálculos realizados demonstram a viabilidade técnica para aplicação do projeto desenvolvido em trabalhos futuros.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade Tecnológica Federal do Paraná, pela participação da acadêmica Anyele Seifert no Programa de Voluntariado em Iniciação Científica e Tecnológica (Edital PROPPG 04/2019 — PIVICT).

## REFERÊNCIAS

AHMED, W. H.; ISMAIL, B. I. Innovative techniques for two-phase flow measurements. **Recent Patents on Electrical Engineering**, v. 1, n. 1, p. 1–13, 2008. DOI: [10.2174/1874476110801010001](https://doi.org/10.2174/1874476110801010001).

ANDREUSSI, P.; DI DONFRANCESCO, A.; MESSIA, M. An impedance method for the measurement of liquid hold-up in two-phase flow. **Int. J. Multiphase Flow**, v. 14, n. 6, p. 777–785, 1988. DOI: [10.1016/0301-9322\(88\)90074-2](https://doi.org/10.1016/0301-9322(88)90074-2).

BENDIKSEN, K. H. An experimental investigation of the motion of long bubbles in inclined tubes. **Int. J. Multiphase Flow**, v. 10, n. 4, p. 467–483, 1984. DOI: [10.1016/0301-9322\(84\)90057-0](https://doi.org/10.1016/0301-9322(84)90057-0).

CORRÊA, F. C. **Sistema embarcado para medidas de escoamento bifásico gás-líquido**. Jul. 2009. 107 f. Diss. (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP. Disponível em: <http://repositorio.unicamp.br/jspui/handle/REPOSIP/263016>. Acesso em: 15 mar. 2020.

FLORA, B. F. **Sensor de impedâncias de anéis para medida de fração de vazio em escoamento gás-líquido**. Fev. 2011. 184 f. Diss. (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP. Disponível em: <http://repositorio.unicamp.br/jspui/handle/REPOSIP/264014>. Acesso em: 15 mar. 2020.

HOYLE, B. S. Process tomography using ultrasonic sensors. **Meas. Sci. Technol.**, v. 7, n. 3, p. 272–280, 1996. DOI: [10.1088/0957-0233/7/3/007](https://doi.org/10.1088/0957-0233/7/3/007).

JONES, O. C.; DELHAYE, J.-M. Transient and statistical measurement techniques for two-phase flows: A critical review. **Int. J. Multiphase Flow**, v. 3, n. 2, p. 89–116, 1976. DOI: [10.1016/0301-9322\(76\)90001-x](https://doi.org/10.1016/0301-9322(76)90001-x).

LIMA, L. E. M. **Análise do modelo de mistura aplicado em escoamentos isotérmicos gás-líquido**. Jul. 2011. 147 f. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP. Disponível em: <http://repositorio.unicamp.br/jspui/handle/REPOSIP/264105>. Acesso em: 15 mar. 2020.

LOWE, D.; REZKALLAH, K. S. A capacitance sensor for the characterization of microgravity two-phase liquid-gas flows. **Meas. Sci. Technol.**, v. 10, n. 10, p. 965–975, 1999. DOI: [10.1088/0957-0233/10/10/317](https://doi.org/10.1088/0957-0233/10/10/317).

NICKLIN, D. J. Two-phase bubble flow. **Chem. Eng. Sci.**, v. 17, n. 9, p. 693–702, 1962. DOI: [10.1016/0009-2509\(62\)85027-1](https://doi.org/10.1016/0009-2509(62)85027-1).

OFUCHI, C. Y. **Técnicas avançadas para análise de escoamento bifásico gás-líquido em golfadas**. Ago. 2011. 78 f. Diss. (Mestrado) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, PR. Disponível em: <http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/1294>. Acesso em: 15 mar. 2020.

SHOHAM, O. **Mechanistic modeling of gas-liquid two-phase flow in pipes**. 1. ed. Richardson, TX, USA: Society of Petroleum Engineers (SPE), 2006. 396 p.

SHU, M. T.; WEINBERGER, C. B.; LEE, Y. H. A simple capacitance sensor for void fraction measurement in two-phase flow. **Ind. Eng. Chem. Fund.**, v. 21, n. 2, p. 175–181, 1982. DOI: [10.1021/i100006a013](https://doi.org/10.1021/i100006a013).

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: 15 mar. 2020.