

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

ANYELE SEIFERT

JOHNNY JOELSON RODRIGUES DE ANDRADE

**ANÁLISE TEÓRICA DE UM SENSOR CAPACITIVO NÃO INTRUSIVO PARA
DETERMINAÇÃO DE FRAÇÃO DE VAZIO E VELOCIDADE DE BOLHA
ALONGADA EM ESCOAMENTOS GÁS-LÍQUIDO**

PONTA GROSSA

2022

**ANYELE SEIFERT
JOHNNY JOELSON RODRIGUES DE ANDRADE**

**ANÁLISE TEÓRICA DE UM SENSOR CAPACITIVO NÃO INTRUSIVO PARA
DETERMINAÇÃO DE FRAÇÃO DE VAZIO E VELOCIDADE DE BOLHA
ALONGADA EM ESCOAMENTOS GÁS-LÍQUIDO**

**Theoretical analysis of a non-intrusive capacitive sensor for determination of
void fraction and elongated bubble velocity in gas-liquid flows**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Elétrica da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientadora: Prof^a. Dra. Fernanda Cristina Corrêa
Coorientador: Prof. Dr. Luiz Eduardo Melo Lima

**PONTA GROSSA
2022**



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

Esta licença permite download e compartilhamento do trabalho desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es), sem a possibilidade de alterá-lo ou utilizá-lo para fins comerciais. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

**ANYELE SEIFERT
JOHNNY JOELSON RODRIGUES DE ANDRADE**

**ANÁLISE TEÓRICA DE UM SENSOR CAPACITIVO NÃO INTRUSIVO PARA
DETERMINAÇÃO DE FRAÇÃO DE VAZIO E VELOCIDADE DE BOLHA
ALONGADA EM ESCOAMENTOS GÁS-LÍQUIDO**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Elétrica da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 03/junho/2022

Fernanda Cristina Correa
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Luiz Eduardo Melo Lima
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Vírginia Helena Varoto Baroncini
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Cristhiane Gonçalves
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

**PONTA GROSSA
2022**

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho não poderia ser finalizado sem a ajuda de diversas pessoas e/ou instituições às quais presto meus agradecimentos.

Ao meu pai Marcelo, que mesmo hoje não estando mais presente entre nós, sempre me incentivou e me deu apoio nos estudos.

A minha mãe Adriana e ao meu noivo Mateus, pelo carinho, incentivo e total apoio em todos os momentos.

A minha mãe Laudiceia, por todo amor e incentivo a cada dia longe de casa, para poder alcançar meus objetivos.

Ao meu pai Joelson, que sempre esteve disposto a tudo para me auxiliar e apoiar nos estudos.

A nossa orientadora e ao nosso coorientador, que nos orientou e mostrou os caminhos a serem seguidos, além da confiança depositada em nós.

A todos nossos amigos e amigas, que estiverem juntos durante toda a nossa trajetória da graduação.

Aos demais que de alguma forma contribuíram para nosso crescimento pessoal e profissional.

RESUMO

Este trabalho apresenta análises de um sensor capacitivo não intrusivo, aplicável para determinação das frações de fases escoando em um líquido estagnado e a velocidade da bolha alongada. As frações de vazio e a velocidade em escoamentos intermitentes possuem grande importância, pois auxiliam a estabelecer parâmetros operacionais, que podem ser aplicados no ramo industrial. O sensor foi projetado considerando-se a utilização de fitas condutoras, fixadas ao redor de um tubo, capturando dados convertidos por um circuito eletrônico. Por meio deste circuito, os valores de capacitância são transformados em frequência, e, conseqüentemente, em período. A velocidade da bolha alongada foi encontrada por simulação numérica baseada em teorema da literatura, variando para diferentes ângulos. A partir das análises de velocidade e período, é possível obter numericamente a distância mínima que os pares de eletrodos devem estar alocados no tubo, com objetivo de otimizar o desenvolvimento do sensor.

Palavras-chave: escoamento multifásico; sensor capacitivo; circuito elétrico.

ABSTRACT

This work presents analyzes of a non-intrusive capacitive sensor, which is applicable for determining the phase fractions flowing in a stagnant liquid and the elongated bubble velocity. The void fractions and the velocity in intermittent flows are of great importance, as they help establish operational parameters that can be applied in the industrial sector. The sensor was designed using conductive tapes fixed around a pipe, capturing data converted by an electronic circuit. Through this circuit, the capacitance values are transformed into frequency and, consequently, the period. The elongated bubble velocity was found by numerical simulation based on the literature theorem, varying for different angles. From the analysis of velocity and period, it is possible to numerically obtain the minimum distance that the pairs of electrodes must be allocated in the pipe, to optimize the development of the sensor.

Keywords: multiphase flow; capacitive sensor; eletric circuit.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Padrões de escoamento na direção horizontal	12
Figura 2 – Padrões de escoamento na direção vertical	12
Figura 3 – Escoamento vertical e seus subpadrões	17
Figura 4 – Escoamento horizontal e seus subpadrões	17
Figura 5 – Modelo aproximado de eletrodos em anel	21
Figura 6 – Modelo simplificado de um sensor capacitivo	21
Figura 7 – Configuração do circuito integrado TLC555	27
Figura 8 – Circuito integrado TLC555 no modo astável	28
Figura 9 – Circuito oscilador do TLC555	29
Figura 10 – Circuito integrado TLC555 dimensionado neste trabalho	35
Figura 11 – Capacitância em função do período: ar-água	35
Figura 12 – Capacitância em função do período: ar-glicerina	36
Figura 13 – Capacitância em função do período: gás-óleo	36
Figura 14 – Capacitância em função do período: Tubo A	36
Figura 15 – Capacitância em função do período: Tubo B	37
Figura 16 – Capacitância em função do período: Tubo C	37
Figura 17 – Capacitância em função do período: Todas as variáveis	38
Figura 18 – L_s em função da inclinação do tubo: ar-água	43
Figura 19 – L_s em função da inclinação do tubo: ar-glicerina	43
Figura 20 – L_s em função da inclinação do tubo: gás-óleo	44
Figura 21 – L_s em função da inclinação do tubo: tubo A	44
Figura 22 – L_s em função da inclinação do tubo: tubo B	45
Figura 23 – L_s em função da inclinação do tubo: tubo C	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparativo resumido de sensores capacitivos da literatura	23
Tabela 2 – Definições para C_{0T} e $C_{\infty T}$ da bolha alongada	25
Tabela 3 – Constantes dielétricas dos fluidos analisados neste trabalho	33
Tabela 4 – Faixas de capacitância (em pF) de acordo com a mistura gás-líquido e dos tubos analisados neste trabalho	33
Tabela 5 – Comparação dos períodos para cada capacitância usando o Tubo A e considerando a mistura ar-água: simulado × calculado .	39
Tabela 6 – Comparação dos períodos para cada capacitância usando o Tubo A e considerando a mistura ar-glicerina: simulado × calculado	39
Tabela 7 – Comparação dos períodos para cada capacitância usando o Tubo A e considerando a mistura gás-óleo: simulado × calculado .	39
Tabela 8 – Velocidade teórica obtida para os tubos A, B, C com a mistura ar-água	40
Tabela 9 – Velocidade teórica obtida para os tubos A, B, C com a mistura ar- glicerina	40
Tabela 10 – Velocidade teórica obtida para os tubos A, B, C com a mistura gás-óleo	40
Tabela 11 – Massas específicas para os fluidos analisados	41
Tabela 12 – T_{total} (μ s) para mistura ar-água	42
Tabela 13 – T_{total} (μ s) para mistura ar-glicerina	42
Tabela 14 – T_{total} (μ s) para mistura gás-óleo	42
Tabela 15 – Comparação de L_s com trabalhos encontrados na literatura	46

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

SIGLAS

CI	Circuito Integrado
DE	Diâmetro Externo
DI	Diâmetro Interno
DISCH	Discharge Terminal
THRES	Threshold Input
TRIG	Trigger Input
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná

LISTA DE SÍMBOLOS

LETRAS LATINAS

C	Capacitância	[F]
E_o	Número de Eötvös	
Fr	Número de Froude	
R	Resistência	[Ω]
Re	Número de Reynolds	

LETRAS GREGAS

α	Fração de vazio	
χ	Suscetibilidade elétrica	
ρ	Massa específica	[kg/m ³]
θ	Inclinação	[°]
ε	Permissividade	[F/m]

SUBSCRITOS

G	Fase gasosa
L	Fase líquida

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	MOTIVAÇÃO E JUSTIFICATIVA	13
1.2	OBJETIVOS	13
1.3	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	14
2	REVISÃO DA LITERATURA	15
2.1	ESCOAMENTOS MULTIFÁSICOS	15
2.2	INSTRUMENTAÇÃO APLICADA	18
2.3	SENSORES CAPACITIVOS	20
2.4	MEDIÇÃO DE FRAÇÃO DE VAZIO	23
2.5	MEDIÇÃO DE VELOCIDADE DA BOLHA ALONGADA	24
3	MATERIAL E MÉTODOS	27
3.1	SENSOR CAPACITIVO	30
3.2	FRAÇÃO DE VAZIO, VELOCIDADE DA BOLHA ALONGADA E DISTÂNCIA ENTRE SENSORES	30
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	33
4.1	ANÁLISES DE FRAÇÃO DE VAZIO	33
4.2	ANÁLISES DE VELOCIDADE DA BOLHA ALONGADA E DISTÂNCIA ENTRE SENSORES	40
5	CONCLUSÕES	47
	REFERÊNCIAS	49

1 INTRODUÇÃO

O conceito de escoamento multifásico está relacionado ao fluxo simultâneo de duas ou mais fases (ou componentes heterogêneos e distintos fisicamente), sendo o bifásico o mais simples destes. Fase é definido pelo estado da matéria que pode ser classificado em sólido, líquido ou gasoso. Podendo ser uma mistura gás-sólido, líquido-sólido, gás-líquido ou líquido-líquido, neste último caso a mistura de dois líquidos imiscíveis, estes são exemplos que constituem o escoamento bifásico. Podem-se encontrar diversas aplicações desta categoria de escoamento na engenharia e nas indústrias, como na geração de energia e nas indústrias química e petrolífera (SHOHAM, 2006). O escoamento gás-líquido é bastante comum e largamente encontrado em usos industriais. Deste modo, torna-se importante mensurar as frações para determinação de padrões de segurança e eficácia.

A fração de vazio é um parâmetro importante que deve ser considerado quando se trata de escoamentos bifásicos e corresponde à fração volumétrica que a fase gasosa ocupa na mistura por certo tempo. Segundo Bertola (2003), a parte interior de um duto onde um fluido escoar pode ser vista como um conjunto distribuído de pontos em um dado instante de tempo, que fazem parte da geometria do sistema. Esses pontos podem ser classificados de duas maneiras distintas no caso de um escoamento bifásico, relacionados às presenças das fases gasosas ou líquida.

Como exemplo de aplicações industriais, pode-se citar a indústria petrolífera, onde ocorre escoamento bifásico na horizontal, inclinado ou na vertical no momento da produção e transporte do petróleo e gás natural. Outro exemplo é em indústrias químicas, onde se encontra esses escoamentos em caldeiras, reatores, condensadores, evaporadores, instalações de destilação, entre outros (SHOHAM, 2006).

Os escoamentos gás-líquido são frequentemente observados em tubulações, se apresentando na forma de padrões que são resultantes de efeitos relacionados principalmente à inclinação e à geometria dos dutos, além das velocidades e propriedades físicas dos fluidos. Isto provoca mudanças de comportamento e o estabelecimento de configurações distintas, tal que a classificação pode variar conforme a posição do tubo (vertical ou horizontal).

Os padrões de escoamento, segundo Bratland (2010), pode assumir distintas formas e configurações, tornando seus estudos e análises um desafio. A Figura 1 ilustra

seis padrões de escoamento na direção horizontal, classificados em bolhas dispersas, bolha alongada, estratificado liso, anular com gotas, golfadas e estratificado ondulado.



Fonte: adaptada de Bratland (2010).

Já a Figura 2, também um modelo adaptado de Bratland (2010), mostra os padrões quando o escoamento é vertical: bolhas dispersas, golfadas, golfadas instáveis, anular e anular com gotas.



Fonte: adaptada de Bratland (2010).

Determinar as características físicas dos escoamentos possui grande importância em aplicações da engenharia. Shoham (2006) aborda alguns conceitos em relação às propriedades cinemáticas dos escoamentos, onde a velocidade tem bastante impacto na dinâmica dos escoamentos. De acordo com Wallis (1969), compreender as configurações das bolhas permite analisar outros parâmetros sobre o assunto, auxiliando em análises e modelagens de escoamentos que apresentam suas respectivas características.

1.1 MOTIVAÇÃO E JUSTIFICATIVA

O presente trabalho possui como contribuição análises para a ciência de dados e medidas, onde a preocupação está no uso de técnicas de medição de capacitância e processamento de sinais, para quantificar, qualificar e visualizar o escoamento de substâncias multifásicas.

O escoamento multifásico caracteriza-se pela mistura de duas ou mais substâncias imiscíveis, que pode ocorrer por diferentes estados agregados (gás, líquido ou sólido), como misturas gás-líquido, ou também por substâncias de mesmo estado, como, por exemplo, óleo-água.

Com isso em mente, percebe-se a importância da captação de medidas, que está no campo de estudo da metrologia. Através de dados experimentais, pode-se realizar e analisar teorias, bem como a aplicação física do projeto, onde será possível então uma comparação entre cálculos e simulações.

Estes dados são de extremo valor em diversas áreas, como, por exemplo, indústrias, pois, os testes e medições tem grande importância neste ramo, podendo ser utilizados para monitoramento de máquinas e equipamentos, bem como controlar objetos e comportamentos em processos.

A aplicação de estudos sobre escoamentos multifásicos tem uma grande importância para as engenharias, pois possui uma grande variedade de áreas a serem exploradas, como já citado o ramo industrial, mas muitos outros como biologia, química e física.

Em todos os âmbitos, o escoamento multifásico ajuda-nos a determinar a eficácia e segurança de processos, onde a utilização de maneira correta para previsão dos mesmos é de grande importância para operações mais seguras e eficientes.

1.2 OBJETIVOS

O presente trabalho tem por objetivo principal realizar estudos de um sensor capacitivo não-intrusivo, com geometria em anel, aplicado para escoamentos intermitentes. O estudo desse sensor é realizada com diferentes tubos e misturas, além de diferentes inclinações.

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Analisar o valor de capacitância através da variação da fração de vazio, utilizando o aplicativo MATLAB®.
- Dimensionar o circuito com o TLC555 para conversão da capacitância em dados legíveis.
- Analisar a faixa de período de passagem da bolha para diferentes tubos e misturas.
- Analisar a velocidade, através da correlação de Nicklin (1962) para diferentes ângulos de inclinação.
- Analisar os possíveis valores de distância entre os sensores.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho está dividido da seguinte forma:

- Este capítulo inicial apresenta a introdução, motivação e justificativa, objetivos e organização do trabalho.
- O Capítulo 2 apresenta a revisão da literatura de escoamentos multifásicos, instrumentação aplicada ao tema, estrutura de sensores capacitivos, medição de fração de vazio e medição de velocidade da bolha alongada.
- O Capítulo 3 apresenta os métodos aplicados para os cálculos teóricos e de simulação do sensor capacitivo, procedimentos para encontrar a faixa de capacitância a partir da fração de vazio, procedimentos para determinar a velocidade a partir de modelagem numérica e parâmetros para dimensionamento dos sensores.
- O Capítulo 4 apresenta os resultados obtidos, como a faixa de capacitância para cada tubo e mistura, a faixa de períodos, a velocidade conforme a inclinação do tubo e análises sobre as distâncias encontradas para os pares de eletrodos.
- O Capítulo 5 apresentar as conclusões do trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO DA LITERATURA

A revisão de literatura desse trabalho apresenta informações importantes a respeito de escoamentos multifásicos e métodos de medição de fração de vazio e velocidade da bolha alongada. Está estruturada da seguinte forma: A Seção 2.1 apresenta fundamentos importantes de escoamentos multifásicos, sua classificação e suas respectivas características; a Seção 2.2 aborda sobre os diversos tipos de sensores que conseguem levantar informações relevantes para análises dos padrões; a Seção 2.3 apresenta fundamentos sobre sensores do tipo capacitivo, o foco desse trabalho; a Seção 2.4 mostra técnicas e conceitos envolvendo a medição de fração de vazio de bolhas; e a Seção 2.5 aborda sobre técnicas e conceitos de medição da velocidade da bolha alongada.

2.1 ESCOAMENTOS MULTIFÁSICOS

Padrões de escoamento referem-se às diferentes configurações que as fases do escoamento multifásico podem apresentar, considerando o comportamento e seu formato. São considerados três principais padrões: disperso, separado e intermitente. No escoamento disperso, uma das fases encontra-se dispersa em forma de partículas, gotas ou bolhas em outra fase que é contínua. O escoamento separado apresenta duas fases contínuas que escoam separadas por uma interface definida. No escoamento intermitente, trata-se da junção dos outros dois padrões (disperso e separado). A ocorrência desses padrões varia de acordo com geometria da tubulação, propriedade dos fluidos e velocidade das fases (LIMA, 2011; SHOHAM, 2006). Com a aplicação de sensores, é possível determinar a velocidade da bolha alongada experimentalmente.

Existem três padrões principais normalmente utilizados: intermitente, anular e bolhas. No escoamento intermitente, têm-se dois subpadrões de classificação: golfadas e golfadas instáveis. As golfadas alternam entre pistões de líquido aerados e bolhas de gás alongadas em paralelo com um filme de líquido fino, os quais se repetem em uma determinada frequência. As golfadas instáveis surgem em tubulações verticais quando o escoamento está com altas velocidades, onde os pistões podem-se romper e causar um escoamento instável. A fração de uma fase pode ser definida pela razão entre as áreas de seção transversal ocupada pela fase e a do tubo. Por outro lado, a

velocidade de uma fase corresponde à vazão volumétrica da fase dividida pela área da seção transversal ocupada pela fase. Por consequência da condição de saturação, a fração de líquido corresponde a diferença entre a unidade e a fração de gás. Há diversas maneiras de realizar medições das frações das fases (CORRÊA, 2009; LIMA, 2011).

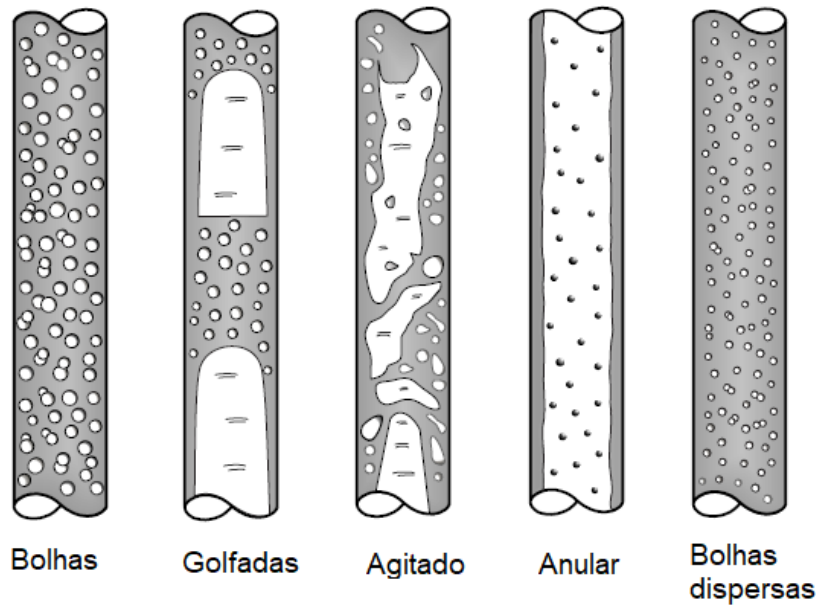
O padrão do tipo anular apresenta dois subpadrões: semi-anular e o anular e bolhas possui os subpadrões bolha e capa esférica. O subpadrão semi-anular é conhecido por ser uma forma alterada do subpadrão anular, apresentando elevadas ondas interfaciais e o filme de líquido próximo à parede pode mudar de direção. Já o subpadrão anular tem como características apresentar um núcleo com gás e gotas de líquido em uma velocidade elevada, envolvidos por um filme de líquido escoando junto à parede. Quando ocorre uma onda de perturbação, o filme de líquido é obstruído (CORRÊA, 2009).

O subpadrão bolhas apresenta um arranjo de bolhas com tamanho semelhante, além de bolhas discretas (também chamado *cluster* de bolhas). As bolhas possuem uma trajetória retilínea, com movimentação que não interage com outras bolhas. Já o *cluster* possui bolhas de diferentes proporções, com formas distorcidas e em uma trajetória não uniforme (LIMA, 2011; SHOHAM, 2006).

Já o tipo capa esférica tem como características bolhas que podem ocupar total ou parcialmente a seção transversal do tubo, em formato de “capa”. Ao se formarem bolhas desse tipo, elas são alcançadas pela próxima bolha que vem atrás, e assim forma-se uma nova bolha, porém de maior comprimento. Esse processo faz com que seja formada a bolha de Taylor (LIMA, 2011; DAVIES; TAYLOR, 1950). A Figura 3 mostra os subpadrões em escoamento vertical.

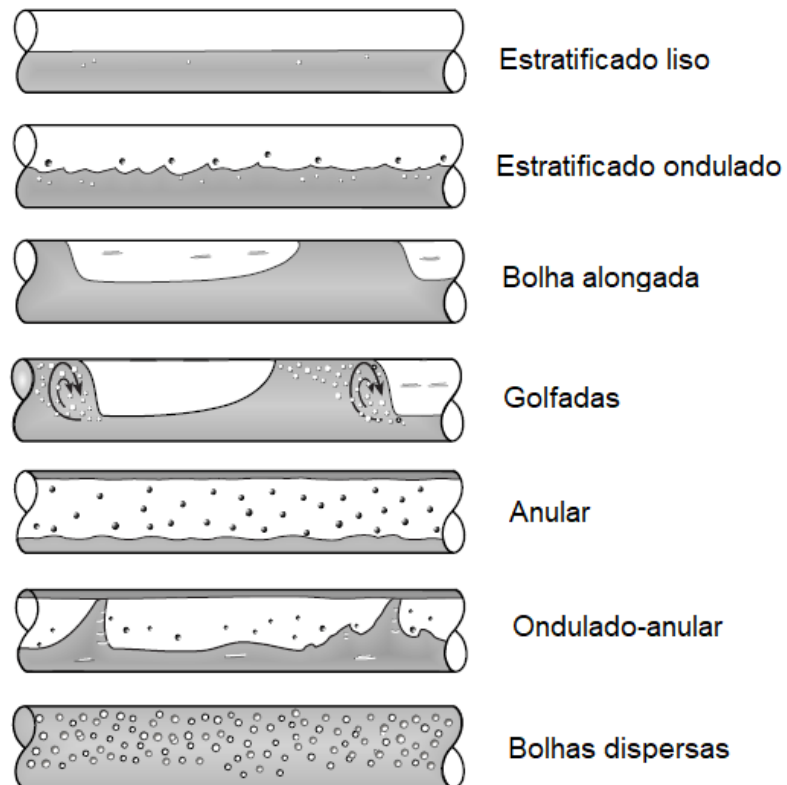
Em escoamentos horizontais, as bolhas vão para o topo do tubo por conta da força gravitacional. Quando há baixas vazões de líquido e gás, o escoamento estratificado (suave) ou ondular podem ser vistos. Ao se aumentar a vazão de gás, um escoamento mais ondulado surge de maneira gradual. Ao chegarem no topo da tubulação, acabam segurando uma bolha de gás. Bolhas maiores podem ser formadas do tipo aerado, caso a velocidade do escoamento seja menor a esses vazios. Para os casos de maior velocidade, surgem o escoamento anular ou de pequenas bolhas dispersas (CORRÊA, 2009). A Figura 4 mostra o escoamento horizontal e seus respectivos subpadrões.

Figura 3 – Escoamento vertical e seus subpadrões



Fonte: adaptada de Shoham (2006).

Figura 4 – Escoamento horizontal e seus subpadrões



Fonte: adaptada de Shoham (2006).

2.2 INSTRUMENTAÇÃO APLICADA

Há diversas maneiras de se obter as velocidades das bolhas e realizar medições das frações das fases em escoamentos multifásicos, onde os sensores baseados em princípios elétricos vem sendo amplamente utilizados. A medição com sensores de impedância elétrica baseia-se no princípio que escoamentos multifásicos gás-líquido apresentam condutividade e/ou permissividade elétrica distintas em suas fases. A partir desse princípio, a fase pode ser relacionada com a capacitância elétrica, modelando-se um circuito para coleta dessas informações. (SILVA, 2008)

Ofuchi (2011) aborda um método para correlacionar os dados obtidos através de dois sensores, *wire-mesh* e um transdutor infravermelho. O sensor *wire-mesh*, introduzido por Prasser, Böttger e Zschau (1998), é constituído por dois planos de eletrodos que permitem visualizar e captar imagens do que está sendo mensurado, com imagens de alta resolução. Esses planos de eletrodos se cruzam e formam um ângulo de 90°, sendo possível obter maiores detalhes sobre características do escoamento e imagens dos padrões. A metodologia baseia-se na descrita por Bendiksen (1984), que se refere a um transdutor infravermelho, que em conjunto com um estroboscópio, capta características do escoamento e analisa a velocidade das bolhas. Ao captar esses dados, estes são tratados através da correlação cruzada, que consiste em trabalhar com dois sinais adquiridos no mesmo tempo, porém em posições diferentes, visando determinar a velocidade instantânea de cada bolha escoando.

Para realizar medições das frações das fases, são diversas metodologias que podem ser aplicadas. A mais comum é o separador de fases, porém trata-se de um processo inviável por conta da lentidão em segregar as fases. Entretanto, existem métodos alternativos como sensores de ultrassom, de micro-ondas, de raios-X, de raios gama, óticos e de impedância elétrica (ROSS; STOBIE, 2010).

Os sensores de ultrassom são conhecidos por serem sensores não intrusivos, isto é, não possuem nenhum contato com o fluido examinado e mesmo assim conseguem realizar medições. Nesse sensor, podem ocorrer quatro fenômenos, sendo: transmissão, reflexão, difração e espelhamento da onda. Esses fatos ocorrem quando a onda ultrassônica atinge uma interface entre dois materiais diferentes, podendo ser interferida pelas características físicas da interface e que, conseqüentemente, afetam na velocidade de propagação da onda. Aplicando-se diversos transdutores ultrassônicos

em torno do duto, podem ser coletadas figuras tomográficas da seção transversal, assim como a fração de vazio. Todavia, esse sensor tem a desvantagem que seu uso é bastante restrito e só tem efetividade quando a fração de vazio é superior à 20% (HOYLE, 1996).

O sensoriamento por raios-X permite coletar diversas imagens do escoamento por segundo, por emissores e receptores estacionários. Por meio dessa configuração, são obtidas até 2000 imagens por segundo. Mesmo apresentando uma vasta leitura, sua desvantagem é o elevado custo e os demasiados cuidados com a radiação ionizante (HAMPEL *et al.*, 2005; HORI *et al.*, 2000). Já com raios gama, este possui energia de radiação superior se comparado com o raio-X, atuando com dois níveis de energia distintos e dependendo do material que atravessa. Os raios gama penetram com maior facilidade, sendo assim, podem ser inseridos em dutos onde a parede apresenta espessura mais grossa. A coleta de dados é alta, com índices de 30 quadros por segundo. A desvantagem é a necessidade de utilizar radioisótopos, o que é proibido em alguns países (JOHANSEN *et al.*, 1996).

Os sensores óticos são classificados em dois grupos: absorção e refração. Pode-se utilizar diferentes metodologias, como luz visível, infravermelha ou ultravioleta (SCHLEICHER *et al.*, 2008). O sensor ótico intrusivo trabalha com hastes de vidro ou fibra ótica, onde um feixe de radiação é produzido pelas fibras óticas até atingir a haste de vidro, inserida diretamente no escoamento. Com base no meio que está inserido, pode acontecer a reflexão nula, total ou parcial dos raios. Essa luz é refletida, direcionada a um fotodetector que tem o trabalho de condicionar o sinal. Nos sensores não intrusivos, estima-se a fração de vazio conforme a radiação transmitida pelo escoamento. Outra alternativa é por câmeras de alta velocidade, que permitem visualizar, de modo rápido, as oscilações do escoamento (JONES JR.; DELHAYE, 1976).

Sensores baseados em princípios elétricos vem sendo largamente utilizados. A técnica de medição por impedância elétrica é baseada no princípio que o escoamento multifásico gás-líquido apresenta condutividade e/ou permissividade elétrica distintas nas fases. Sendo assim, a fase do escoamento na seção transversal do duto pode ser descrita pela capacitância elétrica, além de que, devido às faixas de frequência apresentadas no escoamento, pode-se modelar um circuito paralelo entre resistores e capacitores (SILVA, 2008).

2.3 SENSORES CAPACITIVOS

Podem ser encontrados diversos trabalhos sobre sensores capacitivos na literatura, baseados nas medições de escoamento gás-líquido em tubulações. O capacitor é um componente amplamente utilizado na eletrônica, e tem como principal objetivo armazenar energia. Para o capacitor se carregar, torna-se necessário que uma condição externa realize um trabalho, e geralmente esse processo acontece por uma bateria. Quando elétrons de uma das placas descarregadas do capacitor são transferidas para outra placa, o capacitor se carrega. É preciso realizar um trabalho crescente a medida que a carga nas placas do capacitor aumenta (BONFATI, 2017; HALLIDAY; RESNICK; KRANE, 1984). Segundo Halliday, Resnick e Krane (1984): “O trabalho necessário para carregar um capacitor é convertido na energia potencial elétrica U do campo elétrico que existe entre as placas.” .

A estrutura de um capacitor é composta por dois condutores isolados entre si, denominados placas. As placas podem ter diferentes formas: paralelas, cilíndricas e esféricas. Ao serem carregadas, as cargas das placas possuem o mesmo valor, porém com sinais contrários. Os eletrodos podem ser arrançados de diversos modos, sendo as placas côncavas, helicoidais e em anel as mais conhecidas (HALLIDAY; RESNICK; KRANE, 1984).

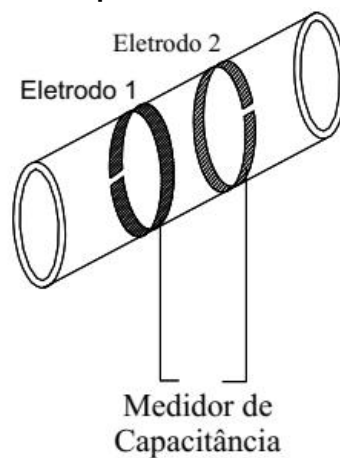
Os eletrodos em placas côncavas são formados por duas placas semicilíndricas, que ficam dispostas uma de frente a outra em torno da tubulação. É considerado o comprimento das placas e o ângulo que elas formam entre si, pois quanto maior o ângulo e o comprimento, maior será o nível de detecção do sinal. Contudo, esses dois fatores possuem uma limitação, pois se o valor do ângulo for muito próximo de 180° e os eletrodos ficarem muito próximos entre si, o sinal perde sua conformidade (AHMED; ISMAIL, 2008).

O eletrodo helicoidal é caracterizado por possuir dois condutores arrançados em forma de hélices, dispostos em torno do duto. Dependendo da forma em que se aplica está técnica é possível a obtenção de respostas mais lineares, ou seja, mais uniformes. Contudo, para isso ser possível é necessária uma grande extensão das placas, fazendo assim com que haja mais interferência (GERAETS; BORST, 1988; STRAZZA *et al.*, 2011; THORN; JOHANSEN; HJERTAKER, 2012).

Os eletrodos em anéis possuem como característica serem formados por anéis

que são colocados próximos um do outro em torno da tubulação. Nesse arranjo, a quantidade mínima de eletrodos são dois, e para obtenção do sinal, leva-se em consideração fatores como comprimento de cada anel e a distância que estão um do outro. Nesse caso, por serem arranjados dessa maneira, o campo elétrico possui distribuição axial no interior do escoamento, com maior intensidade nas bordas. Quanto menor a distância entre os eletrodos, maior será a sensibilidade de resposta, apresentando maior linearidade (AHMED; ISMAIL, 2008). A Figura 5 mostra um modelo adaptado proposto por Ahmed e Ismail (2008).

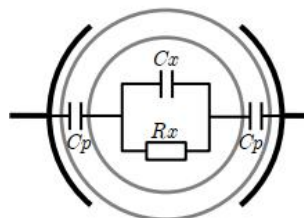
Figura 5 – Modelo aproximado de eletrodos em anel



Fonte: adaptada de Ahmed e Ismail (2008).

Os sensores capacitivos do tipo não intrusivos possuem dois eletrodos no mínimo em sua estrutura, que se localizam em torno do que se deseja mensurar. Shu, Weinberger e Lee (1982) apresentam uma simplificação no modelo com este arranjo, observável no modelo aproximado representado pela Figura 6. '

Figura 6 – Modelo simplificado de um sensor capacitivo



Fonte: Libert (2013).

Observando a Figura 6, nota-se as capacitâncias C_w e C_x que correspondem, respectivamente, a capacitância da parede do duto e capacitância do fluido, além da variável R_x que é a resistência equivalente do fluido. Ahmed e Ismail (2008) citam que para associar os valores de capacitância e de fração de vazio, há uma dependência das

características dielétricas das fases e de suas distribuições no escoamento para se obter os valores de capacitância. Além dos parâmetros como a área de seção transversal e o distanciamento entre as placas de eletrodos, faz-se ainda necessário o isolamento dos anéis para que a interferência de leitura seja mínima.

Com o intuito de reduzir o número de interferências no sensoriamento, é preciso montar uma estrutura que isole os anéis, fazendo com que aumente os recursos de armazenamento de carga. Seguindo os conceitos de eletromagnetismo, 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 Equação (1):

$$E = \frac{\rho_f + \rho_P}{\varepsilon_0} \quad (1)$$

Onde ρ_f é a densidade de carga, ρ_P sendo a densidade de carga polarizada e a constante de permissividade do vácuo representada por $\varepsilon_0 = 8,854 \times 10^{-12} \text{ C}^2\text{N}^{-1}\text{m}^{-2}$.

A densidade de carga polarizada ρ_P quando não há um meio dielétrico é considerada nula. Como este não é o caso, determina-se seu valor por meio da Equação (2):

$$\rho_P = \varepsilon_0 \chi E \quad (2)$$

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

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

Onde A_e é a área das placas de eletrodos e L_e é a distância entre as placas. Sabendo que $(1 - \chi)$ é equivalente à constante dielétrica k e que o produto $\varepsilon_0 k$ equivale a ε , sendo a permissividade. Desta forma, tem-se que C é dada pela simplificação da Equação (3), onde se tem a capacitância dada pela Equação (4):

$$C = \frac{\varepsilon A_e}{L_e} \quad (4)$$

Há diversos outros estudos de aplicação com sensores capacitivos para análises de escoamentos e seus padrões. A Tabela 1 apresenta uma comparação resumida de sensores capacitivos da literatura e suas características.

Tabela 1 – Comparativo resumido de sensores capacitivos da literatura

Referência	Fluidos de trabalho	Frequência	Tipo de sensor
Abouelwafa e Kendall (1980)	Água, óleo e vapor	1 MHz	4 placas côncavas
Ma <i>et al.</i> (1991)	Água e ar	2 MHz	Côncavo
Elkow e Rezkallah (1997)	Água e ar	1 MHz	Helicoidal
Elkow e Rezkallah (1997)	Água e ar	2 MHz	Côncavo e helicoidal
Lowe e Rezkallah (1999)	Água e ar	200 Hz	Côncavo com anéis
Teyssedou e Tye (1999)	Água e ar	1 MHz	Côncavo
Duarte e Prata (2002)	Óleo e gás	–	Côncavo
Holler <i>et al.</i> (2002)	Glicerol, água e gás	15 MHz	15 eletrodos
Dong <i>et al.</i> (2003)	Água e ar	20 kHz	Tomógrafo
Jaworek, Krupa e Trela (2004)	Água e vapor	80 MHz	Côncavo
Reis e Goldstein Jr. (2005)	Água e ar	1 MHz	Côncavo modificado
Reis e Goldstein Jr. (2005)	Água e ar	1 MHz	Duplo helicoidal
Ahmed e Ismail (2008)	Água e óleo	1 MHz	Anel e côncavo
Canière <i>et al.</i> (2008)	Água e ar	100 kHz	Côncavo

Fonte: autoria própria (2022).

2.4 MEDIÇÃO DE FRAÇÃO DE VAZIO

De modo a se realizar as análises e de se obter os dados de fração a vazio em escoamentos gás-líquido, é preciso considerar a capacitância como uma associação em série ou paralelo, que devem apresentar diferentes constantes dielétricas (AHMED; ISMAIL, 2008).

Supondo que o campo seja radial como observado no trabalho desenvolvido por Ahmed e Ismail (2008), pode-se considerar também que o mesmo é constante quando na direção axial e que os anéis que compõem este sistema equivalem a discos planos formando um modelo paralelo entre si. Sendo assim, as fases do escoamento em uma tubulação podem ser consideradas uma espécie de associação de capacitores em série ou paralelo com os eletrodos, dependendo da direção onde as fases se encontram.

Com base nessas informações, as fases de um duto podem ser configuradas como capacitores em série ou paralelo entre os eletrodos. Em escoamentos horizontais, a capacitância equivalente será em série. Já no caso de escoamentos verticais, o escoamento será em paralelo. Para escoamento anular, estratificado ou em golfadas, necessita-se de uma capacitância total C_T . Ahmed e Ismail (2008) mostram que por meio da soma das capacitâncias do gás, do líquido e da parede do tubo (C_g , C_l e C_w , respectivamente), obtém-se C_T pela Equação (5):

$$C_T = C_g + C_l + C_w \quad (5)$$

As capacitâncias do gás, líquido e da parede do duto (C_g , C_l e C_w , respectivamente), são calculadas pelas Equações (6) a (8):

$$C_g = \frac{\varepsilon_0 \kappa_g A_g}{L_e} \quad (6)$$

$$C_l = \frac{\varepsilon_0 \kappa_l A_l}{L_e} \equiv \frac{\varepsilon_0 \kappa_l (A - A_g)}{L_e} \quad (7)$$

$$C_w = \frac{\varepsilon_0 \kappa_w A_w}{L_e} \equiv \frac{\varepsilon_0 \kappa_w \pi [(D + d_w)^2 - D^2]}{4 L_e} \quad (8)$$

As variáveis A_g , A_l , A e A_w são as áreas de seção transversal ocupadas pelo gás, pelo líquido, pela mistura (parte interna do tubo) e pela parede do tubo, respectivamente. A variável D é o diâmetro interno do tubo e d_w a espessura de parede do tubo.

Dividindo todos os termos da Equação (5) pela área de seção transversal do tubo A , encontra-se a Equação (9):

$$C_{tot} = \frac{\varepsilon_0}{L_e} \left\{ \kappa_g \alpha + \kappa_l (1 - \alpha) + \kappa_w \left[\left(1 + \frac{d_w}{D} \right)^2 - 1 \right] \right\} \frac{\pi D^2}{4} \quad (9)$$

E por último, a fração de vazio α é definida pela Equação (10):

$$\alpha = \frac{\mathcal{V}_g}{\mathcal{V}} \equiv \frac{A_g L_e}{A L_e} = \frac{A_g}{A} \quad (10)$$

Onde as variáveis \mathcal{V}_g e \mathcal{V} correspondem aos volumes ocupados pelo gás e pela mistura, respectivamente.

2.5 MEDIÇÃO DE VELOCIDADE DA BOLHA LONGADA

Alguns conceitos relacionados as propriedades cinemáticas de escoamento gás-líquido são apresentados por Shoham (2006). A velocidade superficial de uma fase caracteriza a vazão volumétrica da fase dividida pela área de seção transversal do duto, em outras palavras, considera-se uma fase escoando sozinha no duto. A velocidade local da fase está relacionada com a velocidade superficial da fase dividida pela parte ocupada pela fase na seção transversal do duto. Já a velocidade de translação de uma bolha alongada no escoamento intermitente corresponde a velocidade da fase gasosa, tendo com referência o nariz da bolha. A análise da velocidade de translação é de

extrema importância na dinâmica deste padrão.

A velocidade no escoamento em golfadas é modelada pela lei cinemática proposta por Nicklin (1962), como mostra a Equação (11):

$$U_T = C_{0T}J + V_{\infty T} \quad (11)$$

Sendo $J (\equiv J_g + J_l)$ a velocidade superficial da mistura. As velocidades superficiais das fases (J_g e J_l) correspondem as 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 $k = g, l$.

Como afirma Polonsky, Shemer e Barnea (1999), o primeiro termo da parte direita da Equação (11) corresponde a velocidade devido ao transporte da mistura. O parâmetro C_{0T} é o parâmetro de distribuição, sendo aproximadamente igual à razão entre a velocidade máxima e velocidade média da mistura à frente da bolha alongada. Ao se afastar do nariz da bolha, tem-se $C_{0T} \cong U_{max}/\bar{U}$. O segundo termo está relacionado a velocidade de deslizamento local da bolha alongada por conta do empuxo, em outras palavras, a velocidade da bolha alongada escoando em líquido estagnado, como mostra a Equação (12):

$$V_{\infty T} = C_{\infty T} \sqrt{gD (1 - \rho_l/\rho_g)} \quad (12)$$

Onde ρ_g e ρ_l as massas específicas do gás e do líquido e g sendo a aceleração gravitacional.

Em uma bolha alongada, segundo Fabre e Liné (1992), o parâmetro de distribuição C_{0T} com a velocidade de deslizamento adimensional $C_{\infty T}$ dependem da inclinação do duto (θ) e também dos números adimensionais Eötvös (Eo), de Froude (Fr) e de Reynolds (Re). Bendiksen (1984) apresenta várias correlações experimentais que definem uma estimativa de C_{0T} e $C_{\infty T}$, como mostra a Tabela 2.

Tabela 2 – Definições para C_{0T} e $C_{\infty T}$ da bolha alongada

Parâmetro	Laminar	Turbulento
C_{0T}	2	$\begin{cases} 1,2 & \text{se } Fr \geq 3,5 \\ 1 + 0,2 \text{ sen}^2 \theta & \text{se } Fr < 3,5 \end{cases}$
$C_{\infty T}$	$0,542 \cos \theta + 0,345 \text{ sen } \theta$	$\begin{cases} 0,345 \text{ sen } \theta & \text{se } Fr \geq 3,5 \\ 0,542 \cos \theta + 0,345 \text{ sen } \theta & \text{se } Fr < 3,5 \end{cases}$

Fonte: Bendiksen (1984).

Com a aplicação de sensores, é possível obter dados de velocidade experi-

mentalmente. Para o método proposto deste trabalho, as capacitâncias coletadas pelos sensores dispostos no tubo são convertidas para valores de frequência inversamente proporcionais, e, conseqüentemente, para valores de período diretamente proporcionais. Essa correlação pode ser observada a partir das Equações (13) e (14):

$$t_{s1} = 0,693 (R_A + 2R_B) C_{s1} \quad (13)$$

$$t_{s2} = 0,693 (R_A + 2R_B) C_{s2} \quad (14)$$

Onde t_{s1} e C_{s1} são os dados coletados pelo primeiro sensor, e t_{s2} e C_{s2} são os dados coletados pelo segundo sensor. Relacionando-se os valores de período que o circuito retorna, é possível determinar a velocidade de translação da bolha alongada em função da distância entre os dois sensores (L_s), como mostra a Equação (15):

$$U_T = \frac{L_s}{\Delta t_s} \quad (15)$$

Sendo $\Delta t_s (\equiv t_{s2} - t_{s1})$ a diferença entre os períodos obtidos pelos dois sensores.

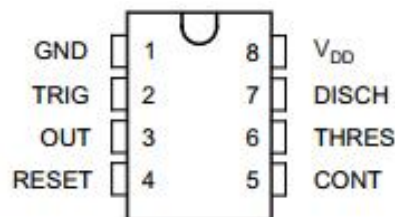
3 MATERIAL E MÉTODOS

Os sensores desenvolvidos neste trabalho visa mensurar, por simulações, dados de velocidade da bolha alongada e fração de vazio para diferentes misturas de fluidos. Os sensores são do tipo capacitivo não intrusivo, com geometria em anel, pois esse tipo de configuração apresenta um comportamento mais linear na resposta, além de apresentar maior sensibilidade comparado a outros sensores.

Para obtenção dos dados e análise das variações dos eletrodos presentes no circuito, é preciso que haja um componente que receba, identifique e trate estas variações de forma que os dados obtidos sejam usados como variáveis legíveis. Para isso, utiliza-se um Circuito Integrado (CI) TLC555, cuja função é transformar valores de capacitância em valores de frequência.

Pelo *Datasheet*, podem-se observar algumas características deste CI como o baixo consumo de energia, maior precisão de leitura de dados, a capacidade de trabalhar com um valor de capacitância baixo, além de possuir um custo relativamente baixo. Para montagem do circuito na aplicação, necessitam-se de dois destes componentes, onde cada um estará instalado em um dos pares de eletrodo em anel. Deste modo, é possível coletar os dados necessários para determinação das frações das fases, assim como da velocidade da bolha. Ainda utilizando o *Datasheet* deste CI, consegue-se verificar as configurações de seus pinos como mostra a Figura 7 (TEXAS INSTRUMENTS, 2019).

Figura 7 – Configuração do circuito integrado TLC555



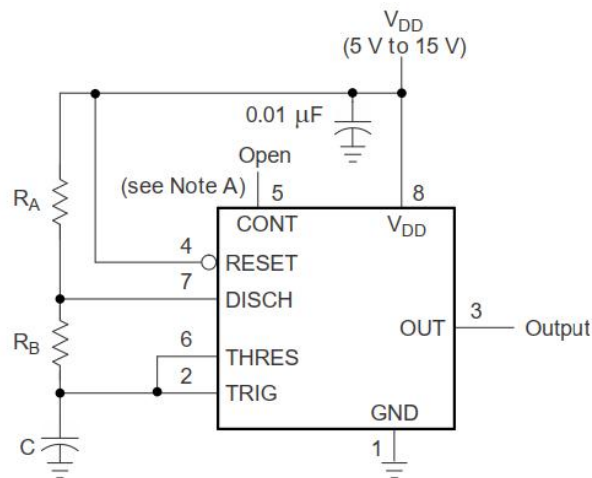
Fonte: Texas Instruments (2019).

A utilização deste CI é bastante comum quando se trata de projetos eletrônicos, devido ao seu amplo campo de aplicação. O TLC555 pode atuar em dois modos servindo como temporizador ou oscilador, além de que seu funcionamento pode ser astável ou monoastável, dependendo da função do circuito. Quando se trabalha com o modo monoastável, o CI recebe a configuração de temporizador, onde o circuito gera pulsos

elétricos de comprimento de onda fixos com intervalos de tempo que independem da tensão aplicada.

Já operando em modo astável, o mesmo passa trabalhar como um oscilador. Neste modo, gera-se uma sequência constante de pulsos alternados na saída, a partir de uma frequência já determinada. Com base nesse comportamento, esta é a configuração empregada para desenvolver a montagem do circuito neste trabalho, conforme a Figura 8.

Figura 8 – Circuito integrado TLC555 no modo astável

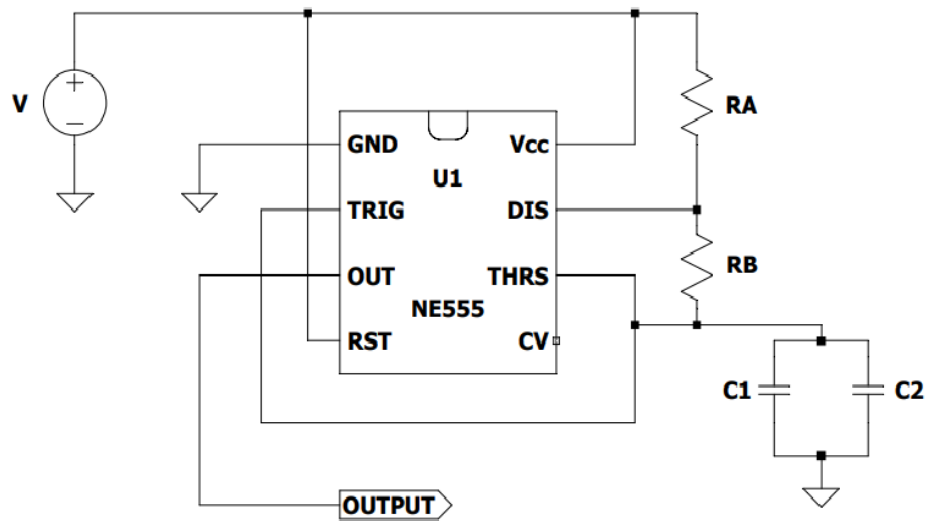


Fonte: Texas Instruments (2019).

Na Figura 8, é possível observar os componentes que formam o modo astável, observando as resistências R_A e R_B que juntamente ao capacitor C . Percebe-se que este, ao receber a tensão vinda das resistências, se carrega até atingir o valor de $2/3$ de V_{DD} . Quando este valor é atingido, Threshold Input (THRES) (pino 6) dispara e encerra o ciclo, dando início a descarga que ocorre em R_B e Discharge Terminal (DISCH) (pino 7), conduzindo que a saída (pino 3) gere um nível lógico baixo (N_B). Quando o capacitor atinge um valor abaixo de $1/3$ de V_{DD} , Trigger Input (TRIG) (pino 2) é acionado e tem-se uma saída com nível lógico alto (N_A), dando fim ao ciclo e permitindo o início de uma nova carga sobre o capacitor.

A Figura 9 representa esquematicamente o circuito que deve ser montado para medir o escoamento, em que pode-se ver o C_1 que representa o par de eletrodos do sensor que realiza a coleta dos dados necessários para determinação da fração de vazio. Entretanto, para determinação da velocidade, torna-se necessários dois sensores, cada um constituído por um par de eletrodos.

Figura 9 – Circuito oscilador do TLC555



Fonte: autoria própria (2022).

De modo a evitar variações que causem problemas nas medições, é necessário a adição de outro capacitor (C_2) para que este ajude no ajuste das capacitâncias e na limitação dos valores de saída, onde se tem a resultante de uma onda quadrada com frequência constante.

Os valores de componentes como resistências e capacitores, que formam o circuito conversor, foram obtidos matematicamente através do aplicativo MATLAB[®], contando com auxílio do *Datasheet* do TLC555. Conhecendo os valores das componentes, o circuito foi simulado no aplicativo LTSpice[®], escolhido devido à facilidade de simulação e interpretação de dados dos circuitos.

As atividades deste trabalho, montagem dos circuitos e simulação foram realizados levando como base pesquisas na literatura, descritos no Capítulo 2. A Seção 3.1 descreve o projeto do sensor capacitivo e suas características, levando-se em consideração a estrutura do tubo. A Seção 3.2 descreve a metodologia para obter as faixas de capacitância em relação à variação da fração de vazio, considerando as dimensões dos tubos e as misturas. Descreve também as faixas de período conforme as capacitâncias encontradas, que em conjunto com a velocidade modelada numericamente, permitem encontrar a distância ideal entre os eletrodos.

3.1 SENSOR CAPACITIVO

As características de sensores capacitivos são o encaixe de, no mínimo, duas placas de eletrodos em torno do componente que se quer medir. Um modelo deste tipo de encaixe é apresentado na Figura 6, sendo uma aproximação do proposto por Shu, Weinberger e Lee (1982).

Ahmed e Ismail (2008) citam que para associar os valores de capacitância e de fração de vazio, há uma dependência das características dielétricas das fases e de suas distribuições no escoamento para se obter os valores de capacitância. Além dos parâmetros como a área de seção transversal e o distanciamento entre as placas de eletrodos, faz-se ainda necessário o isolamento dos anéis para que a interferência de leitura seja mínima. Para o presente trabalho, o arranjo dos eletrodos é em anel. Como já mencionado na Seção 2.3, a Figura 5 apresenta um modelo simplificado dos eletrodos nesse tipo de arranjo.

Na Figura 8, é possível observar os componentes que formam o modo estável, observando as resistências R_A e R_B que juntamente ao capacitor C . Percebe-se que este ao receber a tensão vinda das resistências, se carrega até atingir o valor de $2/3$ de V_{DD} . Quando este valor é atingido THRES (pino 6) dispara e encerra o ciclo, dando início a descarga que ocorre em R_B e DISCH (pino 7), fazendo que saída (pino 3) gere um nível lógico baixo (N_B). Quando o capacitor atinge um valor abaixo de $1/3$ de V_{DD} , TRIG (pino 2) é acionado e tem-se uma saída com nível lógico alto (N_A), dando fim ao ciclo e permitindo o início de uma nova carga sobre o capacitor.

3.2 FRAÇÃO DE VAZIO, VELOCIDADE DA BOLHA A LONGADA E DISTÂNCIA ENTRE SENSORES

Para determinação da fração de vazio em escoamentos multifásicos, primeiramente utiliza-se a Equação (9), aonde a partir desta devem ser definidas as faixas de capacitâncias que determinaram os parâmetros dos sensores que devem compor o trabalho em questão.

Faz-se necessário ter alguns conhecimentos, como as características dos fluidos que escoam na tubulação, mais especificamente suas constantes dielétricas, bem como as dimensões dos tubos, tanto seu diâmetro interno Diâmetro Interno (DI)

quanto seu diâmetro externo Diâmetro Externo (DE), além da distância entre as placas de eletrodos do sensor em anel (L_s).

Conhecendo-se as faixas de capacitância para cada tubo e mistura, é necessário ter conhecimento dos períodos para a fase gasosa (T_G) e líquida (T_L). Para obter essa relação, utilizou-se as Equações (13) e (14). Como já mencionado, essa relação e a modelagem do circuito foram retiradas com base no *Datasheet* do Texas Instruments (2019). Adaptando as equações para encontrar o período desejado, tem-se as Equações (16) e (17).

$$T_G = 0,693 (R_A + R_B) C_G \quad (16)$$

$$T_L = 0,693 (R_A + R_B) C_L \quad (17)$$

Outro fator importante é o período de processamento do microcontrolador (T_p), que se trata do tempo necessário para o microcontrolador captar mudança de sinal do sensor e processar as informações. Considerou-se o período de processamento do Arduino Uno[®], por conta da simplicidade de uso do dispositivo. A placa do Arduino Uno[®] possui um cristal de 16 MHz e o *clock* do conversor A/D pode assumir distintos números para diferentes valores de *prescaler*. O *prescaler* pode variar em 2, 4, 8, 16, 32, 64 e 128, cada qual gerando um valor de *clock*. O *clock* a ser escolhido deve estar na faixa adequada, sem apresentar degradação na precisão. Outro fator é devido à quantidade de amostras por segundo, visto que os sensores são bastante sensíveis à leitura. Sendo assim, encontrou-se o período de processamento T_p pela Equação (18).

$$T_p = \frac{1}{f_{clock}} \quad (18)$$

As Equações (16) e (17) representam os períodos para as fases gasosa e líquida, respectivamente. Para encontrar o período total, encontrou-se uma relação que corresponde ao tempo necessário que cada sensor identifica uma mudança de fase. Junto a essa relação, o período de processamento T_p também é considerado, como pode ser observado na Equação (19).

$$T_{total} = 2(T_L - T_G) + T_p \quad (19)$$

Como o projeto possui dois sensores em anéis, cada qual com dois anéis, é preciso multiplicar o fator $T_L - T_G$ por dois, porque ambos apresentam o mesmo valor.

Para determinar a velocidade da bolha alongada em um escoamento multifásico, a partir do teorema proposto por Nicklin (1962), faz-se necessário conhecer alguns parâmetros. Esses parâmetros são as massas específicas ρ , como a massa específica do gás (ρ_g) e do líquido (ρ_l), além do diâmetro interno do tubo a ser analisado. Como mencionado na Seção 2.5, o parâmetro adimensional $C_{\infty T}$ trata-se da velocidade de deslocamento local, e para o estudo em questão, a correlação utilizada foi para o regime turbulento considerando o número de Froude (Fr) menor que 3,5. As Equações (20) e (21) mostram essas correlações.

$$V_{\infty T} = C_{\infty T} \sqrt{gD (1 - \rho_l / \rho_g)} \quad (20)$$

$$C_{\infty T} = 0,542 \cos \theta + 0,345 \sin \theta \quad (21)$$

Conhecendo-se as variáveis necessárias, pode-se encontrar numericamente os valores de velocidade para os tubos A, B, C com as misturas ar-água, ar-glicerina e gás-óleo.

Tendo conhecimento do período total (T_{total}) e as velocidades para cada tubo e mistura, podendo-se variar também os valores de ângulos de inclinação do tubo (θ), é possível encontrar dados de distanciamento entre os eletrodos (L_s) e fazer análises que poderão ajudar, futuramente, na construção física do sensor. A Equação (22) mostra como encontrar as informações referentes ao L_s .

$$L_s = T_{total} V_{\infty T} \quad (22)$$

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo, são apresentadas as análises de fração de vazios (Seção 4.1) e de velocidade da bolha alongada e distância entre sensores (Seção 4.2).

4.1 ANÁLISES DE FRAÇÃO DE VAZIO

Foram determinados alguns parâmetros a serem seguidos e, foram testados três 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), além da seleção de algumas misturas diferentes escoando nestes tubos: ar-água, ar-glicerina e gás-óleo. Baseado em algumas literaturas e seguindo os conceitos de Flora (2011) e Rosa, Flora e Souza (2012), considerou-se uma distância $L_e = 2$ mm entre as placas dos sensores. Uma das principais características necessárias para determinação das faixas de capacitância são as constantes dielétricas (k) dos fluidos de trabalho, conforme apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 – Constantes dielétricas dos fluidos analisados neste trabalho

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

Fonte: autoria própria (2022).

Com todos os parâmetros definidos para utilização da Equação (9), com o auxílio do aplicativo MATLAB® foram realizados os cálculos para se definir as faixas de capacitâncias. Além das características já citadas, 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 dentre os parâmetros estabelecidos, obtiveram-se os valores de capacitância apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – 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 (2022).

A partir dos dados obtidos, observam-se as diferenças entre os valores mínimos e máximos das capacitâncias, tanto em função das diferentes misturas usadas, em

virtude das diferentes constantes dielétricas de cada fluido dada na Tabela 3, quanto em função das dimensões dos tubos analisados. Verifica-se que o valor mínimo de capacitância para os Tubos A e C diferem do Tubo B. Isso ocorre pelo fato de que a espessura das paredes dos tubos diferem, ou seja, quanto maior for a diferença entre o diâmetro externo e interno, menor deve ser o valor de capacitância mínimo obtido.

A variação da fração de vazio foi realizada com um passo de 0,01, começando em $\alpha = 1$, chegando em $\alpha = 0$. Isto resultou nas faixas de capacitâncias apresentadas na Tabela 4, sendo então possível determinar os valores para dimensionamento dos componentes do circuito de conversão dos sinais obtidos pelo sensor.

Seguindo os conceitos descritos na literatura e baseado no trabalho desenvolvido por Ahmed e Ismail (2008), determinou-se um valor de frequência de 100 kHz, a ser aplicado ao sistema. A partir da frequência que o circuito retorna, determinaram-se os valores de resistência que devem compor os componentes do circuito. Considerou-se $R_B = 68 \text{ k}\Omega$ e, como demonstrado pelo *Datasheet* do circuito, R_A deve ser muito menor que R_B (TEXAS INSTRUMENTS, 2019).

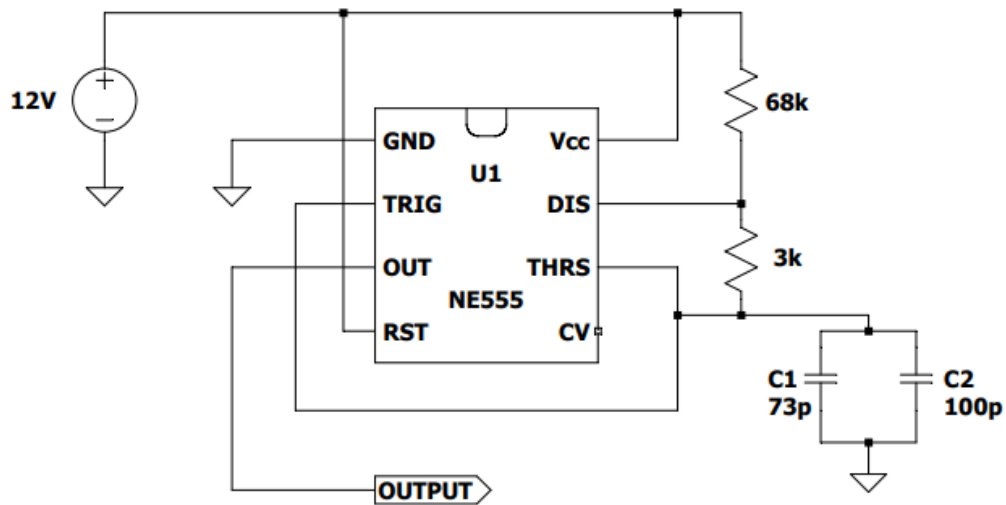
Utilizando a frequência determinada e considerando o capacitor que está paralelo ao sensor como sendo $C_2 = 100 \text{ pF}$, chegou-se a um valor de $R_A = 3 \text{ k}\Omega$. Optou-se por usar C_2 com este valor para que a frequência de saída possua um valor mais acessível à leitura, dado que os valores das faixas de capacitância são bastante baixos, de modo que este, associado em paralelo ao C_1 , devem gerar uma melhor resposta no sistema. Além disso, o TLC555 é alimentado com uma tensão de 12 volts para que o mesmo trabalhe em seu limite.

Na Figura 10, pode-se ver a montagem do circuito que deve ser utilizado para a realização das medições das frequências relacionadas aos parâmetros de interesse.

A partir dos dados apresentados na Tabela 4 têm-se diversas possibilidades de realização de alguns testes, conduzindo variações nos valores do capacitor C_1 , mostrado na Figura 10, permitindo a obtenção de diversos resultados para ajudar na compreensão dos comportamentos das misturas gás-líquido considerando diferentes diâmetros de tubos onde estas misturas escoam.

Deste modo, os gráficos apresentados nas Figuras 11 a 16 referem-se às variações de capacitância em função do período, gerados com auxílio do aplicativo MATLAB[®], em que foram implementadas a modelagem do circuito dimensionado no presente trabalho, conforme informações mostradas na Figura 10.

Figura 10 – Circuito integrado TLC555 dimensionado neste trabalho

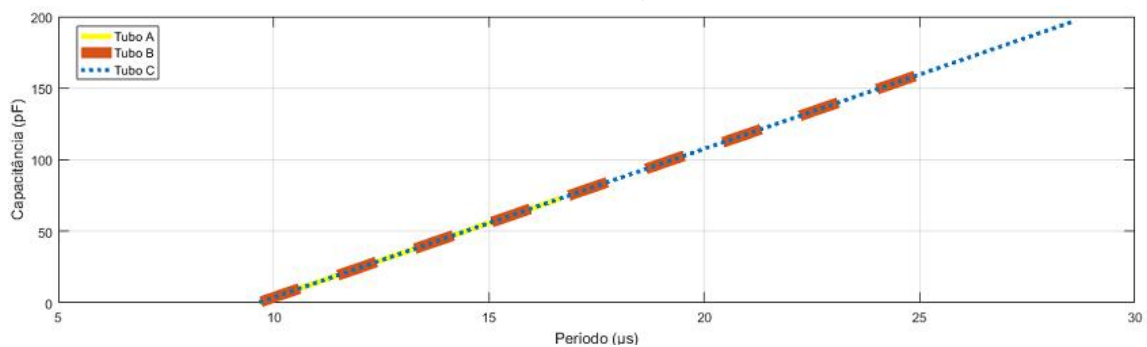


.tran 50u

Fonte: autoria própria (2022).

Os três gráficos apresentados nas Figuras 11 a 13 correspondem a cada uma das misturas (ar-água, ar-glicerina e gás-óleo, respectivamente), analisadas no presente trabalho e mostram a influência de cada tubo (A, B e C) na relação funcional entre capacitâncias e períodos.

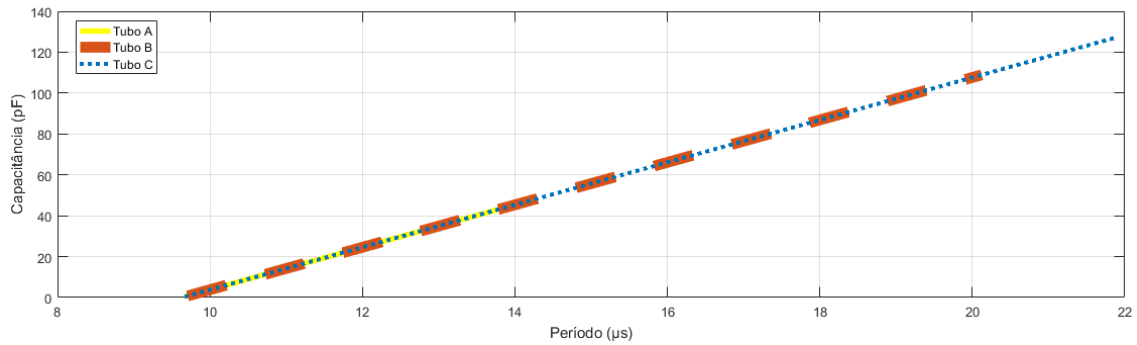
Figura 11 – Capacitância em função do período: ar-água



Fonte: autoria própria (2022).

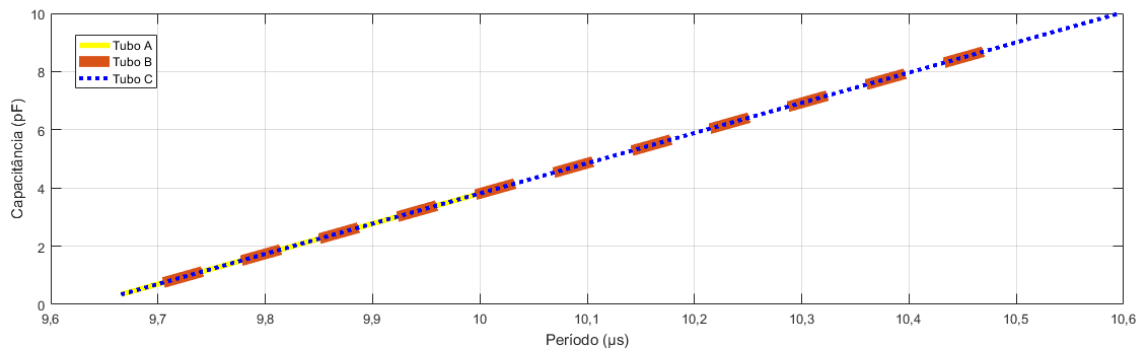
Observa-se nas relações funcionais apresentadas nas Figuras 11 a 13 é um padrão linear destas relações para as três diferentes misturas analisadas. Com o aumento dos valores de período ocorre um crescimento linear nos valores da capacitância, iniciando-se no valor mínimo, comum entre as três misturas, 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. Deste modo, independentemente da mistura, a mudança de características do tubo empregado altera somente os valores

Figura 12 – Capacitância em função do período: ar-glicerina



Fonte: autoria própria (2022).

Figura 13 – Capacitância em função do período: gás-óleo

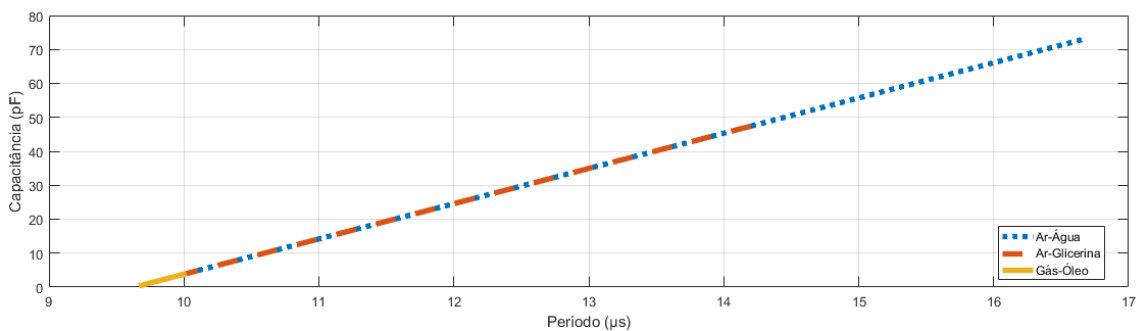


Fonte: autoria própria (2022).

limites máximos de capacitância que podem ser atingidos, mas mantendo a tendência.

Os três gráficos apresentados nas Figuras 14 a 16 correspondem a cada um dos tubos (A, B e C, respectivamente), analisadas no presente trabalho e mostram a influência de cada mistura (ar-água, ar-glicerina e gás-óleo) na relação funcional entre capacitâncias e períodos.

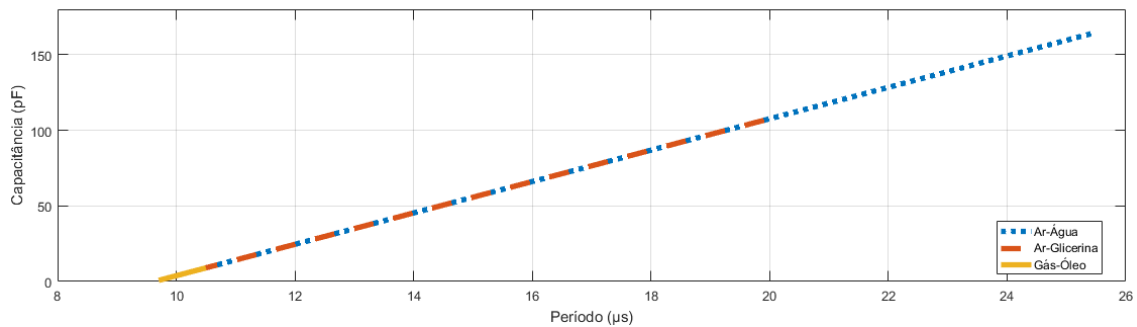
Figura 14 – Capacitância em função do período: Tubo A



Fonte: autoria própria (2022).

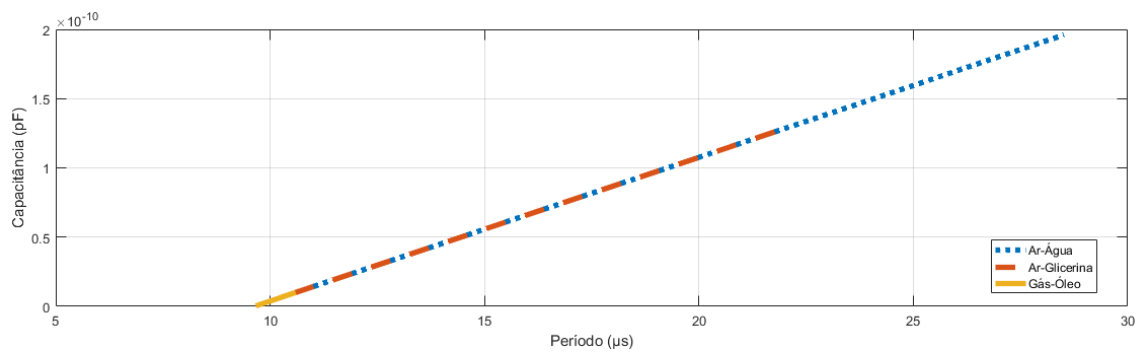
De forma análoga à análise de influência dos tubos, observa-se também um comportamento semelhante quando se analisa a influência das misturas. Verifica-se

Figura 15 – Capacitância em função do período: Tubo B



Fonte: autoria própria (2022).

Figura 16 – Capacitância em função do período: Tubo C



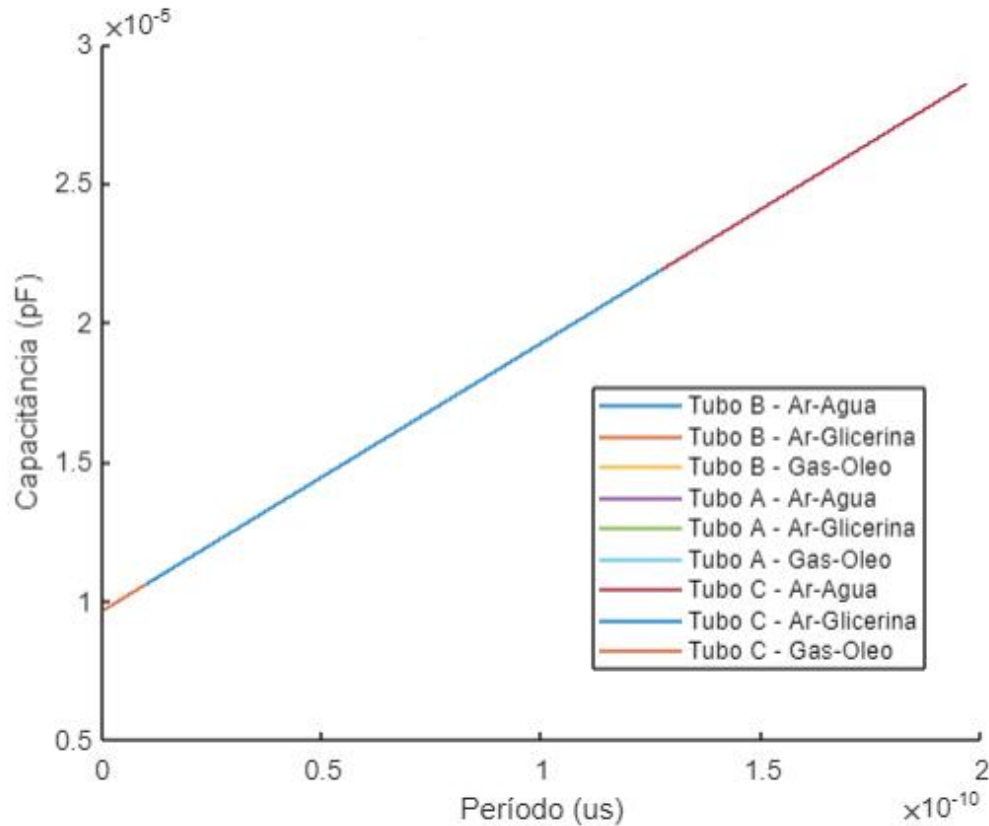
Fonte: autoria própria (2022).

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 . Nas Figuras 14 a 16, pode-se observar estas constatações, que ocorrem nos 3 diferentes tubos (Tubo A, Tubo B e Tubo C, respectivamente), para as três misturas (ar-água, ar-glicerina e gás-óleo).

Este comportamento ocorre independentemente das características do tubo ou das misturas gás-líquido 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 demonstrem uma tendência de crescimento da capacitância com o aumento dos valores de período.

Na Figura 17 podemos observar o comportamento descrito acima, onde é possível ver uma figura composta por todas as substâncias utilizadas no presente trabalho, percebe-se que independente do tubo ou substâncias o padrão se mantém, onde a um aumento dos valores de período em relação a capacitância, as resultantes

Figura 17 – Capacitância em função do período: Todas as variáveis



Fonte: autoria própria (2022).

acabam se sobrepondo umas as outras, pois tendem a seguir uma linearidade constante entre elas, o que prova a semelhança entre as análises realizadas.

Outro meio de verificar estes dados de saída obtidos nestas análises é por simulações realizadas utilizando o aplicativo LTspice[®]. O circuito apresentado na Figura 10 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 C_1 . A comparação entre os resultados, simulados (sim) no LTspice[®] e calculados (calc) no MATLAB[®], foi realizada por meio do cálculo dos desvios relativos, utilizando a Equação (23):

$$\text{Desvio} = \frac{\text{Período}_{\text{sim}} - \text{Período}_{\text{calc}}}{\text{Período}_{\text{calc}}} \quad (23)$$

Utilizando os parâmetros do Tubo A e as capacitâncias das misturas de ar-água, ar-glicerina e gás-óleo, obtiveram-se os resultados apresentados nas Tabelas 5 a 7, respectivamente.

É possível observar que os desvios mínimos e máximos entre valores simulados

Tabela 5 – Comparação dos períodos para cada capacitância usando o Tubo A e considerando a mistura ar-água: simulado x calculado

Capacitância (pF)	Período (μ s)		Desvio (%)
	Simulado	Calculado	
0,334	9,66	9,66	0
0,779	9,71	9,70	0,10
1,225	9,9	9,9	0
36,12	13	12,9	0,78
36,56	13,3	13,2	0,76
37,01	13,6	13,4	1,49
72,34	16,4	16,3	0,61
72,78	16,6	16,5	0,61

Fonte: autoria própria (2022).

Tabela 6 – Comparação dos períodos para cada capacitância usando o Tubo A e considerando a mistura ar-glicerina: simulado x calculado

Capacitância (pF)	Período (μ s)		Desvio (%)
	Simulado	Calculado	
0,334	9,66	9,66	0
0,779	9,71	9,70	0,10
1,225	9,7	9,6	1,04
23,92	11,8	11,7	0,85
24,37	11,98	11,9	0,67
24,81	12,02	12	0,17
47,94	14,15	14,1	0,36
48,39	14,3	14,3	0

Fonte: autoria própria (2022).

Tabela 7 – Comparação dos períodos para cada capacitância usando o Tubo A e considerando a mistura gás-óleo: simulado x calculado

Capacitância (pF)	Período (μ s)		Desvio (%)
	Simulado	Calculado	
0,334	9,66	9,63	0,31
0,781	9,7	9,7	0
1,22	9,75	9,7	0,52
2,16	9,85	9,78	0,72
2,61	9,88	9,87	0,10
3,09	9,93	9,9	0,30
3,54	9,97	9,95	0,20
3,98	10,01	10	0,10

Fonte: autoria própria (2022).

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 haver uma satisfatória concordância entre resultados simulados e calculados, demonstrando assim a viabilidade técnica do circuito dimensionado para permitir a realização de medições em escoamentos gás-líquido.

4.2 ANÁLISES DE VELOCIDADE DA BOLHA ALONGADA E DISTÂNCIA ENTRE SENSORES

Para encontrar a velocidade da bolha alongada em um escoamento multifásico, a partir do teorema de Nicklin (1962), é preciso conhecer alguns parâmetros. Conhecendo-se as variáveis necessárias, pode-se encontrar numericamente os valores de velocidade para os tubos A, B, C com as misturas ar-água, ar-glicerina e gás-óleo, como mostram a Tabela 8, a Tabela 9 e a Tabela 10, respectivamente.

Tabela 8 – Velocidade teórica obtida para os tubos A, B, C com a mistura ar-água

Ângulo (°)	Velocidade (m/s)		
	Tubo A	Tubo B	Tubo C
0	0,2146	0,2628	0,2736
15	0,2426	0,2972	0,3093
30	0,2542	0,3113	0,3240
45	0,2483	0,3042	0,3166
60	0,2256	0,2763	0,2876
75	0,1875	0,2296	0,2390
90	0,1366	0,1673	0,1741

Fonte: autoria própria (2022).

Tabela 9 – Velocidade teórica obtida para os tubos A, B, C com a mistura ar-glicerina

Ângulo (°)	Velocidade (m/s)		
	Tubo A	Tubo B	Tubo C
0	0,2146	0,2629	0,2736
15	0,2427	0,2972	0,3094
30	0,2542	0,3113	0,3240
45	0,2484	0,3042	0,3166
60	0,2256	0,2763	0,2876
75	0,1875	0,2297	0,2390
90	0,1366	0,1673	0,1742

Fonte: autoria própria (2022).

Tabela 10 – Velocidade teórica obtida para os tubos A, B, C com a mistura gás-óleo

Ângulo (°)	Velocidade (m/s)		
	Tubo A	Tubo B	Tubo C
0	0,2146	0,2629	0,2736
15	0,2427	0,2972	0,3094
30	0,2542	0,3113	0,3240
45	0,2484	0,3042	0,3166
60	0,2256	0,2763	0,2876
75	0,1875	0,2297	0,2390
90	0,1366	0,1673	0,1742

Fonte: autoria própria (2022).

Optou-se em trabalhar com a faixa de 0° a 90°, com um passo de 15° entre cada valor. Analisando os dados de velocidade da Tabela 8, Tabela 9 e Tabela 10, pode-se perceber pouquíssimas diferenças entre os valores, que ocorre por conta das massas específicas de cada fluido e as combinações, como mostra a Tabela 11.

Tabela 11 – Massas específicas para os fluidos analisados

Fluido	ρ (kg/m ³)
Ar	1,2
Água	1000
Glicerina	1261
Gás Natural	0,78
Óleo	880

Fonte: autoria própria (2022).

É possível perceber que a velocidade teórica para este caso, calculada pelo teorema de Nicklin (1962), depende principalmente dos fatores de ângulo de inclinação e diâmetro interno do tubo, além das massas específicas dos fluidos que compõem a mistura.

Com objetivo de estimar dados para o L_s (distância entre os sensores) e realizar um estudo sobre, foi preciso conhecer os períodos T_L e T_G . Os períodos podem ser calculados a partir da Equação (17) e Equação (16), respectivamente. Observando essas equações, pode-se ver que ambas dependem da capacitância medida na fase líquida e gasosa C_L e C_G .

Os dados de capacitância foram calculados com base na variação de fração de vazio, como mostra os resultados da Tabela 4, e, além disso, na Equação (17) e Equação (16), as variáveis R_a e R_b precisam ser dimensionadas para o circuito que converterá os dados de capacitância em frequência. Como mostra a Figura 10, os valores foram de $R_A = 3 \text{ k}\Omega$ e $R_B = 68 \text{ k}\Omega$.

Como mostra as Figuras 11 a 16, encontraram-se os valores dos períodos conforme os tipos das misturas e tubos. Esses dados são referência para estimar o parâmetro L_s , visto que é necessário conhecer T_L e T_G . Além disso, como as informações obtidas pelo TLC555 deverão ser inseridas a um microcontrolador para transformar em dados legíveis, precisa-se considerar também o período de processamento do mesmo.

Como já mencionado na Seção 3.2, considerou-se o período de processamento do Arduino Uno[®]. O valor de *prescaler* optado para os cálculos desse trabalho foi 16, que resulta em um *clock* de 1 MHz. O *clock* escolhido está na faixa adequada, sem

apresentar degradação na precisão. Outro fator é devido à quantidade de amostras por segundo, visto que os sensores são bastante sensíveis à leitura. Sendo assim, encontrou-se o período de processamento T_p pela Equação (18).

De acordo com a Equação (18), o valor de T_p foi de 1μ segundo. Considerando-se o valor dos períodos calculados pelas Equações (16) e (17), e adicionalmente o período de processamento, foi possível definir valores de T_{total} , através da Equação (19).

Os valores obtidos para T_{total} podem ser observados nas Tabelas 12 a 14.

Tabela 12 – T_{total} (μ s) para mistura ar-água

Tubo	T_G	T_L	T_{total}
A	29,67	6464,39	12870,45
B	66,70	14540,00	28947,59
C	29,67	17462,21	34866,08

Fonte: autoria própria (2022).

Tabela 13 – T_{total} (μ s) para mistura ar-glicerina

Tubo	T_G	T_L	T_{total}
A	29,67	4298,05	8537,76
B	66,70	9663,72	19195,04
C	29,67	11298,03	22537,73

Fonte: autoria própria (2022).

Tabela 14 – T_{total} (μ s) para mistura gás-óleo

Tubo	T_G	T_L	T_{total}
A	29,67	353,51	648,68
C	66,70	796,99	1461,57
C	29,67	886,43	1714,53

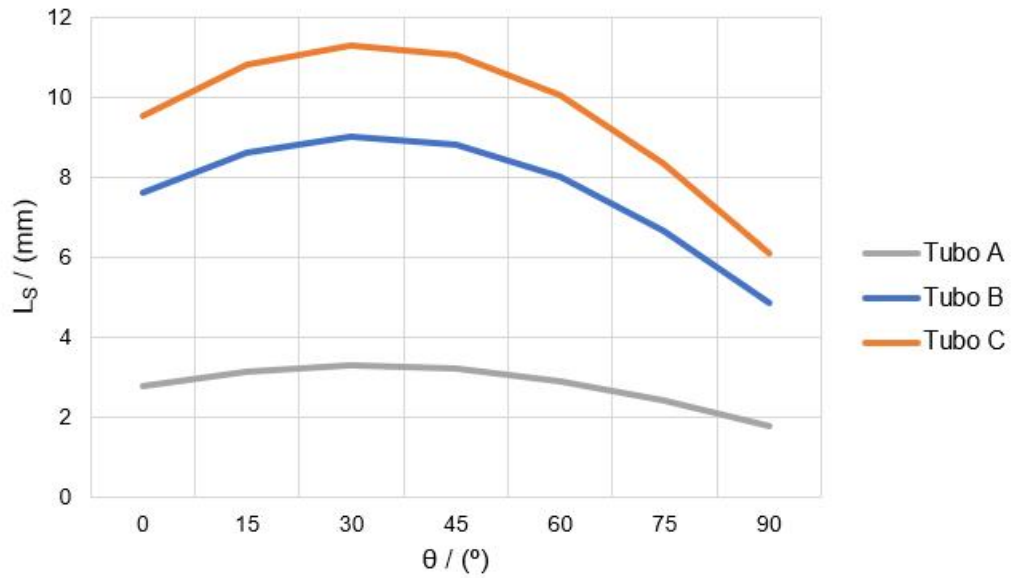
Fonte: autoria própria (2022).

Já tendo conhecimento da velocidade calculada $V_{\infty T}$, como mostra as Tabelas 8 a 10, e sabendo-se dos valores de T_{total} , foi possível calcular o L_s . Para o cálculo de L_s , utilizou-se a Equação (22).

Conhecendo-se esses parâmetros e os ângulos desejados, que para este trabalho são 0° , 15° , 30° , 45° , 60° , 75° e 90° , pode-se encontrar os valores para o L_s , conforme o tipo de tubo e mistura. Desse modo, os gráficos apresentados nas Figuras 18 a 20 estão relacionados às variações de L_s em função da inclinação do tubo e das misturas ar-água, ar-glicerina e gás-óleo, com auxílio do aplicativo Excel, conforme as capacitâncias apresentadas na Tabela 4 e do circuito modelado da Figura 10.

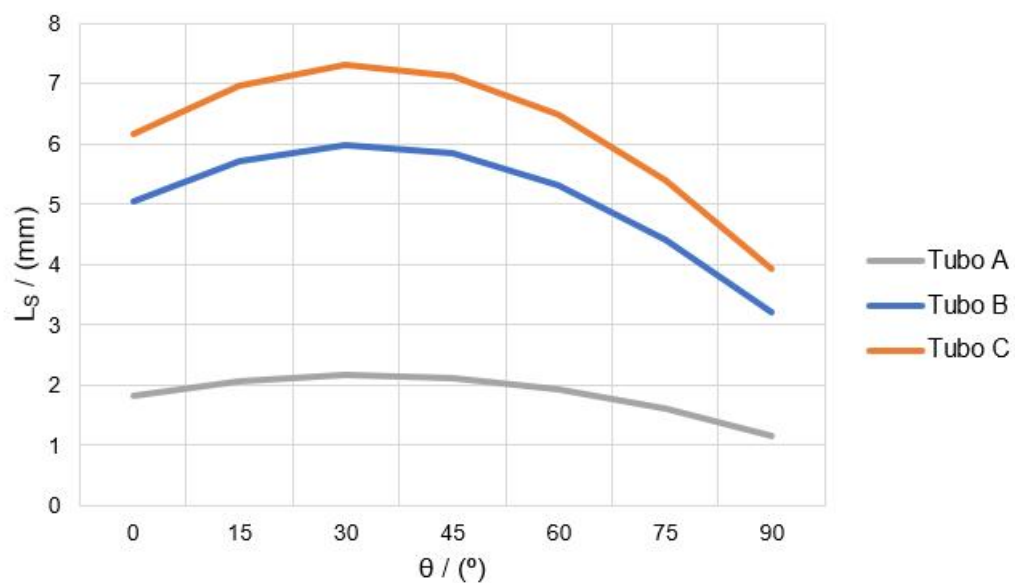
Pode-se observar que para as três misturas, o tubo C apresentou valor maior para o L_s , e o tubo A tendo o menor valor. Isso ocorre por conta da faixa de capacitância,

Figura 18 – L_s em função da inclinação do tubo: ar-água



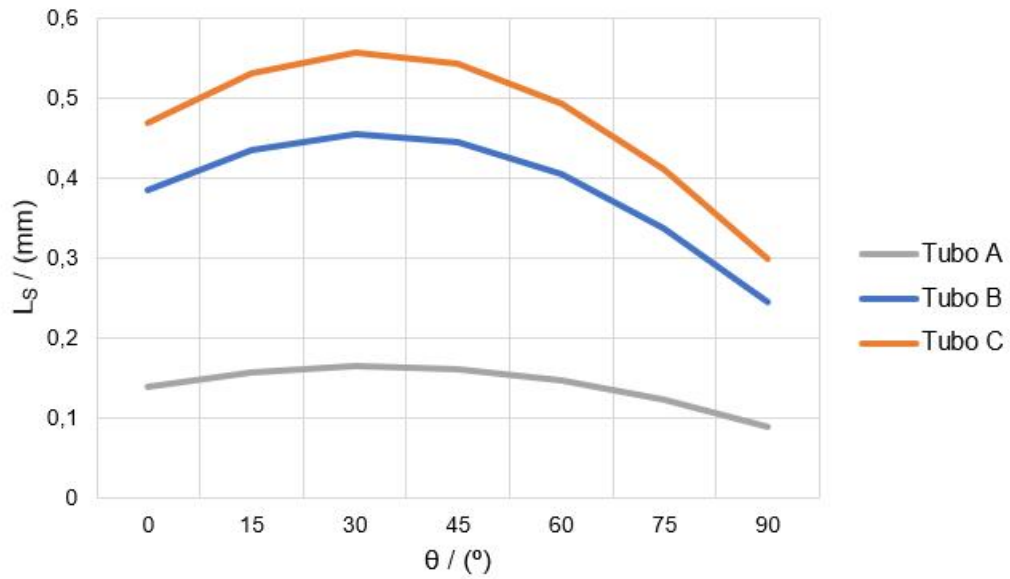
Fonte: autoria própria (2022).

Figura 19 – L_s em função da inclinação do tubo: ar-glicerina



Fonte: autoria própria (2022).

Figura 20 – L_s em função da inclinação do tubo: gás-óleo

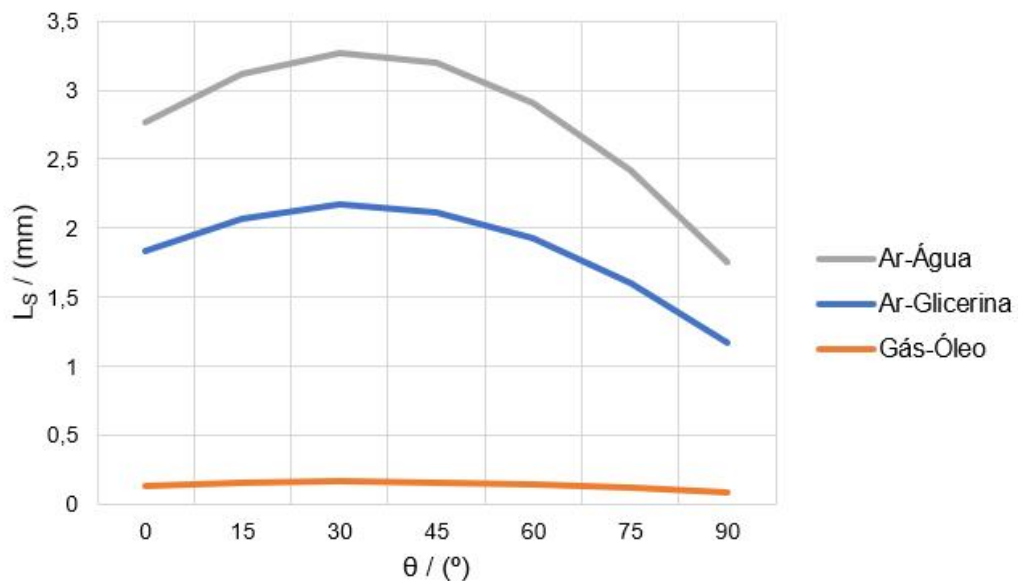


Fonte: autoria própria (2022).

que tem valor mais elevado se comparado aos tubos A e B, mas também por conta da velocidade. A velocidade possui valor mais elevado devido ao diâmetro interno do tubo C, sendo de 26 milímetros. Mesmo tendo pouca diferença nos valores dos diâmetros dos tubos, percebe-se uma alteração significativa na velocidade.

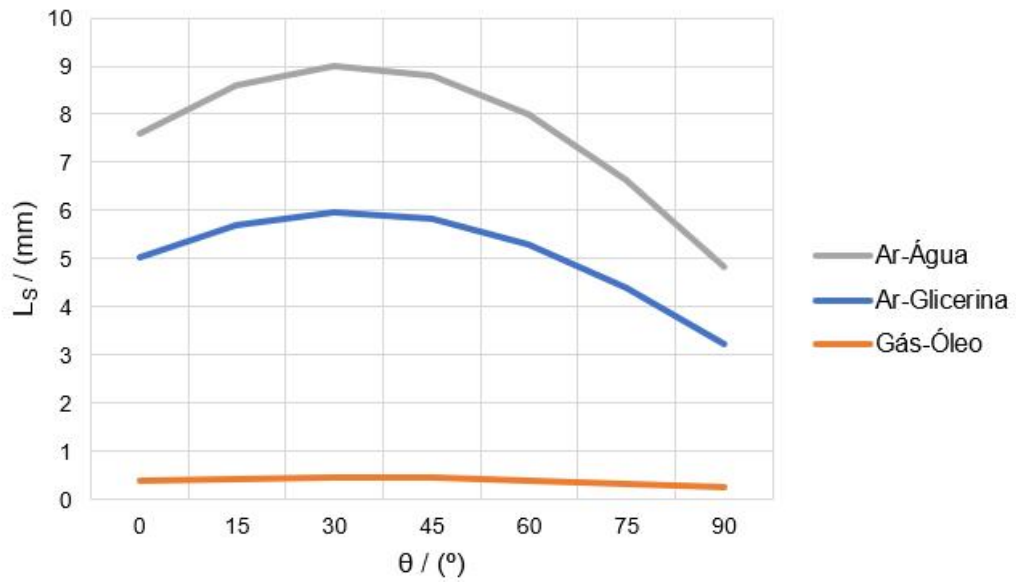
Já os gráficos apresentados nas Figuras 21 a 23 estão relacionados às variações de L_s em função da inclinação do tubo e dos diâmetros dos tubos, ou seja, um comparativo entre tubo A, tubo B e tubo C.

Figura 21 – L_s em função da inclinação do tubo: tubo A



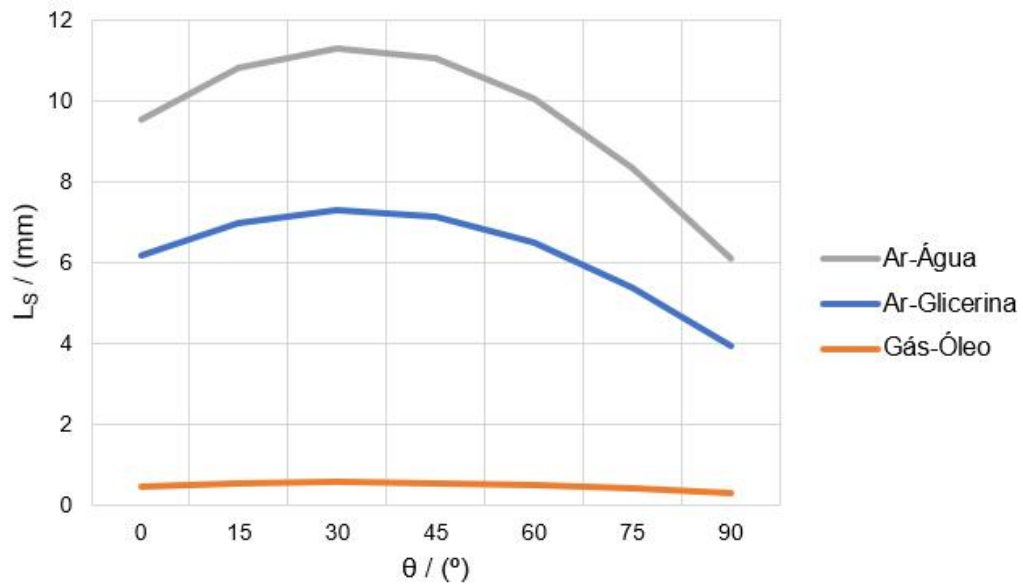
Fonte: autoria própria (2022).

Figura 22 – L_s em função da inclinação do tubo: tubo B



Fonte: autoria própria (2022).

Figura 23 – L_s em função da inclinação do tubo: tubo C



Fonte: autoria própria (2022).

Pode-se observar que para os três tubos, a mistura ar-água apresentou valor maior para o L_s , e a mistura gás-óleo tendo o menor valor. Isso acontece, pois a capacitância varia conforme a mistura, apresentando valores iguais (comparando-se diferentes misturas para um mesmo tubo) quando $\alpha = 0$, porém com números distintos quando $\alpha = 1$. O que também interfere são as constantes dielétricas de cada fluido, pois fazem parte do cálculo da capacitância. Na questão da velocidade, as massas específicas possuem diferenças, mas os tipos de misturas fazem com que a relação ρ_l/ρ_g tenha pouca diferença quando se comparam diferentes misturas em um mesmo tubo.

Uma breve comparação com a literatura é realizada para analisar a viabilidade técnica dos dados encontrados neste trabalho. A Tabela 15 mostra um comparativo com dois trabalhos que utilizam sensores capacitivos em forma de anel para medição da velocidade da bolha alongada.

Tabela 15 – Comparação de L_s com trabalhos encontrados na literatura

Autor(es)	Sensor	Fluidos	Ls (mm)
Bernardes (2003)	Capacitivo em anel	Ar-água	82
Santos (2015)	Capacitivo em anel	Ar-água	32
Presente trabalho	Capacitivo em anel	Ar-água	12
		Gás-óleo	

Fonte: autoria própria (2022).

Esse comparativo é necessário, pois precisa-se entender se o valor mínimo encontrado corresponde e concorda com os sensores dimensionados em trabalhos executados e testados experimentalmente. Existe uma certa limitação das características físicas do sensor, porém o valor mínimo para distância entre os eletrodos servirá como referência para estudos e o correto dimensionamento de implementações experimentais futuras.

5 CONCLUSÕES

Com as análises deste trabalho, percebeu-se como a estrutura do tubo, os fluidos e o circuito para processamento podem interferir na construção física do sensor. Sensores dos tipos capacitivos são bastante aplicáveis para medições em escoamentos multifásicos, pois apresentam alta sensibilidade, e mais especificamente, o sensor do tipo anel é melhor comparado a outras configurações de sensores, sendo muito sensíveis quando ocorre mudança de fase, e com maior sensibilidade à medida que a distância entre os eletrodos diminui.

Para aplicação de sensores capacitivos em forma de anéis, com objetivo de analisar a velocidade da bolha, precisa-se considerar dois fatores. O primeiro deles, é o distanciamento entre os eletrodos de cada sensor (L_e), que está relacionado com o tempo de resposta suficiente para ocorrer mudança de uma fase para outra (gás-líquido). L_e foi dimensionado conforme proposto por algumas literaturas, pois L_e amplifica o valor absoluto da capacitância, considerado suficiente para análises de escoamento em golfadas, segundo Ahmed e Ismail (2008). O segundo fator é a distância entre os dois sensores empregados no trabalho (L_s). Conforme os resultados obtidos, a distância mínima encontrada entre os sensores é em torno de 12 mm, considerando diferentes valores de diâmetros dos tubos e as misturas ar-água, ar-glicerina e gás-óleo. Para determinar o valor mínimo ideal, os fatores variação de capacitância entre cheio e vazio e maior sensibilidade são de extrema importância. Como mencionado na Tabela 15, os trabalhos da literatura utilizaram valores como 82 mm e 32 mm, superiores ao valor mínimo citado neste trabalho. Neste caso, a distância mínima para analisar a mudança de fase sem interferências se mostra como viável, pois os dados da literatura estão acima deste valor base.

O ponto principal que irá diferenciar o valor de L_s para cada projeto, são as próprias limitações do sensor, o nível de sensibilidade que se deseja obter, a resolução espacial e a linearidade. A resolução espacial relaciona-se com o comprimento axial de cada eletrodo, e o sensor em anel exige que esse comprimento seja, aproximadamente, 50% o valor do diâmetro do tubo ($0,5D$), como explica Rosa, Flora e Souza (2012). Com base nisso, pode-se perceber que o valor fica bastante próximo do encontrado na análise numérica, tendo como base o diâmetro interno do tubo C (26 mm).

Foi possível observar que a velocidade calculada, através do teorema de Nicklin

(1962), depende apenas da inclinação do tubo, das misturas, do número de Froude e do diâmetro interno do tubo em análise. Já para o período, neste caso T_L e T_G , dependem do valor da capacitância, pois está atrelado ao circuito do TLC555. Tendo conhecimento desses dois fatores, de modo numérico, é possível calcular qual deve ser a distância entre os sensores, de modo que seja possível captar as mudanças de fase do escoamento sem causar interferências e prejudicar a leitura dos sensores.

Mesmo tendo o objetivo do trabalho sendo cumprido, é importante ressaltar pontos de melhoria para esse projeto, que podem ser abordados e desenvolvidos em trabalhos futuros:

- Desenvolver fisicamente o sensor capacitivo, considerando uma estrutura externa para blindagem dos eletrodos com intuito de eliminar a capacitância residual entre os eletrodos, fios e circuito.
- Desenvolver uma programação em microcontrolador para processamento dos dados coletados de capacitância, para serem convertidos em período e possa ser encontrada a velocidade da bolha alongada experimentalmente.
- Com o sensor fisicamente desenvolvido, realizar testes comparativos com dados calculados e simulados, além de testar a efetividade do sensor.

REFERÊNCIAS

ABOUELWAFI, M. S. A.; KENDALL, E. J. M. The use of capacitance sensors for phase percentage determination in multiphase pipelines. **IEEE Trans. Instrum. Meas.**, v. 29, n. 1, p. 24–27, 1980. DOI: 10.1109/tim.1980.4314856.

AHMED, W. H.; ISMAIL, B. I. Innovative techniques for two-phase flow measurements. **Recent Patents on Electrical & Electronic Engineering (Formerly Recent Patents on Electrical Engineering)**, v. 1, n. 1, p. 1–13, 2008.

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.

BERNARDES, L. E. P. **Estudo de escoamento bifásico vertical descendente utilizando medidor de composição**. 2003. 84 f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Oceânica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, fev. 2003.

BERTOLA, V. **Modelling and Experimentation in Two-Phase Flow**. 1. ed. Wien, Switzerland: Springer-Verlag GmbH, 2003. v. 450. 429 p. (CISM International Centre for Mechanical Sciences). DOI: 10.1007/978-3-7091-2538-0.

BONFATI, L. V. **Desenvolvimento de circuito de condicionamento de sinais para um sensor capacitivo utilizado para classificação de combustíveis**. 2017. 74 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Eletrônica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, PR, nov. 2017. Disponível em: <http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/16199>. Acesso em: 5 dez. 2021.

BRATLAND, O. **Pipe Flow 2: Multi-Phase Flow Assurance**. 1. ed. Singapore: Dr Ove Bratland Systems Pte. Ltd., 2010. 354 p. Disponível em: <http://www.drbratland.com/>. Acesso em: nov. 2020.

CANIÈRE, H. *et al.* Capacitance signal analysis of horizontal two-phase flow in a small diameter tube. **Exp. Therm Fluid Sci.**, v. 32, n. 3, p. 892–904, 2008. DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2007.10.011.

CORRÊA, F. C. **Sistema embarcado para medidas de escoamento bifásico gas-liquido**. Jul. 2009. 107 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, Brasil. Disponível em: <https://hdl.handle.net/20.500.12733/1610479>. Acesso em: 3 jul. 2021.

DAVIES, R. M.; TAYLOR, G. I. The mechanics of large bubbles rising through extended liquids and through liquids in tubes. **Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences**, v. 200, n. 1062, p. 375–390, 1950.

DONG, F. *et al.* Application of electrical resistance tomography to two-phase pipe flow parameters measurement. **Flow Meas. Instrum.**, v. 14, n. 4–5, p. 183–192, 2003. DOI: 10.1016/s0955-5986(03)00024-4.

DUARTE, L. G.; PRATA, A. T. Geometria de sensores capacitivos aplicados em escoamentos multifásicos. *In*: UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA (UFPB), ago. 2002, João Pessoa, PB. ANAIS do II Congresso Nacional de Engenharia Mecânica (CONEM). Rio de Janeiro, RJ: Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas (ABCM), 2002. (Refrigeração, Ar Condicionado, Aquecimento e Ventilação), 0426:1–0426:9. Paper ID: CPB0426.

ELKOW, K. J.; REZKALLAH, K. S. Void fraction measurements in gas-liquid flows under 1 - g and μ - g conditions using capacitance sensors. **Int. J. Multiphase Flow**, v. 23, n. 5, p. 815–829, 1997. DOI: 10.1016/s0301-9322(97)00020-7.

FABRE, J.; LINÉ, A. Modeling of two-phase slug flow. **Annual review of fluid mechanics**, v. 24, n. 1, p. 21–46, 1992.

FLORA, B. F. **Sensor de impedâncias de anéis para medida de fração de vazio em escoamento gás-líquido**. 2011. 184 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, fev. 2011.

GERAETS, J. J. M.; BORST, J. C. A capacitance sensor for two-phase void fraction measurement and flow pattern identification. **International Journal of Multiphase Flow**, v. 14, n. 3, p. 305–320, 1988.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; KRANE, K. S. **Fisica 3**. [S. l.]: LTC, 1984. v. 3.

HAMPEL, U. *et al.* Experimental ultra fast X-ray computed tomography with a linearly scanned electron beam source. **Flow Measurement and Instrumentation**, v. 16, n. 2-3, p. 65–72, 2005.

HOLLER, G. *et al.* A novel capacitance sensor principle applicable for spatially resolving downhole measurements. *In*: mai. 2002, Anchorage, AK, USA. IMTC/2002. Proceedings of the 19th IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference. [S. l.]: Institute of Electrical e Electronics Engineers (IEEE), 2002. v. 2, p. 1157–1160. DOI: 10.1109/imtc.2002.1007120.

HORI, K. *et al.* Development of an ultrafast X-ray computed tomography scanner system: Application for measurement of instantaneous void distribution of gas-liquid two-phase flow. **Heat Transfer—Asian Research**, v. 29, n. 3, p. 155–165, 2000.

HOYLE, B. S. Process tomography using ultrasonic sensors. **Measurement Science and Technology**, v. 7, n. 3, p. 272, 1996.

JAWOREK, A.; KRUPA, A.; TRELA, M. Capacitance sensor for void fraction measurement in water/steam flows. **Flow Meas. Instrum.**, v. 15, n. 5-6, p. 317–324, 2004. DOI: 10.1016/j.flowmeasinst.2004.04.002.

JOHANSEN, G. A. *et al.* A dual sensor flow imaging tomographic system. **Measurement Science and Technology**, v. 7, n. 3, p. 297, 1996.

JONES JR., O. C.; DELHAYE, J.-M. Transient and statistical measurement techniques for two-phase flows: a critical review. **International Journal of Multiphase Flow**, v. 3, n. 2, p. 89–116, 1976.

LIBERT, N. **Sistema de medição capacitivo para determinação da fração de vazio em escoamentos bifásicos**. 2013. 115 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica e Informática Industrial) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, PR, ago. 2013. Disponível em: <http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/595>. Acesso em: 5 dez. 2021.

LIMA, L. E. M. **Análise do modelo de mistura aplicado em escoamentos isotérmicos gás-líquido**. Jul. 2011. 147 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, Brasil. Disponível em: <http://repositorio.unicamp.br/jspui/handle/REPOSIP/264105>. Acesso em: 3 jul. 2021.

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.

MA, Y.-P. *et al.* Two simplified methods to determine void fractions for two-phase flow. **Nucl. Technol.**, v. 94, n. 1, p. 124–133, 1991. DOI: 10.13182/NT91-A16228.

NICKLIN, D. J. Two-phase bubble flow. **Chemical engineering science**, v. 17, n. 9, p. 693–702, 1962.

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>.

POLONSKY, S.; SHEMER, L.; BARNEA, D. The relation between the Taylor bubble motion and the velocity field ahead of it. **International Journal of Multiphase Flow**, v. 25, n. 6-7, p. 957–975, 1999.

PRASSER, H.-M.; BÖTTGER, A.; ZSCHAU, J. A new electrode-mesh tomograph for gas-liquid flows. **Flow Meas. Instrum.**, v. 9, n. 2, p. 111–119, 1998. DOI: 10.1016/s0955-5986(98)00015-6.

REIS, E. dos; GOLDSTEIN JR., L. A non-intrusive probe for bubble profile and velocity measurement in horizontal slug flows. **Flow Meas. Instrum.**, v. 16, n. 4, p. 229–239, 2005. DOI: 10.1016/j.flowmeasinst.2005.03.003.

ROSA, E. S.; FLORA, B. F.; SOUZA, M. A. S. F. Capacitance signal analysis of horizontal two-phase flow in a small diameter tube. **Meas. Sci. Technol.**, v. 23, n. 5, p. 055304, 2012. DOI: 10.1088/0957-0233/23/5/055304.

ROSS, A.; STOBIE, G. Well testing — An evaluation of test separators and multiphase flow meters. *In*: 28TH INTERNATIONAL NORTH SEA FLOW MEASUREMENT WORKSHOP, out. 2010. **Proceedings [...]**. [S. l.]: TUV NEL, 2010. 4.3:1–4.3:21.

SANTOS, G. J. dos. **Sensor capacitivo inteligente para monitoramento de escoamentos bifásicos**. 2015. 61 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica e Informática Industrial) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, PR, mar. 2015. Disponível em: <http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/1304>. Acesso em: 5 dez. 2021.

SCHLEICHER, E. *et al.* Design of an optical tomograph for the investigation of single-and two-phase pipe flows. **Measurement Science and Technology**, v. 19, n. 9, p. 094006, 2008.

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. **Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals**, v. 21, n. 2, p. 175–181, 1982.

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

STRAZZA, D. *et al.* Capacitance sensor for hold-up measurement in high-viscous-oil/conductive-water core-annular flows. **Flow Measurement and Instrumentation**, v. 22, n. 5, p. 360–369, 2011.

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.

TEYSSÉDOU, A.; TYE, P. A capacitive two-phase flow slug detection system. **Rev. Sci. Instrum.**, v. 70, n. 10, p. 3942–3948, 1999. DOI: 10.1063/1.1150017.

THORN, R.; JOHANSEN, G. A.; HJERTAKER, B. T. Three-phase flow measurement in the petroleum industry. **Measurement Science and Technology**, v. 24, n. 1, p. 012003, 2012.

WALLIS, G. B. **One-dimensional two-phase flow**. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 1969. 408 p.