

Matheus Gama Costa

**CARACTERIZAÇÃO DE ESCOAMENTOS MULTIFÁSICOS
UTILIZANDO ELEMENTOS PIEZELÉTRICOS**

Qualificação submetida ao Programa
de Pós-Graduação em Engenharia de
Sistemas Eletrônicos da Universidade
Federal de Santa Catarina.

Orientador: Prof. Dr. Kleber Vieira de
Paiva

Coorientador: Prof. Dr. Anderson W.
Spengler

Joinville
2019



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE SISTEMAS ELETRÔNICOS - PPGESE

Avaliação de Exame de Qualificação

No **22/04/2019** a partir das **14h**, sala **U155**, Bloco U do Centro Tecnológico de Joinville da UFSC, reuniu-se a Banca Avaliadora de Exame de Qualificação composta pelos seguintes membros:

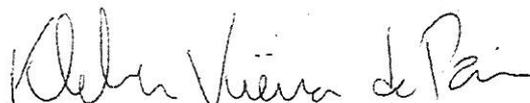
Nome	Instituição	Função
Prof. Dr. Kleber Vieira de Paiva	UFSC	Presidente
Prof. Dr. Jorge Luiz Goes Oliveira	UFSC	Membro
Prof. Dr. Rodrigo Moreira Bacurau	UFABC	Membro

para a avaliação do Projeto de Pesquisa do estudante **Matheus Gama Costa**, orientado pelo **Prof. Kleber Vieira de Paiva** e coorientado pelo **prof. Anderson Wedderhoff Spengler**, com trabalho intitulado **CARACTERIZAÇÃO DE ESCOAMENTOS MULTIFÁSICOS UTILIZANDO ELEMENTOS PIEZELÉTRICOS**.

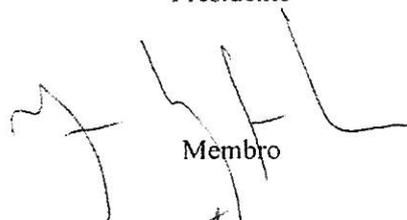
Da avaliação da Banca, o estudante foi considerado APROVADO () REPROVADO no Exame de Qualificação.

Para o caso de reprovação, a Banca levou em conta os seguintes aspectos, que devem ser considerados pelo estudante para nova submissão de requerimento de Exame de Qualificação, nos termos da resolução específica vigente:

Nestes termos, assinam:


Presidente


Membro


Membro

Membro


Estudante

RESUMO

A identificação de perfis de escoamento, assim como a vazão mássica dos escoamentos multifásicos que chegam nas plataformas de extração de petróleo, são de suma importância para as empresas que atuam nessa extração. Dessa maneira, de posse de sistemas de medição de baixo custo e de fácil instalação, a indústria poderá maximizar o controle e otimizar o tempo de controle, além reduzir custos relativos aos equipamentos para medição do escoamento do tipo óleo-gás-água. Com isso, o presente trabalho tem como objetivo, através de técnicas de medições ultrassônicas, com o auxílio de elementos piezelétricos, caracterizar escoamentos multifásicos com duas e três fases. Serão utilizadas técnicas que envolvem o TOF (tempo de voo do sensor ultrassônico), efeito Doppler, e a absorção de tais ondas pelos fluidos presentes no escoamento. Para realizar as medições será desenvolvida uma placa de aquisição de sinais fornecidos por elementos piezoelétricos, com base na placa TDC1000-7200, da Texas Instruments, para que seja possível utilizar múltiplos sensores. O tratamento dos dados coletados, possibilitará ao software, a ser desenvolvido, identificar perfis de escoamento já apresentados pela literatura. Testes iniciais para a observação do comportamento dos elementos piezelétricos, foram realizados estaticamente. De modo que se obteve, uma faixa mínima em relação ao nível que os sensores conseguem identificar.

Palavras-chave: Ultrassônico. Escoamentos Multifásicos. Sensores Piezelétricos.

ABSTRACT

The identification of flow profiles, as well as the mass outflow, of the multiphase profiles that arrive at the oil extraction platforms are of essential importance to the companies involved in this extraction. In this way, with low-cost measurement systems and simple installations, industry can maximize control time and reduce costs related to oil-gas-water flow measurement equipment. Therefore, the present work aims, through ultrasonic measurements techniques, with the help of piezoelectric elements, to characterize multiphase flows with two and three phases. Techniques involving TOF (flight time of the ultrasonic sensor), Dopple effect, and the absorption of such waves by the fluids present in the flow will be used. To perform measurements, a piezoelectric elements signal acquisition board based on Texas Instruments TDC1000-7200 will be developed to allow multiple sensors to be used. The treatment of the collected data, allows the software, to be developed, to define flow profiles already presented in the literature. Initial tests to observe the behavior of piezoelectric elements were performed statically. So we obtained a minimum working range.

Keywords: Ultrasonic. Multiphase flows. Piezoelectric Sensors.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Um mapa de escoamento vertical de duas fases genérico.	11
Figura 2 - Um mapa de escoamento horizontal de duas fases genérico.	13
Figura 3 - Desenvolvimento do escoamento em dutos.....	15
Figura 4 - Dimensões do Tubo de Venturi Padrão.	16
Figura 5 - Efeito Doppler.	17
Figura 6 - Acoplamento de sensores ultrassônicos utilizados por Murakawa.....	18
Figura 7 - Modo transmissão-Recepção para ultrassons.	19
Figura 8 - Configuração para sensores Pulso-Eco.....	20
Figura 9 - Bancada Multifásica Laboratório T2F.....	23
Figura 10 - Tubo de Venturi disponível.	24
Figura 11 - Posição dos sensores no recipiente de acrílico utilizado nos testes estático.....	25
Figura 12 - Posicionamento do sensor na tampa do recipiente de acrílico.	26
Figura 13 - Medições com um único fluido.	27
Figura 14 - Medições com dois fluidos.	27
Figura 15 - Erros das medidas de vazão assumindo os fluidos em repouso.	28
Figura 15 – Tela <i>software LabVIEW</i>	29
Figura 16 - Quedas de pressão para cada ponto do Tubo de Venturi em diferentes vazões de água.	30
Figura 17 - Cronograma de Atividades.	31

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Equipamentos da bancada de testes e suas quantidades..... 24

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	7
1.1	OBJETIVOS	8
1.1.1	Objetivo Geral	8
1.1.2	Objetivos Específicos	8
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	9
2.1	ESCOAMENTO MULTIFÁSICO.....	9
2.1.1	Padrões de escoamento multifásico	10
2.1.1.1	Padrões em escoamentos Verticais	11
2.1.1.2	Padrões em escoamentos Horizontais	12
2.2	MEDIÇÃO DE VELOCIDADE - TUBO DE VENTURI ...	14
2.3	ONDAS ULTRASÔNICAS.....	16
2.3.1	Método Doppler	17
2.3.2	Método Transmissão-Recepção	18
2.3.3	Método Pulso-Eco	19
3	PROPOSTA DE MESTRADO	21
3.1	BANCADA EXPERIMENTAL	22
3.2	SISTEMA DE MEDIÇÃO DE VELOCIDADE.....	23
3.3	EQUIPAMENTOS DISPONÍVEIS	24
4	RESULTADOS PRELIMINARES	25
4.1	MEDIÇÃO ULTRASÔNICA	25
4.2	MEDIÇÕES COM O TUBO DE VENTURI.....	29
5	CRONOGRAMA DE ATIVIDADES	31
	REFERÊNCIAS	33

1 INTRODUÇÃO

Escoamentos multifásicos são encontrados em diversas aplicações de engenharia, desde o setor alimentício até o setor petroquímico. Neste último é possível se observar a presença de três ou mais fases, normalmente óleo-água-gás, em todo o percurso da produção.

Com isso, existe a necessidade de tecnologias que consigam realizar medições precisas dos fluxos, pois permitem a obtenção de informações necessárias para se estimar as taxas de extração nos poços. Essas medições também contribuem para otimizações na produção, onde a partir das informações medidas podem ser definidas ações de controle em: válvulas, controle de pressão de água injetada no poço, entre outros (FOSS; KNUDSEN; GRIMSTAD, 2018).

Atualmente o método mais utilizado, para se estimar a produção de um poço, consiste na utilização de tanques separadores, sendo esses usados na quantificação do volume de cada uma das fases extraídas do poço em um determinado tempo. Esse método necessita que a produção seja parada durante o período de medição. Após a separação das fases presentes, são utilizados métodos de medição monofásica em cada uma das fases para estimar a quantidade de cada substância no intervalo de tempo definido da medição (CORNELIUSSEN et al. 2005).

Para a indústria de óleo e gás, é desejável medições de vazão mássica *in-line*, de modo a não se utilizar a separação de fases. Isso, além de maximizar a produção por meio de um monitoramento em tempo real, exclui a necessidade da utilização dos sistemas de separação convencionais (OLIVEIRA et al., 2009). Equipamentos alternativos dotados de novas e já conhecidas tecnologias são encontrados, porém são de alto custo (LORENTZEN et al., 2010). Com isso, a busca por medidores a baixo custo e precisos está em pauta entre muitas empresas, além do uso de tecnologias viáveis e soluções práticas no auxílio das operações de medição.

Com as medições sem a separação das fases, seria possível diminuir nas plataformas equipamentos como separadores de fases, o que diminuiria o espaço e o custo de operação na extração. Possibilita também, o monitoramento em tempo real da vazão de cada uma das fases que chegam do reservatório, sendo viável estimar as taxas de produção local e um melhor gerenciamento dos reservatórios.

Desse modo, observando as dificuldades nas medições de vazão em plataformas de petróleo, e seus benefícios na operação, o desenvolvimento de equipamentos que sejam robustos e precisos se torna imperativo. A utilização de sensores não intrusivos e de fácil mobilidade,

que possibilitem sua instalação sem mudanças nas tubulações já existentes nas plataformas é de grande importância, para que os processos não necessitem ser parados para a realização das aferições.

Sendo assim, este trabalho apresenta como proposta um sistema de medição, preciso, para medir as vazões e os perfis em escoamentos multifásicos óleo-água-ar a partir de anéis de sensores piezelétricos, e um medidor de vazão tubo de venturi.

Para a realização dos testes experimentais, tem-se disponível uma bancada que possibilitará a criação de diversos perfis de escoamento com até três fases. A bancada encontra-se devidamente instrumentada, além de possuir um tomógrafo comercial, possibilitando a validação dos resultados a serem obtidos do hardware que será desenvolvido.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo principal do presente trabalho é identificar os perfis de velocidade em escoamentos multifásicos através da integração de sensores piezelétricos e um Tubo de Venturi.

1.1.2 Objetivos Específicos

Para alcançar os fins citados anteriormente, apresenta-se como objetivos específicos.

- Validar, estática e dinamicamente, a utilização de sensores piezelétricos, individualmente e em conjunto, com várias fases;
- Validar as medições de vazão multifásica com o tubo de Venturi;
- Calibrar e entender o funcionamento do tomógrafo disponível;
- Desenvolver protótipos de hardware e software, de baixo custo, não intrusivos e preciso, para leitura de sinais providos de sensores piezelétricos;
- Realizar testes de hardware e software, tanto estaticamente quanto dinamicamente;

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 ESCOAMENTO MULTIFÁSICO

São escoamentos em que mais de uma fase de fluido estão presentes em um mesmo duto. Um exemplo tradicional desse tipo de escoamento está presente na extração do petróleo, onde petróleo, água, gás e partículas sólidas, escoam dos poços até os tanques de separação.

Tais escoamento multifásico são fenômenos cuja análise é mais complexa que o escoamento monofásico, quando processos correlatos são analisados. Isso ocorre pelos seguintes fatos:

- A presença de mais de uma fase no escoamento, exigindo um número adicional de equações que expressam o fenômeno físico;
- Há uma distribuição espacial das fases, a qual não é conhecida em sua plenitude. Ademais, a distribuição espacial das fases não deixa de ser um fenômeno de difícil quantificação. Em muitos casos a interface gás-líquido que separa as fases tem forma complicada, além de apresentar movimento aleatório;
- Há mudanças de padrões de escoamento que dependem de características físicas e operacionais do sistema, como quantidade de água injetada nos poços ou a presença de gases dentro dos poços. Estes padrões por sua vez alteram e/ou determinam os fenômenos de transferência de massa, de quantidade de movimento e energia entre as fases;
- Há grande influência do escoamento de cada uma das fases no escoamento da outra, a realidade mostra que as variáveis locais de cada fase, como a velocidade, a pressão, etc, podem flutuar no tempo com amplitude considerável.

Sendo assim, calcular ou mesmo medir o valor médio de uma variável em escoamento bifásico, requer procedimentos mais complexos que aqueles aplicados as variáveis de escoamentos monofásicos

Observando aspectos práticos, Christopher (2005) caracteriza as taxas e processos de transferência de massa, momento e energia como as principais dificuldades em projetos que trabalham com escoamentos multifásico.

A distribuição geométrica, ou topologia, dos componentes que compõem a tubulação, tem impacto direto no fluxo interno de cada fase, bem como nas taxas e processos de transferências já descritos. Desta forma, a compreensão deste fenômeno apresenta um grande desafio no estudo dos fluxos multifásicos (CHRISTOPHER, 2005).

2.1.1 Padrões de escoamento multifásico

Os regimes de fluxo são divididos em disperso, separado, intermitente ou uma combinação deles. Corneliussen et al. (2005) os caracterizou como:

- Fluxo disperso: caracteriza-se por uma distribuição de fases uniforme nas direções radial e axial. Como os fluxos borbulhado e misto, que podem ser observados na Figura 2.
- Fluxo separado: apresenta uma distribuição de fases não contínua, na direção radial, e contínua, na direção axial. Como os fluxos estratificados e anular presentes na Figura 2.
- Fluxo intermitente: apresenta comportamento não contínuo no eixo axial, apresentando um comportamento instável. Na Figura 1 podem ser observados os fluxos *churn* e *slug* como exemplos.

Normalmente, os padrões de fluxo são reconhecidos por inspeção visual, embora outros meios, como as flutuações na fração volumétrica, tenham sido desenvolvidos para situações em que a informação visual não consiga ser obtida (CORNELIUSSEN, et al. 2005).

Serão apresentados, nas subseções seguintes, alguns exemplos de mapas de regime de escoamento, juntamente com as definições que ajudam a distinguir os vários regimes. Os exemplos apresentados dos fluxos de misturas de gás e líquido em tubos horizontais e verticais são de considerável interesse industrial, principalmente na indústria de óleo e gás.

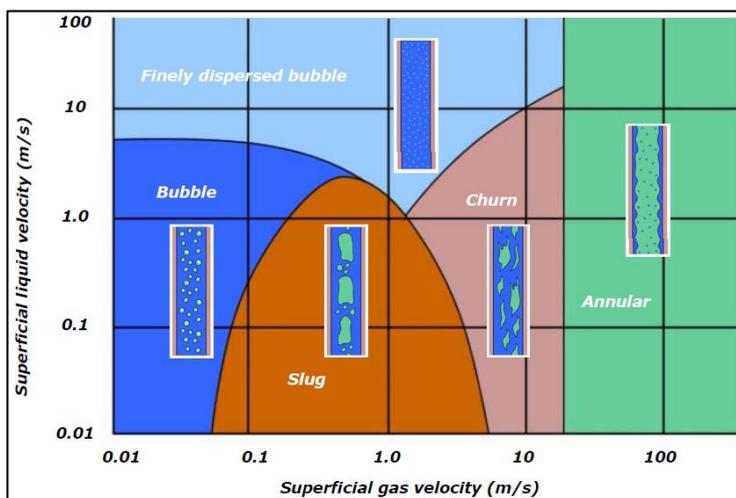
As Figura 1 e Figura 2 apresentam ilustrações dos regimes de fluxo e onde eles ocorrem. Christopher (2005), afirma que o diâmetro da linha onde está acontecendo o escoamento é de suma importância, de modo que se os fluxos forem mantidos constantes e o diâmetro da linha for reduzido, as velocidades irão aumentar e o ponto no mapa de escoamento se moverá para cima e para a direita ao longo da diagonal. Dessa maneira, esses são

os parâmetros que possibilitam de maneira mais simples a alteração do regime de escoamento.

2.1.1.1 Padrões em escoamentos Verticais

O fluxo multifásico em escoamentos verticais apresenta mudança em todas as fases de modo a se comportar com os perfis, bolha, *slug*, *churn* e anular, podendo ser observado na Figura 1.

Figura 1- Um mapa de escoamento vertical de duas fases genérico.



Fonte: (CORNELIUSSEN et al. (2005).

Collier e Thome (1996) definem quatro dos escoamentos verticais apresentados na Figura 1 como:

- Escoamento borbulhado (*bubbly flow*): a fase de gás ou vapor, se distribui como bolhas discretas em uma fase líquida contínua. Sendo que em um dos extremos, as bolhas podem ser pequenas e esféricas e, no outro extremo as bolhas podem ser grandes com uma cauda achatada e plana;
- Escoamento pistonado (*slug flow*): as bolhas de gás ou vapor são aproximadamente do diâmetro do tubo. A parte superior da bolha possui forma esférica e o gás é separado da parede do duto por um fino filme de líquido descendo

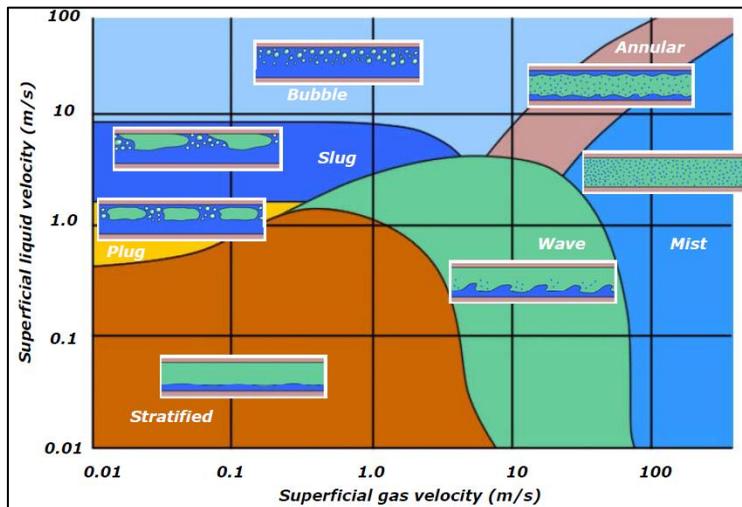
de forma lenta. Duas bolhas sucessivas são separadas por partes líquidas (*slugs*) que podem conter bolhas de menor diâmetro em forma dispersa;

- Escoamento agitado (*churn flow*). Ocorre quando o escoamento pistonado se instabiliza e as grandes bolhas se quebram dando lugar a um escoamento caótico no centro de duto, deslocando o líquido contra as paredes. Este padrão possui uma característica oscilatória entre escoamento pistonado e anular;
- Escoamento anular (*annular flow*): uma lâmina de líquido formado na parede do tubo, com um núcleo central contínuo de gás ou vapor. Ondas de grande amplitude que geralmente estão presentes na superfície da lâmina, e a quebra contínua dessas ondas forma uma fonte de arrastamento de gotículas que ocorrem em quantidades variáveis no núcleo de gás central.

2.1.1.2 Padrões em escoamentos Horizontais

Nos fluxos horizontais, as transições também são funções do diâmetro do tubo, tensão interfacial e velocidade. A Figura 2 apresenta as transições dos regimes, são dependentes da velocidade superficial dos gases e líquidos, sendo este mapa é válido apenas para um duto com diâmetro constante.

Figura 2 - Um mapa de escoamento horizontal de duas fases genérico.



Fonte: (CORNELIUSSEN et al. (2005).

Collier e Thome (1996) definem seis dos escoamentos horizontais apresentados na Figura 2 como:

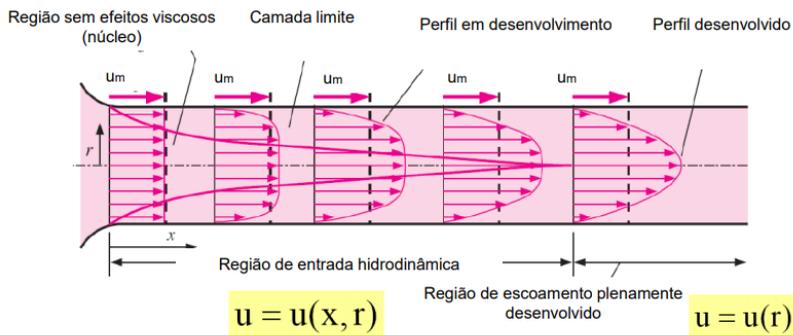
- Escoamento borbulhado (*bubbly flow*). É similar ao apresentado no fluxo vertical, com a exceção de que as bolhas de vapor tendem a escoar na metade superior do tubo. Em velocidades moderadas de ambas as fases líquidas e gasosas, a seção transversal inteira do tubo contém bolhas a velocidades ainda mais elevadas, um padrão de fluxo equivalente ao padrão anular fino é inserido;
- Escoamento pistonado (*plug flow*). É semelhante ao escoamento pistonado na direção vertical. As bolhas de gás tendem a escoar na metade superior do tubo;
- Escoamento estratificado (*stratified flow*). Ocorre apenas em velocidades muito baixas de líquido e gás. As duas fases fluem separadamente com uma interface relativamente suave;
- Escoamento ondulado (*wavy flow*). À medida que a velocidade do gás aumenta, o escoamento é perturbado pelas ondas que escoam na direção do escoamento;

- Escoamento pistonado (*slug flow*). Um aumento adicional na velocidade do gás faz com que as ondas na interface sejam captadas para formar um *slug* espumoso que é propagado ao longo do canal a uma alta velocidade. A superfície superior do tubo atrás da onda é molhada por uma lâmina residual que drena para a maior parte do líquido. Este padrão, não deve ser confundido com o escoamento pistonado em dutos horizontais (Plug). Enquanto no primeiro caso, as grandes bolhas são formadas a partir da coalescência das pequenas, quando é aumentada a vazão de gás num padrão de bolhas, neste caso, as bolhas (ou bolsões) de gás são formadas a partir da desestabilização do filme de líquido;
- Escoamento anular (*annular flow*): aumentado ainda mais velocidade do gás resultará na formação de um núcleo de gás com uma lâmina de líquido em torno da periferia do duto. A lâmina pode não ser contínua em torno de toda a circunferência, mas será mais espesso na base do tubo.

2.2 MEDIÇÃO DE VELOCIDADE - TUBO DE VENTURI

A velocidade é um parâmetro importante no estudo da dinâmica de fluidos, de modo que vários fenômenos relacionados ao desenvolvimento do escoamento podem ser estudados através da medição dessa grandeza. Para escoamentos internos em dutos, sendo a condição de não escorregamento considerada, é sabido que a velocidade do fluido nas paredes do duto é igual a zero, já o valor máximo da velocidade se encontra no centro, como na Figura 3.

Figura 3 - Desenvolvimento do escoamento em dutos.



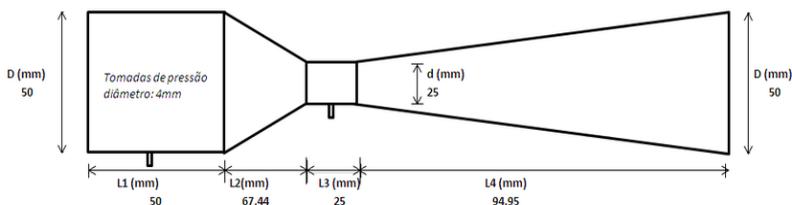
Fonte: Adaptado, (ÇENGEL et al. (2007)).

Tendo isso em mente, o efeito Venturi ocorre em escoamentos em dutos fechados, de modo que em locais onde a seção transversal do tubo diminui nota-se um aumento da velocidade do escoamento, além de diminuição da pressão estática, já em locais onde ocorre uma expansão dele, o efeito é oposto, ocorrendo uma diminuição da velocidade do fluido e um aumento da pressão estática (SCHEAUA, 2016).

O tubo de Venturi usa do efeito Venturi e a partir de uma geometria específica consegue realizar medições de velocidade nos dutos. A geometria consiste em uma redução brusca da seção transversal inicial, seguida de uma expansão mais lenta, formando assim uma garganta. Dessa maneira, identifica-se três seções nesse instrumento, a seção de contração, a seção de garganta e a seção de difusão, como ilustrado na Figura 4.

O Tubo de Venturi é instrumentado com sensores em pontos ao longo de sua extensão, desde a seção inicial (D), até a garganta (d). Com o conhecimento da massa específica do fluido que passa por ele, é possível determinar a velocidade média do escoamento utilizando correlações.

Figura 4 - Dimensões do Tubo de Venturi Padrão.



Fonte: (SANTOS; BETTEGA, 2015)

2.3 ONDAS ULTRASÔNICAS

As ondas ultrassônicas são ondas mecânicas que se propagam em uma frequência fundamental superior a 20 kHz. Este tipo de onda, é geralmente gerada a partir de perturbações em um meio material que se propaga longitudinalmente e transversalmente (DACIUK, 2008). No caso do escoamento bifásico água-ar, o modo de propagação predominante é o longitudinal.

Uma das formas mais comuns de gerar a onda ultrassônica baseia-se no efeito piezométrico, que consiste na conversão de um pulso elétrico em vibrações mecânicas por meio de transdutores de cristal piezométrico. O mesmo material piezométrico pode agir como um receptor de ondas de ultrassom convertendo a onda mecânica em um sinal elétrico. Assim como qualquer onda, o ultrassom, ao atravessar uma interface de transição entre dois materiais de características diferentes, tem uma parte de sua energia refletida e outra transmitida, podendo sofrer alteração de sua direção de propagação (DACIUK, 2008).

Em interfaces líquido-gás, a onda ultrassônica é totalmente refletida. Essa propriedade possibilita a detecção da posição de bolhas de gás presentes em um escoamento bifásico. Em análise de escoamentos, as técnicas ultrassônicas podem ser classificadas em três tipos: Doppler, transmissão-recepção e pulso-eco. Também pode ser utilizada a combinação dos três tipos, resultando num método híbrido (DACIUK, 2008).

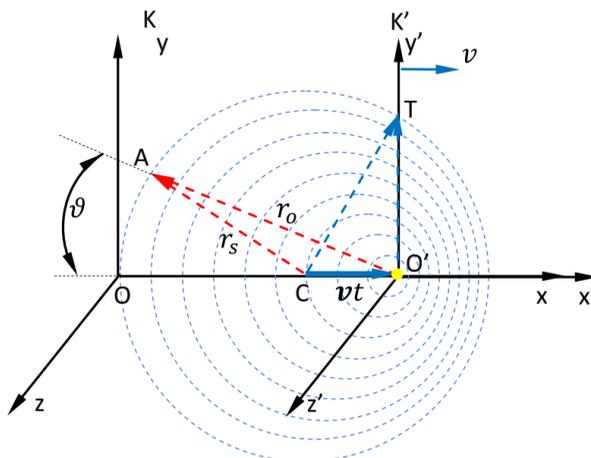
2.3.1 Método Doppler

O método Doppler é muito utilizado para medição de vazão. A técnica se baseia no efeito Doppler, o qual é caracterizado pelo princípio físico, o qual verifica a alteração linear da frequência das ondas sonoras. Tais ondas são refletidas com o movimento de um objeto refletor em relação a uma fonte. A diferença entre a frequência da onda de ultrassom transmitida e a da onda recebida são diretamente relacionadas à velocidade do escoamento e , por meio de uma geometria conhecida, é possível obter-se a vazão (MURAKAWA et al. 2005).

Na Figura 5 é exemplificado o efeito Doppler, sendo K o referencial inicial e K' o referencial final, o eixo x assume uma fonte sonora com velocidade de afastamento v , assumindo-se um observador em A , ϑ seria o ângulo entre a direção que o observador recebe o sinal e a direção do movimento da fonte. Tendo o triângulo ACO' pode se obter a equação 1 (KLINAU, S 2016):

$$r_s^2 = r_0^2 + v^2 t^2 - 2r_0 \cos \vartheta \quad (1)$$

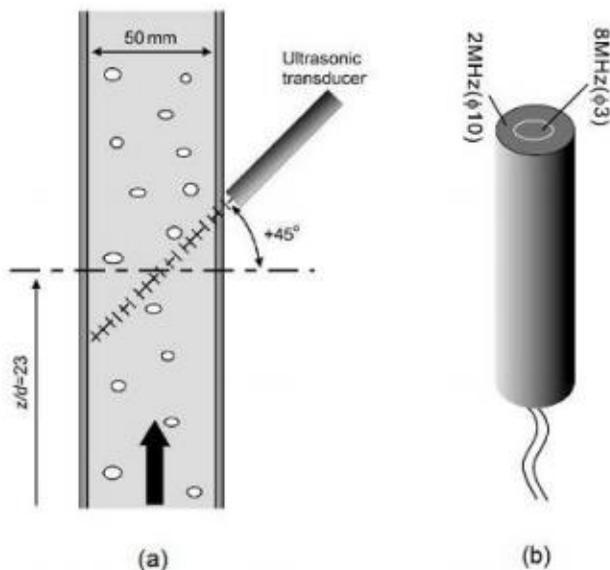
Figura 5 - Efeito Doppler.



Fonte: (KLINAKU, S 2016).

Um exemplo de acoplamento dos sensores para esse método é apresentado na Figura 6.

Figura 6 - Acoplamento de sensores ultrassônicos utilizados por Murakawa.



Fonte: (MURAKAWA et al. (2005).

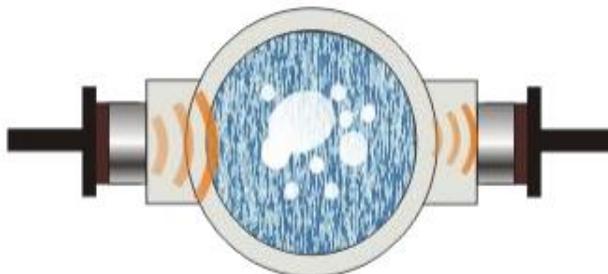
2.3.2 Método Transmissão-Recepção

A técnica de transmissão-recepção compreende a propagação de ondas ultrassônicas através de um escoamento, geradas a partir de um emissor posicionado na parede do duto e adquiridas por um ou mais receptores em oposição ao primeiro. O posicionamento dos transdutores também pode variar de acordo com a aplicação desejada. As principais informações extraídas do escoamento, como vazão, fração de vazio densidade, são obtidas por meio de correlações com a alteração do tempo de trânsito e da amplitude da onda ao atravessar o meio.

Vatanakul et al. (2004) utilizou o desvio padrão do tempo de trânsito e da amplitude do sinal de ultrassom para medição da fração de vazio em escoamentos trifásicos.

Um exemplo do posicionamento dos sensores pode ser observado na Figura 7.

Figura 7 - Modo transmissão-Recepção para ultrassons.



Fonte: (OFUCHI, C. Y. 2011).

2.3.3 Método Pulso-Eco

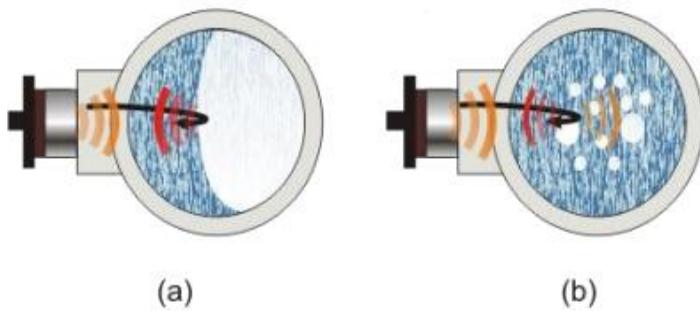
O método pulso-eco refere-se à aquisição de um sinal de ultrassom, refletido por uma interface, com a utilização do mesmo transdutor que emite a onda. Em escoamentos multifásicos, a técnica tem sido aplicada para a determinação da posição da interface entre as diferentes fases, e para a caracterização da mistura por meio da variação da energia do eco refletida (DACIUK, 2008).

A posição da interface é obtida por meio da velocidade do som na mistura e o tempo de trânsito que a onda ultrassônica leva para atingir a interface, ser refletida e retornar ao transdutor emissor. Faccini (2008) estudou o escoamento bifásico estratificado, através de técnicas ultrassônicas. A técnica de pulso-eco também foi utilizada para medição das alturas de líquido, junto com uma técnica de visualização de alta velocidade para filmagem de escoamentos.

A energia do eco refletida pode ser correlacionada com o aumento de obstáculos encontrados pela onda ultrassônica no meio. Carvalho et al. (2009) utilizaram a energia do eco refletida como um dos parâmetros para medição da fração de vazio de 0 a 15%. O parâmetro é útil principalmente na transição do regime de escoamento borbulhante para intermitente. Os autores observaram que as bolhas, características do padrão em golfadas, refletem grande parte do pulso de ultrassom.

Um exemplo de acoplamento dos sensores para a utilização do método pulso-eco, pode ser observado na Figura 8.

Figura 8 - Configuração para sensores Pulso-Eco.



Fonte: (OFUCHI, C. Y. 2011).

3 PROPOSTA DE MESTRADO

Petróleo e gás natural são extraídos de diferentes fontes geológicas. A maioria dos campos de petróleo e gás são encontrados em rochas sedimentares. Tais rochas possuem um grau de porosidade e permeabilidade que possibilitam o movimento e o acúmulo de óleo e gás. Perfurando uma dessas fontes é possível extrair alguma quantidade de óleo e/ou gás.

Para estimular a saída do petróleo ou o gás do poço, seja para começar, continuar ou aumentar o fluxo, água é bombeada para as camadas de rochas profundas. A alta pressão da água resulta em taxas de fluxo de extração elevadas e torna a operação do poço mais econômica.

Com isso, existe a necessidade de se medir as vazões oriundas dessa extração, que são em grande parte multifásicas, para que, posteriormente, essas informações possam ser utilizadas na distinção dos fluxos de óleo, água e gás.

Com base nessa necessidade, propõe-se como proposta de dissertação de mestrado, o desenvolvimento de um módulo de aquisição de dados capaz de captar as informações de sensores ultrasônicos, para assim identificar as vazões e concentrações em escoamentos multifásicos (gás – óleo – água). Para tal tarefa, serão utilizados elementos piezoelétricos para a emissão e captação das ondas sonoras, em conjunto à um tubo de venturi, possibilitando um sensoriamento não intrusivo e de baixo custo.

Para tanto será adotada a seguinte metodologia para execução desse trabalho:

1. Revisão bibliográfica: será realizada uma ampla revisão bibliográfica sobre o estado da arte de escoamento multifásicos, bem como uma revisão sobre a parte de ultrassonografia;
2. Projeto da bancada experimental: serão desenvolvidos aparatos de fixação, para que seja possível instalar os sensores piezoelétricos *in-line* com a bancada de escoamento multifásico;
3. Realização de medidas estáticas: serão realizadas medições estáticas das interfaces entre líquido e ar, de modo a utilizar sensores compatíveis com a medição de mudanças de fases do ar para o líquido. Além disso serão realizados testes em um recipiente de aço inox que mais se aproximam do que estará presente na bancada final;
4. Realização dos testes de caracterização de escoamento: serão realizados testes para a caracterização dos escoamentos

- presentes na literatura (COLLIER e THOME, 1996), de modo a conseguir realiza-los na bancada dinâmica;
5. Desenvolvimento de *hardware*: será desenvolvida uma placa de *hardware* a qual permitirá a utilização de vários elementos piezelétricos, e possibilitará também a modulação desses elementos em frequências tanto nas faixas de kHz, quanto as de MHz;
 6. Realização de testes dinâmicos: serão realizadas medições com os perfis multifásicos, de modo a tentar caracterizar tais perfis. A validação desses dados será feita a partir de comparação com as informações geradas a partir do tomógrafo comercial disponível no laboratório, o Tomoflow R100;
 7. Análise de resultados: serão realizadas análises das frações de vazio presentes no sistema para cada perfil estabelecido na tubulação, de modo a verificar se os dados coletados condizem com a inspeção visual. Posteriormente serão realizadas comparações com os dados coletados com o Tomoflow R100, de modo a definir taxas de erro, assim como os limites de medição que todo o aparato, hardware, software e fixação, possuem.

3.1 BANCADA EXPERIMENTAL

Para a realização dos testes dinâmicos, tem-se disponível uma bancada capaz de gerar misturas de gases e líquidos, em condições controladas de pressão, vazão e temperatura, a qual está instalada no laboratório Thermal Fluid Flow Group.

A bancada, representada na Figura 9, proporciona a geração de escoamentos com até três fases (ar, água e/ou óleo). Esses escoamentos serão criados para caracterizar os comportamentos dentro dos dutos presentes na indústria.

Além de possibilitar a criação dos escoamentos com três fases, a bancada possui sensores em vários pontos, o que possibilitará caracterizar informações de vazão, pressão e temperatura de entrada, que esperam ser medidas com o módulo a ser desenvolvido. Estão presentes nas entradas de cada uma das fases, sensores de vazão independentes, após as misturas encontra-se um sensor de pressão, um tomógrafo comercial e um medidor de vazão do tipo Venturi, o qual é capaz de medir vazões multifásicas.

Figura 9 - Bancada Multifásica Laboratório T2F.



Fonte – Autor (2019).

3.2 SISTEMA DE MEDIÇÃO DE VELOCIDADE

O sistema de medição de velocidade disponível consiste em um tubo de Venturi adaptado com sete tomadas de pressão, sendo a primeira de referência para obter as diferenças em relação as outras seis. Como pode ser visto na Figura 10, instrumento é feito de acrílico, o que permite a visualização do escoamento interno ao tubo. O diâmetro interno da entrada do Venturi é de 40 mm, enquanto o diâmetro interno da garganta é de 20 mm.

Figura 10 - Tubo de Venturi disponível.



Fonte: Autor (2019).

3.3 EQUIPAMENTOS DISPONÍVEIS

Na Tabela 1 são apresentadas as descrições dos principais equipamentos que compõem a bancada multifásica.

Tabela 1 - Equipamentos da bancada de testes e suas quantidades.

Quantidade	Descrição
2	Coriolis – CMF200M - 2"
1	Tomoflow R100
2	Manômetros Analógicos
2	Bomba 1 CV
1	Compressor
1	Tubo de Venturi
2	Sensores de pressão absoluta
4	Sensores de pressão diferencial

Fonte: Autor (2019).

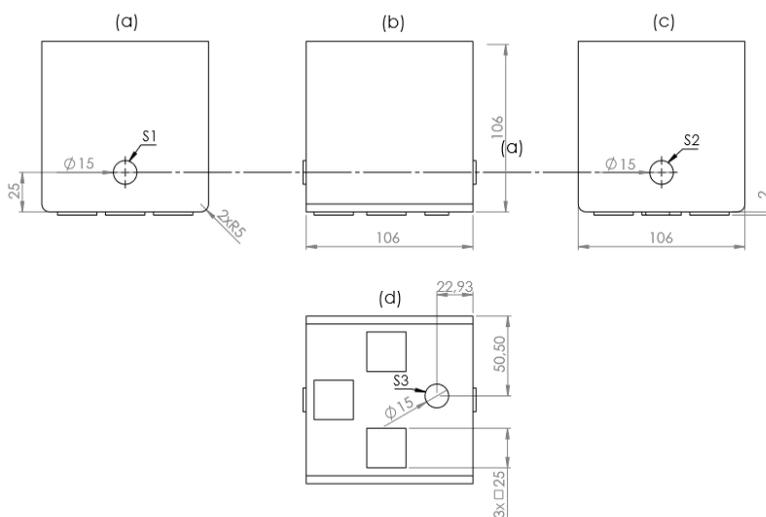
O medidor de vazão Coriolis CMF200M, tem a capacidade de medir até 87100 kg/h (líquidos) e 10000 kg/h (gases). O tomógrafo possui planos de medição com distância média de 142 mm, contendo cada um dos planos 12 eletrodos. As bombas conseguem atingir uma vazão máxima de 23,9 m³/h. O tubo de Venturi possui sete tomadas de pressão em sua extensão, o que permite a medição de vazões com múltiplas fases presentes.

4 RESULTADOS PRELIMINARES

4.1 MEDIÇÃO ULTRASÔNICA

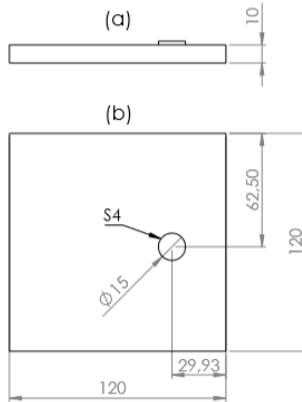
Foram realizados testes iniciais em coluna estática com os transdutores piezelétricos de 1 MHz, os quais tiveram como objetivo definir o comportamento destes sensores em diversas configurações, sendo possível obter algumas condições de funcionamento para cada caso. Nas Figura 11, Figura 12 e Figura 13 - Representação do posicionamento dos sensores na caixa de acrílico., é apresentada uma representação da localização de cada um dos sensores na caixa de acrílico utilizada para os primeiros testes estáticos.

Figura 11 - Posição dos sensores no recipiente de acrílico utilizado nos testes estático.



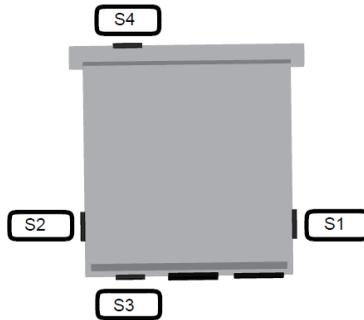
Fonte: Autor (2019).

Figura 12 - Posicionamento do sensor na tampa do recipiente de acrílico.



Fonte: Autor (2019).

Figura 13 - Representação do posicionamento dos sensores na caixa de acrílico.



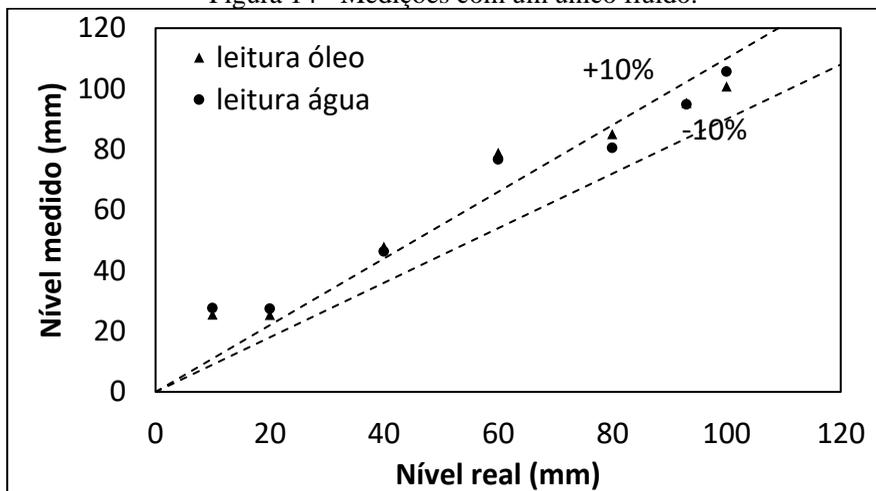
Fonte: Autor (2019).

Os testes foram divididos em duas configurações principais. Inicialmente definindo o mesmo elemento piezoeletrico atuando como emissor e receptor, posteriormente a emissão e recepção do sinal foi feita separadamente por dois elementos de material piezoeletrico. Em ambos os casos o comportamento dos sensores foi testado com diferentes níveis de fluido, assim como a combinação de dois fluidos de diferente densidade (água e óleo).

A primeira configuração visa comparar o nível real de um único fluido, com o nível medido através dos sensores. Os resultados obtidos com um único fluido, inicialmente água e posteriormente óleo, indicam

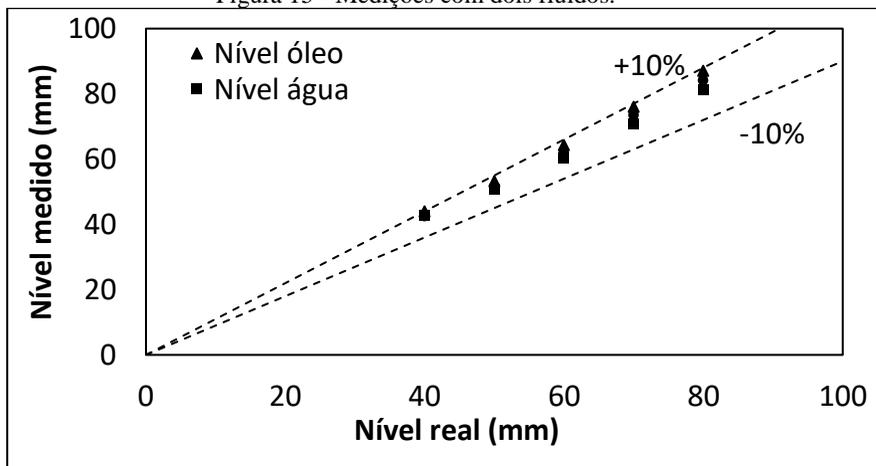
que o sensor com as configurações utilizadas não é adequado para medições menores de oitenta milímetros. Já nos testes com dois fluidos o nível mínimo, nível total de água e óleo, é de quarenta milímetros. Essas informações estão apresentadas nos gráficos presentes Figura 14 e Figura 15.

Figura 14 - Medições com um único fluido.



Fonte: Autor (2019).

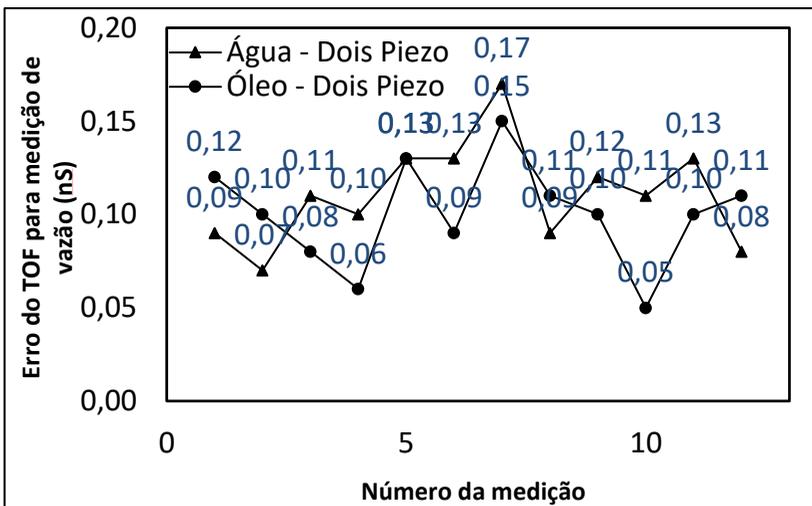
Figura 15 - Medições com dois fluidos.



Fonte: Autor (2019).

A segunda configuração teve como objetivo medir o fluido estático de modo a se esperar um valor de variação de tempo igual a zero, com o fluido em repouso. Embora o erro médio em ambos os fluidos tenha ficado por volta dos 0,10 ns como apresentado na Figura 16, não foi possível obter maiores conclusões devido à não ser possível realizar medições de vazão com o tanque de prova.

Figura 16 - Erros das medidas de vazão assumindo os fluidos em repouso.



Fonte: Autor (2019).

Tendo em vista os dados obtidos, é possível afirmar que para a primeira configuração, com somente um piezelétrico, os níveis mínimos confiáveis são de oitenta e quarenta milímetros, para um único fluido e para dois fluidos, respectivamente. Para a segunda configuração não foi possível obter conclusões em relação a fidelidade das medições de vazão. Isso ocorreu, pois como o fluido estava estático, o único ponto de medição possível foi o de vazão nula. Com isso, para melhor análise dessa configuração de teste, seria necessário o acoplamento dos sensores na bancada experimental, de modo a se ter variações na vazão, o que será realizado nos próximos passos.

Constatou-se também, que os piezelétricos com 1MHz de frequência de vibração, não são bons para medições com interfaces que partem de um gás para um líquido ou sólido. Porém, apresentaram bons resultados quando a interface parte de um líquido para gás ou sólido.

4.2 MEDIÇÕES COM O TUBO DE VENTURI

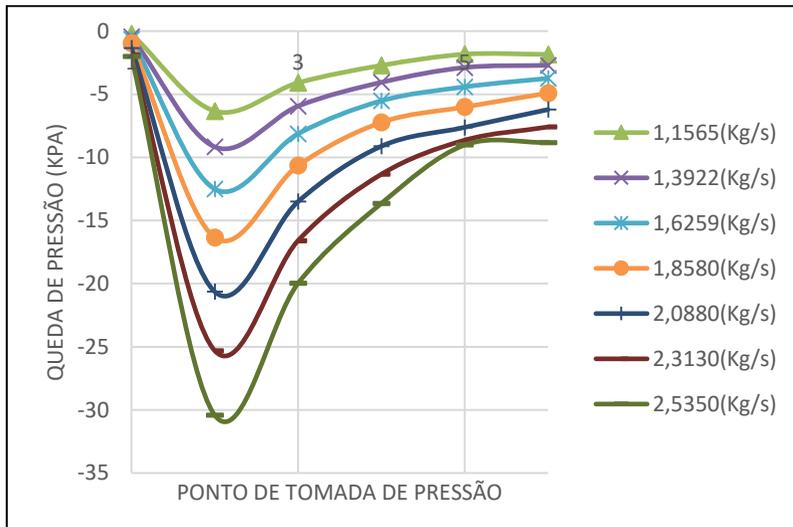
Foram iniciados os testes com o tubo de Venturi de modo a se verificar o comportamento de suas tomadas de pressão para um único fluido, além da aquisição de sinal de pressão através do *software* Labview, como na Figura 17. Desse modo, para os testes iniciais com apenas uma fase, no caso água, considerando diferentes vazões de escoamento, foram realizadas medições das diferenças de pressão em cada um dos pontos do tubo de Venturi para diferentes vazões. Os resultados podem ser vistos na Figura 18.

Figura 17 – Tela *software* LabVIEW.



Fonte: Autor (2019).

Figura 18 - Quedas de pressão para cada ponto do Tubo de Venturi em diferentes vazões de água.



Fonte: Autor (2019).

Também foram iniciados os testes bifásicos - água e ar. A partir de tais resultados verificou-se que os sensores de pressão instalados no tubo de Venturi apresentam ruídos nas medições de pressão. Tais ruídos ocorreram em função do efeito compressível do ar, e podem ser verificados em vazões muito baixas ou em vazões muito elevadas de água. Com isso, identificou-se a necessidade de uma melhor análise e uma nova metodologia para utilização de tal equipamento, que será realizada dentro do escopo do presente trabalho.

5 CRONOGRAMA DE ATIVIDADES

Figura 19 - Cronograma de Atividades.

Tarefas	Status	1º Trimestre (Jan/19-Mar/19)			2º Trimestre (Abr/19-Jun/19)			3º Trimestre (Jul/19-Set/19)			4º Trimestre (Out/19-Dez/19)		
		Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maió	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
Revisão do Estado da arte													
Revisão da literatura sobre escoamentos multifásicos/sensoriamento ultrasônico	Iniciado	█	█	█	█	█	█						
Revisão de artigos relacionados a caracterização de escoamentos multifásicos	Iniciado	█	█	█	█	█							
Revisão dos procedimentos para medição de vazões de multiplas fases	Iniciado	█	█	█	█	█							
Metodologia													
Realização dos testes estáticos com os elementos piezelétricos	Iniciado		█	█	█	█	█						
Realização dos testes dinâmicos com os elementos piezelétricos	Não iniciado							█	█	█	█	█	
Desenvolvimento e testes do hardware final para aquisição dos sinais do elementos piezelétricos	Iniciado			█	█	█	█	█					
Realização dos testes para caracterização do escoamento multifásico com o Tomógrafo/Venturi	Iniciado			█	█	█	█	█					
Análise de resultados e escrita													
Comparar resultados coletados do tomógrafo com os do venturi e valida-los	Não iniciado						█	█	█	█			
Validar os dados coletados com os elementos piezelétrico com os resultados do tomógrafo e do venturi	Não iniciado								█	█	█	█	█
Escrita da dissertação	Não iniciado									█	█	█	█

Fonte: Autor (2019).

REFERÊNCIAS

- CARVALHO, R. D. M.; VENTURINI, O. J.; TANAHASHI, E. I.; NEVES JR., F.; FRANÇA, F. A. Application of the ultrasonic technique and high-speed filming for the study of the structure of air–water bubbly flows. *Experimental Thermal and Fluid Science*, v. 33, n. 7, p. 1065-1086, 2009.
- ÇENGEL, Yunus A.; CIMBALA, John M. *Mecânica dos Fluidos: Fundamentos e Aplicações*. São Paulo: McGrawHill, Bookman, AMGH, 2007. XXVI,
- CHRISTOPHER, E. B. *Fundamentals of multiphase flows*. Cambridge University, Press UK, 2005.
- CORNELIUSSEN, S. et al. *Handbook of multiphase flow metering*. Norwegian Society for Oil and Gas Measurement (NFOGM), Revision, v. 2, 2005.
- COLLIER, J. G. e THOME, J. R. *Convective Boiling and Condensation*. New York: Oxford University Press Inc. 1996.
- DACIUK, R. J. *Estudo de parâmetros ultra-sônicos para caracterização de líquidos*. Dissertação de Mestrado. 2008. 90f. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2008.
- FACCINI, J. L. H. *Estudo de Escoamentos Bifásicos Usando Técnicas Ultra-Sônicas*. Tese de Doutorado. 2008. 177f. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2008.
- FOSS, B.; KNUDSEN, B. R.; GRIMSTAD, B. Petroleum production optimization a static or dynamic problem? *Computers & Chemical Engineering*, Elsevier, v. 114, p.245–253, 2018.
- HALLIDAY, R.; RESNICK, R.; WALKER, J.. *Fundamentos de Física, Volume 2: Gravitação, Ondas e Termodinâmica*. Rio de Janeiro: LTC, 2009.
- KLINAKU, S. The Doppler effect and the three most famous experiments for special relativity, *Results in physics*, Elsevier, v.6, p.235-237, 2016.

LORENTZEN, R. J. et al. Soft multiphase flow metering for accurate production allocation (russian). In: SOCIETY OF PETROLEUM ENGINEERS. SPE Russian Oil and Gas Conference and Exhibition[S.I.], 2010.

MURAKAWA, H.; KIKURA, H.; ARITOMI, A. Application of ultrasonic doppler method for bubbly flow measurement using two ultrasonic frequencies. Experimental Thermal and Fluid Science, Elsevier, v. 29, p. 843–850, 2005.

OFUCHI, C. Y.. Técnicas avançadas para análise de escoamentos bifásicos gás-liquido em golfadas. Dissertação - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2011.

OLIVEIRA, J. L. G. et al. Mass flow rate measurements in gas–liquid flows by means of a venturi or orifice plate coupled to a void fraction sensor. Experimental Thermal and Fluid Science, Elsevier, v. 33, n. 2, p. 253–260, 2009.

S, CHEAUA, F. D. Theoretical approaches regarding the venturi effect Hidraulica, n. 3, 2016.

VATANAKUL, M.; ZHENG, YING; COUTURIER, M. Application of Ultrasonic Technique in Multiphase Flows. Ultrasonics, p. 5681-5691, 2004.