

Juliano Moreira Leite

# **SISTEMA DE MEDIÇÕES LÍQUIDO-GÁS A PARTIR DE TUBO VENTURI**

Projeto de Dissertação de Mestrado  
submetido ao Programa de Pós-  
Graduação em Engenharia de Sistemas  
Eletrônicos (PPGESE) da  
Universidade Federal de Santa  
Catarina para a obtenção da  
Qualificação do Projeto de Dissertação  
de Mestrado  
Orientador: Prof. Dr. Jorge Luiz Goes  
Oliveira  
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 dia 29/04/2019 a partir das 16h, sala U155, Bloco U do Centro Tecnológico de Joinville da UFSC, reuniu-se a Banca Avaliadora de Exame de Qualificação composta pelos seguintes membros:

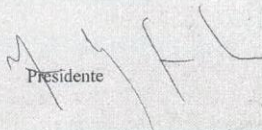
Nome	Instituição	Função
Prof. Dr. Jorge Luiz Goes Oliveira	Universidade UFSC	Presidente
Prof. Dr. Luís Fernando Caparroz Duarte	Universidade UTFPR	Membro
Prof. Dr. Kleber Vieira de Paiva	Universidade UFSC	Membro

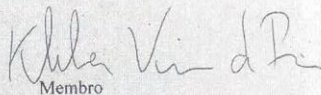
para a avaliação do Projeto de Pesquisa do estudante **Juliano Moreira Leite**, orientado pelo **Prof. Jorge Luiz Goes Oliveira**, com trabalho intitulado **SISTEMA DE MEDIÇÕES LÍQUIDO-GÁS A PARTIR DE TUBO VENTURI**.

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

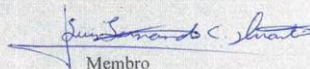
Para o caso de reprovação, a Banca levou em conta os seguintes aspectos, que devem ser considerados pelo estudante para nova submissão de requerimento de Exame de Qualificação, nos termos da resolução específica vigente:

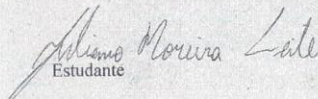
Nestes termos, assinam:

  
Presidente

  
Membro

Membro

  
Membro

  
Estudante

## RESUMO

O desenvolvimento e o uso de novos sistemas de medição em substituição aos convencionais separadores de fases se tornaram foco das indústrias de petróleo e gás natural, nas medições das vazões de gás, óleo e água nos poços de extração. Buscam-se medidores a baixo custo e precisos, além do uso de tecnologias viáveis e soluções práticas no auxílio das operações de medição. Facilidades de medição são desejadas principalmente nas operações de extração em águas profundas. Tem-se por objetivo propor alternativa de baixo custo para as medições de vazões de escoamento do tipo líquido-gás através de um tubo de venturi. Modelos de escoamentos bifásicos tradicionais serão adaptados para criar um algoritmo capaz de prescrever o campo de pressão teórico ao longo do venturi e comparar com medições das pressões ao longo de um protótipo desse elemento deprimogêneo.

**Palavras-chave:** Indústrias de petróleo e gás natural, Sistemas de medição, Escoamentos líquido-gás, Venturi.

## ABSTRACT

The development of liquid and gas two-phase flow measurement systems in replacement to old-fashioned phase separators is essential to the oil and gas industry. Gas, oil and water flows occur simultaneously in pipes at these industries. Measurement techniques must satisfy precision and costs, besides they need to resist to challenging operational conditions. Measurement solutions are particularly interesting to deep-water operations. This work aims at developing a low cost liquid and gas two-phase flow measurement system consisting of a modified venturi meter. Traditional two-phase flow models will be adapted to the venturi meter geometry to model the theoretical pressure behavior along the venturi. Pressure measurements will provide info to an algorithm in order to estimate liquid and gas flow rates without phase separation.

**Keywords:** Oil and gas industry; measurement systems, liquid and gas two-phase flows; Venturi meter.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 Exemplo de mapa de padrões vertical.....	16
Figura 3.2 Exemplo de mapa de padrões horizontal .....	17
Figura 4.1 Ilustração da bancada multifásica (vista de topo) .....	19
Figura 4.2 Fotografia do tubo de venturi usinado em acrílico.....	21
Figura 4.3 Fotografia da placa com sensores de pressão diferencial. Note a identificação da posição dos canais (CH) .....	22
Figura 4.4 Interface gráfica de um modelo de Virtual Instrument (VI) desenvolvido no LabVIEW .....	23
Figura 4.5 Coleta de dados de pressão a partir de transdutor Omega para escoamentos bifásicos .....	24
Figura 5.1 Variação da pressão estática ao longo do venturi para escoamento monofásico com vazão de água igual a 0,65 kg/s.....	26
Figura 5.2 Variação da pressão estática ao longo do venturi para escoamento monofásico com vazão de água igual a 2,15 kg/s.....	26
Figura 5.3 Pressão estática maonométrica ao longo do venturi para escoamento bifásico de ar e água .....	27
Figura A.1 Variação da pressão estática ao longo do venturi para escoamento monofásico com vazão de água igual a 0,80 kg/s.....	32
Figura A.2 Variação da pressão estática ao longo do venturi para escoamento monofásico com vazão de água igual a 0,95 kg/s.....	32
Figura A.3 Variação da pressão estática ao longo do venturi para escoamento monofásico com vazão de água igual a 1,10 kg/s -1.....	33
Figura A.4 Variação da pressão estática ao longo do venturi para escoamento monofásico com vazão de água igual a 1,10 kg/s -2.....	33
Figura A.6 Variação da pressão estática ao longo do venturi para escoamento monofásico com vazão de água igual a 1,40 kg/s.....	34
Figura A.7 Variação da pressão estática ao longo do venturi para escoamento monofásico com vazão de água igual a 1,55 kg/s.....	35
Figura A.8 Variação da pressão estática ao longo do venturi para escoamento monofásico com vazão de água igual a 1,70 kg/s.....	35
Figura A.9 Variação da pressão estática ao longo do venturi para escoamento monofásico com vazão de água igual a 1,85 kg/s.....	36
Figura A.10 Variação da pressão estática ao longo do venturi para escoamento monofásico com vazão de água igual a 2,00 kg/s.....	36

## LISTA DE QUADROS

Quadro 4.1 Quadro com Representação dos Sensores Utilizados no Venturi .....	23
Quadro 5.1 Cronograma de Atividades a Serem Desenvolvidas até a Defesa do Mestrado .....	29

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 2.1 Projeção de Consumo de Óleo, Biocombustível e Gás Natural .....	13
Tabela 4.1 Lista dos equipamentos e sensores que compõem a bancada multifásica .....	20
Tabela 4.2 Escala dos sensores de pressão diferencial .....	22

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

PPD – Placa de Medição com Sensores de Pressão Diferencial

T2F – Thermal Fluid Flow Group



## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>OBJETIVOS</b> .....	<b>10</b>
1.1	OBJETIVO GERAL .....	10
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	10
<b>2</b>	<b>CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROBLEMA</b> .....	<b>12</b>
<b>3</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>14</b>
3.1	ESCOAMENTO MULTIFÁSICO ( <i>Multiphase Flow - MF</i> )	14
<b>3.1.1</b>	<b>Conceitos Básicos</b> .....	<b>14</b>
<b>3.1.2</b>	<b>Padrões de escoamento Vertical</b> .....	<b>16</b>
<b>3.1.3</b>	<b>Padrões de escoamento Horizontal</b> .....	<b>17</b>
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA E MATERIAIS</b> .....	<b>18</b>
4.1	EXPERIMENTOS .....	19
4.2	BANCADA MULTIFÁSICA .....	19
4.3	VENTURI .....	20
<b>4.3.1</b>	<b>Testes em escoamento Monofásico</b> .....	<b>21</b>
<b>4.3.2</b>	<b>Testes em escoamento Bifásico</b> .....	<b>23</b>
<b>5</b>	<b>RESULTADOS PARCIAIS</b> .....	<b>25</b>
5.1	ESCOAMENTO MONOFÁSICO (ÁGUA) .....	25
5.2	ESCOAMENTO BIFÁSICO (ÁGUA E AR) .....	26
<b>6</b>	<b>CRONOGRAMA</b> .....	<b>29</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>31</b>
	<b>APÊNDICE A – Resultados Preliminares</b> .....	<b>32</b>

## 1 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo a determinação das vazões de escoamentos bifásicos do tipo líquido-gás sem separação das fases através do uso de um elemento deprimogêneo, um tubo de venturi modificado. Para a determinação das vazões, apenas transdutores de pressão e termopares serão utilizados.

### 1.1 OBJETIVO GERAL

A determinação da vazão em elementos deprimogêneos (e.g. venturi) é normatizada através da NBR-5167 de 1991. Contudo, apenas escoamentos monofásicos são considerados.

A utilização do venturi para escoamentos bifásicos é tema de investigação: não há normatização para esse tipo de escoamento. Tem-se por objetivo criar um algoritmo capaz de prescrever o campo de pressão teórico ao longo do venturi para escoamentos bifásicos e comparar com medições das pressões ao longo do protótipo de venturi. Modelos de escoamentos bifásicos tradicionais (e.g. modelo de Lockhart e Martinelli) serão utilizados para esse propósito.

### 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

O algoritmo a ser desenvolvido deve satisfazer três etapas essenciais:

- Validação de modelo teórico para escoamento bifásico líquido-gás (equações de conservação e de estado) que possam descrever a evolução da pressão estática ao longo do venturi. Nesse algoritmo, é atividade de pesquisa determinar o fator de fricção em função da aceleração e desaceleração do escoamento ao longo do venturi. Pesquisa preliminar indica que não há correlação disponível na literatura;

- Determinar o provável padrão de escoamento. A modelagem acima é dependente dos padrões de escoamento líquido-gás. Como as flutuações dos sinais de pressão ao longo do tempo são dependentes do padrão de escoamento, o algoritmo deve determinar o provável padrão através de *Fast Fourier Transform* (FFT) e ajustar a aplicação do modelo teórico;

- Apresentar algoritmo de determinação das vazões de entrada a partir das pressões medidas. As curvas teóricas de pressão serão geradas

a partir de faixas possíveis da combinação de vazões do líquido e de gás. A curva de pressão modelada (teórica) com menor desvio em relação aos pontos experimentais deverá estimar a vazão de líquido e de gás.

Para garantir a viabilidade do algoritmo desenvolvido, serão necessárias medições de escoamentos bifásicos em uma bancada multifásica com instrumentação adequada.

## 2 CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROBLEMA

O transporte de fluidos por meio de tubulações (*i.e.* escoamento interno) ocorre em uma série de aplicações industriais. Como exemplo, citam-se áreas da indústria alimentícia e petroquímica, além da exploração de recursos naturais como o gás natural e o petróleo. Para fins de controle de produção e aferição dos órgãos fiscais nas atividades de extração, há a necessidade de maior precisão nas estações de medição.

Na extração de óleo e gás natural, o escoamento interno consiste de várias fases que compõem a produção; *e.g.* produtos de alto valor comercial (petróleo e gás natural) e resíduos (água, sedimentos e gás carbônico). A aferição precisa das vazões em escoamentos com várias fases (*e.g.* escoamentos multifásicos) é particularmente desafiadora, não sendo possível encontrar equipamentos ou técnicas universalmente aceitas para a vasta gama de produções encontradas.

A importância de medições precisas na indústria de óleo e gás pode ser facilmente compreendida através das massas anuais produzidas de petróleo e gás natural, e suas correspondentes frações energéticas equivalentes. De acordo com a publicação *Statistical Review of World Energy* da *British Petroleum*, em 2016, o consumo mundial de petróleo (incluindo biocombustíveis) e gás natural foi de 4.418 milhões de toneladas e 3.204 milhões de toneladas de óleo equivalente, respectivamente. Esses valores equivalem a 33,3% e 24,1%, nessa ordem, do consumo mundial de energia. Salienta-se ainda que, de 2005 a 2016, o consumo mundial de petróleo cresceu a uma taxa média anual de 1,1% e o de gás natural, a uma taxa média anual de 2,3% (Minqi Li, 2017).

Para projetar a produção futura de petróleo e gás natural, Minqi Li usou o método da Linearização de Hubbert como principal ferramenta analítica. As previsões são apresentadas na Tabela 2.1, e realçam a importância de medições precisas na produção de petróleo e gás natural.

Tabela 2.1 Projeção de Consumo de Óleo, Biocombustível e Gás Natural

Consumo de Energia no Mundo (Mtoe)*	2000	2010	2020	2030	2040	2050
Óleo e Biocombustível	3,59	4,085	4,574	4,542	4,145	3,55
Gás Natural	2,182	2,874	3,422	3,591	3,344	2,869
Total	5,772	6,959	7,996	8,133	7,789	6,419

\*Milhões de toneladas de óleo equivalente

Fonte: Minqi Li (2017), adaptada pelo autor (2019).

Na indústria do petróleo, o escoamento multifásico (em geral, simplificado como escoamento líquido-gás) ocorre em todo o percurso da fase de produção, desde a rocha-reservatório às unidades de separação, passando pela coluna de produção, linha de surgência, além das unidades industriais de refino. Em geral, as medições fiscais exigem a separação de fases e a consequente interrupção da produção.

Nas duas últimas décadas, o desenvolvimento e o uso de novos sistemas de medição em substituição aos convencionais separadores de fases se tornaram foco das indústrias de petróleo e gás natural, nas medições das vazões de gás, óleo e água nos poços de extração. Buscam-se medidores a baixo custo e precisos, além do uso de tecnologias viáveis e soluções práticas no auxílio das operações de medição. Facilidades de medição são desejadas principalmente nas operações de extração em águas profundas.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 ESCOAMENTO MULTIFÁSICO (*Multiphase Flow - MF*)

Falcone, Hewitt e Alimonti (2009) definem escoamento multifásico como escoamento simultâneo de duas ou mais fases, por um mesmo sistema/meio/perfil. Segundo Corneliussem *et al.* (2005), escoamento multifásico consiste do escoamento de dois ou mais fluidos (gás, líquido) no mesmo meio (tubos, canais).

A análise de escoamentos multifásicos é complexa. Sua previsão e modelagem são desafiadoras. Este tipo de escoamento pode ser considerado como o mais comum na natureza. Exemplificam-se rios carregados de resíduos, o sangue em nossas veias, a seiva das plantas com nutrientes etc.

As fases presentes em um escoamento multifásico podem ser sólidas, líquidas ou gasosas. Em um sistema de extração de petróleo, as fases são tipicamente simplificadas como óleo, água e gases. Estes últimos podem ser decorrentes da produção ou artificialmente injetados com o intuito de manter a pressão no poço de extração (e.g. injeção de CO<sub>2</sub>). Em suma, são simplificados como escoamentos do tipo líquido-gás, sendo o líquido muitas vezes tratado como uma mistura homogênea de petróleo e água. O conteúdo de água em óleo é uma importante característica da fase líquida.

Os escoamentos do tipo líquido-gás são classificados de acordo com sua topografia, ou melhor, com o padrão de escoamento. A formação de diferentes padrões de escoamento decorre das condições termodinâmicas de produção (e.g. pressão, temperatura, vazão) e das características dos meios de transporte (e.g. diâmetro das tubulações).

##### 3.1.1 Conceitos Básicos

São apresentadas a seguir definições básicas de escoamentos líquido-gás. Consideram-se processos adiabáticos unidimensionais (e.g. na direção principal do escoamento) e em regime permanente. Os subscritos *l* e *g* representam propriedades do líquido e gás, respectivamente.

A vazão mássica total de um escoamento (Eq. 3.1) é igual à soma das vazões mássicas do gás,  $m_g$ , e do líquido,  $m_l$ :

$$m = m_g + m_l \quad (3.1)$$

Assim, as vazões volumétricas do gás e líquido,  $Q_g$  e  $Q_l$ , respectivamente, estão diretamente relacionadas às vazões mássicas através de:

$$m_g = \rho_g Q_g = \rho_g v_g A_g \quad (3.2)$$

$$m_l = \rho_l Q_l = \rho_l v_l A_l \quad (3.3)$$

onde  $\rho$ ,  $v$  e  $A$ , representam a massa específica do fluido, a velocidade, e a área ocupada pelas fases numa determinada seção transversal ao escoamento.

A fração volumétrica da fase gasosa,  $\alpha_g$ , é frequentemente conhecida como fração de vazão média, Eq. (3.4). Essa é obtida através da razão entre o volume ocupado pelo gás,  $V_g$ , e o volume total em um determinado trecho do tubo,  $V$  (Oliveira, 2005):

$$\alpha_g = \frac{V_g}{V_g + V_l} \quad (3.4)$$

Outra propriedade importante para a modelagem de escoamentos líquido-gás é o fator de escorregamento médio,  $S$ . Esse é definido como a razão entre as velocidades médias das fases gasosa,  $v_g$ , e líquida,  $v_l$ :

$$S = \frac{v_g}{v_l} \text{ ou } S = \frac{\rho_l \cdot x \cdot (1 - \alpha_g)}{\rho_g \cdot (1 - x) \cdot \alpha_g} \quad (3.5)$$

onde  $x$  é o título, Eq. (3.6). Trata-se da razão entre a vazão mássica de gás e a vazão mássica total:

$$x = \frac{m_g}{m} \quad (3.6)$$

A perda de carga em uma determinada seção do duto é dada pela Eq. (3.7), Collier e Thome (1996). A variação da pressão estática é decorre de perdas friccionais,  $\frac{dP}{dz_{atrito}}$ , de aceleração do escoamento,  $\frac{dP}{dz_{aceleração}}$ , e devido ao campo gravitacional,  $\frac{dP}{dz_{gravitacional}}$ :

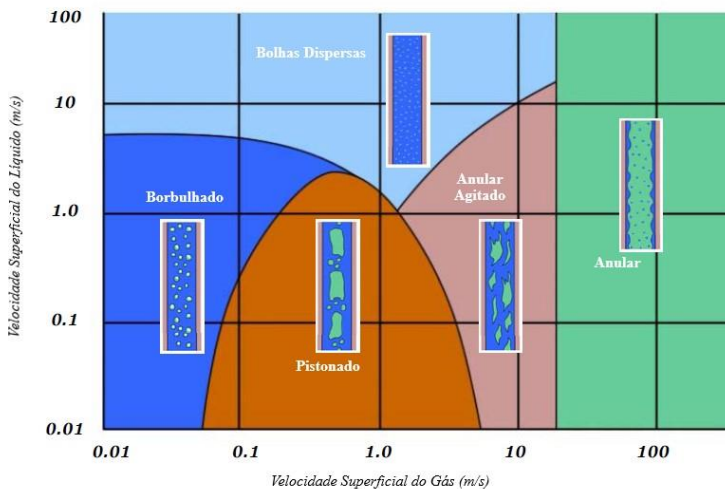
$$-\frac{dP}{dz} = -\frac{dP}{dz_{\text{atrito}}} - \frac{dP}{dz_{\text{gravitacional}}} - \frac{dP}{dz_{\text{aceleração}}} \quad (3.7)$$

### 3.1.2 Padrões de Escoamento Vertical

As medições de vazão em escoamentos na indústria de petróleo e gás natural ocorrem frequentemente no sentido ascendente, já que boa parte do transporte dos fluidos é nesta direção. Os padrões dependem da topografia (características geométricas ocupadas pelo gás e pelo líquido). A probabilidade de ocorrência de um padrão é representada em um mapa de padrões em função da direção do escoamento (vertical ou horizontal), das propriedades dos fluidos (e.g. densidade e viscosidade) e de características relacionadas à vazão média de cada fase (e.g. velocidade superficial da fase); ver Figura 3.1, Corneliussem *et al.* (2005), por exemplo.

Os padrões de escoamentos verticais podem ser resumidos como: borbulhado (*Bubbly Flow*), pistonado (*Slug Flow*), anular agitado (*Churn Flow*) e anular (*Annular Flow*). As topografias podem ser observadas em Collier e Thome (1996).

Figura 3.1 Exemplo de mapa de padrões vertical



Fonte: Corneliussem *et al.* (2005).

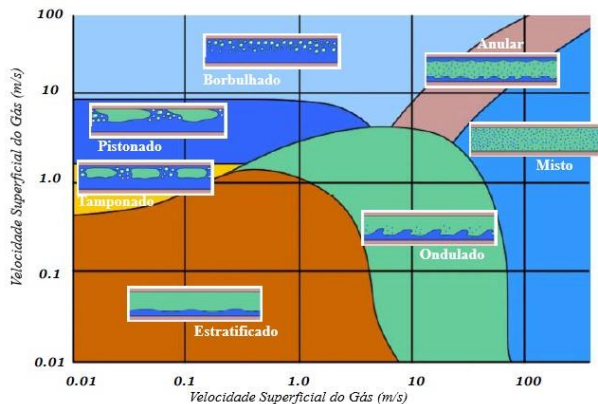


### 3.1.3 Padrões de Escoamento Horizontal

Os padrões de escoamento bifásico em dutos horizontais ou com inclinação possuem assimetria radial devido à influência da gravidade. De modo geral, a maior parte do gás se localiza na parte superior do tubo. Os padrões de escoamentos horizontais podem ser resumidos como: borbulhado (*Bubbly Flow*), tamponado (*Plug Flow*), anular agitado (*Churn Flow*), estratificado, pistonado, disperso (ou misto) e anular (*Annular Flow*). As topografias também podem ser observadas em Collier e Thome (1996).

Na figura 3.2, é apresentado um exemplo de mapa de padrões horizontal com as transições de padrão dependentes das velocidades superficiais do gás e do líquido.

Figura 3.2 Exemplo de mapa de padrões horizontal



Fonte : Corneliussen *et al.* (2005).

## 4 METODOLOGIA E MATERIAIS

A determinação da vazão em elementos deprimogêneos (e.g. venturi) é normatizada através da NBR-5167 de 1991. Através de informações da geometria do venturi, da massa específica (obtida indiretamente por medições de temperatura e pressão, inseridas em equação de estado) e da pressão diferencial entre a entrada e a garganta do venturi é determinada a vazão mássica. Há requisitos de escoamento completamente desenvolvido na entrada do dispositivo.

A utilização do venturi para escoamentos bifásicos é tema de investigação: não há normatização para essa condição. Através de modelos de escoamentos bifásicos (e.g. modelo de Lockhart e Martinelli) será criado um algoritmo capaz de prescrever o campo de pressão teórico ao longo do venturi e comparar com medições das pressões ao longo do protótipo de venturi.

Dessa forma, o algoritmo a ser desenvolvido tem três etapas essenciais:

- Descrever modelo teórico para escoamento bifásico líquido-gás (equações de conservação e de estado) que possam descrever a evolução da pressão estática ao longo do venturi. Nesse algoritmo, é atividade de pesquisa determinar o fator de fricção em função da aceleração e desaceleração do escoamento ao longo do venturi. Pesquisa preliminar indica que não há correlação disponível na literatura;

- Determinar o provável padrão de escoamento. A modelagem acima é dependente dos padrões de escoamento líquido-gás (ver capítulo 3). Como as flutuações dos sinais de pressão ao longo do tempo são dependentes do padrão de escoamento, o algoritmo deve determinar o provável padrão através de *Fast Fourier Transform* (FFT) e ajustar a aplicação do modelo teórico;

- Apresentar algoritmo de determinação das vazões de entrada a partir das pressões medidas. As curvas teóricas de pressão serão geradas a partir de faixas possíveis da combinação de vazões do líquido e de gás. A curva de pressão modelada (teórica) com menor desvio em relação aos pontos experimentais deverá estimar a vazão de líquido e de gás.

Por fim, as medições de pressão ao longo do venturi e as vazões conhecidas *a priori* serão fundamentais para garantir a viabilidade da metodologia acima.

## 4.1 EXPERIMENTOS

Os experimentos realizados com o venturi acontecem em uma bancada multifásica no laboratório *Thermal Fluid Flow Group* (T2F). A bancada foi instalada em 2018 e ajustada até a presente data para gerar escoamentos multifásicos. É possível a mistura de até três fluidos diferentes, um gás e dois líquidos diferentes.

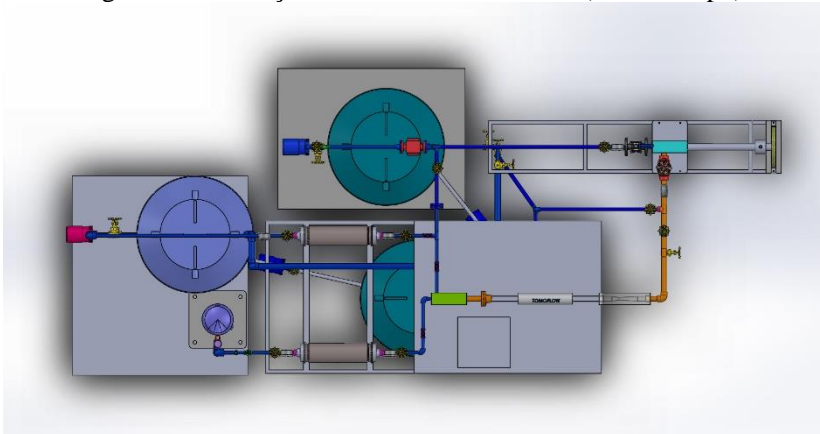
Inicialmente, serão realizados testes de escoamento monofásico com fluido líquido incompressível (água). Posteriormente, serão realizados testes de escoamentos bifásicos com ar e água.

## 4.2 BANCADA MULTIFÁSICA

A bancada de testes de escoamentos multifásicos construída pela equipe do T2F tem layout flexível: são possíveis várias configurações de vazões e combinações de fases, escoamentos verticais e horizontais.

Uma lista dos equipamentos e sensores que compõem a bancada é apresentada na Tabela 4.1. Na Figura 4.1, é apresentada uma ilustração da bancada em vista de topo. A mesma conta com tomógrafo de capacitância elétrica, que será usado para auxiliar no cálculo de frações de vazios do algoritmo, bem como na caracterização de padrão de escoamento.

Figura 4.1 Ilustração da bancada multifásica (vista de topo)



Fonte: Autor (2019).

Tabela 4.1 Lista dos equipamentos e sensores que compõem a bancada multifásica

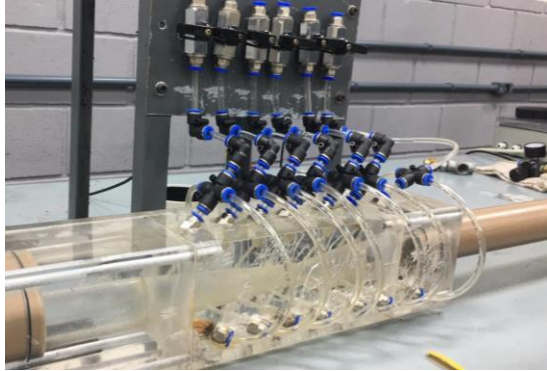
Quantidade	Descrição
1	Coriolis para medição de propriedades de entrada do ar no sistema
1	Coriolis para medição de propriedades de entrada da água no sistema
1	Regulador de pressão da entrada no ar no sistema, alcance 0-150 psi
2	Transdutor de pressão absoluta, de visualização (sem coleta de dados) das condições da bancada
1	Caixa misturadora de fluidos
1	Tomógrafo de capacitância elétrica
8	Válvula tipo gaveta manual, 1"
3	Válvula tipo globo manual, 1"
1	Válvula tipo globo manual, 1,5"
3	Válvula de retenção horizontal, 1"
1	Bomba hidráulica
1	Reservatório de Água (350l)

Fonte: Autor (2019).

### 4.3 VENTURI

O venturi utilizado (Fig. 4.2) foi fabricado em laboratório e em acrílico para permitir visualização. A visualização é essencial para avaliar como a evolução do padrão bifásico afetará o campo de pressões. Sete furações para coleta de dados de pressão estática ao longo do dispositivo são disponíveis. A angulação das furações foi projetada evitar que bolhas de ar fiquem alojadas nas tomadas de pressão.

Figura 4.2 Fotografia do tubo de venturi usinado em acrílico



Fonte: Autor (2019).

Em cada seção transversal que é feita a tomada de pressão, há três furos: dois na parte inferior e um na parte superior do venturi. Esses furos são interligados com o auxílio de tubos de 6 mm de diâmetro através de cruzeta. A coleta da pressão em determinada seção transversal é realizada em uma das conexões da cruzeta.

#### **4.3.1 Testes em Escoamento Monofásico**

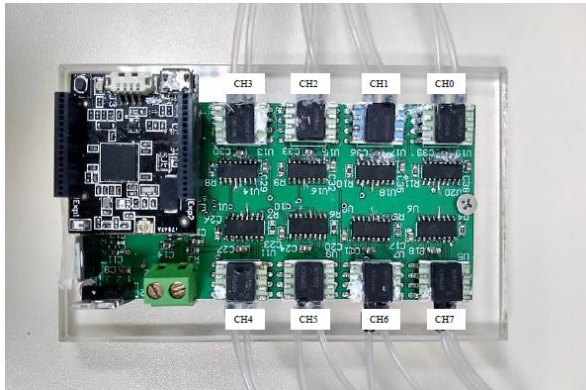
Os dados coletados em escoamento monofásico (somente água) foram obtidos de acordo com o arranjo de coleta apresentado na Figura 4.2. As tomadas de pressão estão posicionadas na mesma altura, 29 cm, em relação à base do venturi. A coleta dos dados foi realizada através de uma placa conectada a oito sensores de pressão diferencial com diferentes escalas de medição, desenvolvida de forma dedicada para esse experimento. A fotografia da placa é apresentada na Figura 4.3. As escalas dos sensores são apresentadas na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 Escala dos sensores de pressão diferencial

	Canais (CH)							
	CH 0	CH 1	CH 2	CH 3	CH 4	CH 5	CH 6	CH 7
Escala dos Sensores (bar)	0,3	0,15	0,5	0,6	0,9	0,8	0,07	0,07

Fonte: Autor (2019).

Figura 4.3 Fotografia da placa com sensores de pressão diferencial. Note a identificação da posição dos canais (CH)



Fonte: Autor (2019).

A placa conta com: cinco sensores de pressão diferencial com alcance de leitura entre  $\pm 15$  psi (TSCDDRN015PDUCV) correspondentes aos canais 0, 2, 3, 4 e 5; um sensor com alcance de  $\pm 5$  psi (NSCDRRN005PDUNV) na posição de canal 1; e dois sensores com alcance de  $\pm 1$  psi (TSCDJN001PDUCV) posicionados nos canais 6 e 7.

No Quadro 4.1, é apresentado a posição de cada sensor da placa em relação à tomada de pressão no venturi. O ponto zero (0) representa a primeira tomada de pressão onde fica o bocal do venturi (à esquerda da Figura 4.4). Os demais pontos são representados de 1 a 6, sendo o número à última tomada de pressão à direita da Figura 4.4. Nessa última figura, é apresentada interfaces gráfica criadas no LabVIEW com medições de pressões diferenciais em relação à entrada do venturi.

As medições dos transdutores contidos na placa de aquisição foram comparadas a medições de transdutores diferenciais de pressão de alta precisão (ômega) para atestar a qualidade dos mesmos. A placa de

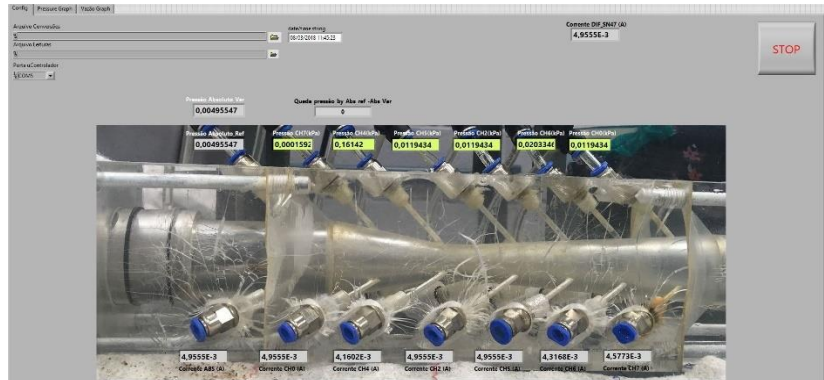
aquisição permite a coleta e transmissão de dados via wi-fi para um computador de análise.

Quadro 4.1 Representação da posição dos sensores utilizados no venturi

Sensor	Posição do venturi						
	0	1	2	3	4	5	6
Todos	CH7	CH4	CH5	CH2	CH0	SN47	

Fonte: Autor (2019).

Figura 4.4 Interface gráfica de um modelo de Virtual Instrument (VI) desenvolvido no LabVIEW

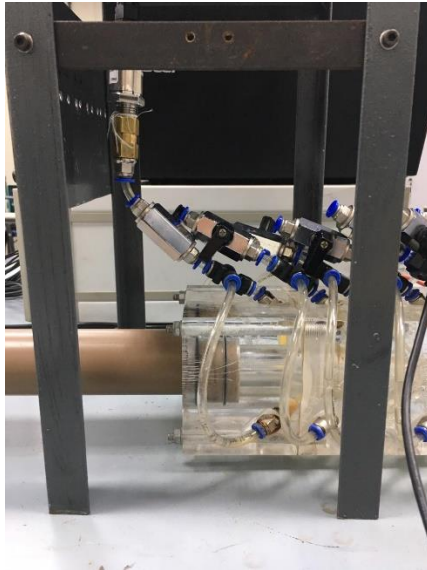


Fonte: Autor (2019).

### 4.3.2 Testes em Escoamento Bifásico

Os testes em escoamentos são mais complexos, e intensas flutuações de pressão ocorrem em cada seção transversal. Dados obtidos pela placa de aquisição foram comparados a dados de sensores da Omega para confirmar as variações de pressão obtidas. No caso de escoamentos bifásicos, medições também serão realizadas com um transdutor de pressão absoluta com alcance de 0-100 psi (Dwyer 628-10-GH-P1-E1-S1) para cada tomada de pressão; ver Figura 4.5. O sensor foi posicionado a uma altura aproximada de 20 cm em relação à base do venturi.

Figura 4.5 Coleta de dados de pressão a partir de transdutor Omega para escoamentos bifásicos



Fonte: Autor (2019).



## 5 RESULTADOS PARCIAIS

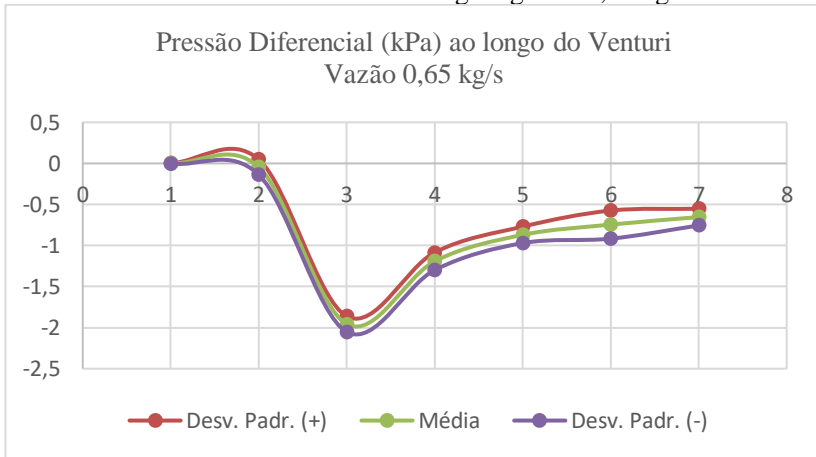
A seguir são apresentados alguns resultados já obtidos até o momento. Após um período aproximado de um ano, a bancada experimental foi concebida, reestruturada e comissionada para permitir escoamentos com três fases distintas: água, óleo de cozinha e ar. A instrumentação (e.g. transdutores de pressão, termopares) foi devidamente instalada. O controle de bombas e compressores é possível através de inversores de frequência e válvulas de controle. As vazões de cada fase são obtidas através de medidores Coriolis, antes da junção dos escoamentos. Os dados de vazão de cada fase, temperatura e pressão da mistura podem ser adquiridos em computador através da plataforma Labview.

### 5.1 ESCOAMENTO MONOFÁSICO (ÁGUA)

Os dados de escoamento monofásico foram coletados a partir de uma placa de medição constituída com sensores de pressão diferencial (PPD). Os sensores dessa placa foram previamente calibrados a partir de colunas estáticas de água. Testes foram realizados em faixas de vazão de água entre  $0,65$  e  $2,15 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$  em períodos de 30 segundos.

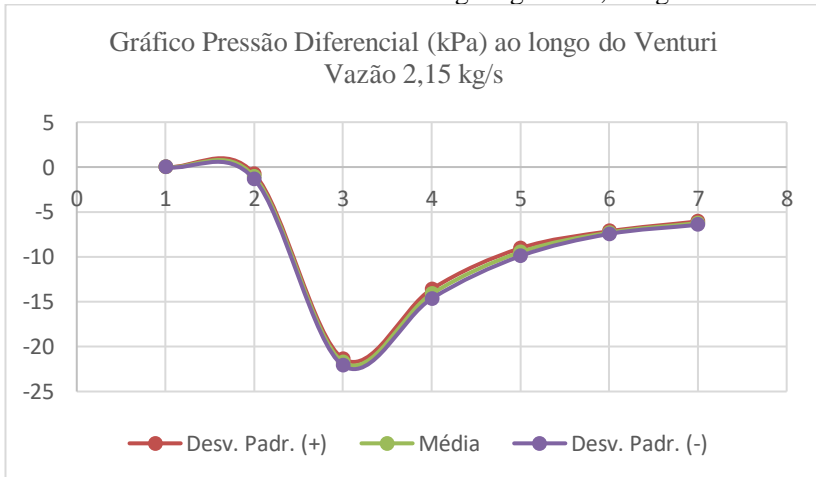
Nas Figuras 5.1 e 5.2 são apresentadas as variações de pressão estática ao longo do venturi para as vazões de  $0,65$  e  $2,15 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$ , respectivamente. Linhas de tendência foram adicionadas aos pontos experimentais, juntamente com o desvio padrão em intervalos de 95% de confiança. As pressões medidas são subtraídas pela pressão estática de entrada (ponto 1, o ponto de maior pressão estática). Um total de sete tomadas de pressão está disponível no venturi. A distância aproximada entre cada ponto é de 2,5 cm. Outros resultados preliminares podem ser vistos no apêndice A.

Figura 5.1 Variação da pressão estática ao longo do venturi para escoamento monofásico com vazão de água igual a 0,65 kg/s



Fonte: Autor (2019).

Figura 5.2 Variação da pressão estática ao longo do venturi para escoamento monofásico com vazão de água igual a 2,15 kg/s



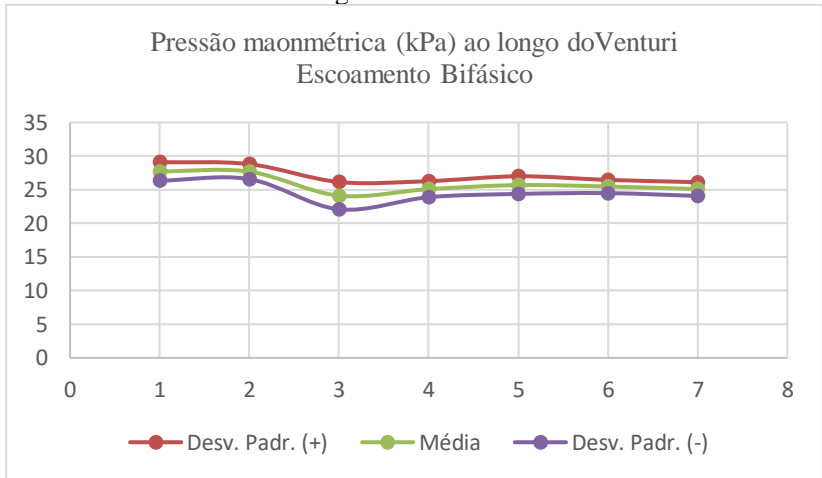
Fonte: Autor (2019).

## 5.2 ESCOAMENTO BIFÁSICO (ÁGUA E AR)

É apresentado na Figura 5.3 um exemplo de medição de escoamento bifásico do tipo ar e água. É apresentada a evolução da

pressão estática manométrica ao longo do venturi para vazões médias de ar e água iguais a 0,00285 kg/s e 0,64382 kg/s, respectivamente. Devido às maiores variações de pressão esperadas para esse tipo de escoamento, dados de pressão estática foram obtidos individualmente para cada ponto de coleta do venturi através de um mesmo sensor (Dwyer 628-10-GH-P1-E1-S1) em períodos de 10 min. O aumento do período de coleta foi necessário para garantir um processo estocástico.

Figura 5.3 Pressão estática manométrica ao longo do venturi para escoamento bifásico de ar e água



Fonte: Autor (2019).



## 6 CRONOGRAMA

Quadro 6.1 Cronograma de Atividades

Atividades a Serem Desenvolvidas	Maio					Junho					Julho					Agosto					Setembro					Outubro					Novembro					Dezembro					Janeiro					Fevereiro				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Desenvolvimento do algoritmo em Matlab	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█																																						
Reparos na placa de sensores de pressão	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█																																								
Ajustes algoritmo, e instrumentação da bancada multifásica.											█	█	█	█	█																																			
Experimentos																█	█	█	█	█	█	█	█	█	█																									
Avaliação dos resultados e preparação da dissertação																										█	█	█	█	█	█	█	█	█	█															
Apresentação																																				█	█	█												

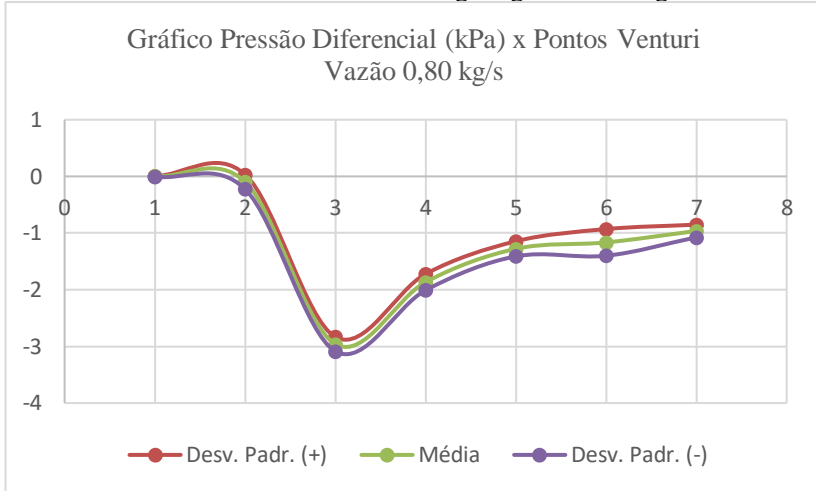


## REFERÊNCIAS

- [1] MINQI LI, 2017, Salt Lake City. **World Energy 2017-2050: Annual Report**. Salt Lake City: Department Of Economics, University Of Utah, 2017. 42 p.
- [2] HUBBERT, Marion King. **Techniques of prediction as applied to the production of oil and gas**. National Bureau of Standards, 1982.
- [3] CORNELIUSSEN, Sidsel. **Handbook of Multiphase Flow Metering**. Lysaker: The Norwegian Society For Oil And Gas Measurement The Norwegian Society Of Chartered Technical And Scientific Professionals, 2005. 115 p.
- [4] OLIVEIRA, Jorge Luiz Goes. **MEDIÇÃO DE VAZÃO DE ESCOAMENTOS BIFÁSICOS UTILIZANDO TUBO DE VENTURI OU PLACA DE ORIFÍCIO ASSOCIADOS A UM SENSOR DE FRAÇÃO DE VAZIO COM CAMPO ELÉTRICO GIRANTE**. 2007. 129 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestre em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.
- [5] FALCONE, Gioia; HEWITT, G. F.; ALIMONTI, Claudio. **MULTIPHASE FLOW METERING: DEVELOPMENTS IN PETROLEUM SCIENCE**. 54. ed. Amsterdam: Elsevier, 2009. 340 p.

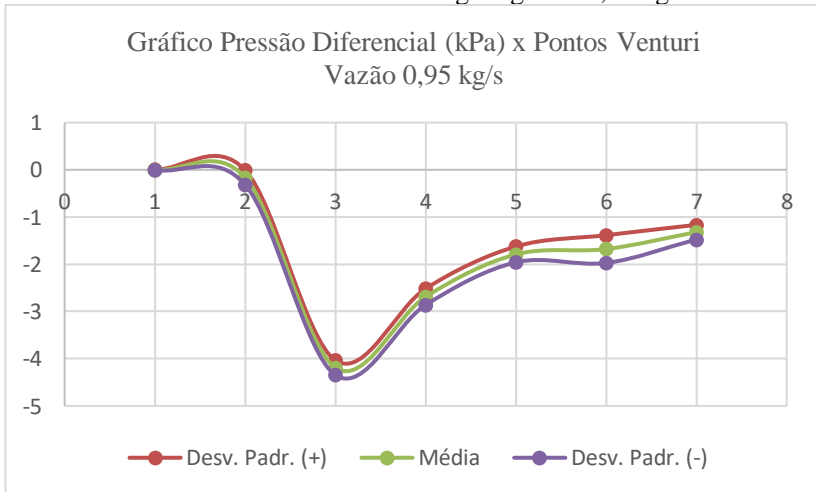
## APÊNDICE A – Resultados Preliminares

Figura A.1 Variação da pressão estática ao longo do venturi para escoamento monofásico com vazão de água igual a 0,80 kg/s



Fonte: Autor (2019).

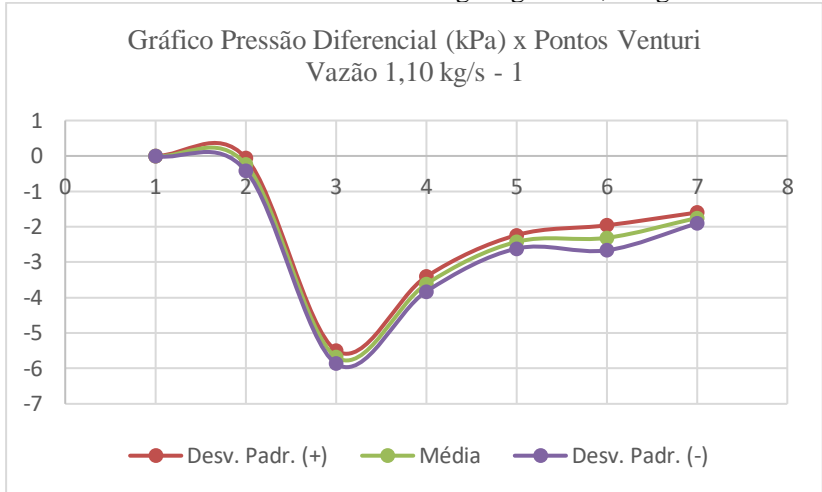
Figura A.2 Variação da pressão estática ao longo do venturi para escoamento monofásico com vazão de água igual a 0,95 kg/s



Fonte: Autor (2019).

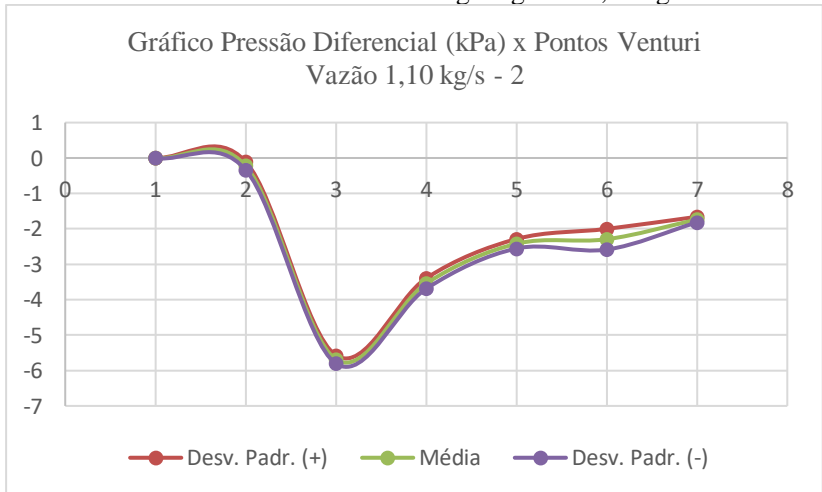


Figura A.3 Variação da pressão estática ao longo do venturi para escoamento monofásico com vazão de água igual a 1,10 kg/s -1



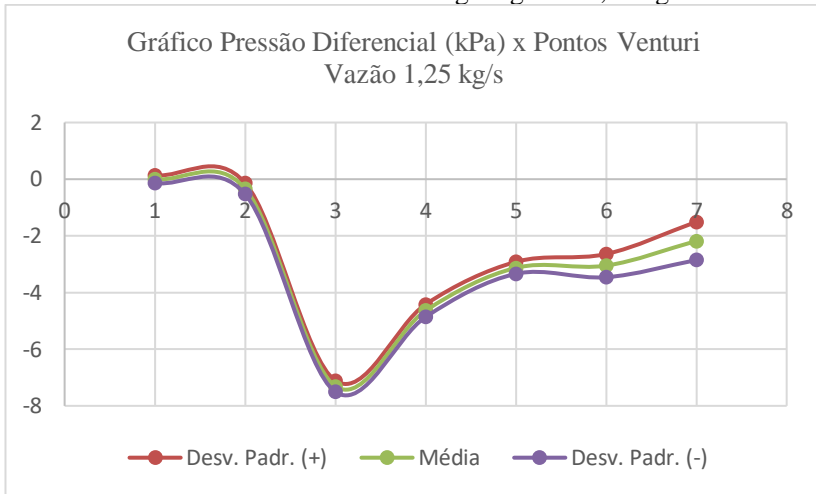
Fonte: Autor (2019).

Figura A.4 Variação da pressão estática ao longo do venturi para escoamento monofásico com vazão de água igual a 1,10 kg/s -2



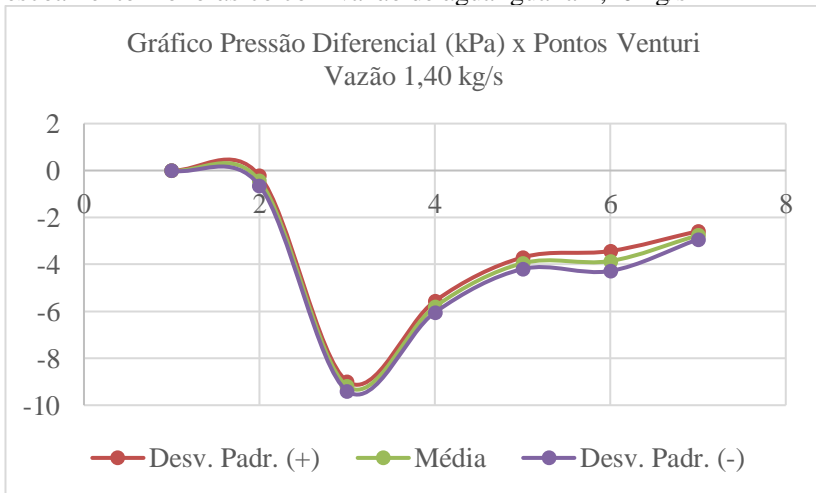
Fonte: Autor (2019).

Figura A. Variação da pressão estática ao longo do venturi para escoamento monofásico com vazão de água igual a 1,25 kg/s



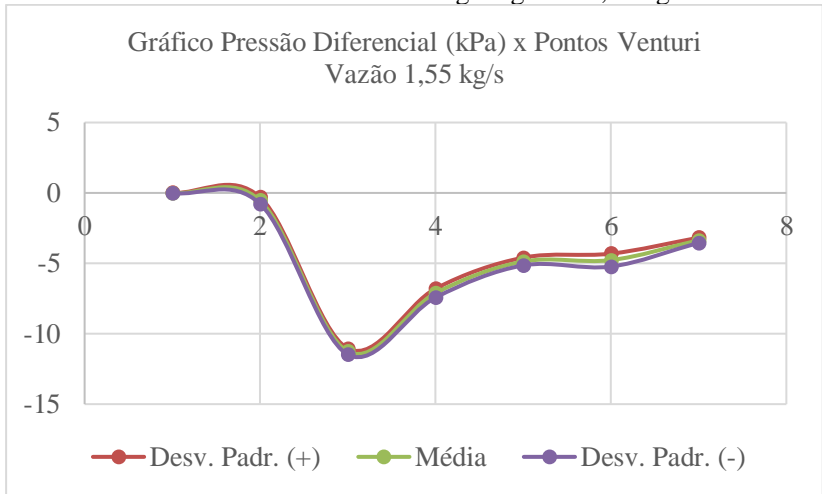
Fonte: Autor (2019).

Figura A.5 Variação da pressão estática ao longo do venturi para escoamento monofásico com vazão de água igual a 1,40 kg/s



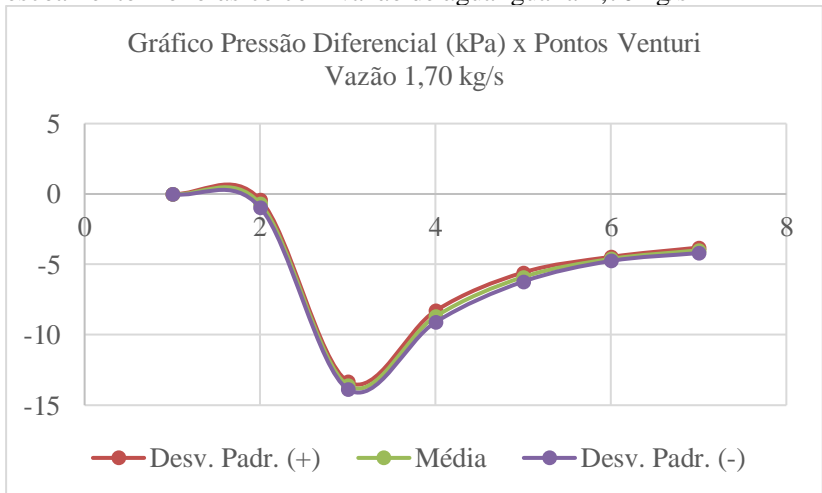
Fonte: Autor (2019).

Figura A.6 Variação da pressão estática ao longo do venturi para escoamento monofásico com vazão de água igual a 1,55 kg/s



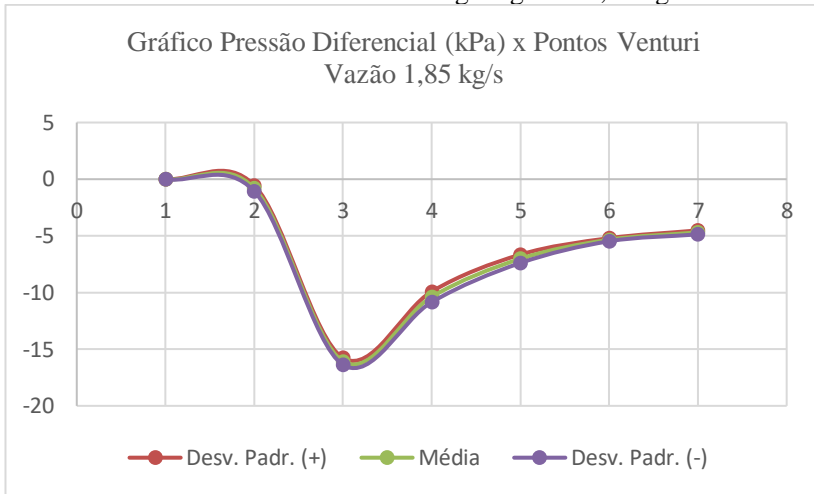
Fonte: Autor (2019).

Figura A.7 Variação da pressão estática ao longo do venturi para escoamento monofásico com vazão de água igual a 1,70 kg/s



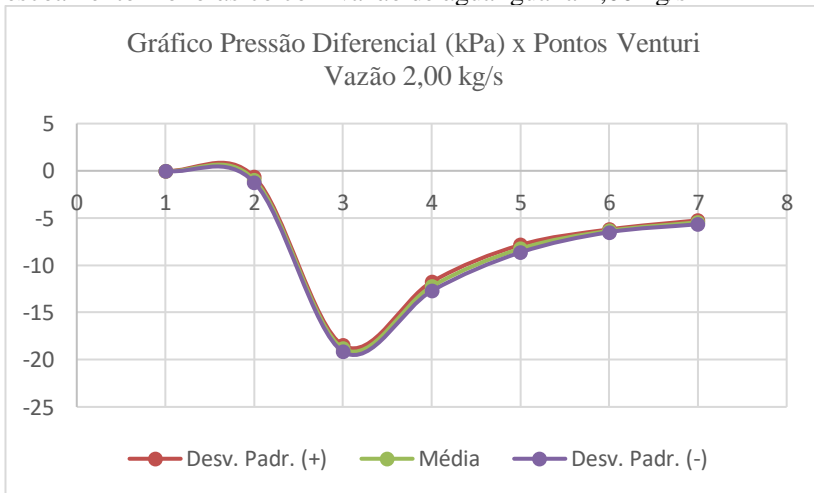
Fonte: Autor (2019).

Figura A.8 Variação da pressão estática ao longo do venturi para escoamento monofásico com vazão de água igual a 1,85 kg/s



Fonte: Autor (2019).

Figura A.9 Variação da pressão estática ao longo do venturi para escoamento monofásico com vazão de água igual a 2,00 kg/s



Fonte: Autor (2019).