



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA  
CAMPUS I – CAMPINA GRANDE  
CENTRO CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO QUÍMICA INDUSTRIAL  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM QUÍMICA INDUSTRIAL**

**ALLAN FIGUEIRÊDO LEITE**

**DESENVOLVIMENTO E MONTAGEM DE UM TUBO DE PITOT DIDÁTICO PARA  
DETERMINAÇÃO DE PERFIL DE VELOCIDADE.**

**CAMPINA GRANDE  
2023**

ALLAN FIGUEIRÊDO LEITE

**DESENVOLVIMENTO E MONTAGEM DE UM TUBO DE PITOT DIDÁTICO PARA DETERMINAÇÃO DE PERFIL DE VELOCIDADE.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento do Curso de Química da Universidade Estadual da Paraíba, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Química Industrial.

**Área de concentração:** Fenômenos de Transporte.

**Orientadora:** Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Maristela Alves da Silva

**CAMPINA GRANDE  
2023**

É expressamente proibido a comercialização deste documento, tanto na forma impressa como eletrônica. Sua reprodução total ou parcial é permitida exclusivamente para fins acadêmicos e científicos, desde que na reprodução figure a identificação do autor, título, instituição e ano do trabalho.

L533d Leite, Allan Figueirêdo.  
Desenvolvimento e montagem de um Tubo de Pitot didático para determinação de perfil de velocidade [manuscrito] / Allan Figueirêdo Leite. - 2023.  
36 p. : il. colorido.

Digitado.  
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Química Industrial) - Universidade Estadual da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia, 2023.  
"Orientação : Profa. Dra. Maristela Alves da Silva, Coordenação do Curso de Química Industrial - CCT. "

1. Medidores de vazão. 2. Mecânica dos fluidos. 3. Protótipo. I. Título

21. ed. CDD 660

ALLAN FIGUEIRÊDO LEITE

**DESENVOLVIMENTO E MONTAGEM DE UM TUBO DE PITOT DIDÁTICO PARA DETERMINAÇÃO DE PERFIL DE VELOCIDADE.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento do Curso de Química da Universidade Estadual da Paraíba, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Química Industrial.

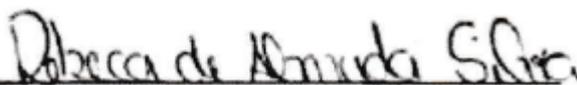
**Área de concentração:** Fenômenos de Transporte.

Aprovada em: 05/12/2023.

**BANCA EXAMINADORA**



Prof<sup>ª</sup>. Dra. Maristela Alves da Silva (Orientadora)  
Universidade Estadual da Paraíba (DQ/CCTUEPB)



Prof<sup>ª</sup>. Dra. Rebeca de Almeida Silva  
Universidade Estadual da Paraíba (DQ/CCTUEPB)



Prof. Dr. Carlos Antônio Pereira de Lima  
Universidade Estadual da Paraíba (DESA/CCTUEPB)

Aos meus familiares, por todo  
carinho, incentivo e cuidado,  
DEDICO.

## **AGRADECIMENTOS**

Dedico este trabalho àqueles que foram luz e inspiração ao longo desta jornada acadêmica. À minha família, pelo amor incondicional e apoio constante; aos amigos, pela paciência e incentivo valioso.

Quero expressar minha sincera gratidão a todos os funcionários de serviços gerais e administrativos da universidade pelo seu trabalho e dedicação foram fundamentais para manter o ambiente mais propício possível para a jornada acadêmica.

A todos os professores do Centro de Ciências e Tecnologia do Curso de Química Industrial da Universidade Estadual da Paraíba, por toda contribuição, ensinamentos e experiências durante todos estes anos de curso.

Cada palavra deste trabalho é um reflexo do apoio e confiança que recebi, e dedico este TCC a todos que acreditaram em mim. Que este seja um tributo ao esforço coletivo que tornou possível este feito. A todos, o meu mais profundo agradecimento.

*“O sucesso é ir de fracasso em fracasso  
sem perder entusiasmo.”*

*Winston Churchill*

## RESUMO

O propósito deste projeto é criar um modelo inicial para medir a velocidade de fluidos através da montagem de um dispositivo conhecido como Tubo de Pitot. Esse dispositivo tem a finalidade de permitir calcular a velocidade de um escoamento em uma tubulação, usando a variação na altura do nível manométrico. Além disso, é possível determinar o regime de escoamento do fluxo para cada velocidade, como também o perfil de velocidade. Os experimentos desenvolvidos têm um propósito didático, visando o ensino e aprendizado dos princípios da mecânica dos fluidos. Para construir o modelo inicial, partiu-se de um protótipo de um Pitot estático e foi realizado um planejamento para a confecção de um Pitot com variações de alturas ao longo da seção transversal da tubulação e foram empregados materiais disponíveis no laboratório (conexões, bancada, manômetro em U, etc..). Os resultados experimentais obtidos foram satisfatórios e estavam em concordância com os conceitos teóricos de um fluido ideal presentes na literatura. Nesse sentido, a equação de Bernoulli foi aplicada para determinação das velocidades do escoamento. Espera-se que este protótipo possa servir a futuros experimentos visando facilitar a compreensão por meio de uma abordagem que integra teoria e prática nas aulas práticas do Laboratório de Fenômenos de Transporte na UEPB - Universidade Estadual da Paraíba.

**Palavras-chave:** medidores de vazão; mecânica dos fluidos; protótipo.

## ABSTRACT

The purpose of this project is to create an initial model to measure fluid velocity by assembling a device known as a Pitot Tube. This device is intended to allow calculating the speed of a flow in a pipe, using the variation in the height of the manometric level. Furthermore, it is possible to determine the flow regime of the flow for each speed, as well as the velocity profile. The experiments developed have a didactic purpose, aiming at teaching and learning the principles of fluid mechanics. To build the initial model, we started with a prototype of a static Pitot and planning was carried out to create a Pitot with height variations along the cross-section of the pipe and materials available in the laboratory were used (connections, bench, U-shaped pressure gauge, etc.). The experimental results obtained were satisfactory and were in agreement with the theoretical concepts of an ideal fluid present in the literature. In this sense, Bernoulli's equation was applied to determine flow velocities. It is hoped that this prototype can serve future experiments aiming to facilitate understanding through an approach that integrates theory and practice in practical classes at the Transport Phenomena Laboratory at UEPB - State University of Paraíba.

**Key words:** flow meters; fluid mechanics; prototype.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Esquema de um tubo de Venturi.....	14
Figura 2 - Esquema de uma placa de orifício .....	15
Figura 3 - Rotâmetro adaptado em uma tubulação para medir vazão. ....	16
Figura 4 - Esquema de medidor tipo Turbina. ....	16
Figura 5 - Esquema de medidor tipo Turbina. ....	17
Figura 6 - Visão geral da formação dos vórtices. ....	18
Figura 7 - Esquema de medidor Calha Parshall.....	19
Figura 8 - Desenho esquemático de um tubo de Pitot utilizado em aeronaves.....	20
Figura 9 - Desenho esquemático de um Tubo de Pitot. ....	22
Figura 10 - Esquema da bancada experimental.....	27
Figura 11 - Fixação das mangueiras no manômetro e das abraçadeiras.....	28
Figura 12 - Acoplamento do tubo de Pitot no suporte. ....	28
Figura 13 - Visão geral da linha após montagem.....	29
Figura 14 - Detalhe da régua graduada fixada no suporte. ....	30
Figura 15 - Perfil de velocidade experimental. ....	32

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dados das propriedades termofísicas .....	31
Tabela 2 - Altura da coluna d'água no manômetro.....	31
Tabela 3 - Resultados experimentais de velocidade e regime de escoamento.....	32

## LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

$\Delta H$	.....	Variação de altura manométrica [m]
$\Delta P$	.....	Variação de pressão [Pa]
$^{\circ}C$	.....	Graus Celsius
$\mu$	.....	Viscosidade dinâmica do fluido [kg/m.s]
Bsp	.....	British Standard Pipe
cm	.....	Centímetro
D	.....	Diâmetro da tubulação [m]
g	.....	Gravidade [m/s <sup>2</sup> ]
h	.....	Altura manométrica da coluna [m]
P	.....	Pressão [Pa]
P <sub>1</sub>	.....	Pressão de estagnação [Pa]
P <sub>2</sub>	.....	Pressão de estática [Pa]
PVC	.....	Policloreto de Vinila
Re	.....	Número de Reynolds [Adimensional]
Rpm	.....	Rotações por minuto
TPU	.....	Poliuretano termoplástico
UEPB	.....	Universidade estadual da Paraíba
$v$	.....	Velocidade [m/s]
$\rho$	.....	Densidade [kg/m <sup>3</sup> ]

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	12
2	OBJETIVOS .....	13
2.1	Objetivo geral .....	13
2.2	Objetivos específicos.....	13
3.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	14
3.1	Medidores de vazão .....	14
3.1.1	<i>Tubo de Venturi</i> .....	14
3.1.2	<i>Placa de Orifício</i> .....	15
3.1.3	<i>Rotâmetro</i> .....	15
3.1.4	<i>Tipo Turbina</i> .....	16
3.1.5	<i>Medidor de vazão Eletromagnético</i> .....	17
3.1.6	<i>Medidor de vazão tipo Vórtex</i> .....	17
3.1.7	<i>Medidor de vazão Calha Parshall</i> .....	18
3.1.8	<i>Tubo de Pitot</i> .....	19
3.1.9	<i>Aplicações</i> .....	20
3.1.10	<i>Vantagens e desvantagens do Tubo de Pitot</i> .....	21
3.2	Teorema de Bernoulli.....	21
3.3	Número de Reynolds.....	24
4.	MATERIAIS E MÉTODOS .....	26
4.1	Materiais.....	26
4.2	Bancada para instalação da linha de ensaios com o Tubo de Pitot .....	26
4.3	Descrição da linha de montagem do dispositivo Pitot .....	27
4.4	Aquisição de dados.....	30
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	31
6	CONCLUSÃO .....	33
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	34

## 1 INTRODUÇÃO

A medição de vazão desempenha um papel crucial no processo de produção empresarial, permitindo o monitoramento e controle das atividades, além da avaliação do desempenho de equipamentos que lidam com líquidos ou gases.

Não existe experimento fácil, nem substituto para o cuidado com a experimentação em diversas áreas da pesquisa básica e desenvolvimento de produtos aplicados. Como a experimentação é tão importante em todas as fases da engenharia, há uma necessidade definitiva de o engenheiro e seus analistas estarem familiarizado com métodos de medição, bem como técnicas de análise para interpretação de dados experimentais (Holman, 2012).

De acordo com as pesquisas de Lermen (2011) e de Gonçalves (2011), a medição precisa e a análise do comportamento do fluxo de fluidos em tubulações têm sido um desafio fundamental tanto na engenharia quanto em diversas outras áreas da ciência e tecnologia. É essencial compreender como a velocidade do fluido varia ao longo da seção transversal de uma tubulação para projetar sistemas eficientes de transporte de fluidos, como tubulações de água, sistemas de refrigeração e processos industriais. Além disso, essa compreensão é crucial para garantir a segurança e o desempenho adequado de muitos sistemas.

Medir a velocidade do fluxo em tubulações é extremamente importante para várias aplicações, como melhorar o desempenho de sistemas de transporte de fluidos, analisar perdas de pressão e avaliar o funcionamento de bombas e válvulas. É essencial compreender como a velocidade varia em diferentes alturas da tubulação para garantir um projeto e operação eficientes desses sistemas.

O Tubo de Pitot é uma sonda que pode ser inserida em um fluxo de fluido para medir as pressões total e estática. Ao calcular a diferença entre essas pressões, é possível determinar a velocidade do fluido. O foco deste estudo está no desenvolvimento de e análise de um protótipo conhecido como Tubo de Pitot, que é uma ferramenta essencial para medir velocidades em fluidos para utilizá-lo em aulas experimentais do componente curricular Fenômenos de Transporte nas determinações de perfil de velocidade em condutos fechados.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo geral**

Desenvolver um protótipo do Tubo de Pitot e utilizá-lo em aulas didáticas experimentais do componente curricular Fenômenos de Transporte para determinar o perfil de velocidade em condutos fechados.

### **2.2 Objetivos específicos**

- Planejamento do esquema da linha de escoamento (linha Pitot);
- Aquisição dos materiais para a montagem do sistema;
- Montagem e ajuste da linha de escoamento para determinação do perfil de velocidade;
- Determinar o número de Reynolds e sua classificação quanto ao regime de escoamento (laminar, turbulento).

### 3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

#### 3.1 Medidores de vazão

Segundo Delmée, 2003, a vazão pode ser definida como sendo a quantidade volumétrica, mássica ou gravitacional de um fluido que passa através de uma seção de uma tubulação ou canal por unidade de tempo. Portanto, o parâmetro vazão pode ser expresso em unidades de volume ou de massa do fluido por unidade de tempo.

A medição da vazão é essencial a todas as fases da manipulação dos fluidos, incluindo a produção, o processamento, a distribuição dos produtos e das utilidades (RIBEIRO, 2004).

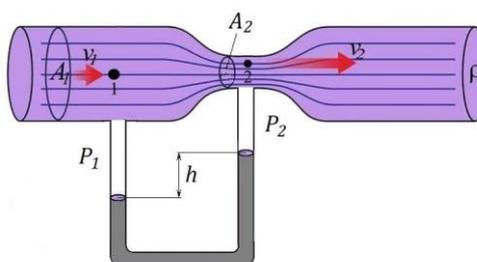
Medidores de vazão são dispositivos usados para medir a vazão de um fluido. Eles são usados em diversas aplicações para monitorar e controlar o fluxo de líquidos ou gases. Existem diferentes tipos de medidores de vazão, cada um com seu próprio princípio de funcionamento e design (ATSUSHI et al. 2001).

Muitos tipos de dispositivos foram desenvolvidos, a partir da equação de Bernoulli, para medir a velocidade de escoamentos e vazões (MUNSON et al, 2004). Alguns tipos de medidores utilizados são:

##### 3.1.1 Tubo de Venturi

O tubo de Venturi é um instrumento que indica a variação da pressão exercida por um líquido que se encontra em movimento por uma tubulação com áreas variáveis, conforme figura 1. O tubo de Venturi, nomeado em homenagem de Giovanni Venturi (1746-1822), um físico italiano que primeiro testou expansões cônicas e contrações.

**Figura 1 - Esquema de um tubo de Venturi**



Fonte: <https://duplacao.com.br/medidores-de-vazao-de-orificio-bocal-e-venturi/>

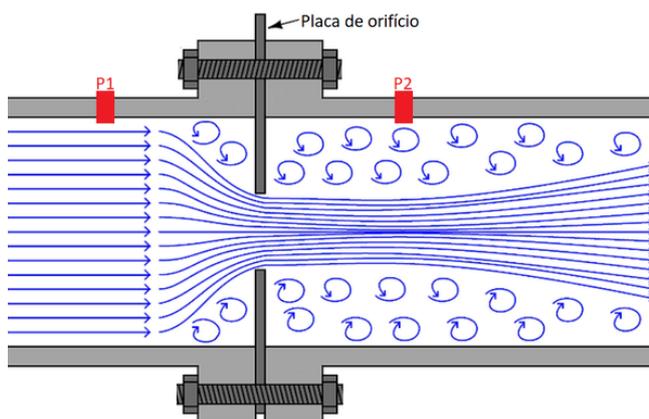
O Venturi original, ou clássico, foi inventado por um engenheiro americano, Clemens Herschel, em 1898. Consistia em uma contração cônica de 21°, uma

garganta reta de diâmetro de comprimento  $d$ , então uma expansão cônica de 7 a 15° (WHITE, 1999).

### 3.1.2 Placa de Orifício

A placa de orifício é o elemento primário de vazão do tipo restrição mais usado. É uma placa fina com um orifício, que geralmente é colocado em um tubo (figura 2). Quando um fluido passa pelo orifício, sua pressão se acumula levemente a montante do orifício. Ela é aplicada na medição de vazão de líquidos limpos e de baixa viscosidade, da maioria dos gases e do vapor d'água em baixa velocidade (RIBEIRO, 2004).

**Figura 2** - Esquema de uma placa de orifício.



Fonte: [https://www.ltiengenharia.com.br/wp-content/uploads/2023/08/3022\\_001\\_01](https://www.ltiengenharia.com.br/wp-content/uploads/2023/08/3022_001_01)

### 3.1.3 Rotâmetro

Segundo White (2011), o rotâmetro é um tubo transparente de área variável com um flutuador que, sob a ação do fluxo, sobe no tubo vertical cônico e assume uma certa posição de equilíbrio para qualquer taxa de fluxo dada. A bóia sobe no tubo cônico para uma posição de equilíbrio que é uma medida da taxa de fluxo de fluido. A capacidade pode ser alterada usando flutuadores de tamanhos diferentes. A figura 3 apresenta um exemplo de rotâmetro empregado para medir vazão.

**Figura 3** - Rotômetro adaptado em uma tubulação para medir vazão.

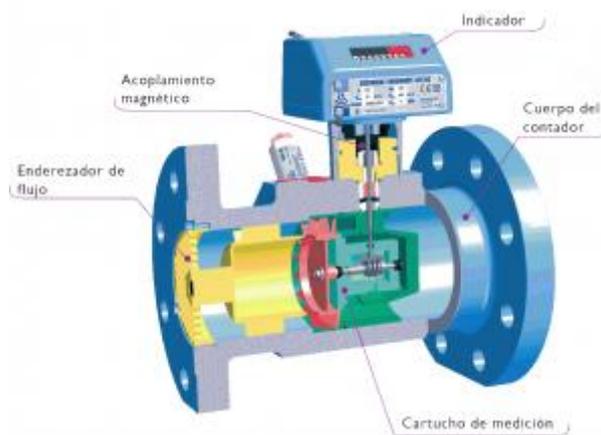


Fonte: <https://indflow.com.br/medidores-de-vazao-e-totalizadores-de-volume/rotametros>

### 3.1.4 Tipo Turbina

Na pesquisa de Baker (1993), o medidor de vazão tipo turbina consiste basicamente em um rotor provido de palhetas suspenso numa corrente de fluido por um eixo de rotação paralelo à direção do fluxo. O rotor é acionado pela passagem de fluido sobre as palhetas em ângulo; sua velocidade angular é proporcional à velocidade do fluido, que por sua vez é proporcional à vazão do volume. A figura 4 apresenta um exemplo de tipo turbina empregado para medir vazão.

**Figura 4** - Esquema de medidor tipo Turbina.

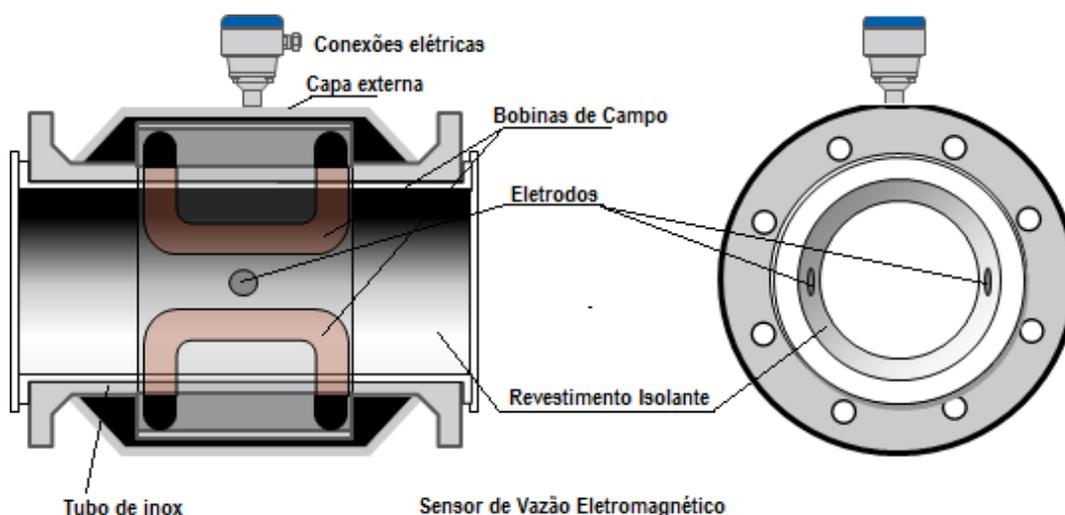


Fonte: <https://sti-gas.com/wp-content/uploads/2016/01/medidor-tipo-turbina-common-esquema-1-300x224.png>

### 3.1.5 Medidor de vazão Eletromagnético

De acordo com Lipták (2003) e Webster (1999), o medidor eletromagnético de vazão representa, inquestionavelmente, um dos dispositivos de medição de vazão mais versáteis e abrangentes disponíveis. Sua característica de perda de carga é comparável à de um trecho retilíneo de tubulação, pois não apresenta obstruções que influenciem o fluxo. Este medidor é praticamente insensível à variação de densidade e viscosidade do fluido a ser medido. Por conseguinte, os medidores eletromagnéticos são excepcionalmente indicados para a medição de fluxos que compreendem substâncias químicas altamente corrosivas, fluidos contendo sólidos em suspensão, lama, água, polpa de papel e uma ampla gama de outros materiais. A figura 5 apresenta um esquema de tipo eletromagnético.

**Figura 5 - Esquema de medidor tipo Turbina.**



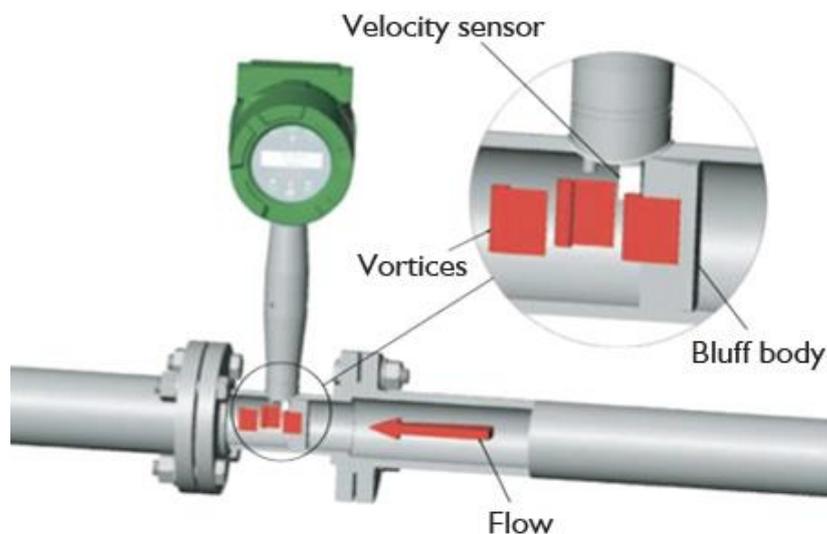
Fonte: [https://www.conaut.com.br/images/Posts/Como\\_Funciona\\_Medidor\\_de\\_vazao/Estrutura\\_do\\_medidor](https://www.conaut.com.br/images/Posts/Como_Funciona_Medidor_de_vazao/Estrutura_do_medidor).

### 3.1.6 Medidor de vazão tipo Vórtex

Já para Gonçalves (2011), quando um fluido se depara com um obstáculo em seu percurso, cria-se uma camada adjacente de fluido que se move de maneira mais lenta ao longo das superfícies exteriores do corpo. Observando a figura 6, caso o obstáculo apresente arestas afiadas, a corrente de fluxo não consegue seguir de forma contínua ao redor do contorno a jusante, ocasionando a separação do fluxo em diversas camadas, resultando na formação de vórtices na região de baixa pressão

logo após o obstáculo. Estes vórtices se desenvolvem alternadamente em ambos os lados do corpo. A frequência com que esses vórtices se formam é diretamente correlacionada com a velocidade do fluido, constituindo assim a base fundamental para o funcionamento do medidor.

**Figura 6 - Visão geral da formação dos vórtices.**

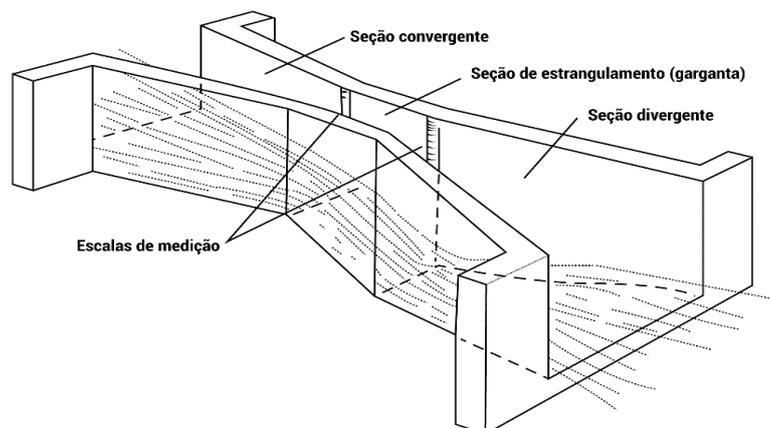


Fonte: <http://www.flowkom.ru/PRODUKT/Pro-VM22.html#th>

### **3.1.7 Medidor de vazão Calha Parshall**

Com os estudos De Assis & Armelin (2021), Tomando como esquema a figura 7, a Calha Parshall é reconhecida como um dispositivo clássico empregado na medição de vazão em canais abertos onde líquidos fluem por gravidade. Amplamente adotada em instalações de tratamento de água, desempenha duas funções essenciais: permite a medição contínua e relativamente simples das vazões de entrada e saída de água do sistema, ao mesmo tempo em que atua como um agente facilitador na rápida mistura dos coagulantes na água, agilizando o processo de coagulação.

**Figura 7 - Esquema de medidor Calha Parshall.**



Fonte: <http://www.fao.org/docrep/r4082e/r4082e06.htm>

### **3.1.8 Tubo de Pitot**

Um tubo Pitot é um instrumento de medição de pressão usado para medir velocidades de fluxo de fluidos (ÇENGEL & CIMBALA, 2008). Ele normalmente utilizado em aeronaves para medir a velocidade do ar, em barcos para medir a velocidade da água e em aplicações industriais para medir velocidades de fluidos (ANTAS,1980).

O tubo de Pitot foi inventado pelo engenheiro francês Henri Pitot em 1732 (FOLSOM, 1956). Desde então, ocorreram muitas adaptações ao tubo de Pitot, sendo as mais conhecidas feitas por Henry Darcy durante a década de 1850 e mais tarde por Ludwig Prandtl. Muitas vezes o tubo de Pitot é referido como tubo de Prandtl devido à contribuição de Prandtl para o seu desenvolvimento. Darcy foi o grande responsável por corrigir certas deturpações na análise teórica anterior de Henri Pitot (DELMÉE, 1982).

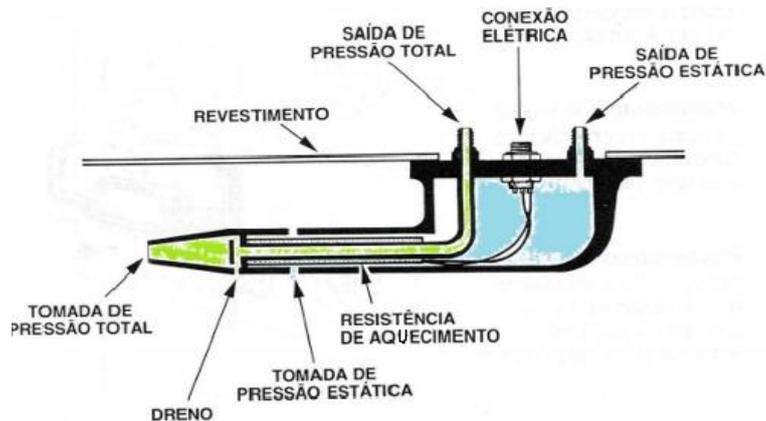
De acordo com Çengel & Cimbala (2015) o tubo de Pitot típico consiste em dois tubos concêntricos (tubos que compartilham o mesmo eixo, mas possuem diâmetros diferentes), o tubo de impacto, que é o tubo interno, e o tubo estático, que é o tubo externo. Seu princípio deriva de fundamentos físicos e encontra ampla aplicação em laboratórios dedicados aos estudos de fluídos, tanto em experimentos de fluxo de água e ar, como em análises de correntes em rios e canais para estimar a vazão por meio da velocidade.

O tubo de impacto consiste em uma abertura na ponta mais distante do tubo, chamada de ponto de estagnação. Neste ponto, a velocidade do fluxo para, e a

pressão correspondente é transmitida para o tubo. Esta pressão é referida como estagnação ou pressão total. O tubo estático, consiste em uma série de furos circunferenciais, deslocados da ponta mais distante do tubo (ÇENGEL & CIMBALA, 2015).

Seguindo as ideias de Munson *et al.* (2004), a série de furos é chamada de pontos estáticos, pois o fluxo forma ângulo reto com os furos e, portanto, apenas a pressão estática e a pressão entram pelos furos. Tomadas individualmente, a estagnação e as pressões estáticas seriam de pouca utilidade. Porém, a diferença entre essas pressões equivale à pressão dinâmica, que é usada para calcular a velocidade do fluxo. Esta velocidade é calculada de acordo com o Teorema de Bernoulli que é detalhado na seção 3.2. A combinação dos tubos de impacto e estáticos, que é um tubo Pitot típico, pode ser vista na Figura 8.

**Figura 8** - Desenho esquemático de um tubo de Pitot utilizado em aeronaves.



Fonte: <https://www.monolitonimbus.com.br/tubo-de-pitot>

### 3.1.9 Aplicações

Embora seja um dos sensores de fluxo mais simples, ele é utilizado em uma ampla variedade de aplicações de estimativa de fluxo.

Algumas de suas aplicações na vida prática são as seguintes:

- É usado em aviões a jato para medir sua velocidade usando a pressão do ar;
- É utilizado em velocímetros marítimos e aeronáuticos.
- Decidir o alcance sobre o qual um medidor de fluxo de vapor mais adequado pode ser utilizado.

### 3.1.10 Vantagens e desvantagens do Tubo de Pitot

Algumas principais vantagens e desvantagens do tubo de Pitot são fornecidas abaixo (WHITE, 1999):

- Vantagens:
  - Prático e simples de introduzir e economicamente adequado para instalar;
  - Não contém peças móveis, isso limita os danos por fricção.;
  - Devido ao seu pequeno tamanho, pode conhecer fluxos líquidos sem fechar o fluxo;
  - A perda de tensão (pressão) é muito pequena;
  - Pode ser facilmente introduzido em condições climáticas extremas, altas temperaturas e situações de tensão.
  
- Desvantagens:
  - Baixa sensibilidade;
  - Requer um fluxo de alta velocidade;
  - Não é apropriado para líquidos sujos ou pegajosos, como remoção de esgoto;
  - Sensibilidade perturbada pela direção do fluxo da corrente;
  - A principal desvantagem do tubo de Pitot é que ele deve estar alinhado com o fluxo direção, que pode ser desconhecida.

### 3.2 Teorema de Bernoulli

A equação de Bernoulli é provavelmente a equação mais famosa e usada em toda a mecânica dos fluidos (WHITE, 1999). De acordo com FOX *et al.* (2006) a Equação de Bernoulli para o uso no Tubo de Pitot, possui algumas restrições a serem seguidas:

1. Escoamento permanente;
2. Escoamento incompressível (líquidos);
3. Escoamento sem atrito;
4. Escoamento ao longo de uma linha da corrente.

O teorema é o meio convencional de calcular a velocidade de um fluido quando se utiliza um tubo de Pitot. A equação (1) representa a Conservação da Energia Mecânica, onde H é a carga total de energia em metros.

$$H_{(m)} = \frac{v^2}{2g} + \frac{P}{\rho g} + Z \quad (1)$$

Onde:

H = Energia total por unidade de peso numa seção ou carga total na seção;

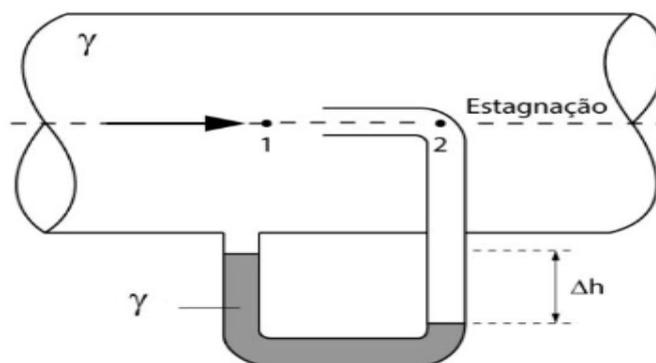
$\frac{v^2}{2g}$  = Energia cinética por unidade de peso ou energia cinética de uma partícula de peso unitário;

$\frac{P}{\rho g}$  = Energia de pressão por unidade de peso ou energia de pressão da partícula de peso unitário;

z = Energia cinética por unidade de peso ou energia cinética de uma partícula de peso unitário.

O Teorema de Bernoulli permite equacionar energias entre dois pontos em um fluido. No caso do tubo de Pitot, de acordo com Thorn *et al.* (1999), os dois pontos são os pontos 1 e 2 da Figura 9. O ponto 1 se refere ao escoamento e o ponto 2, o ponto de estagnação.

**Figura 9** - Desenho esquemático de um Tubo de Pitot.



Fonte: <https://www.guiadaengenharia.com/aplicacoes-equacao-bernoulli>.

A partir da Equação (1) que iguala a energia entre os dois pontos, temos a equação (2).

$$\frac{v_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\rho} + Z_1 = \frac{v_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\rho} + Z_2 \quad (2)$$

Na Equação (2),  $z_1$  e  $z_2$  são iguais, pois o centro radial dos furos nos pontos 2 tem a mesma elevação do ponto 1, portanto,  $z_1$  e  $z_2$  se cancelam. Além disso,  $V_2$  é zero, pois no ponto de estagnação o fluxo para. Dessa forma, a Equação (2) se torna:

$$\frac{V_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\rho} = \frac{P_2}{\rho} \quad (3)$$

Reorganizando-se a Equação (3) em termos da velocidade  $V_1$  calcula-se a velocidade do fluxo a partir da diferença entre as duas leituras de pressão. O resultado é mostrado na equação (4).

$$V_1 = \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho}} \quad (4)$$

Para Mudson et al. (2004), as pressões que entram pelos pontos 1 e 2 são mantidas separadas umas das outras por causa dos tubos concêntricos. Nos tubos concêntricos, são as elevações das superfícies da água que são utilizadas para calcular as pressões. As elevações ( $h$ ) são registradas em mm e são utilizadas na equação abaixo para calcular a carga de pressão correspondente ( $\Delta P$ ). A carga de pressão correspondente calculada aqui é a usada na equação de Bernoulli reorganizada equação (5).

$$\Delta P = \rho_{\text{água}} . g . h \quad (5)$$

O conhecimento dos valores das pressões estática e dinâmica no escoamento nos permite calcular a velocidade local do escoamento e esta é a base do funcionamento do tubo de Pitot (MUDSON *et al.* 2006). Finalizando a equação (6), temos:

$$v_1 = \sqrt{\frac{2 \cdot \rho_{\text{água}} \cdot g \cdot h}{\rho_{\text{ar}}}} \quad (6)$$

Onde:

$v$  = Velocidade do fluido (m/s);

$\rho_{\text{água}}$  = Densidade específica da água (kg/m<sup>3</sup>);

$\rho_{\text{ar}}$  = Densidade específica do Ar (kg/m<sup>3</sup>);

$g$  = Aceleração da gravidade (m/s<sup>2</sup>);

$h$  = Altura manométrica da coluna (m);

### 3.3 Número de Reynolds

O número de Reynolds (NRe ou Re) é utilizado para classificar o regime de escoamento, no qual representa uma relação fundamental entre as forças dinâmicas associadas à vazão de massa e a viscosidade do fluido, podendo ser determinado por meio da seguinte equação (7):

$$\text{Re} = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu} \quad (7)$$

onde:

Re = número de Reynolds (adimensional);

$\rho$  = densidade absoluta (kg/m<sup>3</sup>);

$v$  = velocidade (m/s);

$D$  = diâmetro da tubulação (m);

$\mu$  = viscosidade absoluta (Pa.s).

Sabendo que a viscosidade cinemática é a relação entre viscosidade dinâmica pela densidade, temos a (Equação 8):

$$v = \frac{\mu}{\rho} \quad (8)$$

Onde:

$\nu$  = viscosidade cinemática (m<sup>2</sup>/s);

$\mu$  = viscosidade dinâmica (Pa.s).

$\rho$  = densidade absoluta (kg/m<sup>3</sup>);

Logo, podemos fornecer uma maneira útil de caracterizar o fluxo. É definido como equação (9):

$$\text{Re} = \frac{V \cdot D}{\nu} \quad (9)$$

Onde:

$\nu$  = é a viscosidade cinemática da água (m<sup>2</sup>/s);

$V$  = é a velocidade média do escoamento (m/s);

$D$  = é o diâmetro da tubulação (m).

O número de Reynolds indica o tipo de escoamento de um fluido. Valores pequenos de Reynolds (Re) influem em um escoamento laminar, já valores altos estão associados à escoamento turbulento, uma vez que a dinâmica de escoamento está fundamentalmente associada a Reynolds (AGUIAR & RUBINI,2004).

A experiência de Reynolds visa estabelecer o número de Reynolds crítico associado ao fluxo dentro de um tubo, no qual a transição ocorre do estado laminar (Reynolds < 2000) para um estado transicional (2000 < Reynolds < 4000) e posteriormente para um estado turbulento (Reynolds > 4000).

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste trabalho, será apresentada a metodologia em duas seções, na primeira será relatada todos os materiais envolvidos na construção do protótipo, e na segunda todo o procedimento de montagem e coleta de dados.

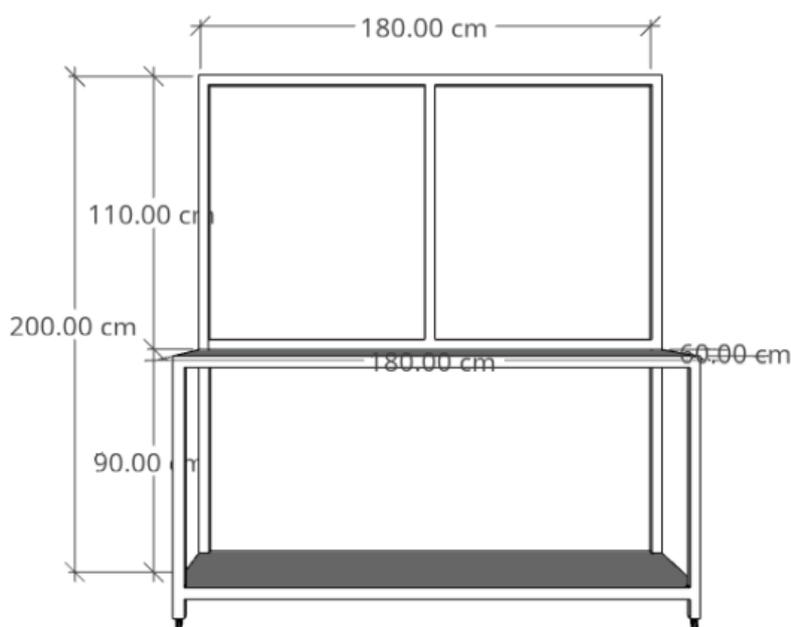
### 4.1 Materiais

- ✓ Tubo de acrílico com as seguintes dimensões comprimento = 50 cm; diâmetro externo = 7,4 cm; Espessura = 3mm
- ✓ 2 Abraçadeira PVC para tubos de 85mm a 114mm
- ✓ 2 Parafuso Aço Inox Cabeça Sextavada Rosca Soberba de 40mm;
- ✓ 2 Arruela lisa zincada branco com diâmetro externo = 19mm; interno = 7mm; espessura = 1,6mm;
- ✓ Furadeira;
- ✓ Manômetro perfil (U) de 500mm;
- ✓ Mangueira de conexões poliuretano termoplástico (TPU);
- ✓ Conexão reta pneumática de engate rápido 1/4 bsp x tubo 6 mm;
- ✓ Tubo de cobre de diâmetro 4,76mm (L);
- ✓ Soprador/Aspirador elétrico de 13000 rpm;
- ✓ Termômetro;
- ✓ 2 Bucha de borracha de material reciclável;
- ✓ Suporte para Tubo de 45mm;

### 4.2 Bancada para instalação da linha de ensaios com o Tubo de Pitot

Foi utilizada para montagem do protótipo uma bancada para fixar os suportes para este experimento de modo que todos os materiais ficassem fixo sem nenhuma vibração de modo a não interferir na coleta de dados. A bancada foi projetada de acordo com a figura 10, tanto para fixação desse protótipo, quanto para fixar outros dispositivos de medidores de vazão.

**Figura 10** - Esquema da bancada experimental.

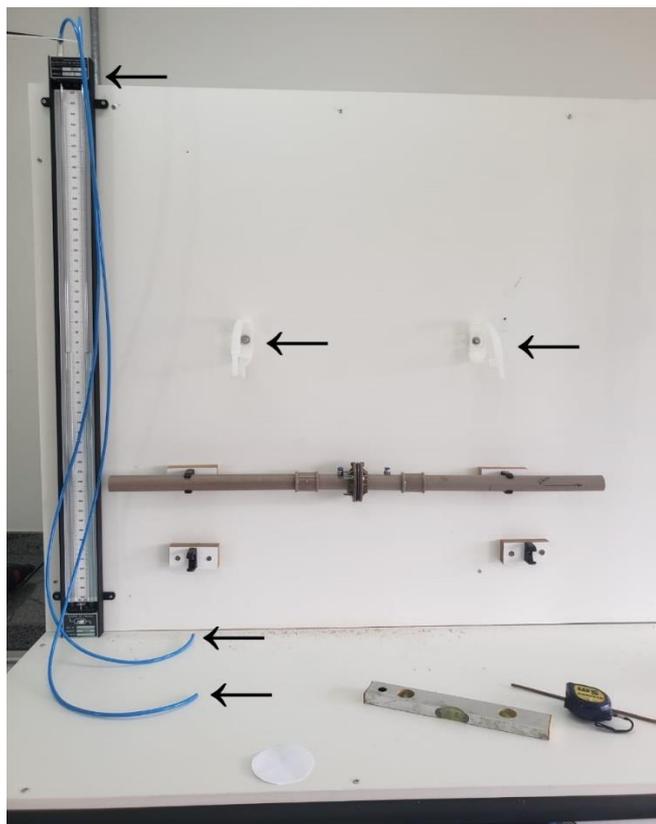


Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

### 4.3 Descrição da linha de montagem do dispositivo Pitot

Neste item serão descritos o passo a passo da montagem da linha Pitot para os ensaios de determinação da velocidade do escoamento. Iniciou-se as atividades da seguinte forma: na parte superior esquerda da bancada, foi fixado um manômetro de perfil (U), conforme figura 11. Em cada ponto do manômetro foi fixada uma mangueira, a primeira para conectar diretamente com o tubo de Pitot e segunda foi acoplada diretamente na tubulação. Ainda nesta figura, pode-se observar que ao lado do manômetro, foi fixado 2 abraçadeiras PVC para tubos de 85mm a 114mm para segurar o tubo de acrílico.

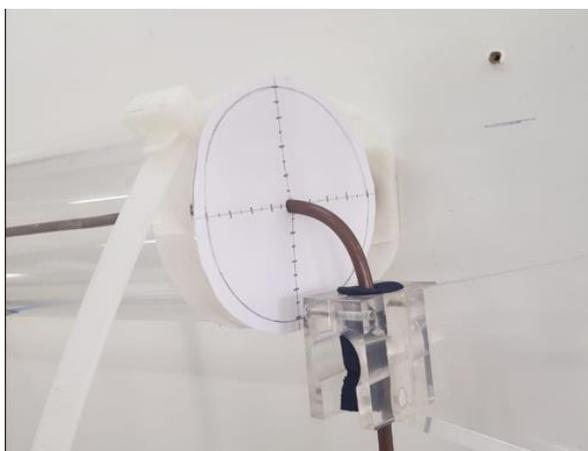
**Figura 11** - Fixação das mangueiras no manômetro e das abraçadeiras.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

A figura 12 apresenta um detalhe do tubo de acrílico fixado na bancada e o tubo de Pitot centralizado dentro da tubulação. Foram utilizadas 2 buchas de borracha de modo a estabilizar o tubo a reter vibrações indesejadas. Para centralizar o tubo de Pitot, foi desenhado uma circunferência de 8 cm com um furo no centro.

**Figura 12** - Acoplamento do tubo de Pitot no suporte.

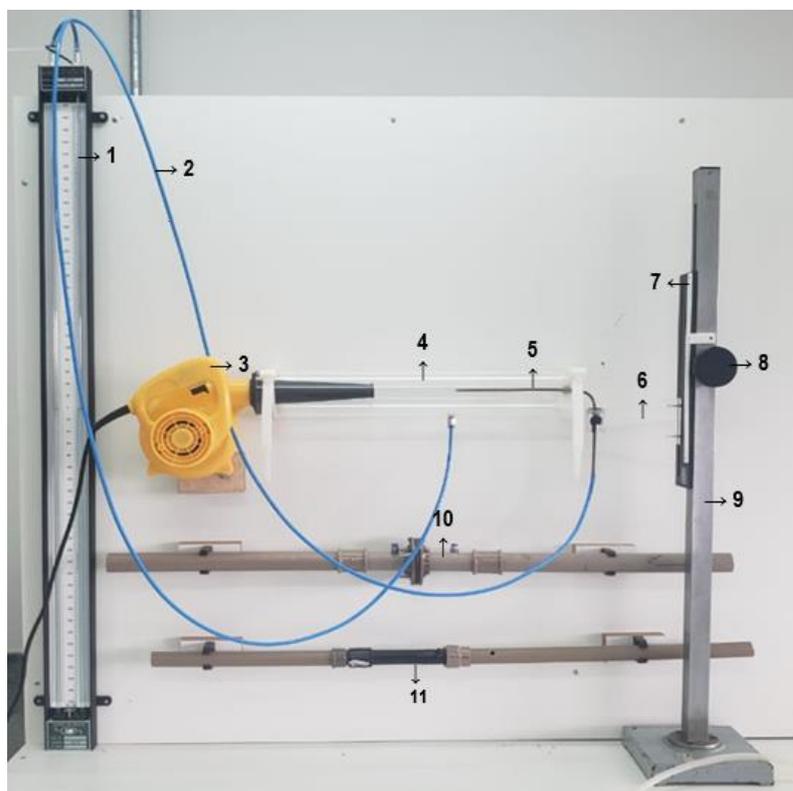


Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

A figura 13 apresenta uma visão geral da linha de experimento montada para aquisição de dados com o dispositivo Pitot. A seguir serão detalhados cada item que compõe a estrutura conforme numerações colocadas na figura.

1. Manômetro em U com régua de graduação;
2. Mangueiras que ligam o manômetro ao tubo de Pitot e a tubulação para as tomadas de pressão (variação de pressão);
3. Soprador: utilizado como fonte do fluxo de ar para dentro do tubo de acrílico;
4. Tubo de acrílico transparente;
5. Tubo de cobre curvado em 90° (tubo de Pitot);
6. Adaptador para o tubo de Pitot;
7. Régua móvel acoplada ao adaptador para deslocamento vertical do tubo de Pitot dentro da tubulação;
8. Parafuso para movimentação do conjunto (régua e adaptador);
9. Suporte vertical com base quadrada;
10. Linha da placa de orifício;
11. Linha do tubo de Venturi;

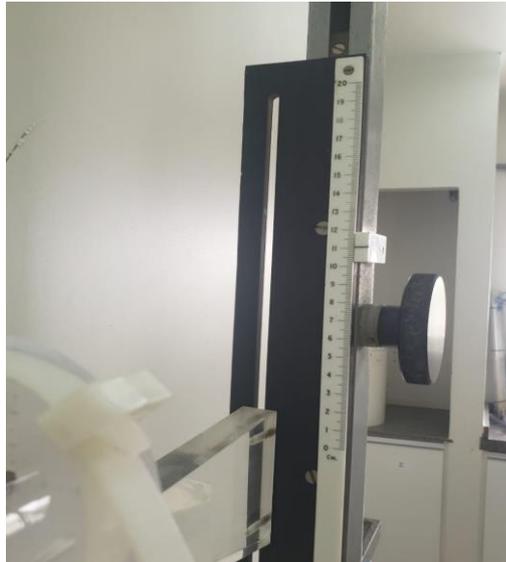
**Figura 13** - Visão geral da linha após montagem.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

A figura 14 apresenta um detalhe do conjunto régua graduada fixada o suporte e acoplada ao adaptador que fixa o tubo de Pitot. O parafuso é responsável pela movimentação do Pitot e consequentemente a variação de altura.

**Figura 14** - Detalhe da régua graduada fixada no suporte.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

#### 4.4 Aquisição de dados

A coleta de dados, iniciou-se com a aferição da temperatura do ambiente para correlacionar as propriedades termodinâmicas dos fluidos que foram utilizados. Em seguida o soprador foi acionado e as primeiras medidas de variação de pressão foram anotadas. Após várias medidas de variação de pressão a velocidade do escoamento foi calculada de acordo com a equação (6):

$$v_1 = \sqrt{\frac{2 \cdot \rho_{\text{água}} \cdot g \cdot h}{\rho_{\text{ar}}}}$$

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste segmento específico, iremos expor e detalhar minuciosamente os resultados alcançados por meio do dispositivo experimental que foi meticulosamente concebido e montado para esta finalidade. A seguir serão apresentados os resultados obtidos com a linha de teste Pitot. A tabela 1 apresenta os dados termodinâmicos considerando a temperatura do ambiente no dia do experimento.

**Tabela 1** - Dados das propriedades termofísicas.

Temperatura (°C)	25
$\rho$ água (kg/m <sup>3</sup> )	997
$\rho$ ar (kg/m <sup>3</sup> )	1,18
g (m/s <sup>2</sup> )	9,8
Viscosidade cinemática do Ar (m <sup>2</sup> /s)	$1,56 \times 10^{-5}$

Fonte: Çengel & Cimbala, 2015.

A tabela 2 apresenta as alturas manométrica de acordo com alteração na posição do tubo de Pitot dentro do tubo, onde os dados positivos consideram-se acima da posição central interna do tubo e a negativa abaixo da posição central.

**Tabela 2** - Altura da coluna d'água no manômetro.

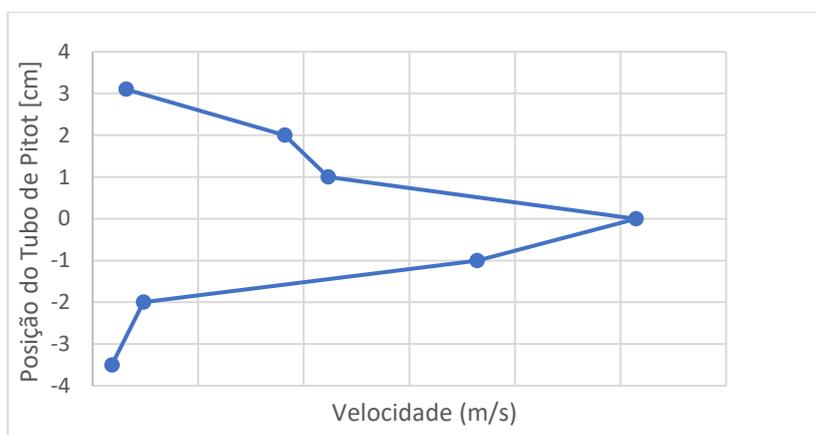
Ensaio	$\Delta H$ - Manômetro (m)	Posição do Pitot (cm)
1	0,0006	3,1
2	0,02	2
3	0,03	1
4	0,16	0
5	0,08	-1
6	0,0014	-2
7	0,0002	-3,5

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

A partir dos dados da tabela 2, construiu-se o perfil de velocidade, conforme apresentado na figura 15. Observa-se nesta figura que apesar das flutuações apresentadas na distribuição dos pontos experimentais, ainda assim é possível observar a tendência no perfil de velocidade da curva mostrando o ponto de máxima velocidade. Essas flutuações podem ser explicadas em função de algumas variações

do próprio experimento como a entrada do escoamento e a manutenção do tubo de Pitot sem inclinação apreciável.

**Figura 15** - Perfil de velocidade experimental.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

A partir dos cálculos de velocidades realizados, foi possível calcular o número de Reynolds ( $Re$ ), e conseqüentemente a classificação quanto ao regime de escoamento apresentado na tabela 3. Observa-se um alto valor de velocidade e número de Reynolds, devido ao soprador utilizado que conferiu um escoamento bastante turbulento.

**Tabela 3** - Resultados experimentais de velocidade e regime de escoamento.

ensaio	$\Delta H$ - Manômetro (m)	Posição do Pitot (cm)	Velocidade (m/s)	Reynolds	Regime de escoamento
1	0,0006	3,1	3,15	14.952,6	Turbulento
2	0,02	2	18,20	86.329,0	Turbulento
3	0,03	1	22,29	105.731,0	Turbulento
4	0,16	0	51,47	244.175,3	Turbulento
5	0,08	-1	36,40	172.658,0	Turbulento
6	0,0014	-2	4,82	22.840,5	Turbulento
7	0,0002	-3,5	1,82	8.632,9	Turbulento

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

## 6 CONCLUSÃO

A execução do experimento, fundamentada na teoria e aplicação prática, demonstrou com sucesso a capacidade de determinar velocidades de escoamento de um fluido. Diante dos resultados apresentados (tabelas e gráfico), a linha Pitot de aquisição de dados de velocidade em tubulação montada em bancada experimental mostrou que o dispositivo confeccionado atendeu aos objetivos propostos de entendimento conceitual, já que foi possível medir a velocidade de acordo com as diferentes alturas internas do tubo. Nesse contexto, o dispositivo apresentou resultados que após mais alguns ajustes a bancada, com a linha Pitot poderá ser utilizada em aulas didáticas experimentais.

A identificação de pequenas discrepâncias nos valores das velocidades pode ser atribuída a uma variedade de fatores, tais como possíveis imprecisões decorrentes da etapa de ajustes durante a operação ou configurações de processamento que não atingiram um nível ótimo.

Neste estudo, uma grande parte da pesquisa foi voltada para o projeto e construção do equipamento experimental. Então, há algumas recomendações para melhorar o projeto do experimento para novas experimentações, são elas:

- Testar uma variedade de taxas de fluxo;
- Reguladores de fluxo: Para controlar o fluxo de fluido durante o experimento;
- Aquisição de um Tubo de Pitot industrial para melhorar a coleta de dados;
- Aumentar o comprimento da tubulação distanciando a fonte de fluxo com o tubo de Pitot;

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIAR, C.E. RUBINI, G. **A aerodinâmica da bola de futebol**. Revista Brasileira de Ensino de Física, Rio de Janeiro, v. 26, p.297-306, 31 nov. 2004.

APLICAÇÕES DA EQUAÇÃO DE BERNOULLI. Guidaengenharia, 2019.  
<https://www.guiadaengenharia.com/aplicacoes-equacao-bernoulli/>. Acesso em: 16 de out. 2023.

ATSUSHI, K., Kiyoshi, Y., Shinya, F., Kenichi, H. **Método de medição de vazão e medidor de vazão**. v. 1. 2001.

ANTAS, Luiz Mendes. **Dicionário de termos técnicos**. 3. ed. São Paulo: Traço, 1980. 948 p. (Coleção Aeroespacial; t. 2.)

BAKER, R. C. “**Turbine and related flowmeters: I. Industrial practice**”. Flow Measurement and Instrumentation. v. 2, pp. 147-161, 1991.

BRUNETTI, F. **Mecânica dos Fluidos**. 2. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, v. 1, 2008.

**COMO FUNCIONA UM MEDIDOR DE VAZÃO ELETROMAGNÉTICO**. Conaut, 2023. <https://www.conaut.com.br/blog/98-como-funciona-medidor-eletromagnetico>. Acesso em: 9 de nov. 2023.

ÇENGEL, Y. A.; CIMBALA, J. M. **Mecânica dos fluidos**. Rio de Janeiro: MCGRAW-HILL Brasil, v. 1, 2008.

ÇENGEL, Y. A.; CIMBALA, J. M. **Mecânica dos fluidos-3**. [S.l.]: Amgh Editora, 2015.

DELMÉE, G. J. **Manual de Medição de Vazão**. 2.<sup>a</sup> ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1938.

DELMÉE, G. J. **Manual de Medição de Vazão**. 3.<sup>a</sup> ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2003. ISBN 85-212-0321-7.

DE ASSIS, Guilherme & Armelin, Liliâne. **Avaliação da vazão escoada por meio da calha Parshall (modelo Armfield)**. Revista DAE. 2021.

FOLSOM, R. G. **Review of the pitot tube**. *Transactions of the American Society of Mechanical Engineers, American Society of Mechanical Engineers*, v. 78, n. 7, p. 1447–1460, 1956.

FOX, R. W.; McDONALD, A. T.; PRITCHARD, P. J. **Introdução a mecânica dos fluidos**. 6. ed. Rio de Janeiro: Livros Tecnicos e Científicos Editora S. A., v. 1, 2006.

GONÇALVES, Genildo Marques. **Medidor Vórtex – Conceitos, tecnologia e aplicações na medição de vazão**. *Petro & Química, SP*, out. de 2011, n° 336, p. 48-52.

HOLMAN, J.P. **Experimental Methods for Engineers**. 8ª ed. McGraw-Hill. v. 1. 2012.

**IRRIGATION SYSTEM**. Fao, 2013. <https://www.fao.org/3/r4082e/r4082e06.htm>. Acesso em: 11 de nov. 2023.

J. R. Van Wazer, J. W. Lyons, K. Y. Kim e R. E. Colwell. **Viscosity and Flow Measurement**, Wiley-Interscience, New York (1963).

LERMEN, R. **Estudo dos conceitos e metodologias envolvidas em sistemas de medição de vazão**. (FAHOR) 2011.

LIPTÁK, B. G. **Instrument Engineers' Handbook – Process Measurement and Analysis**. ISA – The Instrumentation Systems, and Automation Society Vol.1, 2003,

**MEDIDOR-TIPO-TURBINA-COMMON-ESQUEMA**. sti-gas, 2016. <https://sti-gas.com/wp-content/uploads/2016/01/medidor-tipo-turbina-common-esquema-1-300x224>. Acesso em: 10 de nov. 2023.

**MEDIÇÃO DE VAZÃO – PARTE 02 DE 05**. Ltiengenharia, 2023. <https://www.ltiengenharia.com.br/2023/08/22/medicao-de-vazao-parte-02-de-05/>. Acesso em: 11 de nov. 2023.

MUNSON, B. R.; YOUNG, D. F.; OKIISHI, T. H. **Fundamentos da mecânica dos fluidos**. 4. ed. São Paulo: Edgard Blucher, v. 1, 2004.

**OS MEDIDORES DE VAZÃO DE ORIFÍCIO, BOCAL E VENTURI FAZEM O USO DA EQUAÇÃO DE BERNOULLI PARA CALCULAR A VAZÃO DO FLUIDO USANDO A DIFERENÇA DE PRESSÃO ATRAVÉS DE OBSTRUÇÕES NA VAZÃO**. Duplacao ,2023. Disponível em: <https://duplacao.com.br/medidores-de-vazao-de-orificio-bocal-e-venturi/>. Acesso em: 11 de nov. 2023.

PINTO, M. S. S. **Especificações de projeto para medição de velocidade de vento utilizando anemômetro ultra-sônico com método de diferença de fase**. p. 70. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Maranhão. São Luís, 2006.

**PRO-VM22**. Flowkom, 2010. <http://www.flowkom.ru/PRODUKT/Pro-VM22.html>. Acesso em: 11 de nov. 2023.

**ROTÂMETRO PARA LÍQUIDOS E GASES – INF-R-P**. Indflow Soluções Industriais, 2018. Disponível em: <https://indflow.com.br/medidores-de-vazao-e-totalizadores-de-volume/rotametros/rotametro-modelo-inf-r-p/>. Acesso em: 15 nov. 2023.

**TUBO DE PITOT E O ACIDENTE DA AIR FRANCE**. monolitonimbus, 2013. <https://www.monolitonimbus.com.br/tubo-de-pitot-e-acidente-air-france/>. Acesso em: 16 de nov. 2023.

THORN R, Melling A, Köchner H, Haak R, Husain ZD. **Flow measurement**. In: Webster JG, editor. *Crc Press. Meas. Instrumentation, Sensors Handb*. Boca Raton: CRC Press LLC; 1999.

WEBSTER, J. G. **The Measurement, Instrumentation and Sensors Handbook**. CRC Press LLC. 1999

WHITE, F. M. **Mecânica dos Fluidos**. 4ª ed. McGraw-Hill. v. 1. 1999.

WHITE, F. M. **Mecânica dos Fluidos**. 7ª ed. McGraw-Hill. v. 1. 2011.

RIBEIRO M. A. **Medição de vazão**. 6ª Edição. v. 1. 2004.