



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CAMPUS DE RUSSAS

MATHEUS RIBEIRO BARRETO

**OBTENÇÃO DO COEFICIENTE DE DESCARGA DO TUBO VENTURI DA
BANCADA DE MECÂNICA DOS FLUIDOS MF1000 POR MEIO DE TRANSDUTOR
DE PRESSÃO E UMA COMPARAÇÃO COM OS DADOS DO FABRICANTE**

RUSSAS - CE

2023

MATHEUS RIBEIRO BARRETO

OBTENÇÃO DO COEFICIENTE DE DESCARGA DO TUBO VENTURI DA BANCADA
DE MECÂNICA DOS FLUIDOS MF1000 POR MEIO DE TRANSDUTOR DE PRESSÃO
E UMA COMPARAÇÃO COM OS DADOS DO FABRICANTE

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao curso de Engenharia Mecânica da
Universidade Federal do Ceará, Campus
Russas, como requisito parcial para obtenção
do título de Engenheiro Mecânico.

Orientador: Prof. Dr. Camilo Augusto Santos
Costa.

RUSSAS

2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

B263o Barreto, Matheus Ribeiro.

Obtenção do coeficiente de descarga do tubo Venturi da bancada de Mecânica dos Fluidos MF1000 por meio de transdutor de pressão e uma comparação com os dados do fabricante / Matheus Ribeiro Barreto. – 2023.

67 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Russas, Curso de Engenharia Mecânica, Russas, 2023.

Orientação: Prof. Dr. Camilo Augusto Santos Costa.

1. Experimento. 2. Medidor Venturi. 3. Automatização. 4. Coeficiente de descarga. I. Título.

CDD 620.1

MATHEUS RIBEIRO BARRETO

OBTENÇÃO DO COEFICIENTE DE DESCARGA DO TUBO VENTURI DA BANCADA
DE MECÂNICA DOS FLUIDOS MF1000 POR MEIO DE TRANSDUTOR DE PRESSÃO
E UMA COMPARAÇÃO COM OS DADOS DO FABRICANTE

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao curso de Engenharia Mecânica da
Universidade Federal do Ceará, Campus
Russas, como requisito parcial para obtenção
do título de Engenheiro Mecânico.

Aprovado em: 21 / 11 / 2023

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Camilo Augusto Santos Costa
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Profa. Dra. Caroliny Gomes de Oliveira
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. George Luiz Gomes de Oliveira
Universidade Federal do Ceará (UFC)

In memoriam José Matos, querido avô.
Às minhas avós, Regina e Francisca.
Aos meus pais, Ozivaldo e Alancardene.

AGRADECIMENTOS

Eu gostaria de expressar meus sinceros agradecimentos à minha companheira, Inacilani, no qual esteve comigo me apoiando, incentivando e acima de tudo, compreendendo tudo que senti durante todos esses anos de estudo.

Aos meus amigos e colegas de turma do curso de Engenharia Mecânica 2016.1 que estiveram presente nesta jornada.

À minha família pelo apoio e incentivo, em especial minha mãe, Alancardene, por tudo.

Aos meus tios, João e Jeazi por proporcionar minha largada nessa jornada.

Aos meus professores por todo conhecimento transmitido, todo ensinamento e dedicação.

Ao Camilo Augusto, meu orientador, gostaria de expressar minha sincera gratidão por todo o seu apoio, orientação e dedicação durante a realização do meu TCC. Você não desistiu da minha caminhada e através dos seus conhecimentos, experiência e paciência, ajudou-me a encontrar soluções e superar os obstáculos durante a minha trajetória acadêmica.

Sem a ajuda de cada um de vocês eu não teria sido capaz de concluir este projeto. Vocês estiveram comigo em diferentes fases do processo, me incentivando, sendo suporte, compartilhando suas experiências e conhecimentos para essa conquista. Serei eternamente grato pela ajuda de vocês. Muito obrigado.

"Toda a nossa ciência, comparada com a realidade, é primitiva e infantil, e, no entanto, é a coisa mais preciosa que temos."

Albert Einstein.

RESUMO

A medição de vazão é crucial nas indústrias e serviços, uma vez que esta impacta diretamente no controle de processos e fabricação. Cerca de 40% dos medidores industriais utilizam o princípio da diferença de pressão nas medições industriais no qual o medidor Venturi faz parte. O dispositivo se baseia na equação de continuidade e na equação de Bernoulli e foi concebido por Clemens Herschel. O experimento com medidores Venturi demonstra os principais princípios da equação da conservação da massa e energia, bem como detalha o processo de conversão de medidas de pressão em velocidade. Para o experimento foi utilizada uma bancada didática disponível no laboratório de Ciências Térmicas e Fluidos. A coleta de dados automatizada agiliza o processo e torna o sistema menos suscetíveis ao erro, uma vez que a leitura do sinal é feita de forma direta e sistêmica. Com o objetivo de obter as curvas do um tubo Venturi da bancada de forma automatizada foi implementado um sistema de medição com o uso do transdutor de pressão em conjunto com um microcontrolador Arduino. Os dados do medidor foram obtidos e comparados com os dados do fabricante, afim de validar o experimento. O coeficiente de descarga do medidor se comportou conforme a literatura e a automatização se mostrou adequada. O aprendizado por meio da teoria e prática, especialmente através da experimentação, é um caminho para estabelecer um conhecimento sólido e duradouro, o que, por sua vez, fomenta um aprendizado genuinamente significativo da área em estudo.

Palavras-chave: experimento; medidor Venturi; automatização; coeficiente de descarga;

ABSTRACT

Flow measurement is crucial in industries and services, as it has a direct impact on process control and manufacturing. Around 40% of industrial meters use the pressure difference principle in industrial measurements, of which the Venturi meter is a part. The device is based on the continuity equation and Bernoulli's equation and was designed by Clemens Herschel. The Venturi meter experiment demonstrates the main principles of the conservation of mass and energy equation, as well as detailing the process of converting pressure measurements into velocity. A teaching bench available in the Thermal Sciences and Fluids laboratory was used for the experiment. Automated data collection speeds up the process and makes the system less susceptible to error, since the signal is read directly and systemically. In order to obtain the curves of a Venturi tube from the bench in an automated way, a measurement system was implemented using a pressure transducer in conjunction with an Arduino microcontroller. The data from the meter was obtained and compared with the manufacturer's data in order to validate the experiment. The meter's discharge coefficient behaved in accordance with the literature and the automation proved to be adequate. Learning through theory and practice, especially through experimentation, is a way of establishing solid and lasting knowledge, which in turn fosters genuinely meaningful learning in the area under study.

Keywords: experimente; venturi meter; automation; discharge coeficiente;

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Modelo clássico do tubo Venturi.	22
Figura 2 – Perfil da pressão na linha central.....	23
Figura 3 – Medição de vazão pelo método direto.....	25
Figura 4 – Deslocamento do fluido.	26
Figura 5 – Variáveis presente em um tubo Venturi.....	27
Figura 6 – Bancada de testes de mecânica de fluidos utilizada.....	33
Figura 7 – Esquema hidráulico da bancada.	33
Figura 8 – Tanque volumétrico.	34
Figura 9 – Medidas internas do tubo Venturi.	34
Figura 10 – Medidor Venturi.....	35
Figura 11 – Conjunto piezômetro e compressor manual.....	36
Figura 12 – Extremidade inferior do piezômetro.	36
Figura 13 – Conjunto Inversor-motor-bomba.	37
Figura 14 – Cronômetro CD-2800.....	38
Figura 15 – Conexão T.	38
Figura 16 – Placa Arduino UNO.	40
Figura 17 – Transdutor de pressão MPX 5050 DP.....	41
Figura 18 – Bolhas nas tubulações.	43
Figura 19 – Offset em pressão ambiente.	44
Figura 20 – Diagrama de fluxo para experimento com tanque.	45
Figura 21 – Cd médio Venturi.....	50
Figura 22 – Curva de calibração Venturi.....	51
Figura 23 – Curva característica Venturi.....	52
Figura 24 – Desvio padrão de cada ponto de medição.	53
Figura 25 – Diagrama do circuito entre Arduino e sensor.....	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tipo de escoamento segundo Brunetti (2008).	30
Tabela 2– Parâmetros do experimento.	48
Tabela 3 – Dados obtidos experimentalmente.....	66
Tabela 4 – Dados do fabricante.	67

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CFD	Dinâmica dos Fluidos Computacional
ISO	Organização Internacional de Normalização
ANSI	Instituto Americano de Padrões Nacionais
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
UFC	Universidade Federal do Ceará

LISTA DE SÍMBOLOS

Nome	Descrição	Unidade
Q	Vazão em volume	m ³ /s
V	Volume	m ³
T	Tempo	S
v	Velocidade do fluido	m/s
S	Comprimento	m
A	Área	m ²
ρ	Massa específica do fluido	kg/m ³
P	Pressão	Pa
g	Gravidade	m/s ²
z	Altura vertical	m
Cd	Coefficiente de descarga	Adimensional
Re	Reynolds	Adimensional
D	Diâmetro interno do tubo	m
μ	Viscosidade do fluido	Pa.s
Te	Tensão	V
R ²	Coefficiente de determinação	Adimensional

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Objetivos	17
<i>1.1.1</i>	<i>Objetivo Geral</i>	17
<i>1.1.2</i>	<i>Objetivos Específicos</i>	17
1.2	Estrutura do Trabalho	17
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1	Visão geral	19
2.2	Teorema de Bernoulli	21
2.3	Medidores de vazão Venturi	21
2.4	Coeficiente de descarga	23
3	MODELOS FÍSICOS E MATEMÁTICOS	25
3.1	Medição de vazão	25
<i>3.1.1</i>	<i>Equação da vazão por medição direta</i>	25
<i>3.1.2</i>	<i>Medição por diferença de pressão no tubo Venturi</i>	26
<i>3.1.3</i>	<i>Equação da continuidade em regime permanente</i>	26
<i>3.1.4</i>	<i>Equação de Bernoulli e o tubo Venturi</i>	27
<i>3.1.5</i>	<i>Número de Reynolds</i>	29
3.2	Conversão analógico - digital	30
3.3	Conversão tensão - pressão	30
4	APARATO EXPERIMENTAL	32
4.1	Fluido	32
<i>4.1.1</i>	<i>CoolProp</i>	32
4.2	Bancada MF1000	32
<i>4.2.1</i>	<i>Tanque volumétrico</i>	34
<i>4.2.2</i>	<i>Medidor Venturi</i>	34
<i>4.2.3</i>	<i>Piezômetro</i>	35
<i>4.2.4</i>	<i>Conjunto inversor-motor-bomba</i>	37
4.3	Cronômetro	37
4.4	Conexões	38
4.5	Sistema de aquisição dos dados	39

4.5.1	<i>Arduino</i>	39
4.5.2	<i>Python</i>	40
4.5.3	<i>Transdutor de pressão</i>	41
5	METODOLOGIA EXPERIMENTAL	42
5.1	Configuração e checagem inicial	42
5.1.1	<i>Partida e funcionamento</i>	42
5.1.2	<i>Determinação do Offset MPX5050DP</i>	44
5.2	Determinação do coeficiente de descarga do medidor Venturi	45
5.3	Vazão	46
5.4	Análise de dados	47
5.5	Testes Realizados	47
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES	49
6.1	Cd médio Venturi	49
6.2	Curva de calibração Venturi	50
6.3	Curva característica Venturi	52
6.4	Desvio padrão das medições	53
7	CONCLUSÃO	55
7.1	Melhorias para futuros estudos	56
	REFERÊNCIAS	57
	APÊNDICE A – ALGORITMO IDE ARDUINO	61
	APÊNDICE B – ALGORITMO PYTHON	62
	APÊNDICE C – DIAGRAMA DO CIRCUITO	65
	APÊNDICE D – DADOS EXPERIMENTAIS	66
	ANEXO A – DADOS DO FABRICANTE	67

1 INTRODUÇÃO

A medição de vazão desempenha um papel fundamental nas indústrias e nos serviços. É um processo que mensura a quantidade de fluido que passa por determinado trecho em um intervalo de tempo, usado para os mais variados fins, desde o consumo de água da residência até o uso na indústria petrolífera.

Diversos princípios operacionais são empregados nos medidores de vazão, refletindo a ampla variedade de tecnologias disponíveis para monitorar e medir o fluxo de fluidos industriais. Uma considerável parcela dos medidores utilizados na indústria fundamenta-se no princípio da perda de pressão, representando uma abordagem comum para quantificar o volume de fluido em circulação. Nessa categoria, os medidores baseados na perda de pressão obstruem parcialmente o fluxo, gerando uma diferença de pressão estática que é então utilizada para determinar a taxa de vazão.

Um exemplo específico desse tipo de medidor é o tubo Venturi, que será objeto deste trabalho. O funcionamento desse dispositivo baseia-se na criação controlada de uma obstrução no fluxo, resultando em uma diferença de pressão que é proporcional à vazão do fluido. A teoria que proporciona a base do conceito por trás desses medidores é dado pelo Teorema de Bernoulli e a equação da continuidade.

O medidor que leva o nome de Venturi foi dado por Clemens Herschel (1842–1930), engenheiro hidráulico que realizou experimentos em 1887. Clemens inventou o medidor de vazão e o nomeou com o nome Venturi em respeito aos experimentos de Giovanni Battista Venturi (1746–1822) sobre o ganho de velocidade em seções convergente e sua relação com a perda de pressão estática dando origem ao princípio de medição por pressão diferencial (READER-HARRIS, 2015).

A razão por trás da invenção do tubo Venturi, conforme explicado por Herschel, foi sua busca por um medidor eficiente de vazão. Ele concebeu a ideia de um medidor em tubo, inicialmente utilizando um orifício na tubulação para medir a carga, mas logo evoluindo para a concepção de um tubo Venturi. Herschel buscava evitar perdas excessivas de carga e, assim, introduziu a ideia de uma junta suave ascendente e uma expansão "Venturi" de tubo ou bocal abaixo do orifício (GERARDO, 2012).

Basicamente, o tubo Venturi é composto por dois troncos de cone com uma seção cilíndrica constante entre eles havendo dois pequenos orifícios de onde a pressão é medida, um

na entrada e outro na seção constante. A diferença de pressão obtida dessas medições está relacionada com a velocidade do fluxo.

O princípio de Venturi encontra amplas aplicações em processos industriais, abrangendo diversos setores como alimentos, automotivo, agrícola, petroleiro, entre outros. Sua utilização varia desde pequenas adaptações até modificações mais complexas, envolvendo reengenharia. Embora inicialmente mais dispendiosos devido à necessidade de alta qualidade superficial, destacam-se por sua eficiência operacional e facilidade de manutenção. Dentre as aplicações, pode-se citar sua utilização na aeração para aprimorar a qualidade do ar e regular a umidade. Também são utilizados em purificadores de ar, onde a conversão de energia de pressão para energia de velocidade remove impurezas e reduz a temperatura ambiente. O princípio Venturi é eficaz em sistemas de bombeamento, como injetores e ejetores, para transportar fluidos e elevar líquidos em poços, como petróleo e água. Medidores com esse princípio possibilita baixa perda de carga com coeficiente de descarga elevada, sendo uma opção disponível e atrativa no mercado a depender das necessidades do projeto (CAETANO, 2014).

Além da importância para a sociedade e indústria onde a medição e o controle de fluxo são essenciais para produção e eficiência, os tubos Venturi são um meio prático para compreender e aplicar uma parte do vasto conteúdo do universo da mecânica dos fluidos.

O laboratório de ciências térmicas e fluidos, localizado nas dependências da Universidade Federal do Ceará – Campus Russas, dispõe de uma bancada didática de treinamento modular em mecânica dos fluidos, modelo MF 1000, disponíveis para uso nas disciplinas pertinentes ao tema.

É necessário ressaltar que nos experimentos, a coleta de dados é uma das etapas mais importante pois é preciso obter resultados confiáveis, de forma precisa e rápida ou por longos períodos, no qual um sistema de aquisição manual não seja uma opção mais adequada, principalmente se o volume de dados for significativamente elevado.

Uma alternativa de baixo custo para automatizar e otimizar a coleta dos dados necessários em um experimento é a implementação de sensores em conjunto com microcontroladores. Com o rápido avanço tecnológico e o surgimento de Open Hardware, há no mercado opções de baixo custo para melhorar a coleta de dados.

Portanto, estudar os tubos Venturi é mais do que uma exploração acadêmica, é uma oportunidade para unir conhecimento teórico e habilidades práticas, permitindo criar um ambiente real e comum no cotidiano de um engenheiro.

Dito isso, o estudo dos medidores Venturi irá proporcionar um entendimento maior e mais robusto sobre uma área tão vital e versátil, e a aplicação dos conceitos no experimento consolidará o aprendizado desenvolvido. Ademais, faz-se necessário o desenvolvimento de um sistema ágil e preciso de obtenção dos dados, de modo acessível para que otimize o tempo necessário dos experimentos e garanta uma coleta de dados confiável.

1.1 Objetivos

Os objetivos deste trabalho é investigar e analisar a aplicação do medidor Venturi como dispositivo de medição de vazão em sistemas fluidos. O estudo buscará compreender o funcionamento do medidor Venturi em diferentes condições operacionais, avaliando sua performance em relação a parâmetros como pressão e vazão. Além disso, o trabalho visa propor possíveis otimizações na coleta dos dados.

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo principal deste trabalho é obter os dados do medidor Venturi experimentalmente e, utilizando sensores, comparar com os resultados disponibilizados no manual da bancada.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Obter as pressões do sistema por meio de sensores de pressão;
- Obter a curva característica e de calibração de um medidor Venturi;
- Obter o coeficiente de descarga de um medidor Venturi e analisar sua relação com as variáveis de vazão e pressão;

1.2 Estrutura do Trabalho

No capítulo 2, a seguir, será apresentada uma revisão da literatura contendo um breve resumo da história dos medidores Venturi.

No capítulo 3 será apresentado os modelos físicos e matemáticos pertinentes ao trabalho realizado.

No capítulo 4 será apresentado o aparato experimental utilizado para garantir os objetivos deste trabalho.

No Capítulo 5 será mostrado a metodologia para a realização dos experimentos relacionados ao medidor.

No Capítulo 6 é apresentado os resultados obtidos das aplicações práticas realizadas e uma breve discussão sobre os percalços do presente estudo.

No capítulo 7 há a conclusão com as considerações finais.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica deste trabalho busca expor os conceitos e teorias relacionadas à medição com medidores Venturi, proporcionando uma base de conhecimento que servirá como referência para o entendimento dos resultados obtidos.

2.1 Visão geral

A medição de vazão é crucial para controlar o fluxo de fluidos em diversos processos, industriais ou não. Estima-se que pelo menos 40% dos medidores de vazões industriais em uso atualmente utilizem dispositivos baseados em pressão diferencial, sendo os medidores de tubo Venturi o tipo mais comum para vazões médias e grandes (Reader-Harris, 2015).

Ao direcionarmos nossa atenção para os estudos experimentais que procuram explorar o uso de medidores de vazão Venturi na atualidade, podemos identificar uma crescente investigação, com o uso das mais novas tecnologias, em busca de novas descobertas:

Khayat e Afarideh (2019) através da modelagem e simulação de Dinâmica dos Fluidos Computacional (Computational Fluid Dynamics – CFD) analisou e estudou o fluxo bifásico, gás-líquido, não newtoniano em um medidor Venturi. Os resultados obtidos por meio do CFD foram empregados para examinar detalhes das características de fluxo no medidor Venturi que não poderiam ser facilmente observados em testes experimentais.

Masgo (2019) realizou um trabalho sobre os tubos Venturi em simulação numérica, CFD e experimentalmente, no qual ele ressaltou que as pressões experimentais medidas em pontos específicos separados entre si por uma distância estabelecida ao longo da parede do tubo de Venturi não fornecem informações sobre pressões em seções críticas, já as simulações numéricas contínuas oferecem uma visão mais abrangente da distribuição da pressão ao longo de toda a superfície da parede. Ao aprofundar o entendimento do comportamento da pressão no tubo Venturi cria-se possibilidades para novos arranjos de medição.

Hollingshead et al. (2011) estudou o coeficiente de descarga para vários medidores de vazão por diferença de pressão para números de Reynolds baixo em fluidos viscosos. Seu objetivo visava refinar a precisão das medições para uso industrial.

Hasan e Lucas (2011) estudou de forma teórica e experimental o fluxo bifásico gás-água através de um medidor Venturi multifásico condutivo em fluxo anular vertical (gás

úmido). O autor concluiu que o medidor Venturi multifásico de condutância pode ser usado para a medição da vazão de gás em fluxos bifásicos anulares de gás-água e acrescentou que para o menor erro percentual de medição seja utilizado um coeficiente de descarga de 0,932.

Armando et al. (2011) buscaram melhorar o acompanhamento do consumo de água na irrigação e propôs em seu trabalho um sistema de medição de vazão econômico e de construção relativamente fácil, usando software e hardware. O sistema foi projetado para medir a vazão por meio de um medidor Venturi que enviasse as informações por rádio frequência. Os resultados demonstraram que o sistema automatizado de aquisição de dados, com calibração dinâmica, alcançou alta precisão e exatidão, tornando-o adequado para os objetivos do trabalho.

Cid e Correa (2019) aborda a importância das atividades experimentais em seu trabalho e destaca uma lacuna na forma como os conceitos da hidrodinâmica são ensinados em cursos de ensino médio e superior e propõe a construção de um dispositivo chamado "Venturino", que é basicamente um tubo de Venturi feito com materiais de baixo custo e equipado com uma placa microcontrolador Arduino e sensores de pressão.

No estudo conduzido por Barros e Rosa (2018), é realizado experimentos com tubo Venturi para analisar e comparar a curva de coeficiente de descarga obtida através de sensor de pressão modelo MPX 5050 associado a um microcontrolador Arduino Uno® com os valores obtidos manualmente de um manômetro em U. Os resultados experimentais destacaram que a abordagem automatizada demonstrou proporcionar leituras de vazões confiáveis, ao mesmo tempo em que se diminui o tempo necessário para levantamento dessas variáveis com baixo orçamento.

Hutagalung (2019) investigou os resultados experimentais do coeficiente de descarga dos medidores Venturi, comparou com as estimativas teóricas em busca do valor ideal do coeficiente de descarga para várias vazões e concluiu que o valor ideal do coeficiente de descarga do tubo Venturi é de aproximadamente 0,983 para números de Reynolds (Re) elevados.

Segundo Fox, McDonald e Pritchard (2014, p. 476): “A seleção de um medidor de vazão depende de fatores como custo, precisão, necessidade de calibração e facilidade de instalação e manutenção”. Os medidores de tubo Venturi desempenham um papel importante nas medições de fluxo devido à sua precisão, baixa perda de carga, versatilidade e resistência às adversidades ambientais.

Segundo Delmée (2003), devido à significativa influência dos resultados das medições de vazão em operações comerciais, que abrangem desde a compra local até o

funcionamento de gasodutos e oleodutos em escala internacional, as normas nacionais e internacionais, bem como outros regulamentos legais, tornaram-se um elemento fundamental. Essas normas são estabelecidas por organizações de padrões, como a Organização Internacional de Normalização (International Organization for Standardization – ISO), Instituto Americano de Padrões Nacionais (American National Standards Institute – ANSI) e, no Brasil, Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Os medidores de vazão Venturi fazem parte dos dispositivos de pressão diferencial, tendo como base, no Brasil, a norma ABNT NBR ISO 5167.

2.2 Teorema de Bernoulli

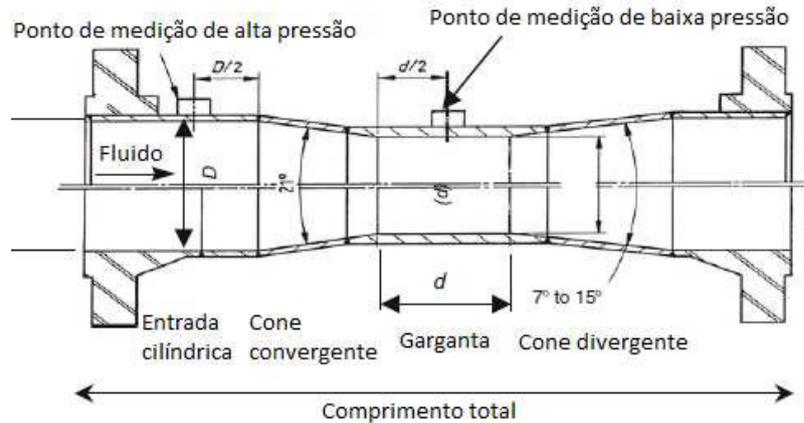
O Teorema de Bernoulli foi inventado por Daniel Bernoulli (1700–1782) como resultado de 145 anos de história, iniciado pelo Benedetto Castelli e sua insatisfação na maneira como Giovanni Fontana media as vazões dos rios. Castelli propõe que a vazão é o produto da velocidade pela área transversal do trecho. Mais tarde, Evangelista Torricelli baseado na hipótese de Galileu Galilei sobre aceleração e da equação de Castelli levanta a hipótese de que um jato d'água saindo de um tanque tem o mesmo momento de um corpo caindo da mesma altura do tanque. Isaac Newton tenta verificar, sem êxito, a hipótese de Torricelli, mas aceita-o sob justificativas baseadas no primeiro teorema de Galileu. Já Daniel Bernoulli resolveu o impasse ao afirmar que o jato d'água não tem o mesmo momento, mas o adquire rapidamente. Por fim, Johann Bernoulli, pai de Daniel Bernoulli apresenta uma explicação melhor do fenômeno e consegue uma dedução mais clara do que conhecemos hoje como equação de uma linha de corrente (GONZÁLEZ, E; MEDEL, J; GONZÁLEZ, F, 2017).

2.3 Medidores de vazão Venturi

Basicamente, o medidor Venturi é composto por dois troncos de cone com uma seção constante entre eles, com dois pequenos orifícios, um na entrada e o outro na seção constante, de onde as pressões são medidas. A diferença de pressão obtida dessas medições está relacionada com a velocidade do fluxo.

Brunetti (2008, p 216) descreve sucintamente as partes que compõe o tubo Venturi: “o tubo Venturi é constituído de um tubo convergente que atinge uma seção mínima denominada garganta, aumentando posteriormente num tubo divergente”. Na Figura 1 é possível visualizar cada seção do medidor.

Figura 1 – Modelo clássico do tubo Venturi.



Fonte: Reader-Harris (2015) modificado.

O medidor que leva o nome de Venturi foi dado por Clemens Herschel (1842–1930), engenheiro hidráulico que realizou experimentos em 1887. Clemens inventou um medidor de vazão e o nomeou com o nome Venturi em respeito aos experimentos de Giovanni Battista Venturi (1746–1822) sobre o ganho de velocidade em seções convergente e sua relação com a perda de pressão estática no qual deu origem ao princípio de medição por pressão diferencial (READER-HARRIS, 2015).

Segundo Gerardo (2012, p.4), as razões para a invenção do tubo Venturi são, nas palavras do inventor:

...Minha primeira concepção de um medidor de tubulação foi colocar um orifício na tubulação e medir a altura manométrica observando a diferença entre as alturas manométricas medidas a montante e a jusante do orifício. A seguir, para evitar perda excessiva de carga no aparelho, concebi a ideia de ter uma junta flexível ascendente e um tubo de expansão “Venturi” ou bocal a jusante do orifício...

Geralmente, os medidores Venturi, ou tubos de Venturi, são fabricados por meio de processos de fundição e usinagem que exigem tolerâncias extremamente precisas, visando replicar o desempenho do projeto-padrão. Isso agrega na característica dos medidores robustez e volume bem como um custo elevado. A porção cônica do tubo localizada após a garganta proporciona uma notável recuperação de pressão, resultando em uma baixa perda de carga. Além disso, o medidor Venturi possui propriedades autolimpantes devido à sua superfície interna suave (FOX; MCDONALD; PRITCHARD, 2014).

Dada a robustez dos medidores de tubo Venturi, eles são habitualmente usados para aplicações submarinas, de gás úmido ou multifásicas (READER-HARRIS, 2015).

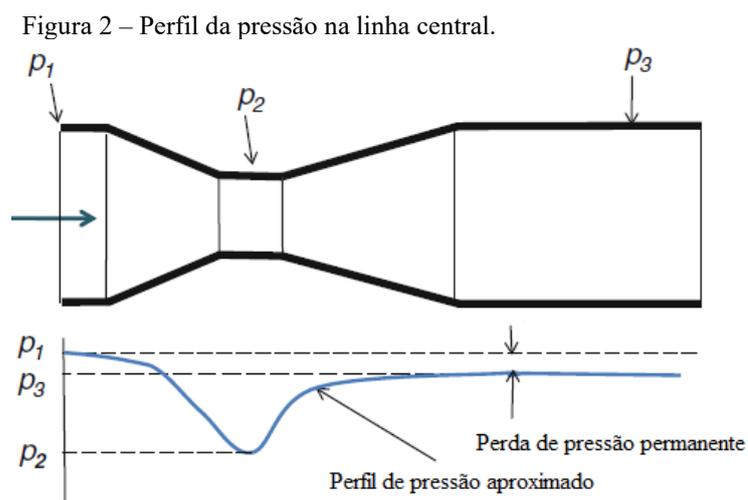
O fluxo do fluido dentro do medidor Venturi possui, geralmente, turbulências que se manifestam por meio de flutuações aleatórias e rápidas em forma de redemoinhos. Esses redemoinhos deslocam massa, energia e momento para diferentes áreas do fluxo, onde essas flutuações contribuem para a transferência de movimento e energia. Além disso, essas turbulências estão associadas aos valores de coeficientes de atrito, transferência de calor e transferência de massa (MASGO, 2019).

Fox, McDonald e Pritchard (2014) relata ainda que os coeficientes de descarga dos medidores de vazão são obtidos na literatura para escoamentos turbulentos e por isso recomenda que haja aproximadamente 10 diâmetros de distância a montante do medidor para qualquer elemento perturbador de escoamento.

2.4 Coeficiente de descarga

Segundo a NBR ISO 5167-1:2008, o Coeficiente de Descarga, C_d , é usado em fluido incompressível para relacionar a vazão real com a vazão teórica.

Para Reader-Harris (2015), os medidores Venturi possuem uma perda de pressão permanente relativamente pequena. Após atingir o seu valor mínimo na garganta, a maior parte da pressão se recupera na seção divergente devido a geometria do dispositivo, reduzindo assim a perda permanente de pressão e consequentemente a perda de energia, conforme a Figura 2. Essa é uma das qualidades desse medidor.



Fonte: Reader-Harris (2015) modificado.

Para tubos Venturi lisos, o aumento do número de Reynolds causa um aumento no coeficiente de descarga porque a perda por atrito como uma fração da pressão diferencial reduz desde que, tanto o tubo Venturi quanto o tubo a montante, sejam lisos (READER-HARRIS, 2015).

Fox, McDonald e Pritchard (2014) nos mostra que, conforme evidenciado por experimentos, os coeficientes de descarga associados aos medidores Venturi abrangem uma faixa de 0,980 a 0,995 em condições de números de Reynolds elevados ($Re > 2 \times 10^5$). E sugere, para números de Reynolds elevados, o uso do coeficiente de descarga em 0,99 com uma margem de erro de aproximadamente $\pm 1\%$.

3 MODELOS FÍSICOS E MATEMÁTICOS

Neste capítulo abordaremos a formulação matemática utilizada para calcular e determinar o coeficiente de descarga de um medidor Venturi.

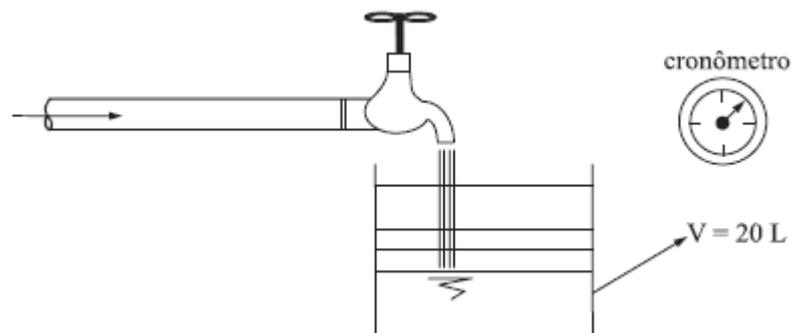
3.1 Medição de vazão

Segundo Delmée (2003, p. 6), “entre as variáveis mais frequentemente medidas, a vazão é a que requer os recursos tecnológicos mais diversos para o desenvolvimento de medidores e transmissores”. Dito isso, será descrito abaixo o equacionamento necessário ao experimento.

3.1.1 Equação da vazão por medição direta

Segundo Fox, McDonald e Pritchard (2014), o método direto é a forma mais óbvia e simples de medição da vazão em tubos. Basicamente, consiste em medir a quantidade de fluido que se acumula em um recipiente de volume conhecido em determinado período de tempo. A Figura 3 exemplifica o conceito da medição pelo método direto.

Figura 3 – Medição de vazão pelo método direto.



Fonte: Brunetti (2008).

$$Q = \frac{V}{t} \quad (1)$$

Onde

Q Vazão em volume

V	Volume
t	Tempo

Embora o método direto citado acima seja útil em algumas situações simples, sua praticidade se torna inviável quando se faz necessário medições mais elaboradas e por isso a medição da vazão é geralmente realizada de forma indireta, sendo comumente feita por meio de inferência, ou seja, mede-se uma variável mais facilmente detectável e, por meio de dedução, determina-se o valor da vazão.

Segundo Azevedo Netto et al. (1998), a determinação da vazão pelo método direto é aplicável para pequenas medições e acrescenta que esse método se torna mais preciso à medida que o tempo de determinação aumenta.

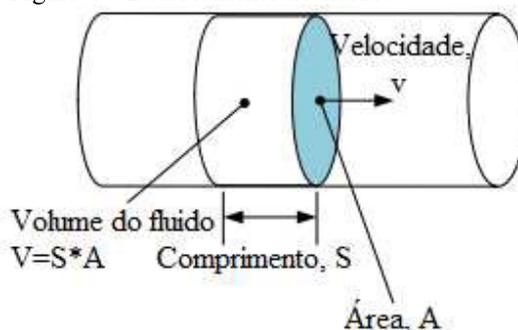
3.1.2 Medição por diferença de pressão no tubo Venturi

Os medidores de vazão por pressão diferencial operam com base em um princípio físico em que uma obstrução na linha de fluxo induz uma redução na pressão, a qual está diretamente ligada à taxa de vazão. Esse fenômeno se fundamenta em duas equações amplamente reconhecidas: a equação da continuidade e a equação de Bernoulli.

3.1.3 Equação da continuidade em regime permanente

Há uma relação muito usada na hidrodinâmica para relacionar a medição de vazão com a velocidade do fluido. Em um fluido qualquer escoando por um tubo, sabemos que a quantidade de volume que flui pela área em determinado tempo é $V = SA$ e a velocidade do fluido é $v = \frac{S}{t}$ e, portanto:

Figura 4 – Deslocamento do fluido.



The Engineer's Guide to DP Flow Measurement (2020) modificado.

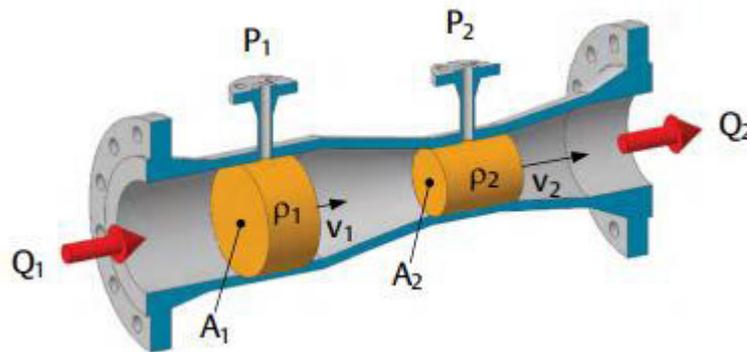
$$Q = \frac{V}{t} = \frac{SA}{t} = vA \quad (2)$$

Onde

v	Velocidade do fluido
S	Comprimento
A	Área

Segundo Brunetti (2008, p 74), “Para que o regime seja permanente, é necessário que não haja variação de propriedades, em nenhum ponto do fluido, com o tempo”. Para que não ocorra variação, é necessário que a quantidade de massa que entra no sistema seja a mesma que sai. Ao considerar o fluido incompressível, $\rho_1 = \rho_2 = constante$, para um sistema com seções A_1 e A_2 e velocidades v_1 e v_2 conforme a Figura 5, temos:

Figura 5 – Variáveis presente em um tubo Venturi.



The Engineer's Guide to DP Flow Measurement (2020).

$$Q = A_1 v_1 = A_2 v_2 \quad (3)$$

A equação 3 infere que a vazão do ponto 1 é igual a vazão do ponto 2 e, portanto, a velocidade deve variar de modo que garanta essa afirmação.

3.1.4 Equação de Bernoulli e o tubo Venturi

A equação de Bernoulli estipula que, em um fluxo constante, a energia total por unidade de massa de um fluido incompressível ideal composta por energia cinética, pressão e potencial gravitacional se mantém invariável ao longo de uma trajetória de fluxo. Portanto:

$$\frac{P}{\rho} + \frac{v^2}{2} + gZ = \text{constante} \quad (4)$$

Onde

P	Pressão
ρ	Massa específica
v	Velocidade do fluido
g	Aceleração da gravidade
Z	Nível do ponto em relação ao referencial

Ao relacionar a equação de Bernoulli com a conservação de massa em um tubo Venturi com referencial na mesma altura entre os pontos 1 e 2, temos:

$$\frac{P_1}{\rho} + \frac{v^2_{1}}{2} = \frac{P_2}{\rho} + \frac{v^2_{2}}{2} \quad (5)$$

Multiplicando os dois lados da equação pela massa específica:

$$P_1 + \rho \frac{v^2_{1}}{2} = P_2 + \rho \frac{v^2_{2}}{2} \quad (6)$$

Reorganizando os termos:

$$2\Delta P = \rho(v^2_{2} - v^2_{1}) \quad (7)$$

Aplicando a equação de continuidade (3) na equação (7), temos:

$$v_1 = \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho \left(\frac{A_1^2}{A_2^2} - 1 \right)}} \quad (8)$$

Onde:

$$\Delta P = P_1 - P_2 \quad (9)$$

Substituindo a velocidade da equação (2) com a equação (8):

$$Q = A_1 \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho \left(\frac{A_1^2}{A_2^2} - 1 \right)}} \quad (10)$$

A equação obtida não levou em consideração as perdas do medidor oriunda da geometria, sendo necessário incluir um coeficiente de perda de carga para relacionar a vazão teórica com a real, tornando a equação (10) em:

$$Q = C_d A_1 \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho \left(\frac{A_1^2}{A_2^2} - 1 \right)}} \quad (11)$$

Onde:

$$C_d = \frac{\text{Vazão real}}{\text{Vazão teórica}} \quad (12)$$

3.1.5 Número de Reynolds

O coeficiente de descarga de um tubo Venturi está intrinsecamente relacionado com o número de Reynolds (Re). Esse parâmetro exerce um impacto significativo no comportamento dos fluidos que se deslocam através de sistemas de tubulação.

O número de Reynolds leva o nome de Osborne Reynolds (1842-1912), um renomado professor de engenharia no Owens College, que hoje corresponde à Universidade de Manchester. Ele é mais lembrado por suas contribuições à compreensão das condições nas quais o fluxo de fluidos em tubulações transita de laminar para turbulento. A partir de seus estudos, o número de Reynolds foi concebido. Este número indica sobre qual tipo de forças prevalecerá no fluido. Quando o valor de Re é grande, sinaliza a predominância das forças dinâmicas. Por outro lado, quando Re é pequeno, indica que as forças viscosas desempenham um papel mais proeminente (READER-HARRIS, 2015).

A determinação do número de Reynolds é obtida pela equação abaixo.

$$Re = \frac{\rho \bar{v} D}{\mu} \quad (13)$$

Onde:

\bar{v}	Velocidade média do tubo
ρ	Massa específica do fluido

D	Diâmetro interno do tubo
μ	Viscosidade do fluido

Na prática, os escoamentos internos são geralmente turbulentos, exceto para fluidos muito viscosos percorrendo uma tubulação com diâmetro relativamente pequeno. Reynolds observou também uma zona no qual coexistem os dois tipos, chamada de zona de transição e os definiu conforme a tabela abaixo (BRUNETTI, 2008).

Tabela 1 – Tipo de escoamento segundo Brunetti (2008).

Valor	Tipo
$Re < 2000$	Escoamento laminar
$2000 < Re < 2400$	Escoamento de transição
$Re > 2400$	Escoamento turbulento

Fonte: Brunetti (2008).

3.2 Conversão analógico - digital

A conversão se refere ao processo de traduzir informações analógicas, que variam continuamente, em dados digitais, que são representados por números discretos.

A conversão é realizada conforme a equação 14.

$$Tensão = \frac{5 \text{ Valor analógico}}{1024} + Offset \quad (14)$$

3.3 Conversão tensão - pressão

A transformação da tensão em pressão é representada por uma equação específica fornecida no datasheet do sensor ou transdutor de pressão. Essas equações variam dependendo do tipo de sensor e da relação matemática entre a tensão de saída e a pressão medida. Os datasheets de sensores de pressão incluem uma equação que descreve essa relação. A equação que descreve essa conversão segundo o datasheet do transdutor MPX 5050DP é:

$$Pressão = \frac{Te}{5} - \frac{0,04}{0,018} \quad (15)$$

Onde:

Te Tensão

Ao realizar a conversão de tensão para pressão, é imperativo seguir as especificações e orientações detalhadas do datasheet. Este cuidado é fundamental devido à diversidade existente entre os sensores e fabricantes, que frequentemente empregam fórmulas e coeficientes específicos em seus dispositivos. Portanto, ao aderir às diretrizes do datasheet, é garantido não apenas a precisão na conversão, mas também a consistência e confiabilidade dos resultados obtidos.

4 APARATO EXPERIMENTAL

Neste capítulo são apresentados os materiais utilizados na condução do presente trabalho. Serão descritos todos os componentes utilizados no experimento bem como a configuração da bancada experimental para a realização dos testes.

4.1 Fluido

O fluido utilizado é água. Devido ao amplo e robusto estudo da viscosidade da água na literatura, em condições normais de temperatura e pressão será adotado o valor constante da mesma. Isso simplifica os cálculos e permite uma abordagem consistente na análise e projeto de sistemas de tubulação (JUSTI; ZOCOLER; SAIZAKI, 2017).

4.1.1 *CoolProp*

O CoolProp trata-se de uma biblioteca de código aberto dedicada a propriedades termo físicas. A biblioteca foi desenvolvida em C++, com suporte disponível para a maioria das linguagens de programação e, incluindo Python, plataformas de interesse técnico. A biblioteca abrange diversos fluidos puros e pseudo puros, além de propriedades de fluidos incompressíveis e ar úmido (BELL et al., 2014).

A viscosidade do fluido foi obtida pela biblioteca CoolProp com as entradas de pressão e temperatura ambiente.

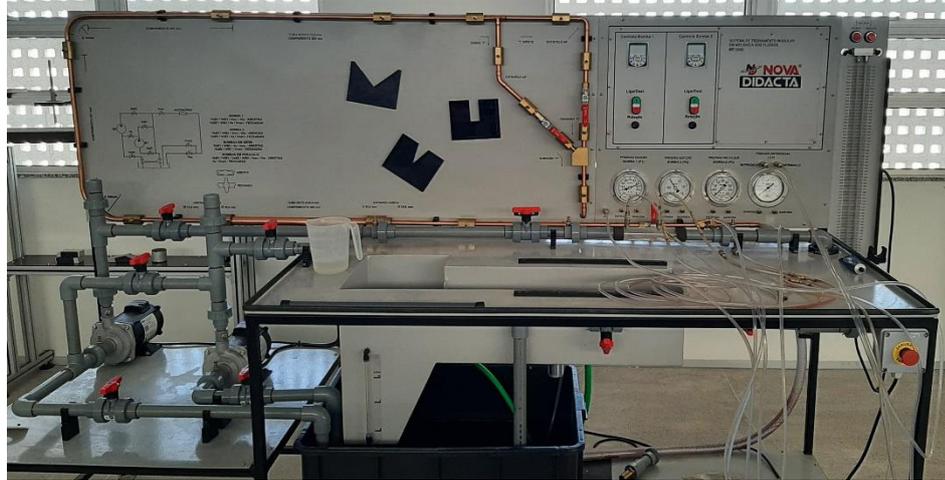
4.2 Bancada MF1000

A bancada de testes, Figura 6 – Bancada de testes de mecânica de fluidos utilizada. Figura 6, encontra-se no Laboratório de Ciências Térmicas e Mecânica dos fluidos na Universidade Federal do Ceará - campus Russas, destinada ao estudo da mecânica dos fluidos.

O sistema da bancada compreende componentes essenciais destinados ao estudo da Mecânica de Fluidos, abrangendo os principais experimentos necessários para a compreensão dos fenômenos em meios líquidos. A bomba faz a água percorrer a tubulação equipada com diversas válvulas, trecho específico para estudos de perda de pressão e espaço para estudos de

válvulas e reservatórios. Além disso, há um painel com manômetros, piezômetro e inversores de frequência para obter as informações necessárias.

Figura 6 – Bancada de testes de mecânica de fluidos utilizada.

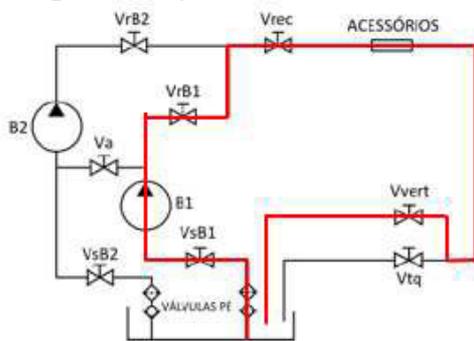


Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

A bancada MF 1000 dispõe de vários acessórios voltado para o estudo da mecânica dos fluidos. Gonçalves (2021) realizou diversos experimentos na mesma, explorando as configurações disponíveis. Já Lima (2022) focou no trecho de perda de carga que envolve perdas menores como conexão T e Y, Curva 45° e 90°.

O diagrama hidráulico da bancada está disposto na Figura 7 e o trecho realçado em vermelho corresponde ao caminho percorrido pelo fluido. As demais válvulas que não estão no caminho realçado permaneceram fechadas e a bomba B2 não foi utilizada.

Figura 7 – Esquema hidráulico da bancada.



- B1 - Bomba 1**
- B2 - Bomba 2**
- VrB1 - Válvula de Recalque da Bomba 1**
- VrB2 - Válvula de Recalque da Bomba 2**
- VsB1 - Válvula de Sucção da Bomba 1**
- VsB2 - Válvula de Sucção da Bomba 2**
- Va - Válvula de Associação das Bombas**
- Vrec - Válvula de Recalque das Bombas**
- Vvert - Válvula do Vertedouro**
- Vtq - Válvula do Tanque**

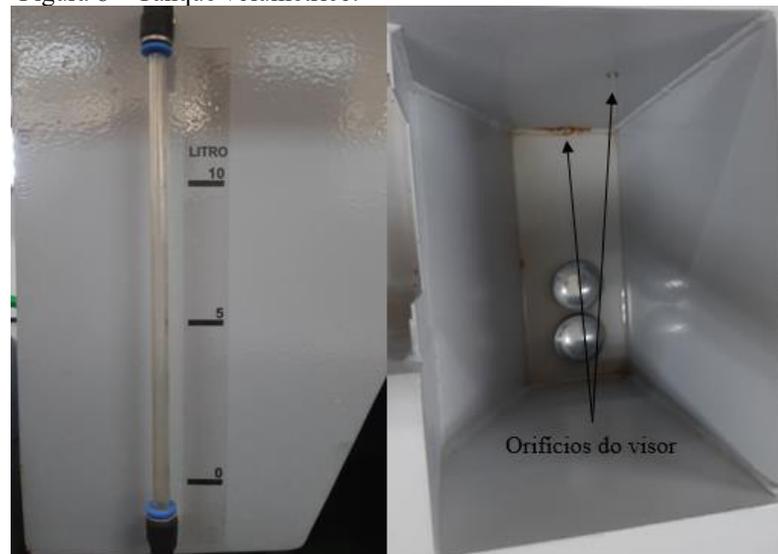
Fonte Sistema de Ensaio para Mecânica dos Fluidos (2016) modificado.

Conforme orientação do manual, a válvula Vvert ficou parcialmente aberta. Para variação da vazão foi utilizado a válvula Vrec.

4.2.1 *Tanque volumétrico*

O tanque volumétrico conta com um visor externo, no qual pode-se observar o fluido enchendo. Ao lado do visor há uma escala de 0 a 10 litros, conforme a Figura 8.

Figura 8 – Tanque volumétrico.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

A utilização do tanque volumétrico se torna necessário para obter as medições reais da vazão da bancada.

4.2.2 *Medidor Venturi*

O medidor Venturi da bancada possui dois pontos de medição, sendo o primeiro na entrada do medidor e o segundo na garganta. As medidas internas do dispositivo se encontram na Figura 9.

Figura 9 – Medidas internas do tubo Venturi.



Fonte Sistema de Ensaio para Mecânica dos Fluidos (2016).

O orifício P1 corresponde a saída de pressão maior, ou seja, o ponto de medição que corresponde a pressão do sistema. O orifício P2 corresponde a pressão menor, presente na garganta do dispositivo.

Figura 10 – Medidor Venturi.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

4.2.3 Piezômetro

O conjunto piezômetro e compressor manual, respectivamente lado esquerdo e direito da Figura 11, disposto na bancada é necessário para o experimento do coeficiente de descarga Venturi para definir a diferença de pressão de forma manual. Segundo Brunetti (2008), o piezômetro é um dispositivo simples que, acoplado no ponto desejado, permite medir diretamente a carga de pressão.

O piezômetro da bancada possui duas colunas para permitir a medição de diferença de pressão através da diferença das alturas de coluna d'água formada. Também há um compressor manual conectado na extremidade superior do dispositivo para poder contrabalancear a pressão para vazões mais elevadas. O conjunto permite observar a diferença de pressão entre a entrada do tubo Venturi e a garganta e foi utilizado devido à dificuldade de controle da vazão pela válvula Vrec.

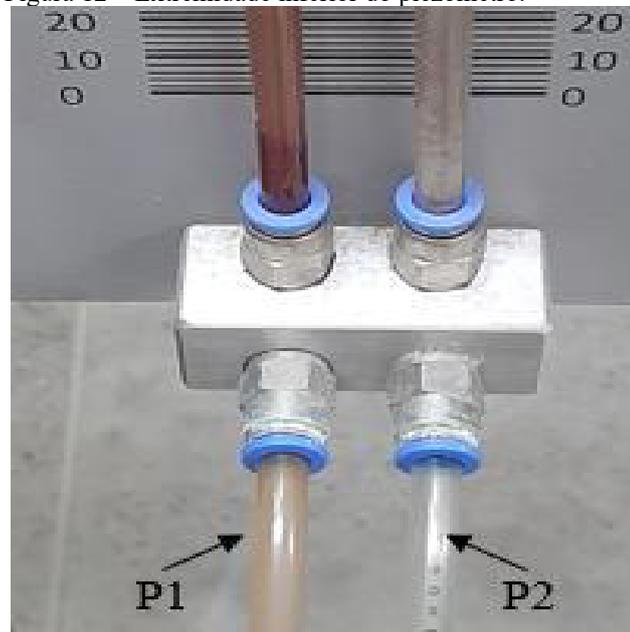
Figura 11 – Conjunto piezômetro e compressor manual.



Fonte: Autoria própria (2023).

Na extremidade inferior é conectado as mangueiras que fazem a ligação com os pontos de medição do tubo Venturi.

Figura 12 – Extremidade inferior do piezômetro.



Fonte: Autoria própria (2023).

A pressão do ponto P1 é a pressão na entrada do tubo Venturi e corresponde a coluna d'água maior. A pressão P2 é a pressão da garganta do dispositivo e corresponde a menor coluna d'água.

4.2.4 Conjunto inversor-motor-bomba

Um dos atuadores amplamente empregados em sistemas de automação consiste na combinação de um inversor de frequência com um motor elétrico acoplado a uma bomba hidráulica. Em tais sistemas, os motores que controlam as bombas funcionam com velocidade variável, o que possibilita o ajuste da vazão ou pressão na linha à jusante da bomba. O inversor de frequência é o dispositivo-chave que viabiliza esse controle de velocidade no motor (AGUIRRE, 2013).

Figura 13 – Conjunto Inversor-motor-bomba.



Fonte: Autoria própria (2023).

Foi utilizado somente uma bomba para os experimentos, conforme instruções do manual da bancada, com o inversor de frequência em aproximadamente 2300 rotações por minuto (rpm) nas vazões baixa e 2700 rpm nas vazões alta.

4.3 Cronômetro

O cronômetro é necessário para a obtenção da vazão real. Ele é usado para determinar o tempo necessário para encher o tanque volumétrico da bancada.

Nos experimentos foi utilizado o cronômetro da Instrutherm, modelo CD-2800. Ele possui resolução de 1/100 segundos para cronometragens menores que 30 minutos e 1 segundo para maiores de 30 minutos (MANUAL DE INSTRUÇÕES: CRONÔMETRO DIGITAL MODELO CD-2800, 2018).

Figura 14 – Cronômetro CD-2800.



Fonte: Autoria própria (2023).

4.4 Conexões

Para conectar o sensor MPX 5050DP em paralelo com o piezômetro foi necessário o uso de conexões em T. É importante ressaltar que o uso se fez necessário para verificar a precisão dos sensores, além do auxílio no controle de vazão discutido posteriormente.

Figura 15 – Conexão T.



Fonte: Autoria própria (2023).

Para o acoplamento das mangueiras no tubo Venturi, foi utilizado conectores pneumáticos. Sua praticidade é útil quando se trata de um sistema que necessita de uma troca rápida.

4.5 Sistema de aquisição dos dados

Blum (2013) relata que um microcontrolador é uma plataforma programável versátil que permite definir a operação de sistemas mecânicos, elétricos e de software complexos usando comandos relativamente simples e acrescenta a flexibilidade de uso que o Arduino proporciona, desde projetos para detecção de movimento até a criação de sistema de controle sem fio.

4.5.1 *Arduino*

O Arduino é uma plataforma eletrônica de código aberto que combina hardware e software de fácil utilização. As placas Arduino têm a capacidade de receber entradas e transformá-las em saídas (WHAT IS ARDUINO?, 2023).

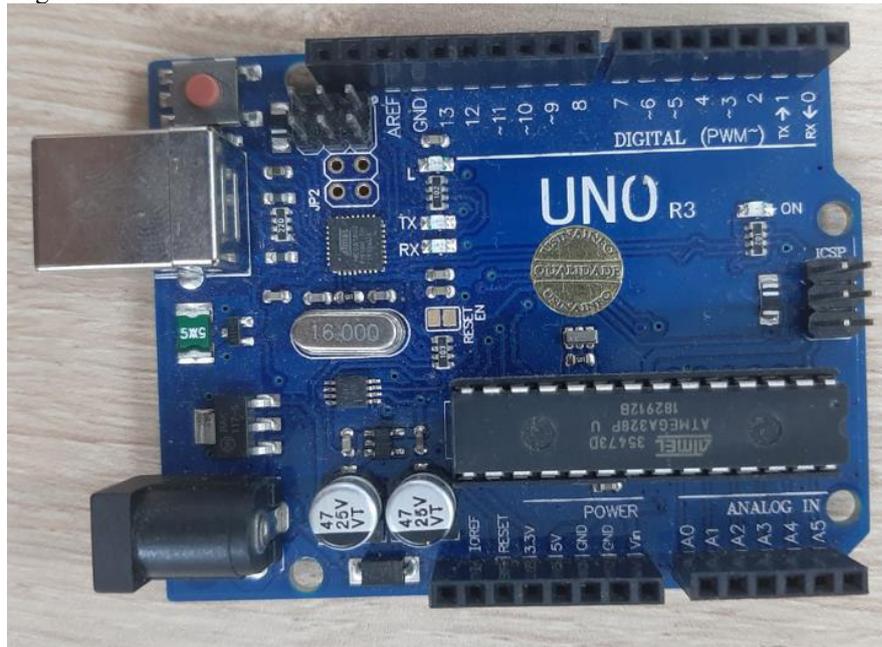
A versatilidade do Arduino proporciona sua aplicação em diversas áreas. Em seu trabalho, Schultz e Van Vugt (2015) concluiu que o Arduino pode ser usado para experimentos de sincronização sensório-motora com alta precisão, baixa latência, além de ser portátil e acessível. Já D'ausilio (2011) classificou o Arduino como uma ferramenta viável e de baixo custo para o controle de múltiplos sinais de entrada e saída em experimentos de laboratórios psicológicos e neurofisiológicos.

O Arduino também é usado como meio de aprendizado, como pode-se observar nos trabalhos de Novacosk (2016) aplicado em experimentos de termodinâmica, Crovador (2019) e Silva (2017) com foco em física e por Lopez-Belmonte et al. (2020) na crescente evolução do uso do Arduino no decorrer dos anos.

O Arduino Uno R3 é o modelo da placa utilizada, sua versatilidade permite a utilização em diversos projetos. Trata-se de uma placa baseada no microcontrolador ATmega328P e possui 14 portas digitais e 6 portas analógicas, proporcionando uma ampla gama de opções para conectar sensores, atuadores e outros dispositivos. É alimentado por meio de uma porta USB ou uma fonte de alimentação externa, oferecendo flexibilidade na escolha da fonte de energia (BLUM, 2013).

Ainda conforme Blum (2013), o Arduino Uno possui um conversor analógico-digital que converte os valores de tensão analógica em representações numéricas de 0 a 1023.

Figura 16 – Placa Arduino UNO.



Fonte: Autoria própria (2023).

Essa plataforma é acompanhada por uma linguagem de programação intuitiva realizada no ambiente de desenvolvimento integrado chamada IDE Arduino. Ela fornece uma interface que simplifica a criação, o carregamento e a depuração do código e inclui várias ferramentas essenciais para o desenvolvimento de projetos (BLUM, 2013).

4.5.2 Python

Python foi criado nos anos 90 por Guido van Rossum no Stichting Mathematisch Centrum na Holanda como sucessor da linguagem ABC. Guido liderou o desenvolvimento do Python com contribuições de outros colaboradores. A Python Software Foundation foi estabelecida em 2001 como uma organização sem fins lucrativos para gerenciar a propriedade intelectual do Python. Todas as versões do Python são de código aberto (HISTÓRIA E LICENÇA, 2023).

Segundo Borges (2014, p 14), “Python é uma linguagem de altíssimo nível orientada a objeto, de tipagem dinâmica forte, interpretada e interativa”.

A linguagem Python é muito versátil permitindo uma ampla gama de aplicações. Além disso, é uma linguagem de fácil aprendizado, sendo uma boa opção de uso.

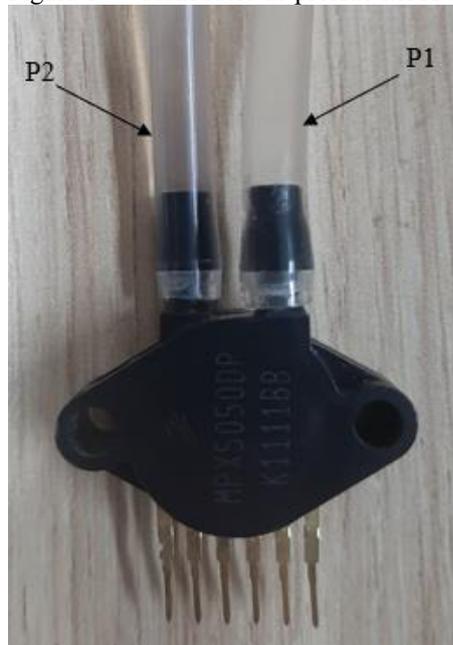
4.5.3 Transdutor de pressão

Segundo Holman (2012), dispositivos que transformam valores de variáveis físicas em sinais elétricos são conhecidos como transdutores. Há no mercado diversos dispositivos cujo o objetivo é medir a pressão, sendo estes conhecidos como transdutores de pressão.

Segundo Reader-Harris (2015), os transdutores de pressão diferencial são suscetíveis a influências externas, ou seja, o valor medido sofre variação em razão das condições do ambiente, ele acrescenta que a extensão desses efeitos varia de acordo com o design do dispositivo e recomenda que o dispositivo seja calibrado no local de uso, nas condições específicas. Baker (2000) relata que esse tipo de medidor pode ter incerteza de medição tão baixa ou inferior a 0,1% da amplitude, mas recomenda a recalibração regular em intervalos de 1 a 6 meses.

O trabalho realizado utilizou um transdutor de pressão modelo MPX 5050DP. Ele é capaz de medir variações de pressão na faixa de 0 a 50 kPa e converter essa pressão em um sinal de saída que varia de, em valores típicos, 0,2 V a 4,7 V. O transdutor em questão mede o diferencial de pressão entre dois pontos, no qual deverá ser conectado a pressão positiva maior na porta P1 e a pressão menor na porta P2, conforme Figura 17.

Figura 17 – Transdutor de pressão MPX 5050 DP.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

5 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

O objetivo deste capítulo é oferecer uma visão abrangente de como o experimento foi planejado e executado, permitindo que todo o processo seja compreendido de forma clara e objetiva, garantindo a reprodutibilidade e a confiabilidade dos dados. Será descrito os métodos utilizados para coletar os dados, calibrar os equipamentos e realizar as medições em si. A frequência das leituras e quaisquer considerações especiais relacionadas à coleta de dados serão mencionadas.

5.1 Configuração e checagem inicial

Antes de iniciar qualquer operação no equipamento, é necessário verificar a integridade dos componentes, pois a verificação ajuda a evitar operações incorretas, garantir a segurança pessoal e dos processos, além de aumentar a vida útil dos componentes. A checagem inicial seguiu o passo a passo abaixo.

- Realizar inspeção visual de todos os componentes do sistema em busca de sinais de desgaste, danos visíveis, ou qualquer anomalia aparente;
- Verificar todas as conexões para que estejam devidamente encaixadas e seguras;

Seguir o passo a passo antes de iniciar qualquer operação no equipamento contribui para a prevenção de operações incorretas, segurança pessoal e dos processos, além de maximizar a vida útil dos componentes.

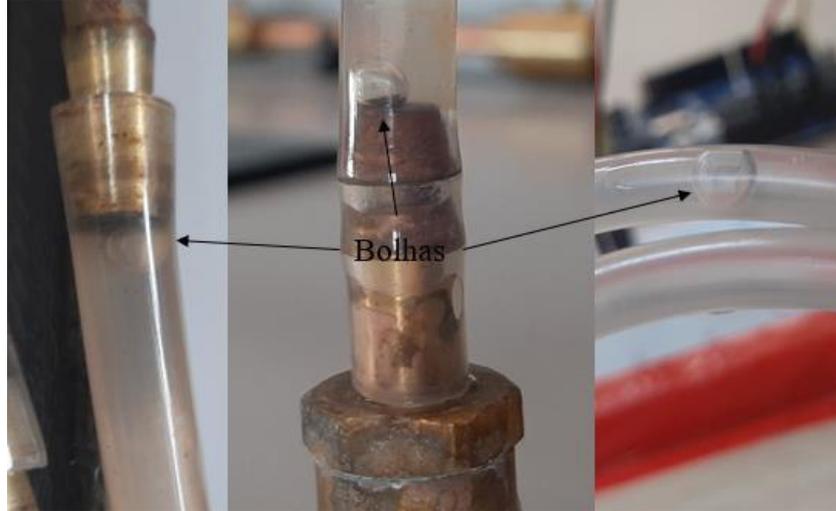
5.1.1 Partida e funcionamento

Antes do acionamento das bombas, é necessário verificar o nível de água do reservatório utilizado, encher o tanque até a medida recomendada e verificar a presença de água na bomba para que não ocorra o funcionamento das bombas sem o fluido.

Com a bancada em funcionamento após a partida, faz-se necessário a sangria das tubulações para a retirada de bolhas. As bolhas surgem facilmente nas tubulações da bancada, conforme pode-se notar na Figura 18, sendo necessário realizar a sangria sempre que houver indícios da presença da mesma. Além disso, as bolhas podem influenciar nos valores medidos, comprometendo o trabalho proposto.

Conforme recomendação do manual, a sangria foi realizada com rotação do motor em 1600 rpm e válvula Vtq parcialmente fechada.

Figura 18 – Bolhas nas tubulações.



Fonte: A autoria própria (2023).

Conforme recomendação do manual, a sangria foi realizada seguindo o passo a passo abaixo.

- Conectar todas as mangueiras nos pontos de medição;
- Bombear o compressor para obter pressão no sistema;
- Fechar as válvulas Vtq e Vvert e abrir as válvulas da tubulação de perda de carga;
- Ligar a bomba 1 e ajustar inversor para aproximadamente 1600 rpm;
- Acionar o botão da válvula “Subir” do piezômetro até retirar a maior quantidade de bolhas possível;
- Pressionar o botão da válvula “Descer” para expulsar as bolhas restantes;
- Utilizar os botões “Subir” e “Descer” para adequar as colunas de água na escala do piezômetro;
- Verificar se não ficou bolhas de ar nas mangueiras que possam influenciar nos resultados. Caso sim, repetir o passo a passo.

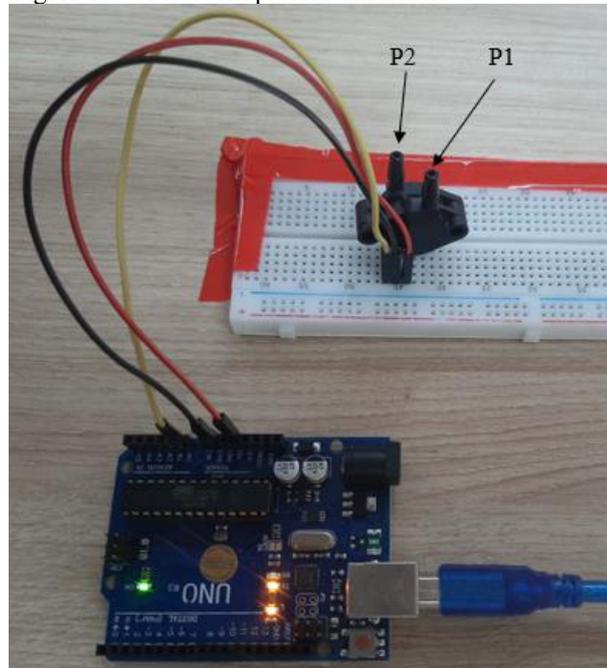
As bolhas de ar presente no sistema podem interferir significativamente nas medições e conseqüentemente na interpretação dos dados experimentais. Este fenômeno é crítico em experimentos que envolvem a medição de pressão, como no caso do estudo em questão. Ao longo do tempo, as mangueiras do sistema podem acumular bolhas de ar,

resultando em distorções introduzindo erros que podem levar a conclusões equivocadas. Portanto, é imperativo adotar procedimentos adequados para eliminar ou minimizar a presença dessas bolhas antes de iniciar qualquer experimento.

5.1.2 Determinação do Offset MPX5050DP

O Offset do transdutor de pressão MPX 5050DP serve para corrigir a diferença do sinal de saída real para o esperado. Ou seja, sua finalidade é evitar a ocorrência do erro sistemático. O ajuste ocorreu por meio do Offset realizado na temperatura ambiente, com o valor numérico resultante da média de 125 medições.

Figura 19 – Offset em pressão ambiente.



Fonte: Autoria própria (2023).

Para a realização do Offset, foi utilizada o dispositivo montado conforme a Figura 19 e seguindo o procedimento abaixo:

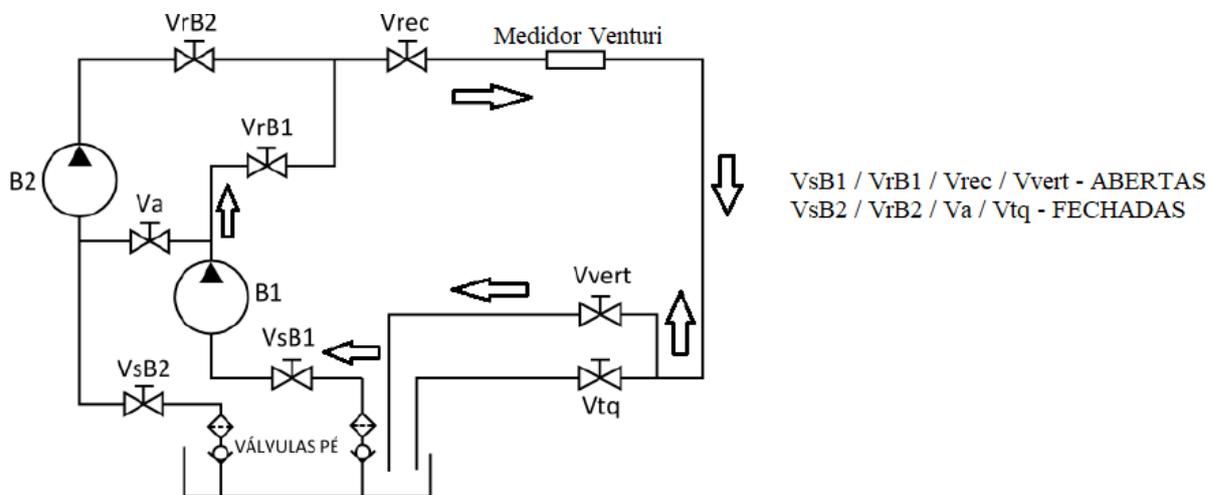
- Compilar o programa na IDE do Arduino e logo em seguida compilar o programa escrito em Python;
- Verificar se os dados do programa foram armazenados corretamente.

Dessa forma, foi obtido o Offset do dispositivo.

5.2 Determinação do coeficiente de descarga do medidor Venturi

O coeficiente de descarga de um medidor Venturi é obtido experimentalmente. Por ser um dado experimental, faz-se necessário investigar o comportamento do mesmo em relação as variáveis do sistema. Foi-se variado a vazão para uma ampla faixa de valores, afim de coincidir aproximadamente com as vazões do experimento do fabricante e ao mesmo tempo obter uma faixa de vazão mais ampla para melhor compreensão do comportamento do C_d .

Figura 20 – Diagrama de fluxo para experimento com tanque.



Fonte Sistema de Ensaio para Mecânica dos Fluidos (2016).

Para a realização deste experimento, foi utilizada o acessório de medição Venturi, com as válvulas aberta e fechada conforme a figura 20 e seguindo o procedimento abaixo:

- Conectar uma das mangueiras na entrada do medidor Venturi, na entrada do piezômetro (P1) e na porta de pressão positiva do transdutor MPX 5050DP;
- Conectar a outra mangueira na garganta do medidor Venturi, na entrada do piezômetro (P2) e na porta de pressão negativa do transdutor MPX5050DP;
- Fechar a válvula do vertedouro para pouco menos da metade a fim de manter a vazão máxima em aproximadamente 20 l/min (0,33 l/s), conforme recomendado no manual da bancada;
- Dar partida no motor da bomba 1 e operá-la a rotação de 2300 rpm, conforme recomendado no manual da bancada;

- Compilar o programa na IDE do Arduino e logo em seguida compilar o programa escrito em Python;
- Verificar se os dados do programa foram armazenados corretamente;
- Medir a vazão real no tanque volumétrico da bancada e registrá-la;
- Abrir a válvula para esvaziar o tanque volumétrico;
- Variar abertura da válvula de recalque V_{rec} e repetir o procedimento.

Dessa forma, foi obtido o C_d de cada vazão. Os resultados serão apresentados no capítulo 6.

5.3 Vazão

Diversos modos de medir o escoamento foram desenvolvidos no decorrer dos anos com o objetivo de determinar a vazão em um tubo, com isso, há uma ampla variedade de medidores em relação ao nível de sofisticação, tamanho, custo, exatidão, versatilidade, capacidade, queda de pressão permanente e princípio operacional (ÇENGEL; CIMBALA, 2012). O melhor método de medir a vazão em um determinado tubo não é o mais sofisticado, ou o mais preciso, mas aquele que cumpre os requisitos do projeto com o menor uso de recursos.

A vazão real é fundamental para a determinação do coeficiente de descarga do medidor Venturi. A obtenção desse dado se baseou no método de medição direta. Será detalhado o item “Medir a vazão real no tanque volumétrico da bancada e registrá-la” da seção anterior para melhor compreensão, conforme o procedimento a seguir:

- Fechar válvula do tanque volumétrico;
- Iniciar cronômetro quando o fluido atingir o nível inicial do tanque;
- Parar cronômetro quando o fluido atingir o volume de 5 litros numerado no tanque.

Para o planejamento adequado e posterior análise do experimento, é fundamental que os envolvidos tenham uma compreensão prévia sobre o que será estudado, como os dados serão coletados e uma noção qualitativa sobre como esses dados serão analisados (MONTGOMERY, 2012).

Montgomery (2012) cita que observar um processo durante sua operação é uma parte importante do processo de aprendizado e compreensão dos fenômenos envolvidos, além de levantar teorias e hipóteses. No entanto, para entender as relações de causa e efeito, validar

ou descartar hipóteses, é preciso alterar as variáveis de entrada e analisar as mudanças da variável de saída.

A frequência de medição foi de 25 medições por segundo durante 5 segundos por tomada, registrado por meio do transdutor de pressão e armazenado em um arquivo .csv para posterior tratamento e análises dos dados, totalizando 125 valores obtidos por vazão em cada ponto.

5.4 Análise de dados

Holman (1989) afirma que todos os experimentos possuem erros independentemente dos cuidados exercidos e acrescenta que é preciso uma análise de dados estatísticos consistente para não serem dependentes dos pré-conceitos humanos. Portanto, para maior credibilidade dos dados, faz-se necessário uma análise estatística das medições.

Segundo Baker (2000), o erro aleatório, que constitui a componente não sistemática do erro experimental, resulta em dispersão e, como o próprio nome sugere, reflete a qualidade do projeto e da fabricação do instrumento. Esta é a parte que não é passível de calibração e quanto menor for o erro, maior será a precisão do instrumento. Sua quantificação frequentemente envolve a realização de várias leituras repetidas, o que resulta no cálculo do desvio padrão de uma amostra limitada, sendo por vezes referido como o desvio padrão experimental.

5.5 Testes Realizados

Os parâmetros de entrada do experimento desempenham um papel importante na obtenção dos dados pois representam as variáveis controladas e monitoradas durante o experimento, que influencia diretamente os resultados e a interpretação dos dados. Na Tabela 2 são fornecidos todos os parâmetros de entrada necessários para os cálculos, seus derivados e também os demais valores necessários ao funcionamento dos dispositivos.

Tabela 2– Parâmetros do experimento.

Valor	Unidade	Descrição
298.15	K	Temperatura ambiente
101325	Pa	Pressão atmosférica
997.047636	kg/m ³	Massa específica da água obtido via CoolProp
9.807	m/s ²	Aceleração da gravidade
0.0243	m	Diâmetro interno na entrada do medidor
0.000464	m ²	Área interna da entrada do medidor
0.01555	m	Diâmetro interno da garganta do medidor
0.000190	m ²	Área interna da garganta do medidor
0.00000092	m ² /s	Viscosidade cinemática da água
2300	rpm	Rotação do inversor nas medições de baixa vazão
2700	rpm	Rotação do inversor nas medições de alta vazão
9600	bits por segundo	Velocidade de comunicação de dados entre o Arduino e Python
40	ms	Intervalo de tempo entre cada medição repetida do transdutor

Fonte: Autoria própria (2023).

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

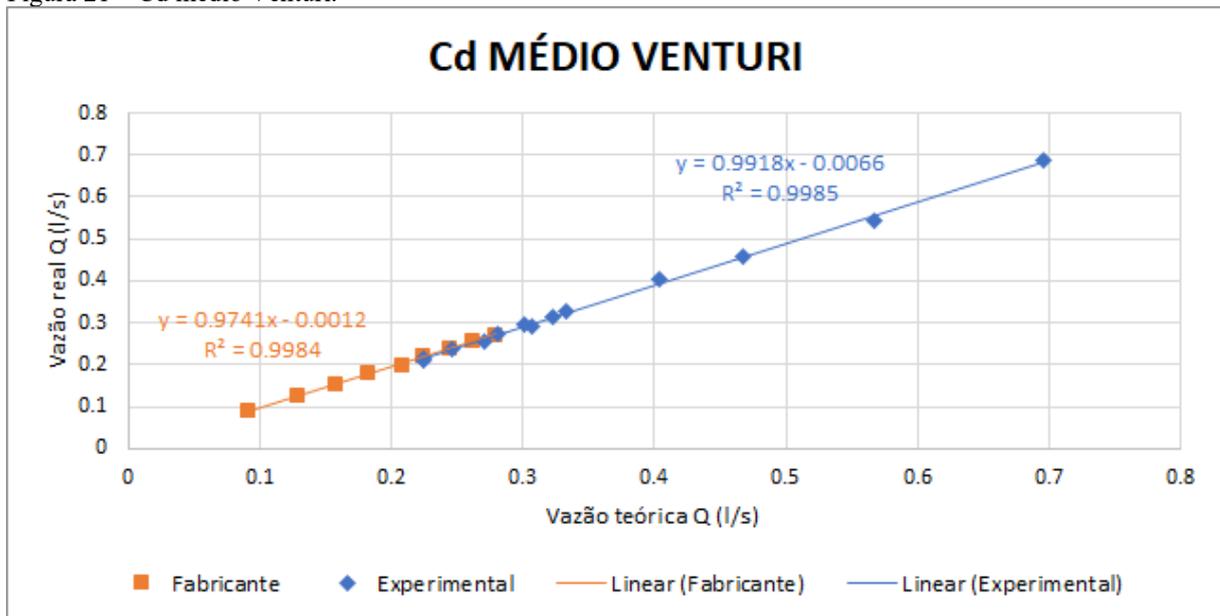
O cálculo do coeficiente de descarga envolve a consideração da geometria do medidor de vazão, a vazão, as propriedades do fluido e a pressão diferencial. Os resultados apresentados neste capítulo foram obtidos por meio de ensaios experimentais. Para uma representação visual das variáveis obtidas foram criados gráficos que possibilitam maior facilidade na leitura e na comparação com os dados do fabricante. Os dados apresentados neste capítulo se encontram no (Apêndice D – DADOS EXPERIMENTAIS e Anexo A – DADOS DO FABRICANTE).

Segundo Aguirre (2013), “A manipulação de vazão por meio de válvulas de controle baseia-se na dissipação de energia pela válvula. Apesar de muito utilizado, tal procedimento é menos eficiente, do ponto de vista energético, do que o uso de sistemas a velocidade variável”.

6.1 Cd médio Venturi

A Figura 21 apresenta um gráfico entre a vazão teórica do medidor Venturi e a vazão real. A vazão teórica foi obtida por meio do transdutor de pressão ao relacionar, através dos conceitos apresentado no capítulo 3, o diferencial de pressão obtido entre a entrada do tubo Venturi e a garganta. Por outro lado, a determinação da vazão real foi conduzida através do emprego do tanque volumétrico da bancada experimental, conforme descrito na seção 5.3. Esse componente essencial da metodologia possibilitou a medição direta da vazão real para à compreensão do desempenho do medidor em condições práticas.

Figura 21 – Cd médio Venturi.



Fonte: Autoria própria (2023).

O gráfico nos mostra uma equação de reta com coeficiente angular muito próximo de 1, ou seja, a média do Cd para as diversas vazões está muito próxima entre si. Os R^2 estão similares e a equação da reta descreve bem o comportamento do sistema. É possível notar que na faixa de interseção dos dados do fabricante e do experimento é difícil distinguir os pontos. Sua sobreposição indica que os experimentos estão convergindo conforme o esperado e, portanto, condizente com a literatura.

A faixa de pontos de vazão obtidos pelo fabricante começou em 0,089 l/s até o máximo de 0,270 l/s. Essa faixa não foi perfeitamente seguida pelo experimento devido à dificuldade do transdutor operar em vazões tão baixa, sendo possível somente operar do mínimo de 0.214961 l/s.

Em contrapartida, o limite superior foi estendido para permitir a obtenção de vários pontos necessários para melhor compreensão do comportamento do medidor. O maior ponto obtido foi 0.685871 l/s, no entanto, a limitação desta vez ocorreu devido ao tanque volumétrico não suportar o escoamento do fluido e devido a isso, o fluido acumular de modo que o líquido presente no tanque estivesse acima do início da escala, impossibilitando a coleta da vazão real.

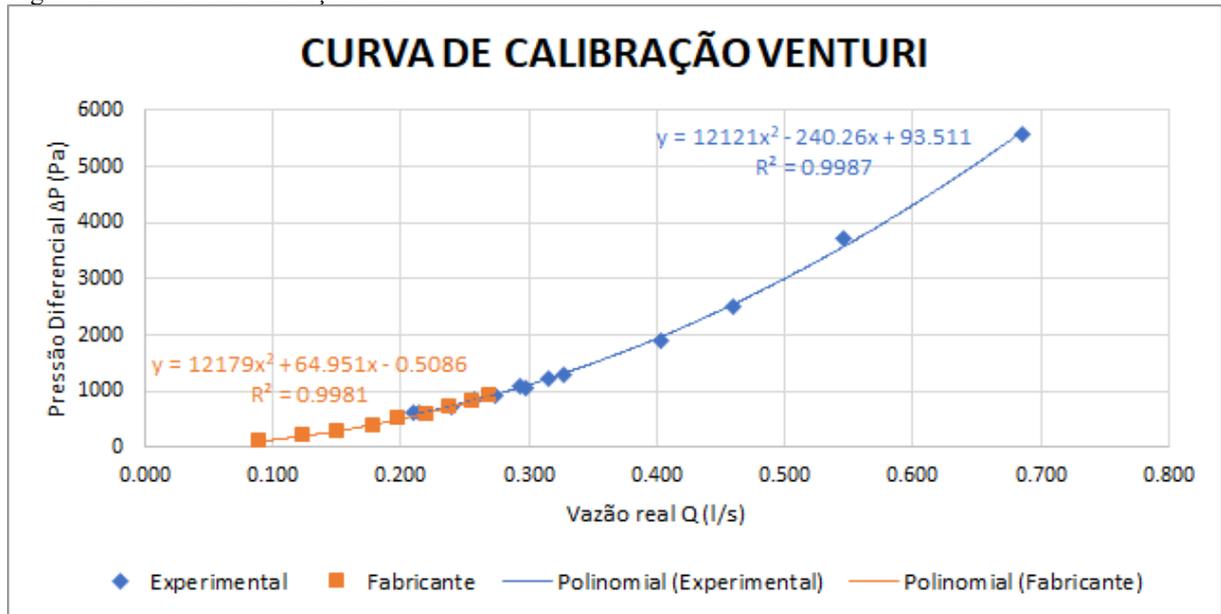
6.2 Curva de calibração Venturi

A curva de calibração é uma ferramenta essencial para garantir que o Venturi forneça medições precisas e confiáveis em um sistema específico. A obtenção desse tipo de

curva envolve testes nas condições mais próximas de trabalho. Os resultados desses testes são então representados graficamente.

O gráfico da Figura 22 estabelece a relação entre a vazão do fluido e a queda de pressão medida através do dispositivo Venturi. A curva mostra como o medidor responde a diferentes taxas de fluxo e ajuda a obter a vazão de forma rápida com cálculos simples.

Figura 22 – Curva de calibração Venturi.



Fonte: Autoria própria (2023).

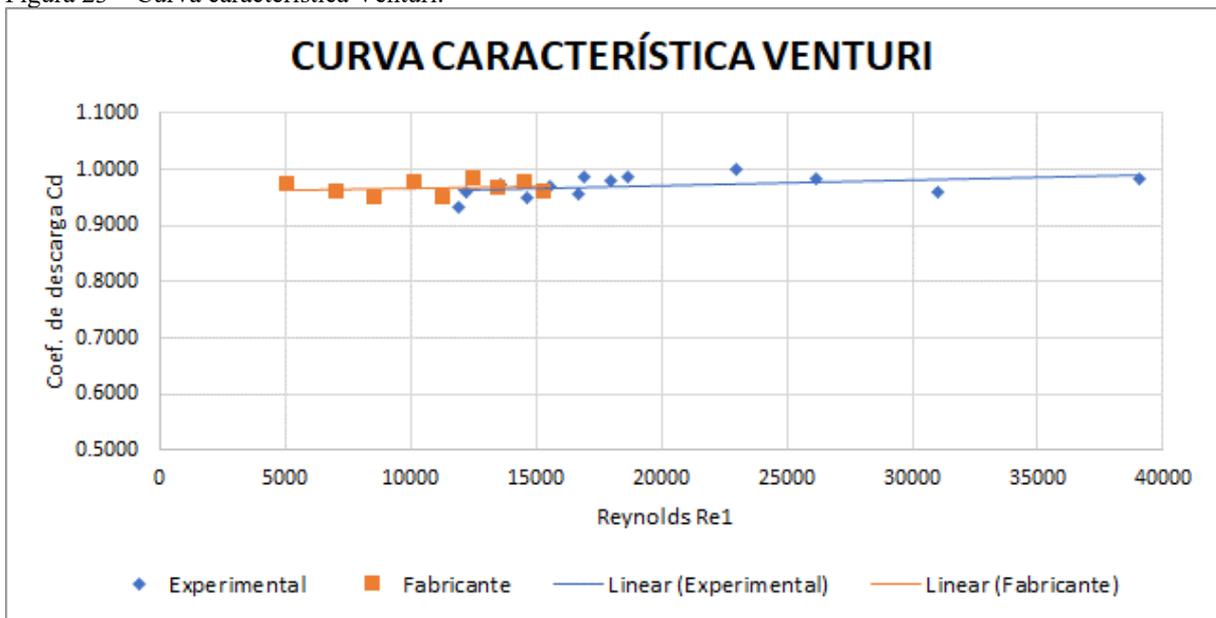
Um indicador fundamental da qualidade da curva de calibração é o R^2 . Quando esse coeficiente atinge o valor elevado de 0.99, como observado no gráfico, isso sugere uma correspondência extremamente forte entre os dados experimentais e a curva teórica. Em outras palavras, 99% da variabilidade nas medições pode ser explicada pela relação estabelecida na curva.

O alto valor de R^2 valida a robustez da curva de calibração, indicando que as medições realizadas pelo Venturi são confiáveis e consistentes. Isso significa que a curva é capaz de prever com precisão a vazão do fluido com base na queda de pressão observada. A confiança nesses resultados é crucial em ambientes onde precisão e confiabilidade são imperativos, como em sistemas industriais, laboratórios de pesquisa e processos experimentais complexos.

6.3 Curva característica Venturi

A Figura 23 representa o coeficiente de descarga em função do número de Reynolds. Nota-se uma similaridade nos dados quando comparados nos mesmos intervalos de vazão. No entanto, nas faixas de vazão maiores, observa-se que os valores começam a convergir para o coeficiente de descarga em aproximadamente 0,98.

Figura 23 – Curva característica Venturi.



Fonte: Autoria própria (2023).

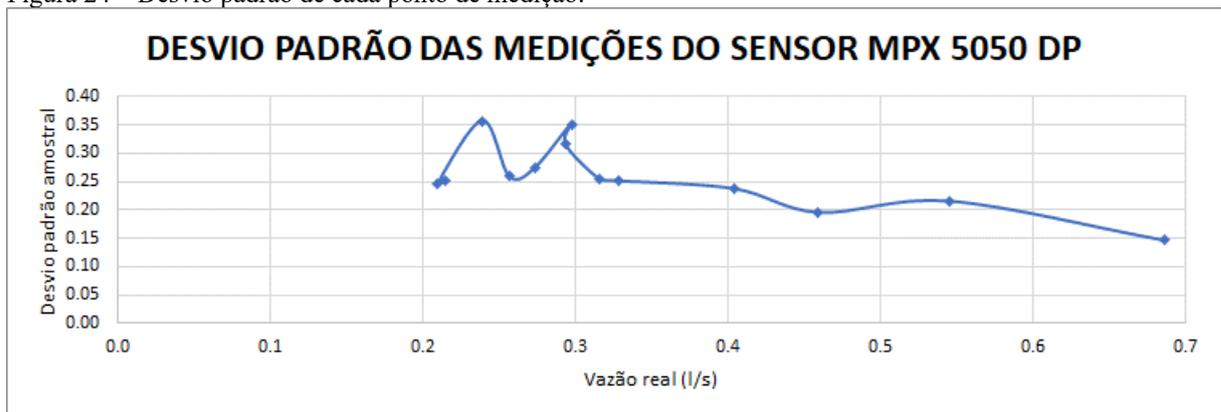
O trabalho de Hasan e Lucas (2011) mostrou que em fluidos multifásicos o coeficiente de descarga mais adequado foi aproximadamente 0,932. No estudo de Hutagalung (2019) o valor do coeficiente de descarga resultante está em uma faixa de 0,981 a 0,984. O livro de Fox, McDonald e Pritchard (2014) também aborda o tema e relata que os coeficientes C_d do Venturi abrangem uma faixa de 0,980 a 0,995 em Re elevados.

Diante disso, é possível observar que o trabalho desenvolvido está convergindo com os observados na literatura. O menor C_d foi de aproximadamente 0,932 observado nas vazões mais baixas, já o maior foi de 0,999 observado nas vazões mais elevada e nota-se uma estabilização do C_d para aproximadamente 0,98 conforme a vazão aumenta.

6.4 Desvio padrão das medições

O desvio padrão serve para medir a dispersão ou variabilidade dos dados em um conjunto. Em outras palavras, ele fornece uma medida quantitativa de quão distantes os valores individuais estão da média do conjunto de dados. Cada ponto do gráfico retrata o desvio padrão daquela vazão.

Figura 24 – Desvio padrão de cada ponto de medição.



Fonte: Autoria própria (2023).

Pode-se observar que o sensor apresentou desvio padrão amostral elevado e o comportamento do mesmo em vazões baixa se intensificou. No entanto, nas vazões elevadas, o desvio padrão se manteve estável com tendência à diminuição. Esse fenômeno explica a incapacidade de o medidor realizar as medições baixas, sua alta dispersão ocasiona na indefinição matemática do cálculo que apresentou erro matemático na extração da raiz quadrada da equação 10.

A análise e comparação dos dados coletados permitiram concluir que a obtenção dos valores do coeficiente de descarga do medidor Venturi usando transdutores de pressão e Arduino é uma abordagem viável. Os valores obtidos foram próximos dos dados do fabricante. Em relação aos dados coletados, observou-se um desvio padrão entre 0.35723028 e 0.14629563, sendo as maiores discrepâncias nas vazões baixas.

O alto desvio padrão do transdutor de pressão é um indicativo preocupante, pois sugere uma variação significativa nos resultados das medições em relação à média esperada. Essa disparidade pode ser atribuída a diversas causas e a identificação se faz necessário para garantir o controle sob o processo.

O desvio padrão pode ser influenciado pela sensibilidade do transdutor às condições ambientais. Variações na temperatura, pressão atmosférica ou umidade podem impactar a precisão das medições. Além disso, as ligações elétricas do sistema Arduino-sensor são frágeis e suscetíveis a ruídos e distorções do sinal.

7 CONCLUSÃO

O Tubo de Venturi é um objeto de aprendizado significativo e uma forma de medição fundamental. O entendimento do conceito de Tubo de Venturi por meio de teoria e prática, no caso, experimentação, possibilita a construção do conhecimento sólido e duradouro, promovendo um aprendizado significativo.

Os resultados desse experimento foram satisfatórios em comparação com os dados fornecidos pelo fabricante. A bancada de mecânica dos fluidos, usando transdutores de pressão, tende a seguir os resultados do fabricante, mas também é necessário ter cuidado com o manuseio do transdutor de pressão devido a sua sensibilidade às condições de trabalho. O controle da vazão pela válvula não permitiu seguir as vazões do fabricante, sendo necessário utilizar o piezômetro para melhor controle na abertura da válvula.

O tanque volumétrico apresenta dificuldade de iniciar a medição no começo da escala à medida que a vazão aumenta, isso ocorre devido à colisão do fluido com o fundo do tanque, gerando ondulações significativas no visor. Além disso, o tanque não consegue medir vazões muito altas, já que as válvulas não conseguem expulsar o fluido mais rapidamente do que é injetado no tanque, resultando em um nível acima do início da escala.

Durante o experimento, as operações foram executadas com o auxílio do técnico presente no laboratório devido à dificuldade de operar o equipamento e registrar os dados simultaneamente, portanto, a recomendação que consta na bancada no qual aconselha a presença de dois indivíduos é fundamental para a realização de experimentos na bancada mitigando a probabilidade de erros. No caso da medição da vazão, o principal fator que pode contribuir para o erro experimental foi o tempo de reação humana ao registrar no cronômetro, principalmente devido à dificuldade de iniciar o cronômetro adequadamente no valor zero do visor do tanque volumétrico.

Considerando o tempo necessário para a obtenção dos coeficientes manualmente, a proposta de obtenção dos dados por meio de transdutores se mostrou vantajosa, uma vez que o transdutor obtém de forma rápida os dados, abrangendo uma faixa mais ampla de trabalho pelo limite superior e necessitar de conhecimentos básicos de programação.

7.1 Melhorias para futuros estudos

Embora os objetivos do projeto tenham sido alcançados, algumas melhorias podem ser consideradas para futuros estudos:

a) Trocar a válvula de controle de vazão, pois a atual não é adequada para essa finalidade ou criar marcações na mesma.

b) Utilizar um transdutor de pressão mais adequado para a faixa de operação da bancada e comparar os resultados com o transdutor atual, principalmente pelo alto desvio padrão amostral encontrado.

c) Minimizar a oscilação no zero da escala na obtenção da vazão real através do tanque volumétrico.

REFERÊNCIAS

AGUIRRE, Luis Antonio. **Fundamentos de instrumentação**. São Paulo: Pearson, 2013.

ARMINDO, Robson André et al. **Desenvolvimento e avaliação de um sistema automatizado de aquisição de dados para medição de vazão, “Autoventuri”**. Bioscience Journal. Uberlândia, p. 764-774. set. 2011.

AZEVEDO NETTO, José Martiniano de et al. **Manual de hidráulica**. 8. ed. [S. L.]: Edgard Blücher Ltda, 1998.

BAKER, Roger C.. **Flow measurement handbook: industrial designs, operating principles, performance, and applications**. [S. L.]: Cambridge University Press, 2000.

BARROS, Gabriel Garnica; ROSA, Henrique Marcio Pereira. **Determinação e análise de coeficiente de descarga de um tubo de Venturi com auxílio de um sensor de diferença de pressão mpx5050**. The Journal Of Engineering And Exact Sciences, [S.L.], v. 4, n. 2, p. 0225-0228, 4 jul. 2018. Universidade Federal de Vicosa. <http://dx.doi.org/10.18540/jcecvl4iss2pp0225-0228>.

BELL, Ian H. et al. **Pure and pseudo-pure fluid thermophysical property evaluation and the open-source therm**. Industrial & Engineering Chemistry Research. [S.L.], p. 2498-2508. 13 jan. 2014. Disponível em: <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ie4033999>. Acesso em: 28 jun. 2023.

BLUM, Jeremy. **Exploring Arduino®: tools and techniques for engineering wizardry**. [S. L.]: Wiley, 2013.

BORGES, Luiz Eduardo. **Python para desenvolvedores: aborda python 3.3**. [S. L.]: Novatec, 2014. 320 p.

BRUNETTI, Franco. **Mecânica dos fluidos**. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.

CAETANO, Naitha Mallmann. **Modelagem e simulação do escoamento em um Venturi**. 2014. 50 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2014.

ÇENGEL, Yunus A.; CIMBALA, John M.. **Mecânica dos fluidos: fundamentos e aplicações**. [S. L.]: McGraw-Hill, 2012. Tradução de: Katia Aparecida Roque e Mario Moro Fecchio.

CID, A.s.; CORREA, T.. **Venturino: análise da variação de pressão em um tubo de venturi utilizando arduino e sensor de pressão**. Revista Brasileira de Ensino de Física, [S.L.], v. 41, n. 3, p. 20180333-20180333, 7 jan. 2019. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/1806-9126-rbef-2018-0333>.

CROVADOR, Alvaro. **O uso do Arduino em sala de aula no experimento do pêndulo simples de Galileu Galilei**. 2019. 84 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado Profissional em Educação e Novas Tecnologias, Centro Universitário Internacional Uninter, Curitiba, 2019.

DELMÉE, Gérard J.. **Manual de medição de vazão**. 3. ed. [S. L.]: Editora Blucher, 2003. 366 p.

D'AUSILIO, Alessandro. **Arduino: a low-cost multipurpose lab equipment**. Behavior Research Methods, [S.L.], v. 44, n. 2, p. 305-313, 25 out. 2011. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.3758/s13428-011-0163-z>.

FOX, Robert W.; MCDONALD, Alan T.; PRITCHARD, Philip J.. **Introdução à mecânica dos fluidos**. 8. ed. [S. L.]: Ltc, 2014. Tradução de: Ricardo Nicolau Nassar Koury e Luiz Machado.

GERARDO, Ruiz Solorio. **Historia del tubo Venturi**. 2012. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/371206838>. Acesso em: 27 ago. 2023.

GONÇALVES, João Emídio Rebouças. **Estudo e análise de uma bancada de mecânica dos fluidos localizada na Universidade Federal do Ceará**. 2021. 57 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Ceará, Russas-Ce, 2021. Disponível em: <http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/57831>. Acesso em: 02 ago. 2023.

GONZÁLEZ, Edmundo Pedroza; MEDEL, Josefina Ortiz; GONZÁLEZ, Francisco Martínez. **História do teorema de Bernoulli**. Acta Universitaria, Guanajuato, v. 17, n. 1, p. 39-45, abr. 2017. Disponível em: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=41617103>. Acesso em: 27 ago. 2023.

HASAN, Abbas H.A.M.; LUCAS, G.P.. **Experimental and theoretical study of the gas-water two phase flow through a conductance multiphase Venturi meter in vertical annular (wet gas) flow**. Nuclear Engineering And Design, [S.L.], v. 241, n. 6, p. 1998-2005, jun. 2011. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.nucengdes.2010.09.006>.

História e licença. 2023. Disponível em: <https://docs.python.org/3/license.html>. Acesso em: 23 out. 2023.

HOLLINGSHEAD, C.L. et al. **Discharge coefficient performance of Venturi, standard concentric orifice plate, V-cone and wedge flow meters at low Reynolds numbers**. Journal Of Petroleum Science And Engineering, [S.L.], v. 78, n. 3-4, p. 559-566, set. 2011. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.petrol.2011.08.008>.

HOLMAN, Jack Philip. **Experimental methods for engineers**. 8. ed. New York: McGraw-Hill, 2012. Disponível em: <https://mech.at.ua/HolmanICS.pdf>. Acesso em: 26 abr. 2023.

HUTAGALUNG, Sutrisno Salomo. **Estimation optimal value of discharge coefficient in a Venturi tubes**. Journal Of Physics: Conference Series, [S.L.], v. 1230, p. 012087, jul. 2019. IOP Publishing. <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/1230/1/012087>.

JUSTI, André Luiz; ZOCOLER, João Luis; SAIZAKI, Paula Mayumi. **Perda de carga no escoamento forçado de água e de vinhaça em tubulação de polietileno**. Revista Engenharia na Agricultura - Reveng, [S.L.], v. 25, n. 6, p. 569-578, 21 dez. 2017. Revista Engenharia na Agricultura. <http://dx.doi.org/10.13083/reveng.v25i6.849>.

KHAYAT, Omid; AFARIDEH, Hossein. **Numerical investigation of non-newtonian liquid-gas flow in Venturi flow meter using computational fluid dynamics**. Iranian Journal Of Science And Technology, Transactions Of Mechanical Engineering, [S.L.], v. 45, n. 2, p. 393-401, 3 out. 2019. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s40997-019-00321-z>.

LIMA, Matheus Gomes. **Análise da perda de carga em uma bancada de mecânica dos fluidos**. 2022. 65 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Ceará, Russas-Ce, 2022.

LOPEZ-BELMONTE, Jesus et al. **Arduino advances in web of science**. A Scientific Mapping of Literary Production. Ieee Access, [S.L.], v. 8, p. 128674-128682, 2020. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/access.2020.3008572>.

Manual de instruções: CRONÔMETRO DIGITAL MODELO CD-2800. [S. L.]: Instrutherm, 2018. Disponível em: https://www.instrutherm.com.br/media/catalog/product/c/d/cd-2800_17.01.2018_vers_pdf.pdf. Acesso em: 14 out. 2023.

MASGO, San Luis Baudilio Tolentino. **Estudio experimental y numérico de la presión del flujo de agua en un tubo Venturi**. Ingenius, [S.L.], n. 23, p. 9-22, 27 dez. 2019. Salesian Polytechnic University of Ecuador. <http://dx.doi.org/10.17163/ings.n23.2020.01>.

MONTGOMERY, Douglas C.. **Design and analysis of experiments**. 8. ed. [S. L.]: John Wiley & Sons, 2012. Disponível em: https://faculty.ksu.edu.sa/sites/default/files/douglas_c._montgomery-design_and_analysis_of_experime. Acesso em: 26 abr. 2023.

NOVACOSK, Marilene Probst. **O Arduino na programação de experiências em termodinâmica e em física moderna**. 2016. 208 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado Profissional de Ensino de Física, Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2016.

NXP, B.V. **mpx5050**: integrated silicon pressure sensor, on-chip signal conditioned, temperature compensated and calibrat. [S. L.]: Nxp Semiconductors, 2023. Disponível em: <https://www.nxp.com/docs/en/data-sheet/MPX5050.pdf>. Acesso em: 07 set. 2023.

READER-HARRIS, Michael. **Orifice plates and Venturi tubes**. [S. L.]: Springer, 2015.

SANTOS, Leandro da Silva. **mf1000**: sistema de ensaio para mecânica dos fluidos. [S. L.]: Nova Didacta, 2016.

SCHULTZ, Benjamin G.; VAN VUGT, Floris T.. **Tap Arduino**: an arduino microcontroller for low-latency auditory feedback in sensorimotor synchronization experim. Behavior Research Methods, [S.L.], v. 48, n. 4, p. 1591-1607, 5 nov. 2015. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.3758/s13428-015-0671-3>.

The engineer's guide to dp flow measurement. [S. L.]: Emerson, 2020.

What is Arduino?. 2023. Disponível em: <https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction>. Acesso em: 23 out. 2023.

APÊNDICE A – ALGORITMO IDE ARDUINO

```
#define saidaSensor_mpx A0          // Tensão de saída Vout
float valorSensorMPX = 0;          //leitura analógica do sensor MPX

void setup() {                     // inicializar variáveis, configurar o modo dos pinos (INPUT ou
  pinMode(saidaSensor_mpx,INPUT);  //Configura o pino especificado para se comportar como
  Serial.begin(9600);              //Define a taxa de dados em bits por segundo (baud) para
  }                                 transmissão de dados seriais
void loop() {                      // função para os dados
  valorSensorMPX = analogRead(saidaSensor_mpx); //Lê o valor do pino analógico especificado
  Serial.println(valorSensorMPX); //Imprime na porta serial o sinal do sensor MPX 5050DP.
  delay(40); // Repete o processo a cada 40 milésimo segundo, totalizando 25 medições por
  }                                 segundo
}
```

APÊNDICE B – ALGORITMO PYTHON

```

# -*- coding: utf-8 -*-
"""
Created on Thu Jun 22 13:54:18 2023

@author: Matheus Ribeiro Barreto
"""
from IPython import get_ipython #Remove todas as variaveis salvas do Variable explorer
get_ipython().magic('reset -sf')

import serial #Biblioteca para comunicação com arduino
import math #Biblioteca matemática
import numpy as np #Biblioteca para matrizes
import CoolProp.CoolProp as cp #Biblioteca de propriedades termodinâmicas

porta = "COM5" #Comunicação com o arduino
velocidade = 9600

fluido = 'Water'          #Dados do coolprop. Água
temp = 298.15             #K
pres = 101325             #Pa
rho = cp.PropsSI('D', 'T', temp, 'P', pres, fluido) #Função para definir a massa específica do fluido

valor_analogico_mpx = 0.0    #Valor do sinal analógico do sensor

tensao_mpx = 0.0 #Valor do sinal elétrico do sensor

offset_mpx = -0.0187522224206348 #Valor de correção do sensor mpx

pressao_kpa_mpx = 0.0 #Pressão do sensor
offset_vetor_sensor_mpx=np.array([],dtype=float) #Vetor com os dados medidos
vazao_teorica_venturi_vetor=np.array([],dtype=float)
pressao_kpa_mpx_vetor=np.array([],dtype=float)

i = 0
total_medicao = 125; #125 medições é igual a 5 segundos

soma_1 = 0.0
media_1 = 0.0

arduino = serial.Serial (porta, velocidade);    #Conexão com a porta do arduino

def calcular_tensao_sensor(valor_analogico,offset): #Converte o sinal analógico em tensão
    return (valor_analogico*5/(1024.0)) + offset_mpx

def calcular_pressao_kpa_sensor_mpx(tensao):
    pressao_kpa = ((tensao/5)-0.04)/0.018    #Função escrita de acordo com os dados do
    fabricante do sensor MPX5050DP

```

```

return pressao_kpa          #Retorna o valor de pressão em bar

def calcular_vazao_teorica_venturi(pressao_kpa,rho):
    pressao_pa=pressao_kpa*1000
    dens=rho
    D1=24.3/1000
    D2=15.55/1000
    A1 = math.pi*math.pow(D1,2)/4
    A2 = math.pi*math.pow(D2,2)/4
    vazao = A1* math.sqrt((2*pressao_pa)/(dens*((math.pow(A1,2)/math.pow(A2,2))-1)))
    vazao_1_s = vazao*1000          #Fator conversão m^3/s para l/min
    return vazao_1_s

while True:
    ""
    while i < total_medicao: # Somatório das primeiras medidas de tensões para definir o offset
        linha = str(arduino.readline()) #Armazena na string "linha" os valores impressos na serial do
        arduino
        linhaFormat = linha[2:-5] #Comando para limpar as duas primeiras e as cinco últimas
        colunas

        valor_analogico_mpx = float(linhaFormat.split(" ")[0])

        offset_mpx = 0.0 #Valor de correção do sensor mpx

        tensao_mpx = calcular_tensao_sensor(valor_analogico_mpx, offset_mpx)
        offset_mpx = 0.2 - tensao_mpx
        soma_1 += tensao_mpx
        i += 1
        offset_vetor_sensor_mpx=np.append(offset_vetor_sensor_mpx, offset_mpx)
        tensao_mpx_corrigida=tensao_mpx+offset_mpx
        print("medida: ", i,"Valor Offset:",round(offset_mpx,5), "V","Valor tensão
        antes:",round(tensao_mpx,5), "V","Valor tensão depois:",round(tensao_mpx_corrigida,5),
        "V","\n")

        i+=1
        if i==total_medicao: # Total de medições coletadas
            break
        print("Valor médio Offset:",round(np.mean(offset_vetor_sensor_mpx),5), "V")
        break
    ""

    linha = str(arduino.readline()) #Armazena na string "linha" os valores impressos na serial do
    arduino
    linhaFormat = linha[2:-5] #Comando para limpar as duas primeiras e as cinco últimas colunas

    valor_analogico_mpx = float(linhaFormat.split(" ")[0]) #divide o conteúdo da string em
    colunas e transforma os valores analógicos da primeira coluna em float

    tensao_mpx = calcular_tensao_sensor(valor_analogico_mpx, offset_mpx) #Calcula a tensão do
    sensor

```

```

    pressao_kpa_mpx = calcular_pressao_kpa_sensor_mpx(tensao_mpx) #Calcula a pressão em
    bar dos sensores

    vazao_teorica_venturi_mpx = calcular_vazao_teorica_venturi(pressao_kpa_mpx,rho)
    #Transformar velocidade em vazão

    vazao_teorica_venturi_vetor=np.append(vazao_teorica_venturi_vetor,
    vazao_teorica_venturi_mpx)
    pressao_kpa_mpx_vetor=np.append(pressao_kpa_mpx_vetor, pressao_kpa_mpx)

    print("Delta P:",round(pressao_kpa_mpx, 5), "Pa","Vazão
    teórica:",round(vazao_teorica_venturi_mpx,5), "l/s")

    i+=1
    if i==total_medicao: # Total de medições coletadas
        break

arduino.close()

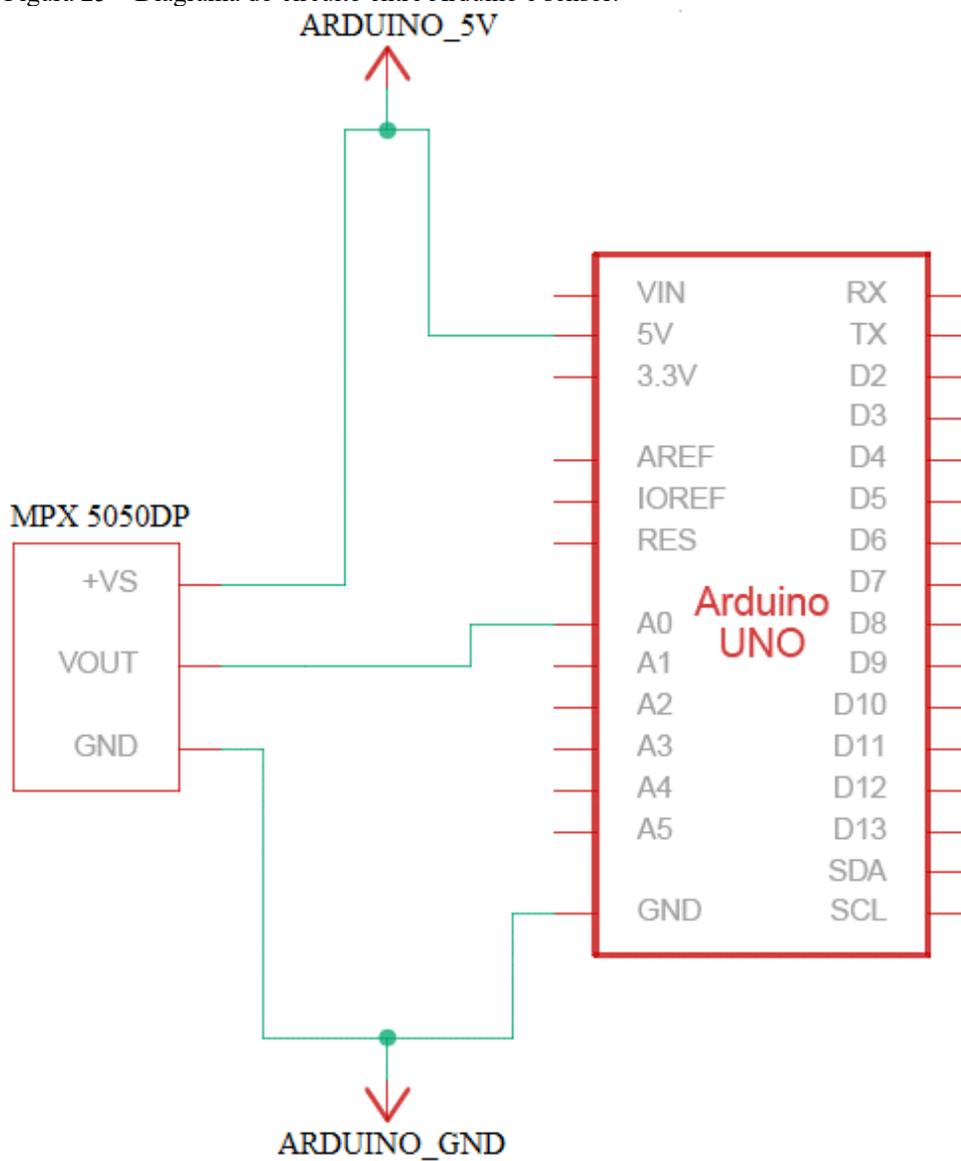
print("Média de delta P:",round(np.mean(pressao_kpa_mpx_vetor) ,5)*1000, "Pa","Média da
vazão teórica:",round(np.mean(vazao_teorica_venturi_vetor) ,5), "l/s")
np.savetxt('teste_vazao_teorica_ls.csv', vazao_teorica_venturi_vetor)
np.savetxt('teste_pressaompkpa_venturi.csv', pressao_kpa_mpx_vetor)

'''
np.savetxt('0_offset_mpx.csv', offset_vetor_sensor_mpx)
'''
}

```

APÊNDICE C – DIAGRAMA DO CIRCUITO

Figura 25 – Diagrama do circuito entre Arduino e sensor.



Fonte: Autoria própria (2023).

APÊNDICE D – DADOS EXPERIMENTAIS

Tabela 3 – Dados obtidos experimentalmente.

Vazão real (l/s)	Pressão ΔP (Pa)	Vazão teórica (l/s)	Coef. de descarga Cd	Velocidade real v_1 (m/s)	Reynolds Re_1
0.685871	5580.70	0.6963	0.985022	1.47817	39042.98
0.545256	3707.44	0.56736	0.961041	1.175121	31038.53
0.459137	2517.34	0.46715	0.982847	0.989519	26136.21
0.403551	1893.64	0.40384	0.999285	0.869723	22972.02
0.327869	1289.04	0.33279	0.985212	0.706614	18663.82
0.315457	1220.03	0.32238	0.978527	0.679865	17957.31
0.293255	1096.33	0.30654	0.956662	0.632015	16693.45
0.297265	1068.55	0.30143	0.986183	0.640658	16921.72
0.273224	917.51	0.28146	0.970738	0.588845	15553.19
0.256674	856.75	0.27066	0.948325	0.553176	14611.05
0.239006	710.48	0.24594	0.971805	0.515099	13605.32
0.209644	612.39	0.2249	0.932164	0.451818	11933.89
0.214961	604.58	0.22387	0.960206	0.463279	12236.60

Fonte: Aatoria própria (2023).

ANEXO A – DADOS DO FABRICANTE

Tabela 4 – Dados do fabricante.

Vazão real (l/s)	Pressão ΔP (Pa)	Vazão teórica (l/s)	Coef. de descarga C_d	Velocidade real v_1 (m/s)	Reynolds Re_1
0,270	919.231	0,280	0,961	0,581	15351
0,256	801.882	0,262	0,978	0,552	14588
0,238	704.092	0,245	0,968	0,512	13528
0,220	586.743	0,224	0,983	0,475	12545
0,198	508.511	0,209	0,951	0,428	11300
0,179	391.162	0,183	0,976	0,385	10170
0,150	293.372	0,158	0,949	0,324	8564
0,124	195.581	0,129	0,961	0,268	7078
0,089	97.791	0,091	0,974	0,192	5071

Fonte: Sistema de Ensaio para Mecânica dos Fluidos (2016) modificado.