



UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALFENAS

BACHARELADO INTERDISCIPLINAR EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA

**DESENVOLVIMENTO DE UM SENSOR DE VAZÃO DE PLACA DE ORIFÍCIO
COM AQUISIÇÃO ELETRÔNICA DA DIFERENÇA DE PRESSÃO**

LARA CRISTINE ZAMBELLI CARREIRO
MATHEUS DE OLIVEIRA ALVES RIBEIRO

POÇOS DE CALDAS

2024

LARA CRISTINE ZAMBELLI CARREIRO
MATHEUS DE OLIVEIRA ALVES RIBEIRO

**DESENVOLVIMENTO DE UM SENSOR DE VAZÃO DE PLACA DE ORIFÍCIO
COM AQUISIÇÃO ELETRÔNICA DA DIFERENÇA DE PRESSÃO**

Dissertação apresentada como parte dos requisitos para a obtenção do título de Bacharel Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia pela Universidade Federal de Alfenas.

Orientador: Prof. Dr. Laos Alexandre Hirano.

Coorientador: Prof. Dr. Marcos Vinícius Rodrigues.

Poços de Caldas - MG

Dezembro/2024

LARA CRISTINE ZAMBELLI CARREIRO
MATHEUS DE OLIVEIRA ALVES RIBEIRO

**DIMENSIONAMENTO E CALIBRAÇÃO DE UM EQUIPAMENTO PARA
MEDIÇÃO DE VAZÃO UTILIZANDO UM SENSOR DE PRESSÃO DIFERENCIAL**

O(A) Presidente da banca examinadora abaixo
assina a aprovação da Dissertação apresentada
como parte dos requisitos para obtenção do
título de Bacharel Interdisciplinar em Ciência
e Tecnologia pela Universidade Federal de
Alfenas.

Aprovada em: 12 de Dezembro de 2024

Prof. Dr. Laos Alexandre Hirano

Assinatura:

Instituição: UNIFAL – campus de Poços de Caldas

Prof. Dr. Marcos Vinicius Rodrigues

Assinatura:

Instituição: UNIFAL – campus de Poços de Caldas

Prof.^a Dr.^a

Assinatura:

Instituição: UNIFAL – campus de Poços de Caldas

AGRADECIMENTOS

Aos nossos pais, nossas bases, que não pouparam esforços para nos proporcionarem as melhores oportunidades, e também por serem fontes de inspiração e orgulho na vida.

Aos Professores Doutores Laos Alexandre Hirano e Marcos Vinícius Rodrigues que nos auxiliaram muito nesse trabalho, com imenso conhecimento transmitido, suporte e confiança. Foi uma experiência enriquecedora tê-los como nossos orientadores deste projeto.

Ao Professor Dr. Daniel Pamplona, que nos forneceu a expertise e equipamentos fundamentais para o desenvolvimento de partes cruciais do nosso projeto.

Aos demais professores do Bacharelado Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia, que sempre nos proporcionaram novos conhecimentos.

RESUMO

O trabalho apresenta o desenvolvimento de um sensor de vazão com placa de orifício, integrado a um sistema de aquisição eletrônica para medição da diferença de pressão, projetado para aplicações didáticas no Laboratório de Mecânica dos Fluidos. Este sistema visa aprimorar a compreensão prática dos conceitos de vazão e pressão diferencial, frequentemente abordados em disciplinas de engenharia. O equipamento, composto por dois sensores de pressão diferencial MPS20N0040D, conectados a uma interface eletrônica baseada no microcontrolador Arduino UNO, permite a coleta de dados em tempo real com expressiva consistência. A montagem do protótipo inclui tubos de PVC, sensores de pressão posicionados antes e depois da placa de orifício, e um sistema eletrônico embarcado para aquisição dos dados. O equipamento foi projetado para calcular parâmetros fundamentais, como a velocidade real do fluido, o número de Reynolds e o coeficiente k em função de Reynolds, que caracteriza o comportamento do escoamento na placa de orifício. Durante o processo, a calibração dos sensores foi realizada utilizando um manômetro em U, atestando a linearização dos dados coletados e a confiabilidade dos resultados obtidos nos ensaios práticos. Os resultados experimentais demonstraram a viabilidade do equipamento, que se mostrou eficiente para aplicações acadêmicas, especialmente em aulas práticas de Mecânica dos Fluidos. O sistema possibilitou análises detalhadas de variações de pressão, vazão e velocidade, com valores que se mostraram consistentes em relação às previsões teóricas. A padronização da calibração reforçou a importância de metodologias confiáveis que validem a qualidade das medições. Além disso, o trabalho aponta para novas perspectivas de melhorias e futuras aplicações, como o uso de sensores com maior faixa de medição, o desenvolvimento de sistemas de automação para integração com controladores industriais e a criação de interfaces mais intuitivas para análise dos dados.

Palavras-chave: calibração; placa de orifício; sensor de pressão; vazão.

ABSTRACT

The study presents the development of a flow sensor using an orifice plate, integrated with an electronic acquisition system for differential pressure measurement, designed for didactic applications in the Fluid Mechanics Laboratory. This system aims to enhance practical understanding of flow and differential pressure concepts, which are frequently addressed in engineering disciplines. The equipment, consisting of two MPS20N0040D differential pressure sensors connected to an electronic interface based on the Arduino UNO microcontroller, enables real-time data collection with significant consistency. The prototype assembly includes PVC pipes, pressure sensors positioned before and after the orifice plate, and an embedded electronic system for data acquisition. The equipment was designed to calculate fundamental parameters such as the actual fluid velocity, the Reynolds number, and the k coefficient as a function of Reynolds, which characterizes the flow behavior through the orifice plate. During the process, the sensors were calibrated using a U-tube manometer, ensuring the linearization of the collected data and the reliability of the results obtained in the practical tests. The experimental results demonstrated the feasibility of the equipment, which proved to be efficient for academic applications, especially in practical Fluid Mechanics classes. The system allowed detailed analyses of pressure, flow rate, and velocity variations, with values consistent with theoretical predictions. The calibration standardization reinforced the importance of reliable methodologies to validate measurement quality. Furthermore, the study highlights new prospects for improvements and future applications, such as the use of sensors with a broader measurement range, the development of automation systems for integration with industrial controllers, and the creation of more intuitive interfaces for data analysis.

Keywords: calibration; orifice plate; pressure sensor; flow rate.

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1.....	12
Equação 2.....	12
Equação 3.....	13
Equação 4.....	13
Equação 5.....	15
Equação 6.....	15
Equação 7.....	15
Equação 8	20
Equação 9	20
Equação 10	26
Equação 11.....	26
Equação 12.....	26
Equação 13.....	26
Equação 14.....	26
Equação 15.....	26
Equação 16.....	26
Equação 17.....	30
Equação 18.....	30
Equação 19.....	30
Equação 20.....	31
Equação 21.....	31
Equação 22.....	31
Equação 23.....	35
Equação 24.....	35
Equação 25.....	35

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Desenho esquemático de um medidor de vazão com placa de orifício.....	14
Figura 2 - Diagrama k em função de R_e e $\frac{D_0}{D}$	16
Figura 3 - Placa de Arduino® UNO.....	17
Figura 4 - Sensor de pressão MPS20N0040D.....	18
Figura 5 - Dimensões do Sensor de pressão MPS20N0040D.....	18
Figura 6 - Esquema da calibração dos sensores de pressão.....	19
Figura 7 - Esquema do circuito para a calibração dos sensores.....	20
Figura 8 - Esquema de integração do manômetro em U.....	21
Figura 9 - Conexão do manômetro em U e sensor.....	21
Figura 10 - Esquema do experimento prático de vazão.....	22
Figura 11 - Esquema da montagem do circuito.....	23
Figura 12 - Esquema de montagem do sistema prático.....	24
Figura 13 - Placa de orifício.....	24
Figura 14 - Esquema representativo do sistema de montagem com suas dimensões em centímetros.....	25
Figura 15 - Tubo em U.....	27
Figura 16 - Conexão Tubo em U do sistema fechado.....	28
Figura 17 - Manômetros e pêra de sucção.....	28
Figura 18 - Protoboard e arduino UNO.....	29
Figura 19 - Gráfico das retas ajustadas do sensor 1.....	30
Figura 20 - Gráfico das retas ajustadas do sensor 2.....	31
Figura 21 - Montagem do sistema.....	33
Figura 22 - Ensaio prático.....	34
Figura 23 - Ensaio prático.....	34
Figura 24 - Gráfico das retas ajustadas dos três procedimentos experimentais.....	35

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação de medidores de vazão.....	13
Tabela 2 - Dados dos sensores 1 e 2.....	32
Tabela 3 - Dados dos experimentos práticos 1, 2 e 3.....	36

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	11
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	12
2.1 Vazão.....	12
2.1.1 Medidores deprimogênios.....	13
2.2 Placa de orifício.....	14
2.3 Trabalhos Anteriores.....	16
2.4 Arduino.....	17
2.5 Sensor de pressão.....	18
3. METODOLOGIA.....	19
3.1 Escolha do sensor.....	19
3.2 Calibração.....	19
3.2.1 Circuito de aquisição e interface.....	19
3.2.2 Integração e coleta de dados.....	21
3.3 Experimento prático de vazão.....	22
3.3.1 Circuito de aquisição e interface.....	22
3.3.2 Montagem do sistema.....	23
3.3.2.1 Montagem do sistema da placa de orifício.....	24
3.3.3 Teste e coleta de dados.....	25
3.4 Método dos mínimos quadrados e qualidade de ajuste.....	25
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	27
4.1 Calibração.....	27
4.1.1 Tratamento de dados.....	29
Tabela 2 - Dados dos sensores 1 e 2.....	32
4.2 Experimento prático de vazão.....	33
4.2.1 Tratamento de dados.....	34
4.2.1.1 Cálculo da velocidade.....	36
4.2.1.2 Número de Reynolds.....	36
4.2.1.3 Parâmetro k.....	37

5. CONCLUSÕES.....	38
6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	39
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	40
8. ANEXOS.....	42
Anexo A - Datasheet do sensor MPS20N0040D.....	42
Anexo B - Programa da Calibração dos Sensores de Pressão.....	45
Anexo C - Programação do Procedimento Experimental.....	47

1. INTRODUÇÃO

A medição de vazão é crucial para a eficiência e produtividade das indústrias, pois permite um controle de processo preciso, evitando perdas e gastos desnecessários. Essa medição é aplicada em diversas áreas, como, por exemplo, em estações de tratamento de água, medição de gases industriais e controle de combustíveis em processos de combustão (PROPEQ, 2019).

No Departamento Municipal de Água e Esgoto de Poços de Caldas, o DMAE, há uma preocupação com as perdas que perdura por anos, e através do Planejamento Estratégico e Plano Municipal de Saneamento Básico - PMSB - de 2014, foi possível atingir uma redução de 7,6% no atual índice trimestral de perdas (HWater, 2023), passando de 354 para 328 litros economizados por dia e poupando R\$ 3,5 milhões dos cofres públicos (Bispo, 2016).

Por se tratar de um parâmetro de operação importante, as principais técnicas de medição de vazão são abordadas em aulas de ciências de engenharia. Especificamente na Universidade Federal de Alfenas este assunto é amplamente abordado em unidades curriculares teóricas e práticas, como laboratório de Mecânica dos Fluidos e Operações Unitárias I.

Dessa forma, houve insatisfação com os métodos de cálculo de vazão e pressão abordados nas aulas de Mecânica dos Fluidos, onde são utilizados medidores deprimogênios - a medição da vazão ocorre a partir da pressão diferencial. A aferição acontece por meio de um manômetro em U subdimensionado, obtendo, por consequência, medidas imprecisas, o que dificulta a aprendizagem e interpretação dos resultados. Com isso, alguns trabalhos - realizados nas dependências do campus - evidenciaram que existem grandes limitações impossibilitando o sucesso de ambos os estudos (Borges; Correa, 2019; Ribeiro; Silva, 2022).

Portanto, o objetivo geral deste trabalho é desenvolver um medidor de vazão com placa de orifício com baixo custo de produção e aquisição eletrônica da variação de pressão em dois pontos distintos - entrada e saída - em tempo real, e, além disso, que seja possível utilizá-lo em aulas de Laboratório de Mecânica dos Fluidos. Já para os objetivos específicos, temos a calibração dos sensores de pressão através da comparação em tempo real com medidas retiradas de um manômetro em U, calibração do próprio medidor de vazão, determinação do parâmetro k da placa de orifício e comparação dos resultados experimentais com a literatura.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Vazão

De acordo com a literatura, a vazão pode ser definida como a quantidade de fluido - líquido ou gás - que escoar por uma seção reta de um conduto (livre ou fechado) por determinada unidade de tempo (Delmée, 2003; Oliveira, 2015). A medição desta grandeza pode ser feita pela massa (vazão mássica) ou pelo volume (vazão volumétrica), representadas nas equações 1 e 2 respectivamente.

$$Q_m = \frac{m}{t} \quad (1)$$

$$Q_v = \frac{V}{t} \quad (2)$$

Sendo:

m : massa, medida em kg;

V : volume, medido em m³;

t : tempo, medido em segundos (s).

Além disso, existem diversos medidores de vazão e podemos classificá-los em quatro grupos, sendo eles: os medidores deprimogênicos (geradores de Δp), lineares, volumétricos e de canais abertos. Cada tipo de instrumento possui características e limitações específicas, então, para a escolha entre os medidores é necessário considerar a perda de carga, pressão, temperatura, viscosidade e outros aspectos (Delmée, 2003). A tabela 1 apresenta os principais tipos de medidores de vazão e suas características.

Tabela 1 - Classificação de medidores de vazão.

Medidores de vazão							
Geradores de Δp		Medidores lineares		Volumétricos		Em canais abertos	
Placa	T	Área variável	Λ	Diafragma	G	Callhas	L
Bocal	T	Coriolis	Λ	Disco de natação	L	Vertedores	L
Venturi	T	Eletro-magnético	LC	Palheta	L		
		Térmico	Λ	Pistão oscilante	L		
Inserção		Turbina	Λ	Pistões recíprocos	L		
- Pitot	T	Ultra-sônico	T				
- Pitot de média	T	Vórtice	T	Rotor			
Especiais		Medidores especiais		- Lóbulo	G		
- Centrífugos	Λ	Força	Λ	- Engrenagem	L		
- Laminares	G	Correlação	E	- Semi-imerso	G		
- Jato	Λ	Laser	G				

T, líquidos, gases e vapor; G, medição de gases, exclusivamente; L, medição de líquidos, exclusivamente; LC, medição de líquidos condutores de eletricidade, exclusivamente; Λ , indica que não é usado para vapores, salvo exceção; E, líquidos com sólidos em suspensão.

Fonte: Delmée (2003).

2.1.1 Medidores deprimogênios

A medição por elementos deprimogênios - principalmente a placa de orifício - é, apesar de antiga, muito utilizada em diversas aplicações industriais. Estes elementos são utilizados para medição de vazão gerando condições conhecidas de queda de pressão, desse modo, a pressão diferencial nos fornece uma medida indireta da vazão medida (Oliveira, 2015). Além disso, são utilizadas leis físicas para fundamentar a teoria de medição de vazão por pressão diferencial, sendo elas: a equação da continuidade e a equação de Bernoulli.

A equação da continuidade é aplicada em fluidos incompressíveis - sua densidade permanece constante durante o tempo - em um duto completamente preenchido. Nele, a seção varia de S_1 para S_2 , desse modo, em determinado instante, a vazão volumétrica Q é igual ao produto da velocidade (V) pela seção (S), com isso, temos:

$$Q = S_1 V_1 = S_2 V_2 \quad (3)$$

Já a equação de Bernoulli, estabelece uma relação entre velocidade e pressão em um filete líquido cujo diâmetro (por hipótese, muito pequeno) varia em determinado trecho indo de uma seção S_1 para uma seção S_2 . Dessa maneira, após sua dedução, a fórmula é expressa da seguinte forma:

$$p_1 + \frac{\rho v_1^2}{2} + \rho * g * z_1 = p_2 + \frac{\rho v_2^2}{2} + \rho * g * z_2 \quad (4)$$

Onde:

p_1 : pressão do fluido no ponto 1, medida em Pascal (Pa);

p_2 : pressão do fluido no ponto 2, medida em Pascal (Pa);

z_1 : altura do fluido no ponto 1, medida em metros (m);

z_2 : altura do fluido no ponto 2, medida em metros (m);

v_1 : velocidade do fluido no ponto 1, medida em m/s;

v_2 : velocidade do fluido no ponto 2, medida em m/s;

ρ : massa específica, medida em kg/m³;

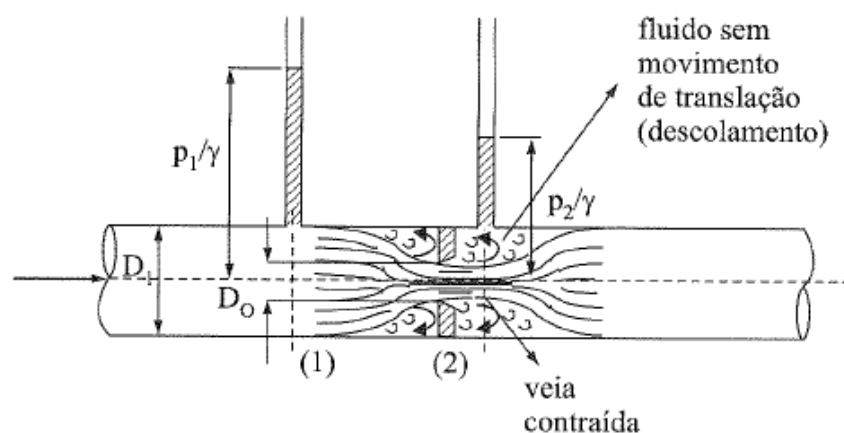
g : aceleração da gravidade, aproximadamente 9,8 m/s².

2.2 Placa de orifício

O medidor de vazão de placa de orifício, por mais que seja uma técnica antiga - vem sendo utilizada desde o Império Romano - ainda é extremamente útil para aplicações industriais (Orfanó, 2018).

Uma placa de orifício é uma placa com uma espessura fina e aresta viva que possui um orifício (podendo ser concêntrico, excêntrico ou segmentar), as dimensões são padronizadas pela norma brasileira NBR ISO 5167 e internacionais ISO 5167 e AGA 3 (Oliveira, 2015). Esse instrumento é normalmente colocado em um tubo, e quando o fluido passa pelo orifício ele é forçado a convergir e passar pelo orifício fazendo com que sua velocidade aumente e a pressão diminua (Orfanó, 2018). É possível observar o fenômeno descrito na figura 1.

Figura 1 - Desenho esquemático de um medidor de vazão com placa de orifício.



Fonte: Brunetti (2008).

Ao provocar o estrangulamento do escoamento do fluido - por meio de uma placa de orifício -, além de gerar um aumento na velocidade e diminuição da pressão, também ocorre

a perda de carga, ocasionada pela brusca variação da área da seção transversal (Borges; Correa, 2019). Dessa maneira, é possível relacionar a vazão e a perda de carga por meio da equação 4 nos pontos (1) e (2) da figura 1, resultando na equação 5:

$$Q = k * A_0 \sqrt{2g \frac{\Delta p}{\gamma}} \quad (5)$$

No qual:

Q : vazão, medida em m³/s;

A_0 : área da tubulação, medida em m²;

Δp : pressão diferencial, medida em Pascal (Pa);

g : aceleração da gravidade, aproximadamente 9,8 m/s²;

γ : peso específico do fluido, medido em N/m³;

k : constante adimensional dependente dos seguintes fatores: relação entre orifício e tubulação, e características do fluido.

Com isso, após a manipulação e simplificação da fórmula, obtém-se a seguinte expressão:

$$Q = k * \sqrt{\Delta p} \quad (6)$$

Onde:

Q : vazão, medida em m³/s;

k : constante adimensional dependente dos seguintes fatores: relação entre orifício e tubulação, e características do fluido;

Δp : pressão diferencial, medida em Pascal (Pa).

O parâmetro k da placa de orifício, apresentado nas equações 5 e 6, é a diferença entre o valor ideal da velocidade do fluido, determinado pela equação de Bernoulli, e o valor real determinado experimentalmente. Mas também pode ser relacionado ao número de Reynolds - “identificador de regime” de escoamento (Delmée, 2003), representado na equação 7 - de aproximação e a razão do diâmetro interno (D_0) e diâmetro externo (D).

$$R_e = \frac{V * D}{\nu} \quad (7)$$

Sendo:

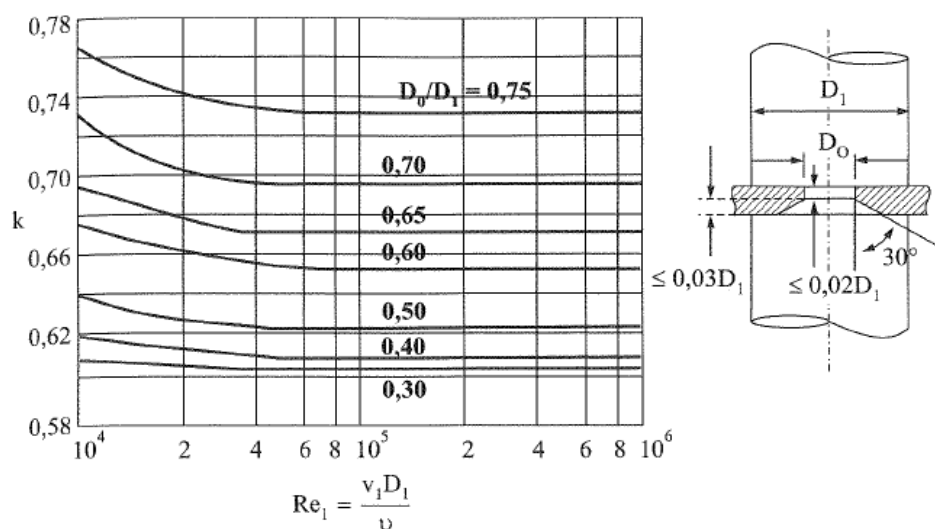
V : velocidade, medida em m/s;

D : diâmetro, medido em metros (m);

ν : viscosidade, medida em m/s².

Assim, é possível encontrar o valor do coeficiente através do diagrama k em função de Re e $\frac{D_0}{D}$, apresentado na figura 2 (Borges; Correa, 2019).

Figura 2 - Diagrama k em função de Re e $\frac{D_0}{D}$.



Fonte: Brunetti (2008).

2.3 Trabalhos Anteriores

A vazão é uma grandeza muito importante, abordada em diversos cursos, na Universidade Federal de Alfenas, campus Poços de Caldas, apresenta problemas na medição deste parâmetro devido à falta de um instrumento capaz de determinar a variação de pressão. Com isso, houveram trabalhos com o objetivo de solucionar essa problemática.

No primeiro estudo, de Borges e Correa (2019), foi proposto um dimensionamento e calibração de um equipamento para medição de vazão utilizando sensores de pressão diferencial. Na monografia, o sensor de escolha foi o MPX5700DP, que possui um range de 700 kPa, com ele foram realizados experimentos a fim de calibrar os sensores para que fosse possível utilizá-los na prática de aferição de vazão.

A calibração de pressão foi dividida em duas faixas de medição, para valores de pressão menores ($42 < ADC < 53$) utilizou-se o manômetro em U de coluna d'água, enquanto para valores maiores ($53 < ADC < 63$) o de coluna de mercúrio. Contudo, ao realizarem a prática, foi observado que o instrumento de coluna d'água apresentou problemas para valores maiores que 8,1 kPa. Apesar das limitações na sensibilidade do dispositivo, o experimento de vazão conseguiu ser concluído. Porém, foi sugerido que houvesse uma continuação para este estudo, pelo fato da faixa utilizada para a calibração do sensor ser muito pouco aproveitada (Borges; Correa, 2019).

Então, pensando nisso, iniciou-se um novo projeto. Em Ribeiro e Silva (2022), o sensor eletrônico adotado foi o MPS20N0040D com um alcance de 0 a 40 kPa, esse dispositivo foi escolhido pelo fato do alcance em aulas da Unifal ser de até 10 kPa.

Ao realizarem a calibração dos sensores, observou-se que o fator de ajuste foi distinto dos dois sensores calibrados, trazendo a possibilidade de que a calibração proposta pelo fabricante pode conter erros. Além disso, quando obtiveram os dados no experimento de vazão com placa de orifício, concluiu-se que nem todos os pontos coletados de entrada tiveram alteração na pressão e os valores de pressão da saída diminuíram conforme os de vazão aumentavam.

Dessa maneira, o trabalho foi inconclusivo pelo fato dos resultados experimentais encontrados não serem condizentes com a teoria, e, deixando claro que ainda são necessários mais estudos referentes ao tema.

2.4 Arduino

Segundo Mcroberts (2018), o Arduino® (Figura 3) é um pequeno computador que você pode programar para processar entradas e saídas entre o dispositivo e os componentes externos conectados a ele. É uma plataforma de computação física/embarcada, ou seja, um sistema que pode interagir com seu ambiente por meio de hardware e software. Podendo ser conectado a lâmpadas, botões, interruptores, sensores de temperatura, de pressão, de vazão, umidade ou qualquer outro dispositivo que emita dados ou possa ser controlado.

Figura 3 - Placa de Arduino® UNO.



Fonte: RoboBuilders (2024).

2.5 Sensor de pressão

A figura 4 apresenta o sensor de pressão MPS20N0040D, um componente eletrônico extremamente compacto e tecnológico, é utilizado para medir a pressão diferencial de diferentes tipos de fluidos, e pode ser trabalhado em conjunto com diversas placas, como por exemplo o Arduino. Isso deve-se porque esse dispositivo apresenta um conversor analógico digital (ADC) com a precisão de 24 bits (Ribeiro; Silva, 2022; Da Silva, 2021, p. 130-143).

Figura 4 - Sensor de pressão MPS20N0040D.



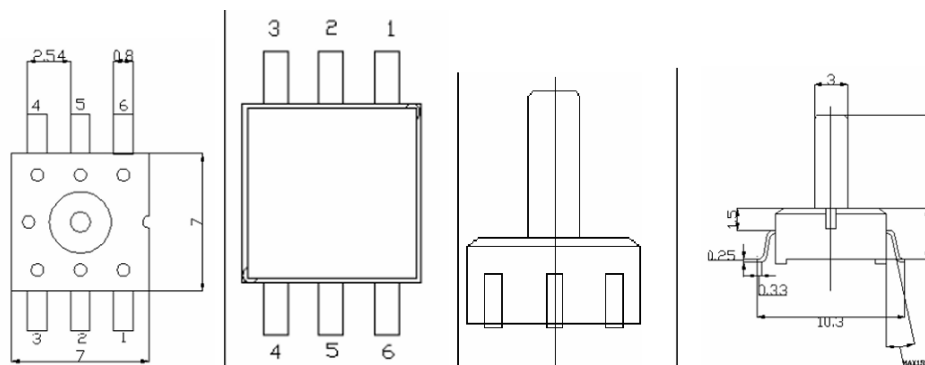
Fonte: Autoria própria (2024).

Algumas de suas especificações técnicas, de acordo com seu datasheet, são:

- a) Faixa de medição de pressão (range): 0 a 40 kPa;
- b) Tensão de trabalho: 5V;
- c) Faixa de temperatura: -40 a 85/C;
- d) Linearidade: $\pm 0,3\%$ F.S;
- e) Histerese: $\pm 0,7\%$ F.S.

Ademais, esse sensor de pressão, por conta de suas características, pode ser utilizado em diferentes projetos, como em máquinas pneumáticas, emissão de gases e medição de vazões de tubulações. A Figura 5 detalha as dimensões dos elementos componentes do sensor MPS20N0040D (em milímetros).

Figura 5 - Dimensões do Sensor de pressão MPS20N0040D.



Fonte: Datasheet (2021).

3. METODOLOGIA

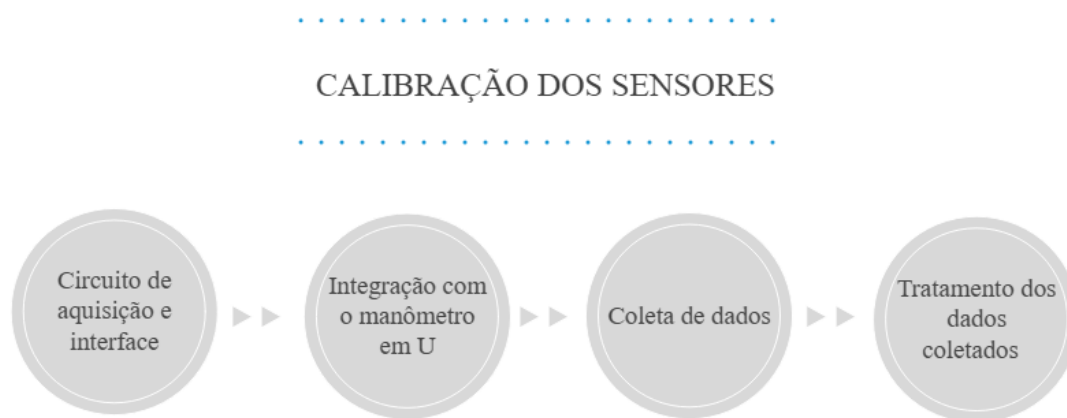
3.1 Escolha do sensor

O sensor foi selecionado após uma extensa pesquisa na internet, visando identificar a melhor opção para as condições dos ensaios experimentais. Este sensor possui um alcance de medição que varia de 0 kPa a 40 kPa, sendo que nas aulas laboratoriais de Mecânica dos Fluidos, o alcance utilizado é de até 10 kPa. Além disso, o sensor é equipado com um conversor analógico-digital (ADC) com precisão de 24 bits, o que garante alta precisão nas medições, além de sua linearidade, facilidade de implementação e alcance de medição do sensor de pressão. Outro fator decisivo para sua escolha foi o excelente custo-benefício, com um preço aproximado de R\$40,00, o que facilita a reposição ou estoque.

3.2 Calibração

O procedimento de calibração dos sensores foi realizado em algumas etapas, conforme a figura 6.

Figura 6 - Esquema da calibração dos sensores de pressão.



Fonte: Autoria própria (2024).

De acordo com a figura 6, o circuito de aquisição e interface foi integrado ao manômetro em U para posterior coleta e tratamento de dados.

3.2.1 Circuito de aquisição e interface

Na primeira parte, após a montagem do circuito, foi criado o código para um sensor de pressão, utilizando o Arduino UNO. Na programação, a coleta de dados ocorre ininterruptamente ao apertarmos qualquer tecla no computador.

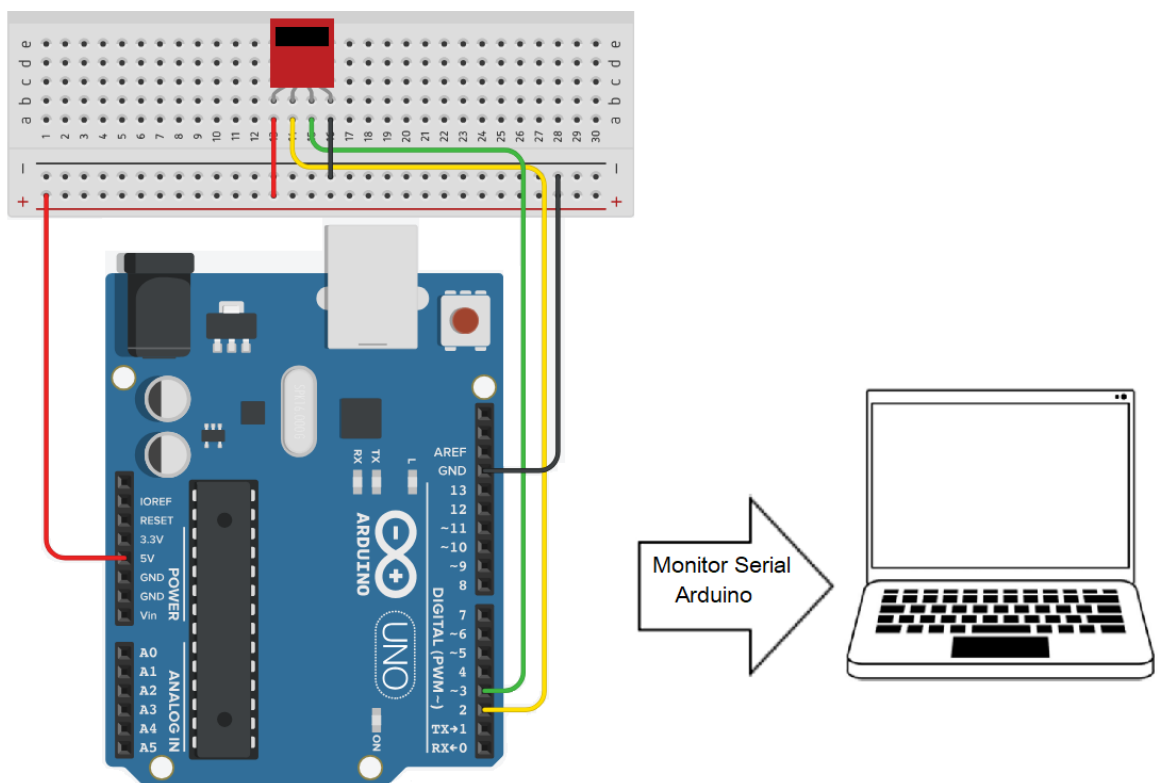
Em relação aos sensores, ambos possuem as portas VCC, GND, OUT e SCK, para as duas primeiras, foram conectadas no 5V e no GND da placa (para cada sensor), enquanto para as duas últimas foram conectadas nas portas 2 e 3 do Arduino UNO, representado na figura 7.

Além disso, a cada segundo, o programa coletava a média de 50 medidas de pressão, bem como seu desvio padrão, retornando seus respectivos valores no monitor serial do arduino.

$$S = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (8)$$

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n} \quad (9)$$

Figura 7 - Esquema do circuito para a calibração dos sensores.



Fonte: Autoria própria (2024).

A figura 7 representa a montagem do sistema utilizando a placa de Arduino para realização do experimento de calibração dos sensores de pressão MPS20N0040D.

3.2.2 Integração e coleta de dados

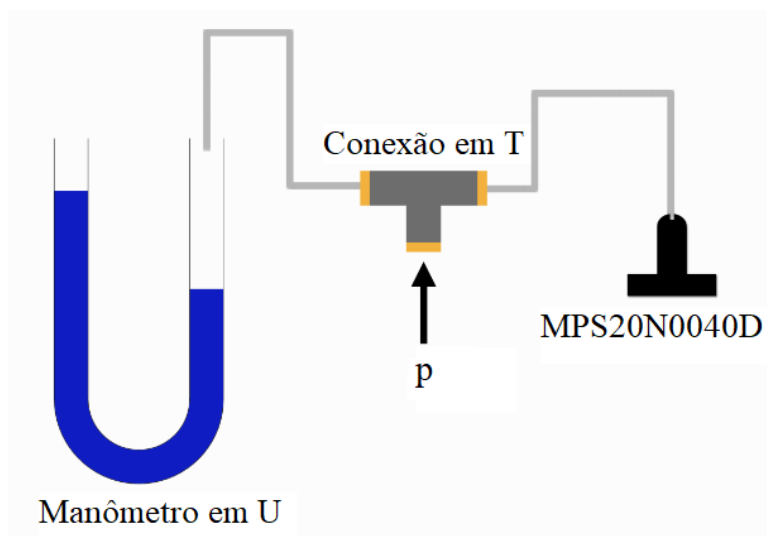
Uma pêra de sucção foi conectada na ao manômetro em U de forma a controlar a altura da coluna d'água a partir da variação da pressão (positiva ou negativa) do sistema. Na outra extremidade do manômetro, o sensor de pressão captava a pressão exercida pela altura do líquido e, no monitor serial do arduino, realizamos a leitura dos dados. As figuras 8 e 9 retratam como foi a montagem do sistema.

Figura 8 - Esquema de integração do manômetro em U.



Fonte: Autoria própria (2024).

Figura 9 - Conexão do manômetro em U e sensor.



Fonte: Adaptado de MakersPortal (2024).

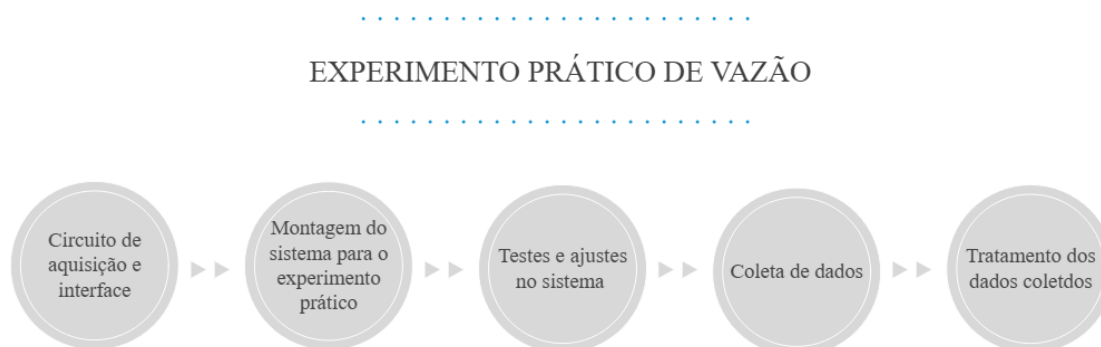
As figuras 8 e 9 mostram como foi feita a montagem do sistema para a calibração dos sensores, conectou-se a pêra de sucção ao manômetro em U - provocando uma diferença de pressão -, em sequência temos o sensor de pressão que mediu esse diferencial e, por fim, o computador onde havia a aquisição dos dados.

Então, com o programa em andamento, manuseamos a pêra de sucção, e coletamos os dados de pressão de 15 pontos distintos - no sentido ascendente - e suas respectivas alturas de coluna d'água no manômetro em U. Realizamos o procedimento com os dois sensores em triplicata, para maior confiabilidade dos resultados.

3.3 Experimento prático de vazão

A figura 10 esquematiza as etapas do procedimento experimental realizado:

Figura 10 - Esquema do experimento prático de vazão.



Fonte: Autoria própria (2024).

Segundo a figura 10, primeiramente, criou-se o circuito de aquisição e interface, então montou-se o sistema para o experimento, depois foram realizados testes e ajustes para que a coleta de dados fosse possível e, por fim, tratar as informações coletadas.

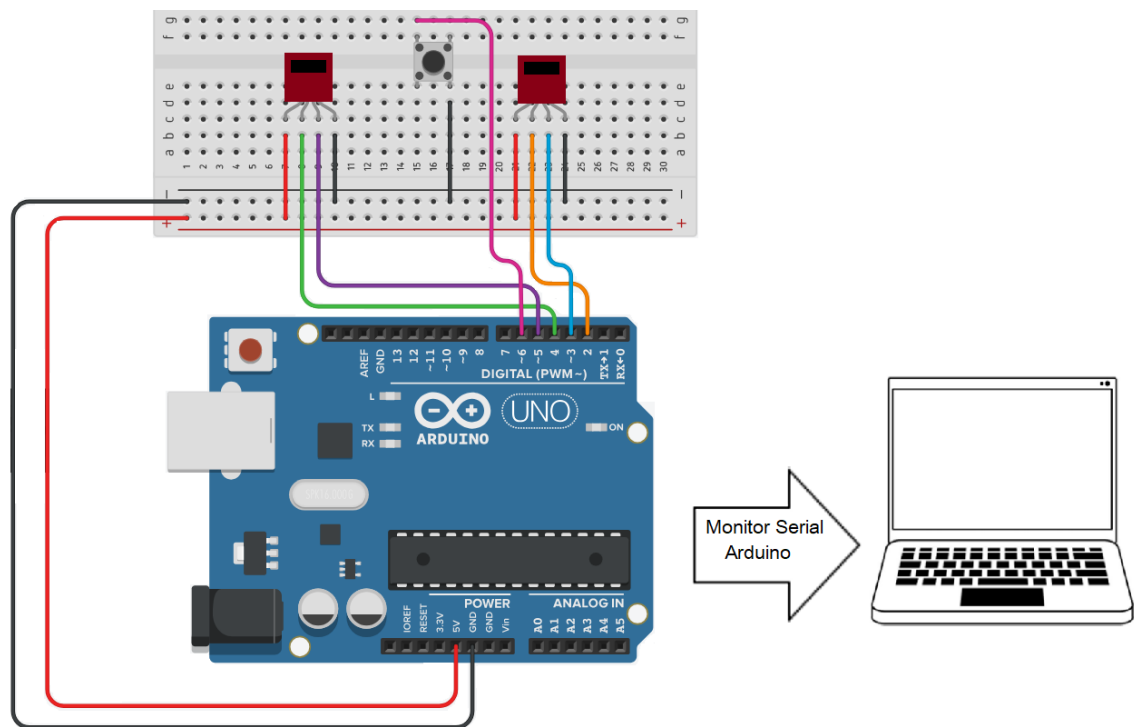
3.3.1 Circuito de aquisição e interface

Na primeira etapa do experimento, foi criado o código para os dois sensores de pressão, utilizando o Arduino UNO. Na programação foi colocado um botão para iniciar a coleta de dados, ao apertá-lo os sensores começam a medir. Com isso, foi possível realizar a medição da vazão com diferentes valores.

Ademais, no programa foi colocado um cálculo da média de 50 medidas e seus respectivos desvios padrão, retornando ao usuário apenas um valor a cada segundo, e, também, foi inserido a diferença de pressão dos dois sensores utilizados.

Em relação aos sensores, ambos possuem as portas VCC, GND, OUT e SCK, para as duas primeiras, foram conectadas no 5V e no GND da placa (nos dois dispositivos), enquanto para as duas últimas foram conectadas, respectivamente, nas portas 2 e 3 - para o primeiro sensor - e 4 e 5 - para o segundo sensor -, e, por fim, o botão foi conectado ao GND e à porta 6 da placa, é possível observar o esquema da montagem na figura 11.

Figura 11 - Esquema da montagem do circuito.



Fonte: Autoria própria (2024).

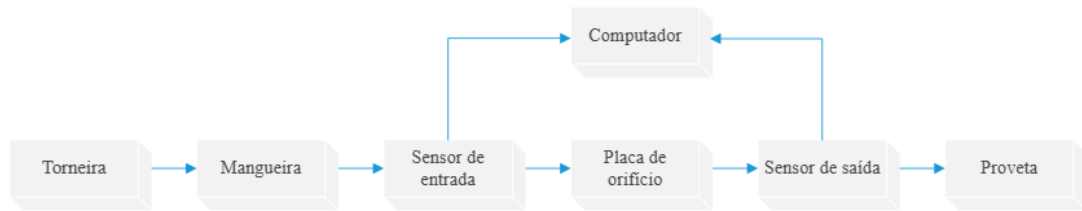
A figura 11 representa a montagem do circuito embarcado com a placa de Arduino UNO, os dois sensores de pressão e o botão utilizados para realização do experimento prático de vazão.

3.3.2 Montagem do sistema

Para a realização da parte experimental do estudo, a placa de orifício concêntrica foi usinada em torno mecânico para suas dimensões estarem de acordo com a norma brasileira e ser possível o encaixe no tubo. Além disso, foram inseridos um engate rápido para cada sensor, localizados um na entrada e um na saída da placa de orifício, com isso, foi possível conectar os dois dispositivos para aquisição de dados. Por fim, foi colocada uma proveta para coletar o volume necessário para o cálculo da vazão - vide equação 2. A montagem com todos esses instrumentos foi retratada na figura 12.

Então, foi montado o sistema completo:

Figura 12 - Esquema de montagem do sistema prático.



Fonte: Autoria própria (2024).

Conforme a figura 12, no sistema colocou-se a mangueira ligada à torneira, seguindo para o sensor de entrada, placa de orifício e sensor de saída - ambos conectados ao computador utilizado para aquisição dos dados. Ao final, foi utilizada uma proveta para a coleta do volume da água.

3.3.2.1 Montagem do sistema da placa de orifício

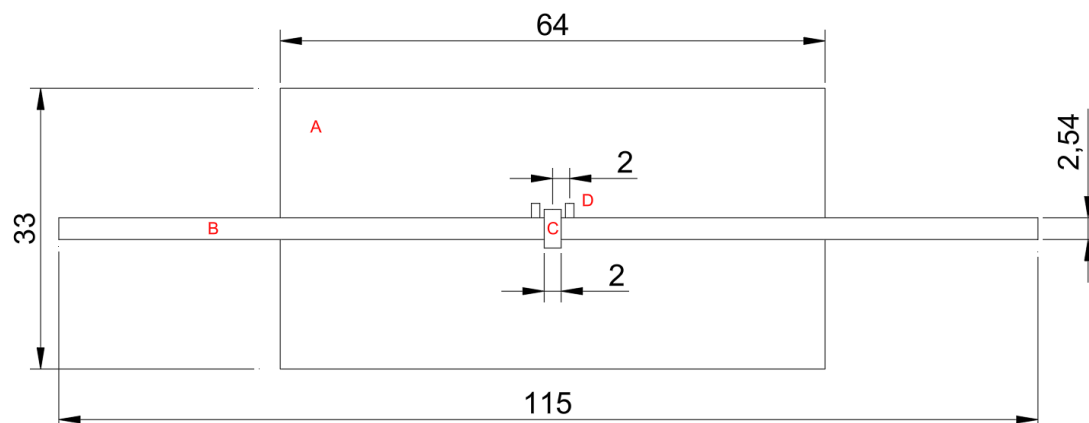
Para o sistema utilizou-se uma placa de orifício (figura 13) usinada para o encaixe na flange, ela apresentou 45° de inclinação da abertura do orifício e diâmetro interno de 18,3 milímetros. A figura 14 representa o esquema da montagem do sistema da placa de orifício.

Figura 13 - Placa de orifício.



Fonte: Autoria própria (2024).

Figura 14 - Esquema representativo do sistema de montagem com suas dimensões em centímetros.



Fonte: Autoria própria (2024).

Conforme o esquema da figura 14, o equipamento foi montado numa placa de MDF (A) a partir de dois tubos com diâmetro interno de 21,1 mm (B) conectados por uma flange (C), onde a placa de orifício foi colocada no interior para o estrangulamento da passagem do fluido e, então, análise da sua velocidade e regime de escoamento e a flange foi posicionada os dois sensores de pressão (D).

3.3.3 Teste e coleta de dados

Depois da montagem do sistema, foram realizados alguns testes para certificar que não haviam vazamentos que compromettesse a coleta de dados do experimento. Foi observado que na conexão da mangueira com a torneira havia um vazamento, assim como no local da placa de orifício. Então, foram feitos alguns ajustes para consertar essas problemáticas aparentes.

Logo após, foi possível efetuar o experimento prático, foram coletados 6 pontos com vazões diferentes. Para conseguir esses dados começamos com a maior vazão disponível, com ela, foi marcado o tempo necessário para encher uma proveta de 2000 ml e, então, a vazão foi sendo alterada até o número de pontos desejado. Este ensaio foi repetido em triplicada para maior confiabilidade dos dados.

3.4 Método dos mínimos quadrados e qualidade de ajuste

Tanto na calibração dos sensores quanto no experimento prático de vazão, utilizou-se o método dos mínimos quadrados pois ele permite a obtenção da equação relacionando as grandezas físicas através da regressão linear, havendo a possibilidade do empoderamento

através da incerteza dos erros (Jardim, 2024). Neste estudo, obtivemos uma equação do modelo $y = ax + b$, conhecida como Modelo de primeiro grau. Para a obtenção das retas, determinamos o coeficiente angular "a" e o coeficiente linear "b" através das fórmulas:

$$\Delta = \sum_{i=1}^n \frac{1}{\sigma_i^2} * \sum_{i=1}^n \frac{x_i^2}{\sigma_i^2} - \left(\sum_{i=1}^n \frac{x_i}{\sigma_i^2} \right)^2 \quad (10)$$

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\sigma_i^2} * \sum_{i=1}^n \frac{x_i y_i}{\sigma_i^2} - \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{\sigma_i^2} * \sum_{i=1}^n \frac{y_i}{\sigma_i^2}}{\Delta} \quad (11)$$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{x_i^2}{\sigma_i^2} * \sum_{i=1}^n \frac{y_i}{\sigma_i^2} - \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{\sigma_i^2} * \sum_{i=1}^n \frac{x_i y_i}{\sigma_i^2}}{\Delta} \quad (12)$$

$$\sigma_a = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\sigma_i^2}}{\Delta} \quad (13)$$

$$\sigma_b = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{x_i^2}{\sigma_i^2}}{\Delta} \quad (14)$$

Em vista da importância dos parâmetros de qualidade de ajuste, utilizamos o método do chi-quadrado reduzido, fundamental em trabalhos que envolvem a coleta de dados. O chi-quadrado reduzido permitiu avaliar a qualidade do ajuste de um modelo estatístico aos dados experimentais, fornecendo uma medida objetiva da coerência entre os valores observados e os valores previstos pelo modelo. Além disso, o uso adequado dos parâmetros de qualidade de ajuste contribuiu para a transparência e a reprodutibilidade dos estudos científicos, aspectos essenciais para o avanço do conhecimento e a aplicação prática dos resultados obtidos.

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^N \left(\frac{y_i - f(x_i)}{\sigma_i} \right)^2 \quad (15)$$

$$v = n - p \quad (16)$$

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Calibração

O sistema proposto na figura 8 foi montado. As figuras 15, 16, 17 e 18 representam fotos da montagem do experimento (como os equipamentos eram grandes não foi possível unificá-los em apenas uma foto).

Figura 15 - Tubo em U.



Fonte: Autoria própria (2024).

Figura 16 - Conexão Tubo em U do sistema fechado.



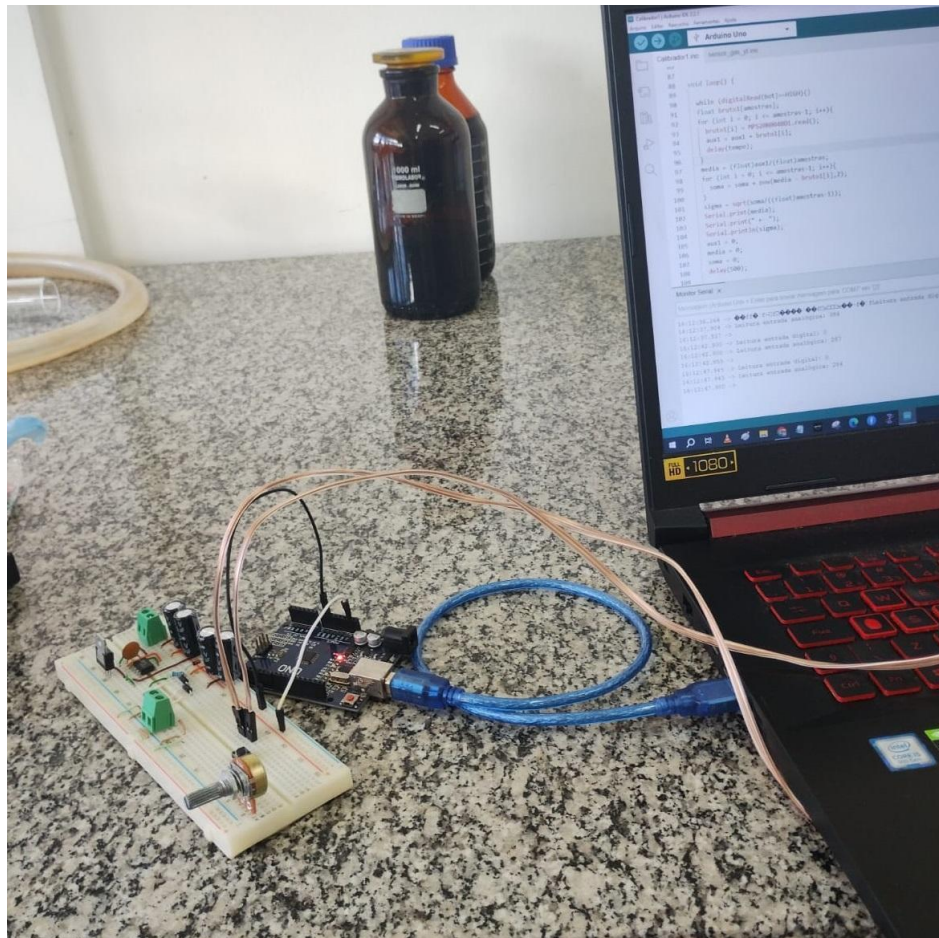
Fonte: Autoria própria (2024).

Figura 17 - Manômetros e pêra de sucção.



Fonte: Autoria própria (2024).

Figura 18 - Protoboard e arduino UNO.



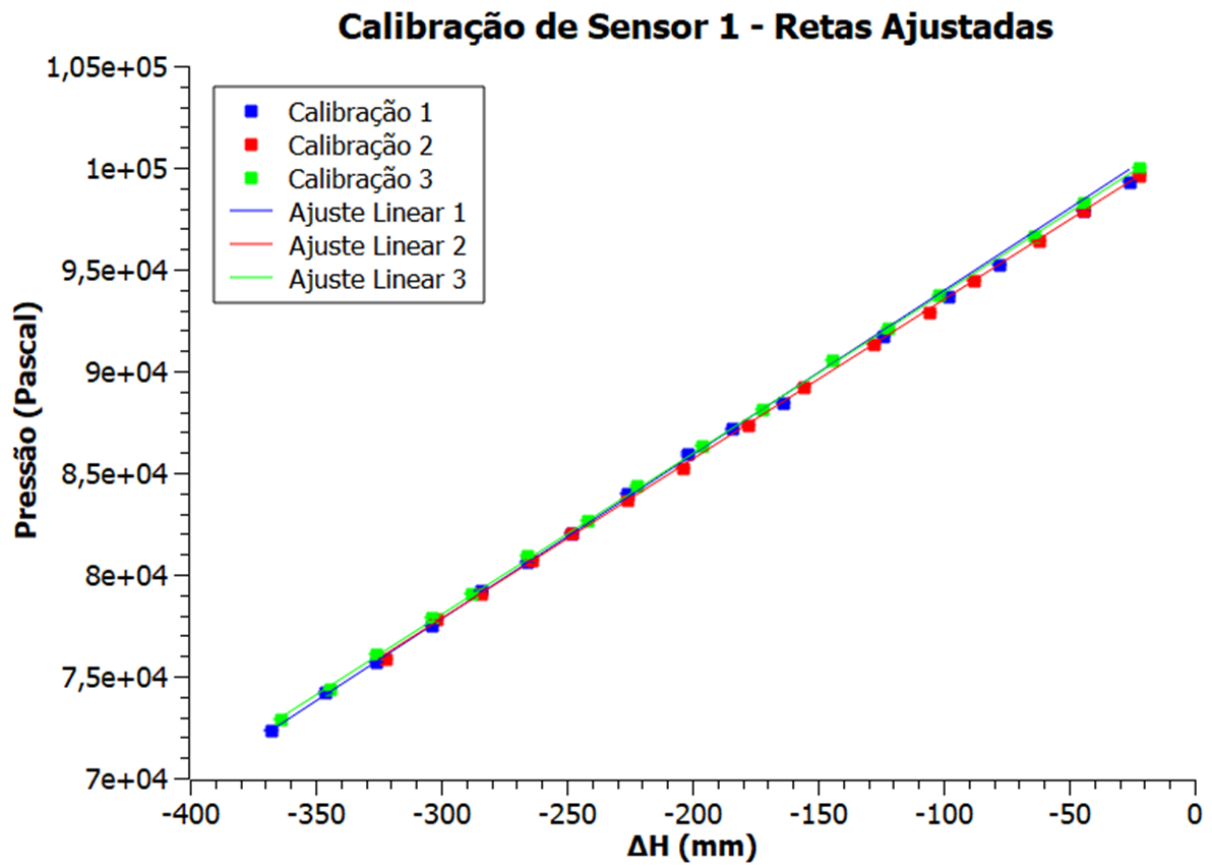
Fonte: Autoria própria (2024).

4.1.1 Tratamento de dados

Após o procedimento experimental em laboratório, foram coletados todos os dados e organizados em um gráfico linear. E a partir do método dos mínimos quadrados, foi possível comparar os resultados dos coeficientes lineares e angulares entre os dois sensores e analisar semelhanças e diferenças.

As retas na figura 19 representam os gráficos da pressão (Pa) em função da altura da coluna d'água (mm) do sensor 1 e a figura 20, as retas do sensor 2.

Figura 19 - Gráfico das retas ajustadas do sensor 1.



Fonte: Autoria própria (2024).

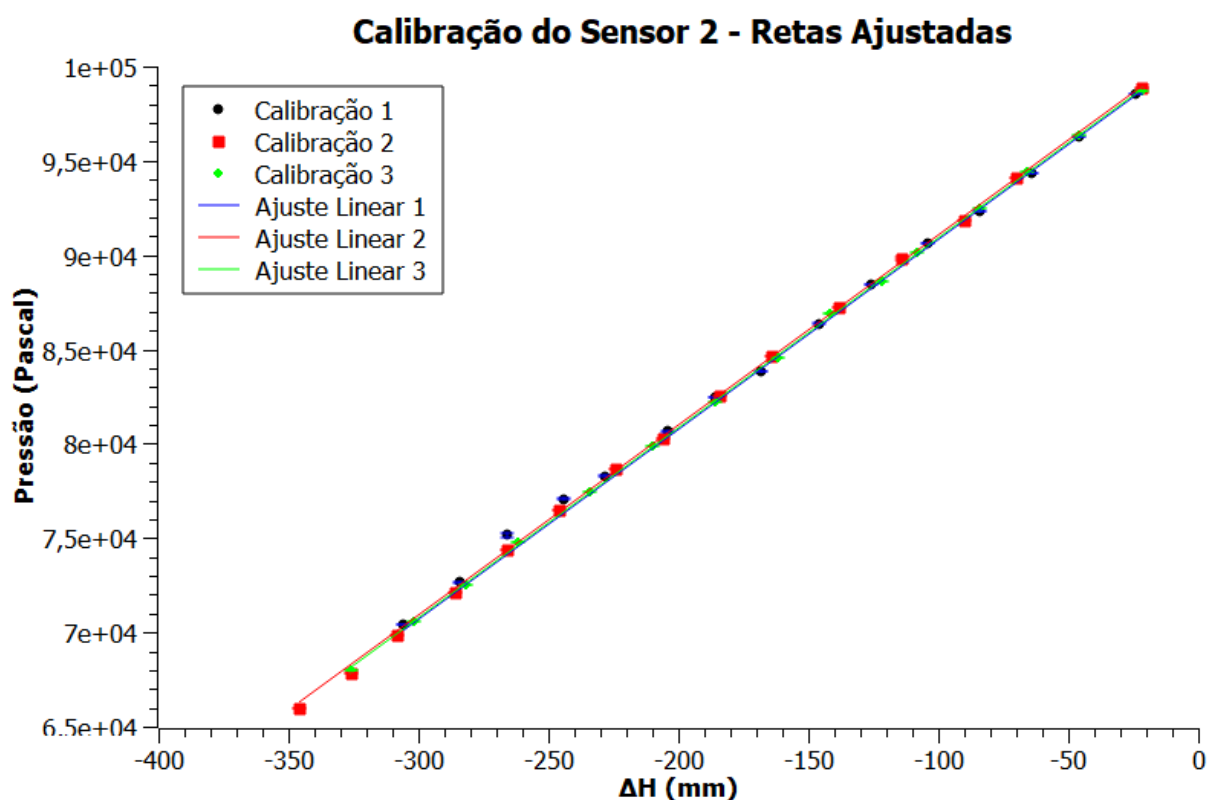
A partir das retas plotadas na figura 19, chegou-se nas seguintes equações:

$$80,52419x \pm 0,00018 + 102.005,67 \pm 13 \quad (17)$$

$$78,39938x \pm 0,00009 + 101.335,84 \pm 2 \quad (18)$$

$$79,017019x \pm 0,000019 + 101.747,58 \pm 1 \quad (19)$$

Figura 20 - Gráfico da Primeira Medição - Sensor 2.



Fonte: Autoria própria (2024).

Referente à figura 20, obtém-se as equações:

$$100,5675x \pm 0,0013 + 100.847,01 \pm 9,21 \quad (20)$$

$$100,68671x \pm 0,00014 + 101.150,81 \pm 6,55 \quad (21)$$

$$100,65442x \pm 0,00004 + 100.996,00 \pm 3 \quad (22)$$

Como observado na comparação entre as figuras 19 e 20, é notável que existe uma discrepância considerável entre os dois transdutores ao observarmos seus coeficientes angulares.

Assim, de acordo com todos os resultados obtidos referentes às equações das retas dos gráficos apresentados, foi possível reuni-los na tabela 2 para fins de comparação entre os dois sensores analisados, assim como a média dos 2 valores dos coeficientes das retas e suas incertezas.

Tabela 2 - Dados dos sensores 1 e 2.

Descrição	coef. a	σ_a	coef. b	σ_b	Qui ²
Sensor 1_1	80,52419	0,00018	102.006	13	7730,24
Sensor 1_2	78,39938	0,00009	101.336	2	2950,00
Sensor 1_3	79,017019	0,000019	101.748	1	4888,00
Média	79,31353	0,00010	101.696	5	5189,41
Sensor 2_1	100,5675	0,0013	100.847	9	5981,75
Sensor 2_2	100,68671	0,00014	101.151	3	6539,32
Sensor 2_3	100,65422	0,0004	100.996	3	5403,04
Média	100,6361	0,0005	100.946	5	5974,70

Fonte: Autoria própria (2024).

Ao averiguar os resultados presentes na tabela, pode-se concluir que os valores relacionados aos coeficientes “a” e “b” são coerentes e semelhantes quando analisamos os sensores separadamente. Todavia, ao compará-los, os valores de “a” para o segundo transdutor é significativamente menor do que o primeiro. Com relação aos resultados de “b”, os dois sensores possuem resultados da ordem de grandeza semelhantes, porém, com números muito elevados. Uma possível interpretação para o valor é que seja a representação da pressão atmosférica.

Observando as medidas de incerteza (σ_a e σ_b), todas estão com números inconsistentes em ambos os sensores. Além disso, comparando os números das duas incertezas, nota-se uma considerável distinção, havendo grande diferença entre as ordens de grandeza, porém em valores desprezíveis.

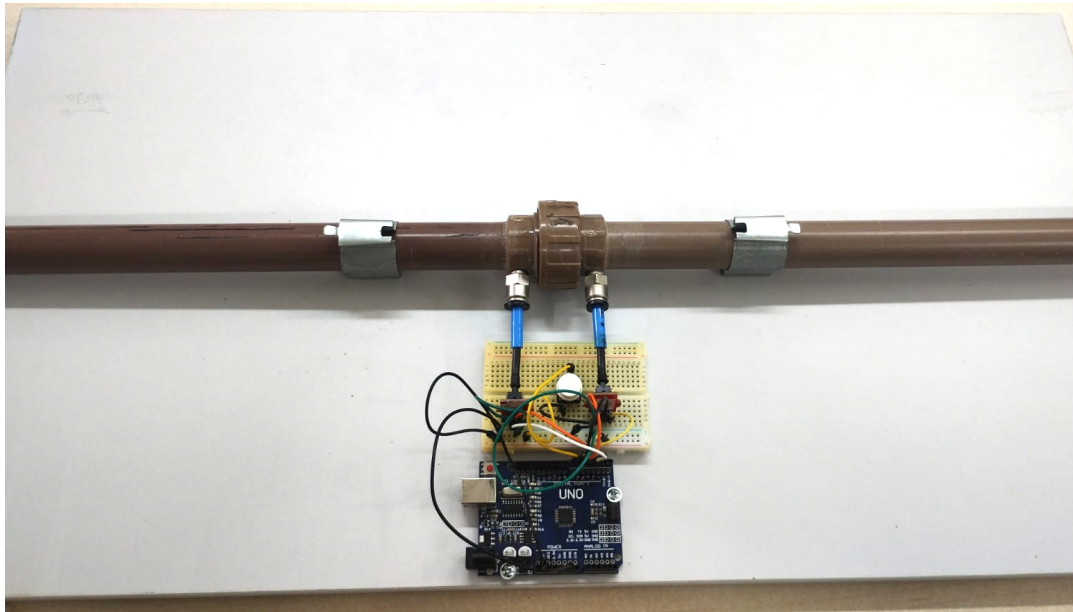
Em relação à qualidade de ajuste, por mais que os valores estejam altos, isso é reflexo da magnitude dos dados que estamos tratando (da ordem de 100.000).

Ante ao exposto, é possível observar que, além de números elevados em relação aos coeficientes, nas duas medições de cada sensor, os pontos estão dispostos de forma uniforme, porém um sensor está totalmente discrepante em relação ao outro. Isso reforça a importância de um procedimento de calibração padronizado para a utilização deles.

4.2 Experimento prático de vazão

Em primeiro plano, foi feita a montagem do sistema utilizando um cano PVC - onde foram colocados os engates rápidos para os dois sensores serem inseridos -, a placa de orifício (que se encontra dentro do tubo) e a placa de Arduino (conectada ao computador), os instrumentos foram fixados a uma peça de MDF para facilitar o manuseio durante o experimento, a figura 21 representa o sistema descrito montado.

Figura 21 - Montagem do sistema.



Fonte: Autoria própria (2024).

O experimento foi realizado na Unifal, campus Poços de Caldas, onde foi possível realizar os testes do sistema e a coleta de dados, as figuras 22 e 23 retratam o ensaio prático feito pelos alunos em colaboração com os seus orientadores, sendo possível a coleta dos dados necessários para análise.

Figura 22 - Ensaio prático.



Fonte: Autoria própria (2024).

Figura 23 - Ensaio prático.



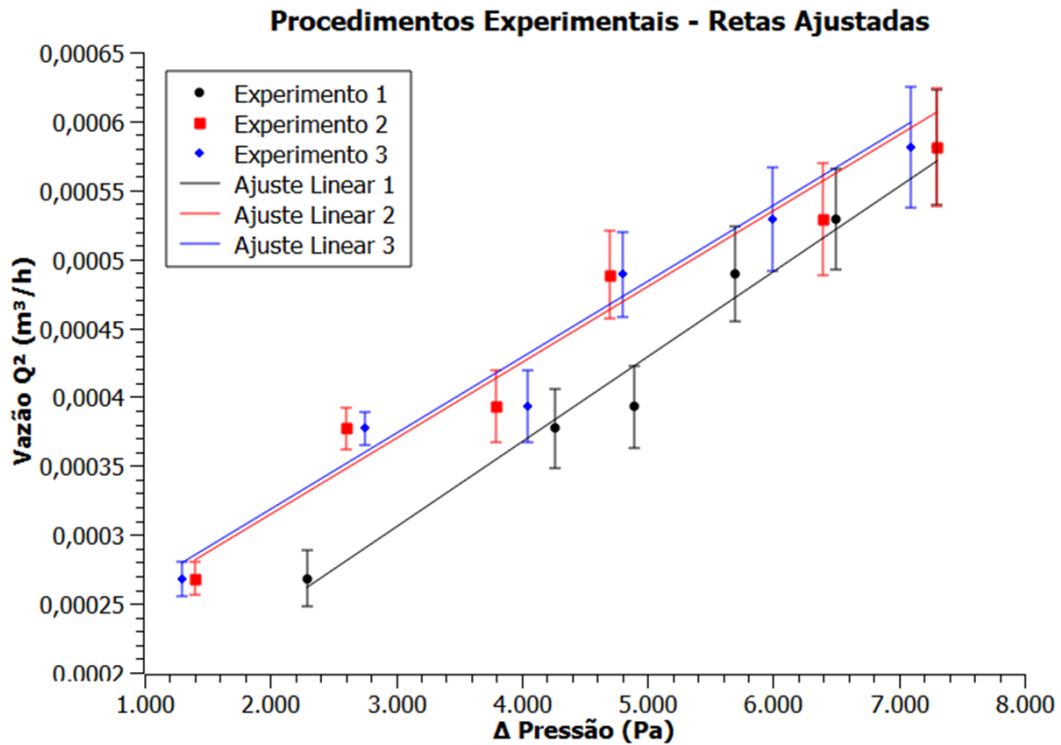
Fonte: Autoria própria (2024).

4.2.1 Tratamento de dados

Assim como realizado no item 4.1.1, foram coletados todos os dados e plotados nos respectivos gráficos a seguir. E a partir do método dos mínimos quadrados, foi possível comparar os resultados dos coeficientes lineares e angulares entre os três procedimentos e analisar sua paridade.

A figura 24 caracteriza os gráficos de diferença de pressão (Pa) pela vazão Q ao quadrado (m^3/h).

Figura 24 - Gráfico das retas ajustadas dos procedimentos experimentais.



Fonte: Autoria própria (2024).

Na figura 24, temos as retas plotadas de acordo com as seguintes equações:

$$6,0 * 10^{-8} x \pm 3,7 * 10^{-6} + 1,3 * 10^{-4} \pm 1,5 * 10^{-2} \quad (23)$$

$$5,7 * 10^{-8} x \pm 2,7 * 10^{-6} + 2,0 * 10^{-4} \pm 7,4 * 10^{-3} \quad (24)$$

$$5,6 * 10^{-8} x \pm 2,6 * 10^{-6} + 2,0 * 10^{-4} \pm 6,7 * 10^{-3} \quad (25)$$

E, a partir dos resultados das equações das retas ajustadas da figura apresentada, foi possível agrupá-las na tabela 3 para fins de comparação entre os três experimentos, bem como a média dos 3 valores dos coeficientes das retas, suas incertezas e os respectivos qui-quadrado.

Tabela 3 - Dados dos experimentos práticos 1, 2 e 3.

Descrição	coef. a	σ a	coef. b	σ b	Qui ²
Experimento 1	6,0E-08	3,7E-06	1,3E-04	1,5E-02	1,03E-06
Experimento 2	5,7E-08	2,7E-06	2,0E-04	7,4E-03	5,65E-06
Experimento 3	5,6E-08	2,6E-06	2,0E-04	6,7E-03	3,49E-06
Média	5,8E-08	3,0E-06	1,7E-04	9,7E-03	3,39E-06

Fonte: Autoria própria (2024).

É notável as similaridades entre os coeficientes angulares representados pela letra “a” e a ordem de grandeza de suas incertezas. No experimento 1, o coeficiente “b” ficou ligeiramente menor do que os demais, essa pequena diferença pode ser atribuída ao fato de ter sido a primeira execução do experimento, por esse motivo optamos pela realização em triplicata. Os valores de qui-quadrado ficaram muito próximos à zero, o que pode indicar que há pouca diferença entre os valores observados e os resultados esperados.

O coeficiente angular “a”, mesmo estando próximo de zero continua positivo, corroborando com a expectativa de linearidade nos resultados. O coeficiente linear “b” não influencia na interpretação dos dados pois muda de acordo com o referencial estabelecido nos procedimentos experimentais, podendo ser configurado como o ponto zero dos ensaios conforme são realizados.

4.2.1.1 Cálculo da velocidade

A partir da equação 6, através da multiplicação da área da tubulação pela vazão, foi determinada a média da velocidade real de 0,90 m/s com um desvio padrão de 0,06 m/s, indicando uma variação controlada nas condições de fluxo. Ademais, através da equação 5, verificou-se a velocidade teórica média de 2,96 m/s com desvio padrão de 0,18 m/s.

4.2.1.2 Número de Reynolds

O intervalo dos valores do número de Reynolds obtidos por meio da equação 7, utilizando a velocidade real, variou de 18.791,62 a 20.934,16, indicando que o fluido opera em regime turbulento.

4.2.1.3 Parâmetro k

Por fim, para o cálculo do parâmetro k, foram utilizados os resultados encontrados na seção 4.2.1.1 (velocidade real e velocidade teórica), então, ao dividir o valor real pelo teórico, obtém-se a constante k. Com isso, chegou-se ao valor médio de 0,315, com o desvio padrão igual a 0,002. E, utilizando a figura 2 como referência e as informações dos diâmetros internos da placa de orifício e do tubo - mencionados na seção 3.3.2.1 -, obtém-se a relação entre $\frac{D_0}{D_1} = 0,87$.

5. CONCLUSÕES

Um experimento de calibração de placa de orifício foi desenvolvido para utilização de aulas práticas de laboratório na unidade curricular de Mecânica dos Fluidos. O protótipo foi feito a partir de um tubo de PVC, uma mangueira, uma placa de orifício, dois sensores de pressão MPS20N0040D e um microcontrolador Arduino a fim trazer a possibilidade do cálculo de vazão por meio de pressão diferencial.

O sensor escolhido, além de um custo acessível, cumpriu com o seu propósito e mostrou que pode ser útil para fins didáticos. Para a calibração deles foi utilizado um manômetro em U em conjunto com a interface criada no Arduino UNO, com isso, foi possível constatar a linearização do gráfico com os dados coletados nos ensaios práticos.

Após a calibração dos sensores, foi elaborado o experimento prático de vazão utilizando equipamento deprimogênio - a placa de orifício. Para ele, criou-se um sistema que analisa a diferença de pressão, e, com a equação 6 é possível o cálculo da vazão. Ademais, ao conduzir o experimento, os resultados da velocidade (real e teórica), número de Reynolds e o parâmetro k foram encontrados e possuíam valores coerentes ao esperado.

Por fim, a faixa utilizada para a calibração do sensor foi explorada integralmente, abrindo margem para a continuação com a utilização de outros sensores para vazões e velocidades maiores visto que os pontos de variação de pressão adotados não cobrem um range expressivo no diagrama de k em função de Reynolds.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como propostas e sugestões que possam dar continuidade ao trabalho, existem várias possibilidades promissoras.

Primeiramente, a otimização dos sensores utilizados é uma área a ser explorada, investigando e testando outros tipos de sensores de pressão diferencial que possam oferecer maior precisão e sensibilidade, comparando seu desempenho com o MPS20N0040D utilizado em nosso trabalho. Além disso, a integração com sistemas de automação é uma proposta relevante, onde é possível desenvolver um sistema de integração entre o sensor de vazão com controladores industriais, permitindo ajustes automáticos em tempo real com base nas medições de vazão.

Ademais, outro campo importante é a análise de custos e benefícios, realizando um estudo detalhado sobre o custo-benefício da implementação de sensores de vazão de placa de orifício em diferentes áreas industriais, considerando a economia de recursos e o aumento de eficiência e produtividade.

Por fim, o desenvolvimento de interfaces de usuário mais intuitivas para a visualização e análise de dados de vazão é fundamental, facilitando a interpretação dos dados por operadores industriais e melhorando a experiência do usuário do sistema. Essas sugestões visam não apenas aprimorar a tecnologia desenvolvida, mas também expandir suas aplicações e benefícios em diversos contextos industriais.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BISPO, R. **Dmae economiza R\$ 3,5 milhões com a redução de perda de água tratada** - Notícias de Poços de Caldas e região | Poços Com. Disponível em: <<https://pocoscom.com/dmae-economiza-r-35-milhoes-com-a-reducao-de-perda-de-agua-tratada/>>. Acesso em: 20 nov. 2024.

BORGES, S. H.; CORREA E. **Dimensionamento e calibração de um equipamento para medição de vazão utilizando um sensor de pressão diferencial**. Trabalho de Conclusão de Curso. Bacharel Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia. Universidade Federal de Alfenas. Poços de Caldas, 2019.

DA SILVA, Rodney Gomes; DE MORAES JÚNIOR, Deovaldo; SANTOS, Aldo Ramos. Aquisição eletrônica de dados da pressão estática, temperatura, velocidade do ar e rotação do ventilado utilizando o microcontrolador arduino em uma unidade experimental de piloto de transporte pneumático. **Brazilian Journal of Technology**, v. 4, n. 3, p. 130-143, 2021. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BJT/article/view/35335/27544>. Acesso em 24 nov. 2024

DELMÉE, Gérard J. **Manual de medição de vazão**. Editora Blucher, 2003. Disponível em: https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=qdW0DwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR7&dq=vazao&ots=16vVK78U4G&sig=1Mr_BkLRCPVuaVmBg2I8oMq_w8w&redir_esc=y#v=onepage&q=vazao&f=false. Acesso em 24 nov. 2024

HWATER. **Case DMAE Poços de Caldas: 7,6% de redução no índice de perdas trimestrais em um ano**. Disponível em: <<https://hwater.com.br/blog/confira-case-dmae-pocos-de-caldas-76-de-reducao-no-indice-de-perdas-trimestrais-em-um-ano/>> Acesso em: 20 nov. 2024.

JARDIM, Renato F. **Linearização e o Método dos Mínimos Quadrados**. 2024. Apresentação do Power Point. Disponível em: <https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/8311945/mod_resource/content/1/Lineariza%C3%A7%C3%A3o%20e%20o%20M%C3%A9todo%20dos%20M%C3%ADnimos%20Quadrados.pdf>. Acesso em 24 nov. 2024.

MCROBERTS, Michael. **Arduino básico**. Novatec Editora, 2018. Disponível em: <https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4287597/mod_resource/content/2/Ardu%C3%ADno%20B%C3%A1sico%20-%20Michael%20McRoberts.pdf>. Acesso em: 20 nov 2024.

OLIVEIRA, Paulo Roberto. **Medição de vazão de líquidos com placa de orifício**. 2015. Disponível em: http://repositoriosenaiba.fieb.org.br/bitstream/fieb/1371/1/TCCP_PAULO%20ROBERTO%20OLIVEIRA.pdf. Acesso em 24 nov. 2024

ORFANÓ, Alex Silva. **MEDIDOR DE VAZÃO DE PLACA DE ORIFÍCIO**. 2018. Disponível em: <https://repositorio.pgsscogna.com.br/bitstream/123456789/27721/1/ALEX_SILVA_ORFAN%C3%93_TCCFINAL.pdf>. Acesso em 24 nov. 2024

PROPEQ. **A importância de medidores de vazão no controle de processos.** Disponível em: <<https://propeq.com/medidores-de-vazao/#:~:text=O%20medidor%20de%20vaz%C3%A3o%20torna,isso%20%C3%A9%20monitorando%20o%20processo>>. Acesso em: 20 nov. 2024.

RIBEIRO, G. L.; SILVA, B. V. F. e. **Desenvolvimento de um instrumento digital para medição de vazão.** Trabalho de Conclusão de Curso. Bacharel Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia. Universidade Federal de Alfenas. Poços de Caldas, 2022.

8. ANEXOS

Anexo A - Datasheet do sensor MPS20N0040D

Introduction

Pressure range :0-5 .8 psi (40kpa);

Product Features:

Solid, MEMS technology, high reliability

Low cost

Wide monitoring and control media

The application of a wide temperature range

Easy to use, choose from a variety of range. Easy to use, easy to install in OEM equipment

Application areas:

Automotive: tire pressure, car air pump, MAP sensor, diagnostic equipment, automotive sensors.

Industry: Air brake switch, portable pressure gauge, such as digital pressure gauge, environmental monitoring, consumer and sports

Health care: patient monitoring and diagnostic equipment, such as blood pressure monitors, medical instrumentation and monitoring

Range: 40kpa (differential pressure)

Output: mV signal

Electricity supply: 5VDC or constant current 1Ma

Linear accuracy: 0.25% FS

Measure the pressure range of 580 PSIG, 40KPaG

Max pressure capacity of three times the measuring range

Work power supply 5 VDC,

Input impedance of 4 - 6 K Ω

The output impedance of 4 - 6 K Ω

Operating temperature -40 - 85 ° C -40 ° F - +185 ° F

Storage Temperature -40 - 125 ° C -40 ° the F - +257 ° F

Accessible media, clean, dry, non-corrosive gases

Bias voltage $\pm$ 25 mV

Full-scale output voltage 50 - 100 mV

Bridge Resistance to 4 - 6 K Ω

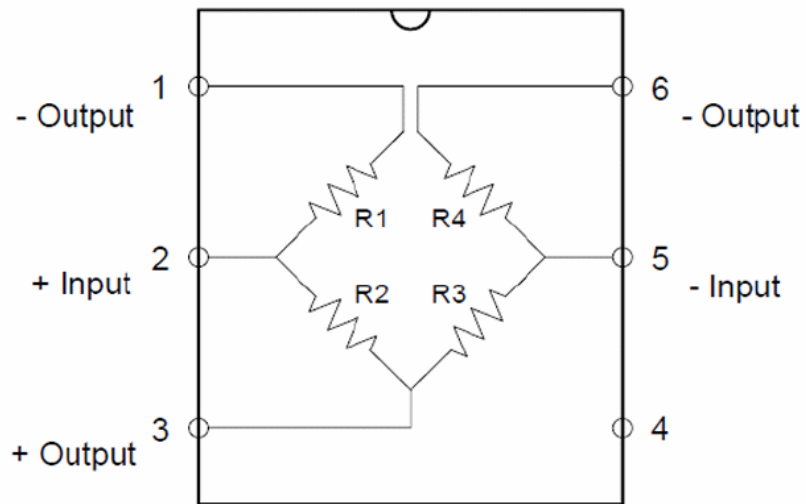
Linearity $\pm$ 0.3% F.S.

Hysteresis $\pm 0.7\%$ F.S.

Bias Temperature coefficient $\pm 0.08\%$ of F.S. / $^{\circ}\text{C}$

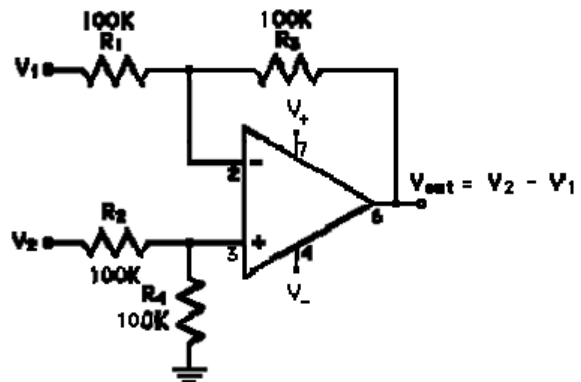
Temperature coefficient of sensitivity -0.21% FS/ $^{\circ}\text{C}$

Circuit

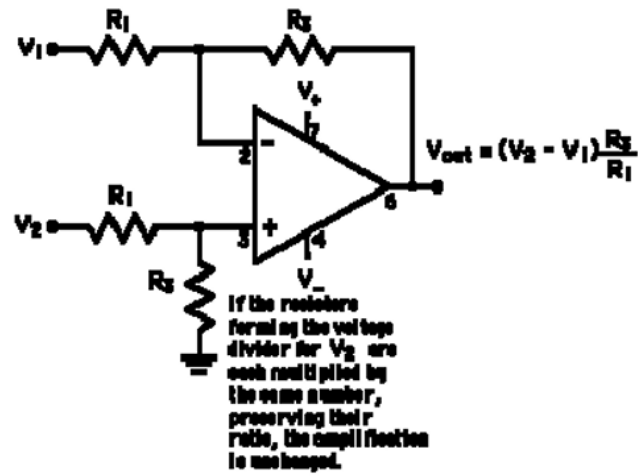


Difference Amplifier

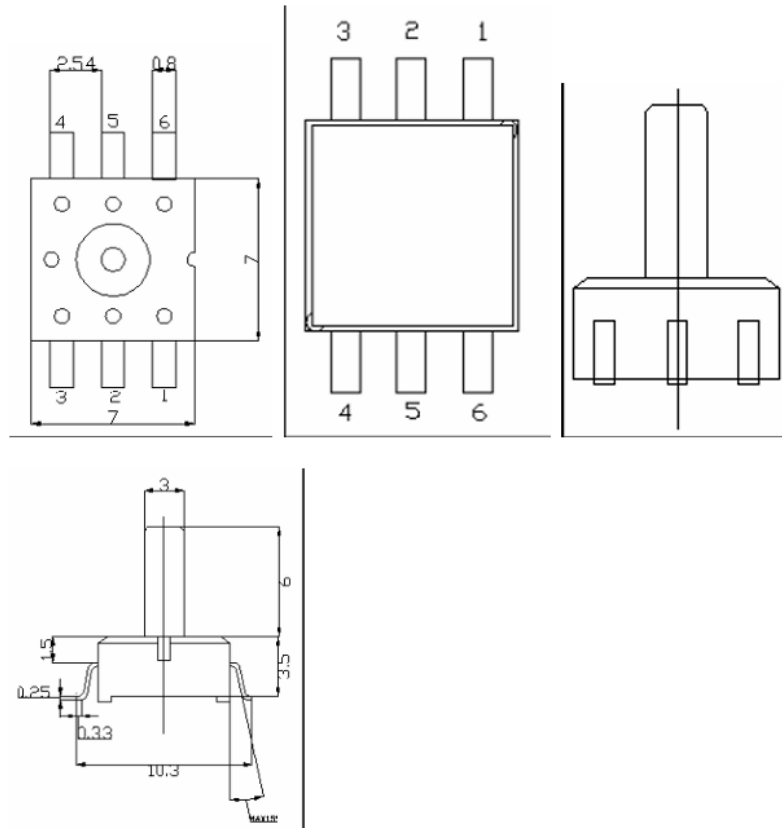
This amplifier uses both inverting and non-inverting inputs with a gain of one to produce an output equal to the difference between the inputs. It is a special case of the differential amplifier. You can also choose the resistances to amplify the difference.



Pressure Sensor MPS20N0040D-S



Dimensions



Anexo B - Programa da Calibração dos Sensores de Pressão

/*****

* PROJETO: Calibrador do sensor MPS20N0040D

* Autores:

* Laos Alexandre Hirano

* Lara, Matheus e Luiz

* Data de criação: 10/09/2023

* Última atualização:

* Sensor de pressão MPS20N0040D

* pino OUT: D02 (saída de dados)

* pino SCK: D03 (pino de clock)

* Observações:

* - Obtem a média de 50 pontos

* - Calcula o desvio padrão

*****/

***** BIBLIOTECAS *****

#include <Wire.h> // Biblioteca que permite a interface I2C

#include <Q2HX711.h> // Biblioteca para o conversor AD do MPS20N0040D

#include <SPI.h> // Biblioteca para comunicação SPI

// *** DEFINIÇÃO DE PINOS *****

const byte MPS_OUT_pin1 = 2; // OUT data pin

const byte MPS_SCK_pin1 = 3; // clock data pin

Q2HX711 MPS20N0040D1(MPS_OUT_pin1, MPS_SCK_pin1);

/*****

PROGRAMA PRINCIPAL **

/*****

int amostras = 50;

int intervalo = 10; //Intervalo de tempo entre uma medida e outra

float media = 0;

float soma = 0;

```

float sigma = 0;
int medida;

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  Serial.print("Aperte qualquer tecla e depois clique em Enter:");
}

void loop() {
  float bruto[amostras];
  medida = MPS20N0040D1.read();
  Serial.println(medida);
  if (Serial.available() > 0){
    char aux = Serial.read();
    Serial.println("Aguarde a coleta de dados");
    for (int i = 0; i <= amostras-1; i++){
      bruto[i] = MPS20N0040D1.read();
      media = media + bruto[i];
      delay(intervalo);
    }
    media = (float)media/(float)amostras;
    for (int i = 0; i <= amostras-1; i++){
      soma = soma + pow(media - bruto[i],2);
    }
    sigma = sqrt(soma/((float)amostras-1));
    Serial.print(media);
    Serial.print(" +- ");
    Serial.println(sigma);
    media = 0;
    soma = 0;
    sigma = 0;
  }
  delay(1000);
}

```

Anexo C - Programação do Procedimento Experimental

```
/******  
* PROJETO: Calibrador do sensor MPS20N0040D  
*****/  
  
#include <Wire.h> // Biblioteca para interface I2C  
#include <Q2HX711.h> // Biblioteca para o conversor AD do MPS20N0040D  
#include <SPI.h> // Biblioteca para comunicação SPI  
  
// Definição de pinos  
const byte MPS_OUT_pin1 = 2;  
const byte MPS_SCK_pin1 = 3;  
const byte MPS_OUT_pin2 = 4;  
const byte MPS_SCK_pin2 = 5;  
const byte botaoPin = 6; // Pino do botão  
  
Q2HX711 MPS20N0040D1(MPS_OUT_pin1, MPS_SCK_pin1);  
Q2HX711 MPS20N0040D2(MPS_OUT_pin2, MPS_SCK_pin2);  
  
int amostras = 20;  
int intervalo = 10; // Intervalo entre leituras  
const float P_pascal1 = 101696.36;  
const float P_pascal2 = 100946.34;  
const float P_atm1 = 7969109.67;  
const float P_atm2 = 8597794.00;  
  
bool coletando = false; // Estado de coleta  
unsigned long inicioCronometro = 0;  
  
void setup() {  
    Serial.begin(9600);
```

```

pinMode(botaoPin, INPUT_PULLUP); // Configuração do botão com pull-up interno
Serial.println("Pressione o botão para iniciar/parar a coleta...");
}

void loop() {
  if (digitalRead(botaoPin) == LOW) {
    coletando = !coletando; // Alterna entre coletando/parado

    if (coletando) {
      inicioCronometro = millis(); // Inicia o cronômetro
      Serial.println("Iniciando coleta de dados...");
    } else {
      unsigned long tempoTotal = millis() - inicioCronometro; // Tempo total de coleta
      Serial.print("Coleta finalizada. Tempo total: ");
      Serial.print(tempoTotal / 1000.0); // Em segundos
      Serial.println(" segundos");
    }
  }

  delay(100); // Evita leitura duplicada por pressão contínua no botão
}

if (coletando) {
  realizarLeituras();
}
}

void realizarLeituras() {
  float bruto1[amostras], bruto2[amostras];
  float media1 = 0, media2 = 0, soma1 = 0, soma2 = 0;
  float sigma1 = 0, sigma2 = 0;

  // Leitura Sensor 1
  for (int i = 0; i < amostras; i++) {
    bruto1[i] = MPS20N0040D1.read();

```

```

    media1 += bruto1[i];
    delay(intervalo);
}
media1 /= amostras;
for (int i = 0; i < amostras; i++) soma1 += pow(media1 - bruto1[i], 2);
sigma1 = sqrt(soma1 / (amostras - 1));

```

```

float pressao1 = (media1 / P_atm1) * P_pascal1;
float incerteza1Pa = (sigma1 / P_atm1) * P_pascal1;

```

```

Serial.print("Sensor 1 - Bruto: ");
Serial.print(media1);
Serial.print(" +- ");
Serial.println(sigma1);
Serial.print("Pressao 1 (Pa): ");
Serial.print(pressao1);
Serial.print(" +- ");
Serial.println(incerteza1Pa);

```

```

// Leitura Sensor 2

```

```

for (int i = 0; i < amostras; i++) {
    bruto2[i] = MPS20N0040D2.read();
    media2 += bruto2[i];
    delay(intervalo);
}
media2 /= amostras;
for (int i = 0; i < amostras; i++) soma2 += pow(media2 - bruto2[i], 2);
sigma2 = sqrt(soma2 / (amostras - 1));

```

```

float pressao2 = (media2 / P_atm2) * P_pascal2;
float incerteza2Pa = (sigma2 / P_atm2) * P_pascal2;

```

```

Serial.print("Sensor 2 - Bruto: ");
Serial.print(media2);

```

```
Serial.print(" +- ");
Serial.println(sigma2);
Serial.print("Pressao 2 (Pa): ");
Serial.print(pressao2);
Serial.print(" +- ");
Serial.println(incerteza2Pa);

// Cálculo da diferença de pressão
float deltaPressao = pressao1 - pressao2;
Serial.print("Delta Pressao (Pa): ");
Serial.println(deltaPressao);

Serial.println("-----");
}
```