



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

DOI: 10.37702/2175-957X.COBENGE.2025.6351

Autores: LARA CRISTINE ZAMBELLI CARREIRO, MATHEUS DE OLIVEIRA ALVES RIBEIRO, MARCOS VINÍCIUS RODRIGUES, LAOS ALEXANDRE HIRANO

Resumo: A medição de vazão é fundamental para o controle de processos industriais, contribuindo para a eficiência operacional e redução de custos (PROPEQ, 2019). No contexto educacional, técnicas de medição de vazão são abordadas em unidades curriculares de ciências de engenharia, como Mecânica dos Fluidos e Operações Unitárias. O uso de painéis hidráulicos didáticos para abordagem experimental de assuntos estratégicos como a medição de vazão é uma alternativa bastante razoável. Contudo, os custos para a aquisição e manutenção destes painéis são geralmente elevados. Assim, o objetivo deste trabalho foi desenvolver e calibrar um sistema de medição de vazão tipo placa de orifício utilizando sensores de pressão de baixo custo e Arduino para medição e aquisição dos dados. Os resultados experimentais de calibração do sensor de pressão foram obtidos com os respectivos desvios padrão, comprovando a qualidade da medida e o parâmetro de calibração, K , da placa de orifício obtido.

Palavras-chave: Placa de orifício, medidor de vazão

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

1. INTRODUÇÃO

A medição de vazão é fundamental para o controle de processos industriais, contribuindo para a eficiência operacional e redução de custos (Propeq, 2019). Aplicada em setores como tratamento de água, controle de gases e combustão, a medição precisa é essencial para evitar perdas significativas. Um exemplo prático é o Departamento Municipal de Água e Esgoto de Poços de Caldas (DMAE), que, por meio do Plano Municipal de Saneamento Básico de 2014, alcançou a redução de 7,6% no índice de perdas de produtos químicos, economizando R\$ 3,5 milhões (Hwater, 2023; Bispo, 2016).

No contexto educacional, técnicas de medição de vazão são abordadas em unidades curriculares de ciências de engenharia, como Mecânica dos Fluidos e Operações Unitárias. O uso de painéis hidráulicos didáticos para abordagem experimental de assuntos estratégicos como a medição de vazão é uma alternativa bastante razoável. Contudo, os custos para a aquisição e manutenção destes painéis são geralmente elevados, ou são pouco funcionais quando encontrados por custos acessíveis.

Assim, o objetivo deste trabalho foi desenvolver e calibrar um sistema de medição de vazão tipo placa de orifício utilizando sensores de pressão de baixo custo e Arduino para medição e aquisição dos dados. Os resultados experimentais de calibração do sensor de pressão foram obtidos com os respectivos desvios padrão, comprovando a qualidade da medida de calibração do sensor e o parâmetro K da placa de orifício obtido foi comparado com valor obtido da literatura.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Placa de Orifício

A vazão, definida como a razão entre a massa ou o volume de fluido e o tempo de escoamento, é o parâmetro chave em diversos processos industriais (Delmée, 2003; Oliveira, 2015). Podendo 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:

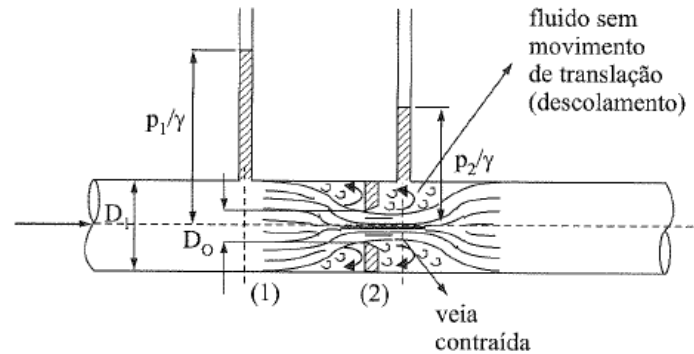
m : massa, medida em kg;

V : volume, medido em m³;

t : tempo, medido em segundos (s).

Medidores clássicos distribuem-se em quatro grupos: deprimogênios, lineares, volumétricos e canais abertos (Delmée, 2003). Entre os elementos deprimogênios, a placa de orifício (figura 1) é a solução industrial mais disseminada devido ao baixo custo e padronização (ABNT NBR ISO 5167; AGA 3.1).

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



Fonte: Brunetti (2008).

As equações da continuidade (equação 3) e da energia mecânica (Equação de Bernoulli, equação 4) para transporte de fluidos são apresentadas a seguir. A determinação da vazão volumétrica para escoamento em tubos pode ser feita através da equação da continuidade (3). A utilização da placa de orifício como medidor de vazão vem da aplicação das equações da continuidade e da energia entre os pontos (1) e (2) da Figura 1, e que relaciona a diferença de pressão ΔP à velocidade de escoamento no interior do tubo (Oliveira, 2015; Orfanó, 2018).

$$Q_V = v_m \cdot A \quad (3)$$

$$P_1 + \frac{\rho \cdot v_1^2}{2} + \rho \cdot g \cdot z_1 = P_2 + \frac{\rho \cdot v_2^2}{2} + \rho \cdot g \cdot z_2 \quad (4)$$

Em que:

- v_m : é a velocidade média do fluido no tubo;
- A: área da seção transversal do tubo;
- 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 média do fluido no ponto 1, medida em m/s;
- v_2 : velocidade média do fluido no ponto 2, medida em m/s;
- ρ : massa específica do fluido, medida em kg/m³;
- g : aceleração da gravidade, aproximadamente 9,81 m/s².

Considerando que: z_1 é igual a z_2 (por ser tratar de um escoamento horizontal); que pela equação da continuidade, $v_1 \cdot A_1 = v_2 \cdot A_2$ e que a relação entre o diâmetro da placa e o diâmetro do tubo dado é β obtém-se a velocidade de escoamento em (1) e a vazão volumétrica do escoamento no tubo, é dada por:

$$v_1 = \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \quad (5)$$

$$Q = \beta \cdot A_0 \sqrt{2g \frac{\Delta P}{\gamma}} \quad (6)$$

Em que:

Q : vazão volumétrica, medida em m³/s;

A_0 : área da tubulação, medida em m^2 ;
 ΔP : pressão diferencial, medida em Pascal (Pa);
 g : aceleração da gravidade, aproximadamente $9,8 \text{ m/s}^2$;
 $\gamma = \rho \cdot g$: peso específico do fluido, medido em N/m^3 ;

A equação (6) pode ser manipulada juntando todas as variáveis constantes em uma única variável k . Deste modo k é uma constante adimensional que depende da relação entre orifício e tubulação das propriedades do fluido e condições de escoamento. Portanto:

$$Q = k * \sqrt{\Delta p} \quad (7)$$

k : constante de descarga da placa de orifício. Adimensional que depende da relação entre os diâmetros da placa de orifício e da tubulação, e do número de Reynolds;

O coeficiente adimensional k corrige desvios do escoamento real devido a viscosidade do fluido (Borges; Correa, 2019). O número de Reynolds estabelece o regime de escoamento através da relação entre forças viscosas e forças de inércia, dado pela equação (8).

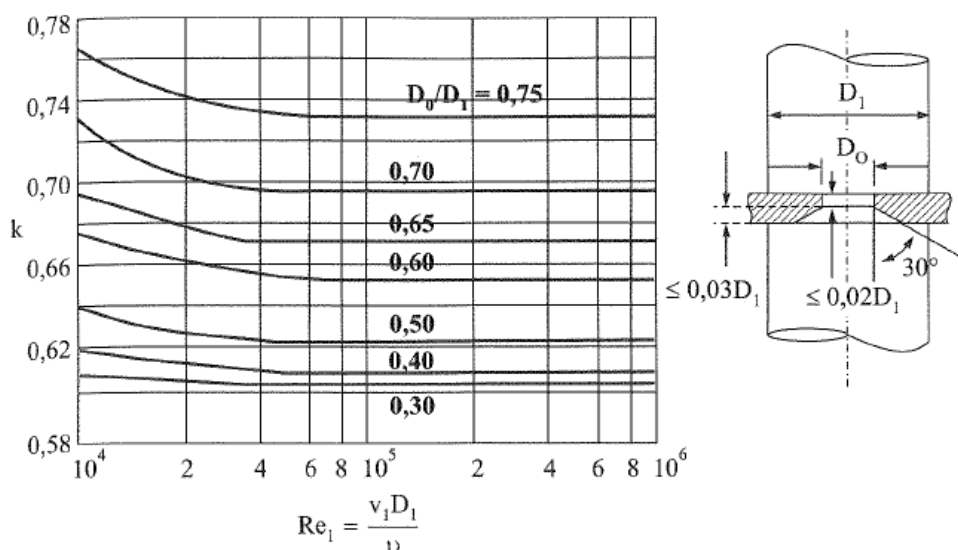
$$Re = \frac{V * D}{\nu} \quad (8)$$

Sendo:

V : velocidade média do escoamento, (m/s);
 D : diâmetro do tubo, (m);
 ν : viscosidade cinemática, (m^2/s).

Através da Figura 2, é possível obter o coeficiente de descarga da placa de orifício em função da razão diâmetro da placa pelo diâmetro do tubo e do número de Reynolds (Borges; Correa, 2019).

Figura 2 - Diagrama de k em função de Re e $\frac{D_0}{D_1}$.



Fonte: Brunetti (2008).

2.2 Sistema Arduino

Estudos anteriores tentaram desenvolver um sistema eletrônico para o cálculo da variação de pressão para o laboratório. Borges e Correa (2019) empregaram sensores MPX5700DP, mas a baixa sensibilidade do manômetro U impediu explorar toda a faixa de calibração. Posteriormente, Ribeiro e Silva (2022) adotaram o sensor MPS20N0040D - para até 40 kPa e adequado ao intervalo típico de aula (≤ 10 kPa) - porém as diferenças significativas entre os fatores de ajuste de dois transdutores e a ausência de variação de pressão em parte dos pontos comprometeram os ensaios com placa de orifício. Assim, ambos os estudos permaneceram inconclusos, indicando a necessidade de metodologias de calibração mais robustas e instrumentação de maior precisão para estudos de vazão na instituição.

O avanço de plataformas abertas possibilita soluções de baixo custo: o Arduino UNO oferece aquisição de dados versátil e programação simplificada (McRoberts, 2018), enquanto o transdutor MPS20N0040D combina alcance adequado (0–40 kPa), linearidade $\pm 0,3$ % FS e conversor ADC de 24 bits, atendendo a requisitos de ensino e pesquisa (Da Silva *et al.*, 2021). Essas tecnologias fundamentam o sistema proposto, que visa superar as limitações identificadas nos trabalhos anteriores, fornecendo medições de ΔP em tempo real, maior exatidão e cálculo do parâmetro k para validação acadêmica.

3. METODOLOGIA

O sensor de pressão MPS20N0040D foi escolhido devido a sua faixa de medição que varia entre 0 kPa a ± 40 kPa, ideal para ser utilizado em aulas laboratoriais de Mecânica dos Fluidos. Além disso, o transdutor apresenta um conversor analógico-digital (ADC) com precisão de 24 bits, o que garante alta precisão e linearidade nas medições, e, por fim, também foi observado seu custo-benefício, com um preço aproximado de R\$40,00, o que facilita a reposição ou estoque.

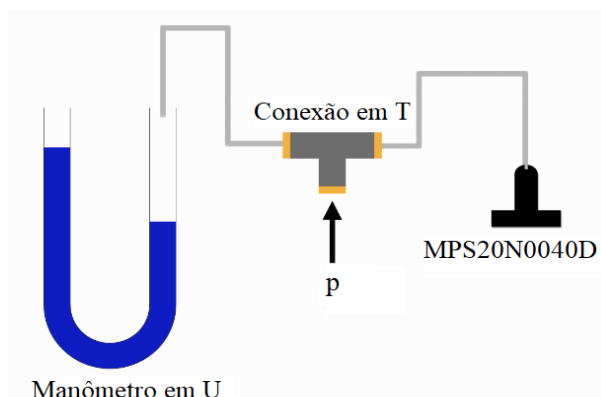
Para a calibração dos sensores, primeiramente foi criada uma rotina de aquisição com uma placa Arduino UNO, permitindo a coleta contínua de dados, com registro da média de 50 leituras por segundo, retornando uma medida média e sua incerteza padrão. A incerteza padrão foi obtida pela Equação (9).

$$S = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (9)$$

Cada sensor foi integrado a um sistema que contém um manômetro em U preenchido com água e uma bomba manual para a manipulação da pressão, através de um conector tipo T conforme representado esquematicamente na Figura 2. Foram coletados 15 pontos distintos com base nas alturas de coluna d'água com incerteza de $\pm 0,5$ mm, e o procedimento foi realizado em triplicata.

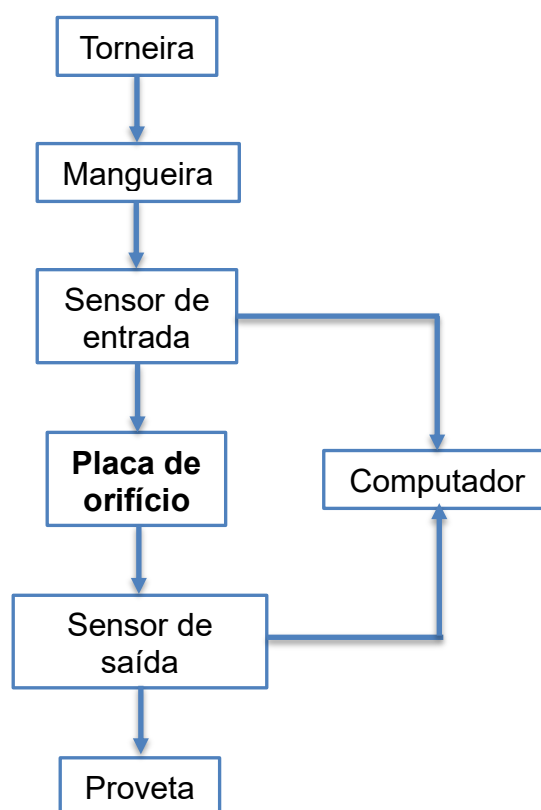
O medidor de vazão foi montado com tubos de PVC de $\frac{1}{4}$ de polegada conectados a um flange. No interior deste flange, uma placa de acrílico com um orifício central de 18,3 mm foi fixada. O orifício possui um ângulo de 45° de inclinação em relação à seção transversal da placa. Os dois sensores de pressão calibrados foram fixados de tal forma a coletar a pressão de entrada e a de saída em relação à estrutura formada pelo flange. A entrada do medidor de vazão foi conectada a uma torneira de água com uma válvula para controle de vazão de entrada. Um recipiente foi posicionado na saída do medidor e a vazão de saída foi medida utilizando uma proveta de 2 litros e um cronômetro. A Figura 3 apresenta um esquema desta montagem.

Figura 3 - Conexão do manômetro em U e sensor.



Fonte: Adaptado de MakersPortal (2024).

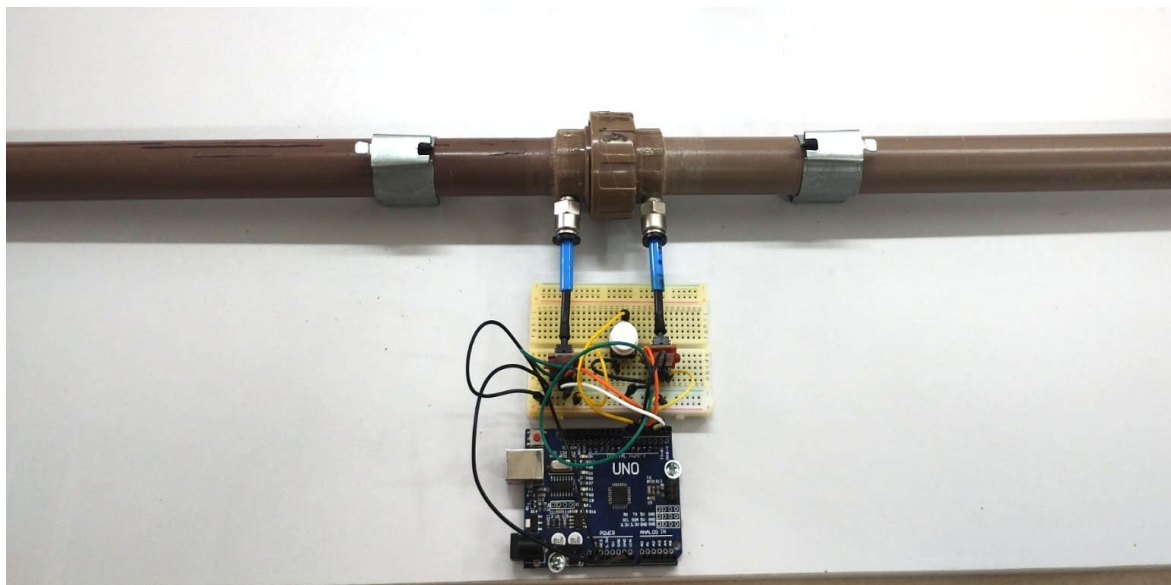
Figura 3 - Esquema de montagem do sistema prático.



Fonte: Autores (2024).

A Figura 4 representa a montagem do medidor de vazão apresentado no esquema.

Figura 4 - Montagem do sistema com a placa de arduino, sensores de pressão de entrada e saída e placa de orifício.



Fonte: Autores (2024).

A vazão foi ajustada manualmente através da válvula de controle permitindo 5 valores distintos. Adotou-se $2 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ como incerteza desta medida. O quadrado do valor da vazão foi relacionado com a diferença de pressão obtida entre os sensores de pressão.

Os dados obtidos na etapa de calibração foram organizados em um gráfico da medida lida pelo Arduino pela diferença de alturas das colunas de água. O método do X^2 foi aplicado para quantificar a qualidade do ajuste da curva de calibração. Na etapa de testes do medidor de vazão, o quadrado do valor da vazão medida em relação a diferença de pressão foi ajustado a uma reta e qualidade deste ajuste foi quantificada pelo método do X^2 . Os coeficientes angular e linear obtidos foram comparados com valores teóricos. O método do X^2 seguiu a Equação (10).

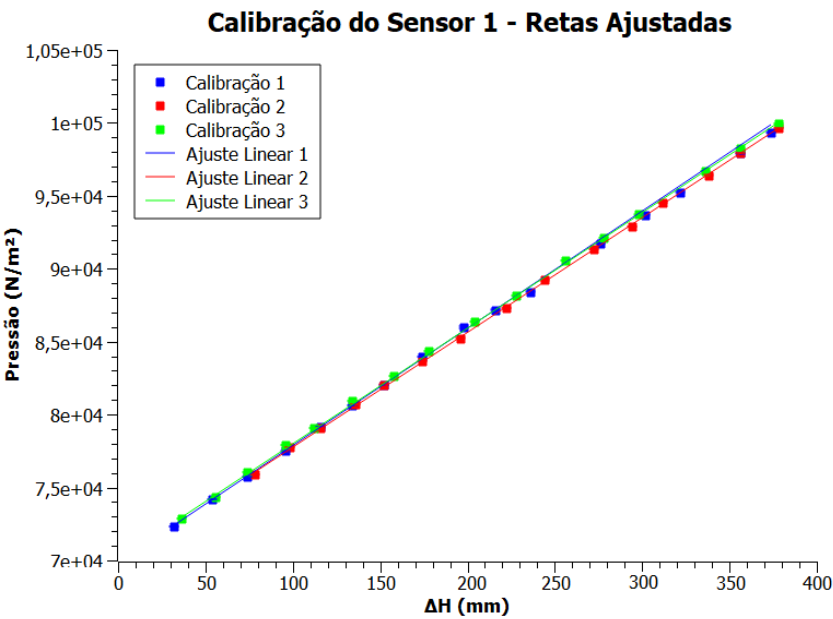
$$\Delta = \sum_{i=1}^n \frac{1}{\sigma_i^2} * \sum_{i=1}^n \frac{x_i^2}{\sigma_i^2} - \left(\sum_{i=1}^n \frac{x_i}{\sigma_i^2} \right)^2 \quad (10)$$

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Calibração

As Figuras 5 e 6 apresentam os resultados obtidos em triplicata na etapa de calibração dos sensores e as tabelas 1 e 2 mostram os valores dos coeficientes da equação. Os pontos foram ajustados a retas pelo método do X^2 e a Tabela 3 mostra um resumo comparando a média simples dos coeficientes obtidos das tabelas 1 e 2.

Figura 5 - Gráfico das retas ajustadas do sensor 1.



Fonte: Autores (2024).

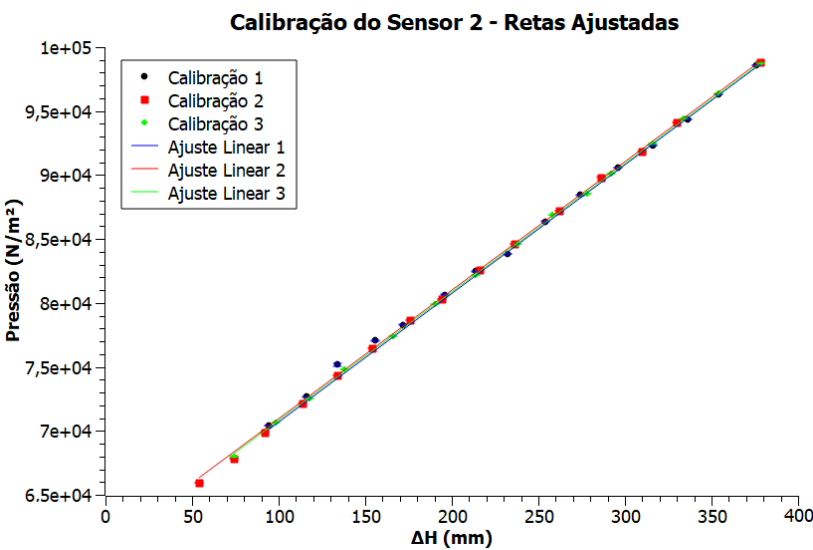
Os ajustes retornaram às seguintes equações.

Tabela 1 - Equações da Figura 5

Coef. a	σ a	Coef. b	σ b
80,52419	0,00018	102.005	13
78,39938	0,00009	101.335	2
79,01702	0,00019	101.747	1

Fonte: Autores (2025)

Figura 6 - Gráfico das retas ajustadas do sensor 2.



Fonte: Autores (2024).

Referente à Figura 6, obtém-se as equações:

Tabela 2 - Equações da Figura 6.

Coef. a	σ a	Coef. b	σ b
100,5675	0,0013	100.847,01	9,21
100,6867	0,0001	101.150,81	6,55
100,6544	0,0000	100.996,00	3,00

Fonte: Autores (2025).

A Tabela 3 mostra um resumo comparando a média simples dos coeficientes obtidos.

Tabela 3 - Dados dos sensores 1 e 2.

Descrição	Coef. a	σ a	Coef. b	σ b	Qui ²
Média Sensor 1	79,31353	0,0001	101.696	5	5189,41
Média Sensor 2	100,6361	0,00061	100.946	5	5974,7

Fonte: Autores (2025).

Ante ao exposto, é possível observar que nas duas medições de cada sensor, os pontos estão dispostos de forma uniforme (representado nas Figuras 5 e 6), porém um sensor está totalmente discrepante em relação ao outro (Tabela 3). Isso reforça a importância de um procedimento de calibração padronizado para a utilização dos sensores.

4.2 Experimento de Vazão

As medições de diferença de pressão pela vazão ao quadrado foram organizadas no gráfico da Figura 7, evidenciando a relação linear entre as variáveis, conforme teoria. Os resultados de três experimentos replicados foram sintetizados na Tabela 4.

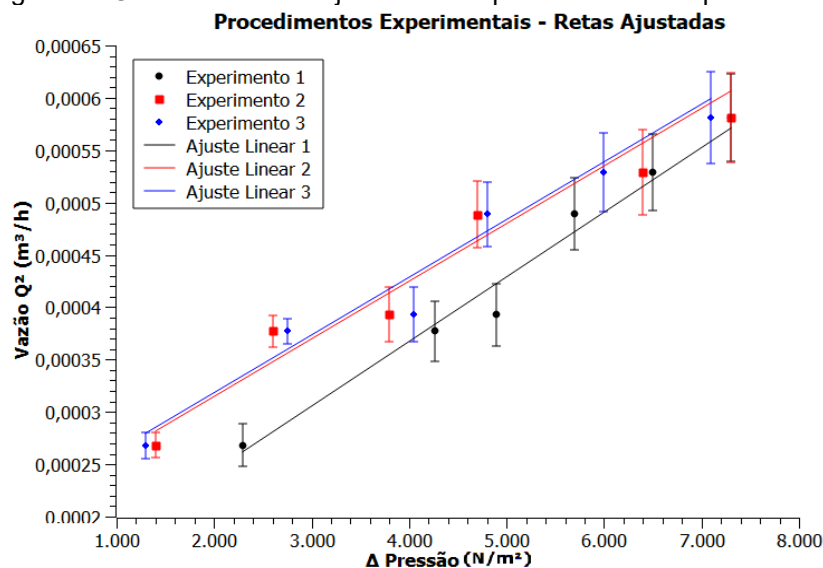
As variáveis ajustadas das três retas obtidas da Figura 7 são apresentadas na tabela 4 enquanto a tabela 5 apresenta a média destes valores.

Tabela 4 – Equações da Figura 7

Coef. a	σ a	Coef. b	σ b
6,0E-8	3,7E-6	1,3E-4	1,5E-3
5,7E-8	2,7E-6	2,0E-4	7,4E-3
5,6E-8	5,6E-6	2,0E-4	6,7E-3

Fonte: Autores (2025).

Figura 7 - Gráfico das retas ajustadas dos procedimentos experimentais.



Fonte: Autores (2024)

Tabela 5 – Dados dos experimentos práticos

Experimento	Coef. a	σ a	Coef. b	σ b	Qui ²
Média	5,80E-08	3,00E-06	1,70E-04	9,70E-03	3,39E-06

Fonte: Autores (2025).

Os três ensaios apresentaram coeficientes angulares “a” estatisticamente semelhantes, com incertezas da mesma ordem de grandeza. No primeiro ensaio, o coeficiente linear “b” foi ligeiramente menor que nos demais. Atribui-se essa variação ao fato de ter sido o primeiro experimento realizado, por este motivo, o procedimento foi repetido em triplicata. Os valores de X^2 reduzido próximos de zero indicam excelente aderência do modelo linear aos dados. Embora a permanença próximo de zero (mas positivo, confirmando a linearidade esperada) o termo b atua apenas como referência de origem experimental e não compromete a interpretação dos resultados.

Parâmetros Calculados

Com a vazão Q calculada a partir da equação (2), utilizou-se a equação (3) para o cálculo da velocidade experimental, dividindo a vazão pela área interna do tubo, resultando no valor médio de 0,90 m/s ($\pm 0,06$ m/s). Ademais, com base na mesma vazão e usando a equação (5), obteve-se a velocidade teórica média de 2,96 m/s ($\pm 0,18$ m/s).

A partir da equação (8), o número de Reynolds foi calculado, ele variou de 18.800 a 21.000, indicando regime turbulento (acima de 4.000). Por fim, o parâmetro k foi calculado pela razão entre a velocidade real e a teórica, resultando em um valor médio de 0,315 ($\pm 0,002$), valor inferior ao valor de referência ($\approx 0,60$ para placas padrão). Essa diferença pode ser atribuída ao ângulo de 45° da placa de orifício utilizada no experimento, maior que a configuração teórica de 30° - apresentada na Figura 2.

4.3 Contexto pedagógico

Este protótipo permite a realização de experimentos voltados ao estudo de mecânica dos fluidos, estatística aplicada a experimentos, instrumentação e automação. No contexto da mecânica dos fluidos, é possível realizar ensaios variando o diâmetro do orifício e a

vazão permitindo abordagens como a determinação do número de Reynolds, coeficiente de vazão e coeficiente de descarga. A troca da placa de orifício por outros elementos para causar a variação de pressão pode ser realizada e será abordada em trabalhos futuros. No contexto da instrumentação, é possível abordar conceitos básicos de estatística aplicada a medições como desvio padrão amostral, linearização, método dos mínimos quadrados, método do qui-quadrado, entre outros, e conceitos aplicados a instrumentação industrial como calibração de instrumentos, estudos da influência da taxa de amostragem sobre uma medida, medidores de pressão e medidores de vazão. Este protótipo também permite o desenvolvimento de diferentes interfaces permitindo abordagens voltadas à automação de processos.

5. CONCLUSÕES

Foi desenvolvido um experimento de calibração de placa de orifício para aulas práticas de Mecânica dos Fluidos, composto por tubo de PVC, placa de orifício, dois sensores MPS20N0040D e microcontrolador Arduino UNO, possibilitando determinar vazão a partir da diferença de pressão. A calibração dos transdutores, realizada com manômetro em U acoplado à interface Arduino, evidenciou comportamento linear dos sensores, confirmando sua adequação didática.

Com os sensores calibrados, efetuou-se o ensaio de vazão empregando a placa de orifício como elemento deprimogênio. Os dados de ΔP permitiram calcular vazão, velocidades real e teórica, número de Reynolds e o coeficiente k ; este último divergiu da literatura, atribuindo-se a discrepância ao ângulo da placa (45° no protótipo versus 30° previsto). A faixa de calibração foi totalmente explorada, sugerindo estudos futuros com sensores de maior alcance para ampliar o espectro de vazões e cobrir regiões não contempladas do diagrama $k \times Re$.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN GAS ASSOCIATION. AGA 3.1: **Orifice Metering of Natural Gas and Other Related Hydrocarbon Fluids**: Part 1

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 5167-1 - **Medidores de Vazão - Placas de Orifício**, Venturis.

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_BkLRCP_VuaVmBg2l8oMq_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.

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.

DEVELOPMENT OF AN ORIFICE PLATE FLOW SENSOR WITH ELECTRONIC ACQUISITION OF PRESSURE DIFFERENCE

Abstract: *This work details a low-cost orifice-plate flow sensor coupled to an Arduino-based differential-pressure acquisition module for use in Fluid Mechanics instruction. Two MPS20N0040D transducers placed upstream and downstream of the plate supply real-time data that, after U-tube manometer calibration, yield fluid velocity, Reynolds number and the empirical coefficient k . Bench tests confirmed linear sensor response and produced pressure-, flow- and velocity-profiles consistent with theory, demonstrating the apparatus' reliability and classroom suitability. The platform enhances students' grasp of ΔP metering while remaining expandable—for higher-range sensors, industrial automation links and improved data interfaces—thus serving as an effective springboard for future research and teaching innovations in engineering education.*

Key-words: calibration; orifice plate; pressure sensor; flow rate.

