

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

LEONARDO DIAS PETRY

INSTRUMENTAÇÃO DE UMA BANCADA DE FLUXO

**Alegrete
2024**

LEONARDO DIAS PETRY

INSTRUMENTAÇÃO DE UMA BANCADA DE FLUXO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Dr. Gustavo Fuhr Santiago

**Alegrete
2024**

LEONARDO DIAS PETRY

INSTRUMENTAÇÃO DE UMA BANCADA DE FLUXO

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Monografia defendida e aprovada em 09 de dezembro de 2024.

Banca examinadora:

Prof. Dr. Gustavo Fuhr Santiago
Orientador
(UNIPAMPA)

Prof. Dr. Celso Nobre da Fonseca
(UNIPAMPA)

Prof. Dr. Tonilson de Souza Rosendo
(UNIPAMPA)



Assinado eletronicamente por **TONILSON DE SOUZA ROSENDO, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 09/12/2024, às 09:59, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **GUSTAVO FUHR SANTIAGO, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 09/12/2024, às 10:03, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **CELSONO DA FONSECA, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 09/12/2024, às 10:08, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1619491** e o código CRC **D2827B50**.

RESUMO

A medição precisa de parâmetros como vazão e pressão é essencial para a avaliação do desempenho de componentes de motores de combustão interna, como cabeçotes, carburadores e coletores de admissão. Bancadas de fluxo desempenham um papel crucial nesse processo, mas apresentam desafios, especialmente quando utilizam manômetros diferenciais de mangueiras, que possuem leitura complexa e propensa a erros. Por outro lado, bancadas equipadas com sensores digitais geralmente apresentam custos elevados, limitando seu uso em ambientes de menor orçamento. Neste trabalho, propõe-se a modernização de uma bancada de fluxo de baixo custo, substituindo o sistema tradicional de mangueiras de nível por sensores digitais de pressão conectados a um microcontrolador. Essa atualização permite a aquisição precisa dos dados de pressão e o cálculo automático da vazão, além de oferecer leituras diretas de pressão diferencial e vazão no equipamento. Com isso, o uso da bancada é simplificado, a repetibilidade dos resultados é ampliada e a comparação entre dados experimentais se torna mais confiável. Os resultados obtidos demonstram as vantagens da incorporação de sensores digitais, como maior precisão nas medições, eliminação de erros de interpretação e melhor adequação didática do equipamento em ambientes de ensino e pesquisa. Assim, este trabalho contribui para a evolução tecnológica de bancadas de medição de baixo custo, tornando-as mais eficientes, acessíveis e adequadas para aplicação acadêmica e experimental.

Palavras-Chave: Bancada de fluxo, sensores de pressão digitais, Arduino, automação, motores de combustão interna.

ABSTRACT

Accurate measurement of parameters such as flow and pressure is essential for evaluating the performance of internal combustion engine components, such as cylinder heads, carburetors, and intake manifolds. Flow benches play a crucial role in this process, but they present challenges, especially when using differential hose pressure gauges, which have complex and error-prone readings. On the other hand, benches equipped with digital sensors are generally expensive, limiting their use in environments with lower budgets. In this work, we propose the modernization of a low-cost flow bench, replacing the traditional level hose system with digital pressure sensors connected to a microcontroller. This upgrade allows for accurate acquisition of pressure data and automatic calculation of flow, in addition to offering direct readings of differential pressure and flow in the equipment. This simplifies the use of the bench, increases the repeatability of results, and makes comparison between experimental data more reliable. The results obtained demonstrate the advantages of incorporating digital sensors, such as greater measurement accuracy, elimination of interpretation errors and better didactic suitability of the equipment in teaching and research environments. Thus, this work contributes to the technological evolution of low-cost measurement benches, making them more efficient, accessible and suitable for academic and experimental application.

Keywords: Flow bench, digital pressure sensors, Arduino, automation, internal combustion engines.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Medidores originais	11
Figura 2 - Sistema montado com Arduino.	15
Figura 3 - Sensor MPVX7002DP.....	18
Figura 4 - Arduino e Sensores	19
Figura 5 - Vista traseira bancada: a) bancada original; b) bancada com conexão para os sensores.....	20
Figura 6 - Gráfico comparativo dos testes.	22
Figura 7 - Válvulas de Regulagem Pressão de Referencia e Pontos de tomada de pressão.	23
Figura 8 - Mostrador LCD.....	23

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Componentes do Sistema Elétrico.....	19
Tabela 2: Resultado comparativo Simulado, Manômetro diferencial e sensores.....	21
Tabela 3 - Parâmetros para cálculo de vazão	34

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CFM – Cubic feet per minute

CAD – Computer Aided Design

LCD - Liquid Crystal Display

IDE - Integrated Development Environment

SUMÁRIO

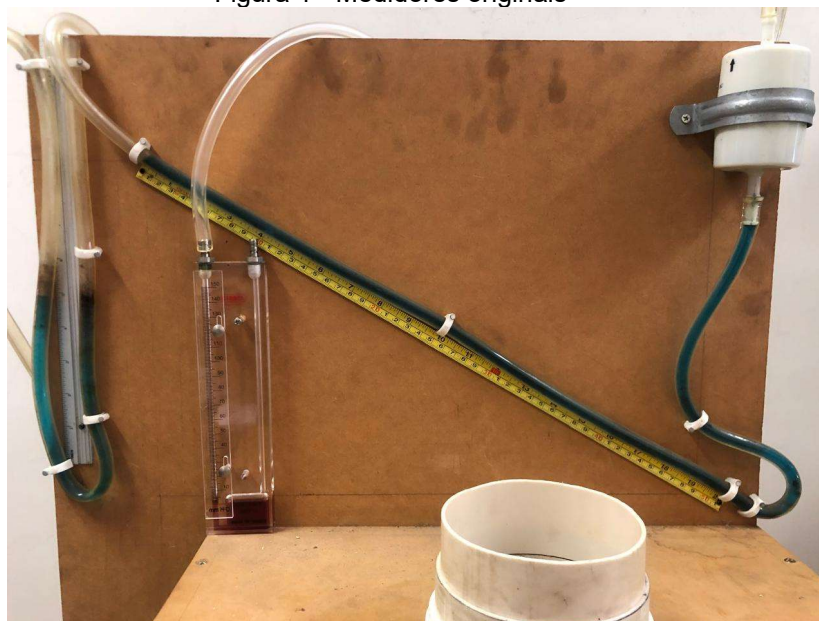
1	INTRODUÇÃO	11
1.1	Justificativa	12
1.2	Objetivo Geral	12
1.3	Objetivos Específicos	12
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	13
2.1	Sistemas Tradicionais de medição de Pressão	13
2.2	Avanço Tecnológico com Sensores Eletrônicos de Pressão.....	13
2.3	Instrumentação da Bancadas de Fluxo com Arduino.....	14
3	METODOLOGIA	16
4	DESENVOLVIMENTO	18
4.1	Fase de Implementação do Sistema	18
4.2	Fase de Testes Comparativos.....	21
5	Conclusões	24
6	SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	25
7	REFERÊNCIAS	26
	APÊNDICE A – Código em Arduino IDE.....	27
	APÊNDICE B – Manual de Utilização	34
	APÊNDICE C – Circuito Elétrico	37

1 INTRODUÇÃO

A medição precisa de parâmetros como pressão e vazão é fundamental para avaliar o desempenho de componentes de motores de combustão interna, especialmente em cabeçotes. No TCC de Bernardi (2015), foi projetada uma bancada de fluxo de baixo custo destinada a medições de perda de carga em cabeçotes de motores de baixa cilindrada unitária, utilizando um sistema de mangueiras de nível para a medição da pressão diferencial. Esse sistema proporcionou resultados satisfatórios, mas apresentava limitações em termos de precisão, repetibilidade e integração com sistemas digitais de coleta e análise de dados.

Conforme Bernardi (2015), o sistema de mangueiras de nível era uma solução acessível para medições básicas, porém utilizando sensores eletrônicos de pressão, existe a possibilidade de modernizar o sistema. Com o uso de sensores eletrônicos controlados por um microcontrolador Arduino, é possível aumentar a exatidão das medições e o processo de coleta de dados. Essa atualização visa não só melhorar a exatidão dos testes, como também facilitar a integração dos resultados com softwares de análise, permitindo a criação de um sistema mais robusto e flexível para futuras expansões. A Figura 1 - Medidores originais mostra a parte superior da bancada com manômetros diferenciais de mangueiras.

Figura 1 - Medidores originais



Fonte: do Autor.

1.1 Justificativa

Bancadas de fluxo para cabeçotes são usadas para estimar variações qualitativas na eficiência volumétrica e conseqüentemente a potência específica de motores alternativos de combustão interna.

1.2 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo descrever o processo de modernização de uma bancada de fluxo de baixo custo para medições de perda de carga, discutindo as vantagens da substituição do sistema de mangueiras de nível pelo uso de sensores de pressão digitais e apresentar os resultados obtidos com a nova abordagem tecnológica.

1.3 Objetivos Específicos

- a) Instalar os sensores digitais na bancada de fluxo de bancada em paralelo com os manômetros diferenciais, e comparar com os resultados de ambos (analógicos e digitais) em um cabeçote de referência.
- b) Desenvolver um algoritmo de aquisição de dados, incluindo um display para visualizar medições instantâneas.
- c) Tabelar, plotar e analisar as curvas de Vazão x Levantamento de válvula de admissão, comparando com valores de referência De Moraes (2018), obtidos a partir de experimentos de simulação realizados pelo autor.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A medição de parâmetros de fluxo e pressão é essencial na análise de desempenho de componentes de motores de combustão interna, como os cabeçotes, pois permite avaliar a eficiência volumétrica dos sistemas de admissão e escape. As bancadas de fluxo, amplamente utilizadas na engenharia automotiva, são projetadas para criar um fluxo de ar controlado e medir a perda de carga causada pelos componentes testados, como descrito por Larese et al. (2015) em suas pesquisas sobre bancadas de teste e suas aplicações em engenharia de fluidos.

2.1 Sistemas Tradicionais de medição de Pressão

Sistemas de medição de pressão baseados em manômetros diferenciais de coluna líquida e mangueiras de nível são amplamente utilizados em bancadas de teste devido ao baixo custo e simplicidade operacional (LI et al., 2019). Esses sistemas utilizam tubos preenchidos com um fluido, geralmente água, que reage à diferença de pressão entre dois pontos do sistema, permitindo a leitura direta da diferença de pressão pela altura da coluna líquida. No entanto, esse método possui limitações em aplicações que exigem alta resolução e automação, pois depende de medições manuais e constantes ajustes de calibração (FERNANDES et al., 2018).

2.2 Avanço Tecnológico com Sensores Eletrônicos de Pressão

O desenvolvimento de sensores de pressão eletrônicos trouxe melhorias significativas em exatidão e tempo, especialmente em sistemas onde há variações rápidas de pressão. Transdutores piezorresistivos, por exemplo, têm sido amplamente utilizados para medições de pressão diferencial, por fornecerem medições confiáveis com alta resolução (LOVISOLO et al., 2020). Esses sensores convertem a pressão em sinais elétricos, permitindo a leitura digital e a integração com sistemas de coleta de dados. Segundo Hossain et al. (2017), a introdução de sensores piezorresistivos em sistemas automotivos de medição de pressão diferencial tem facilitado a modernização de bancadas de teste, permitindo o uso de dados precisos e contínuos para ajustes em tempo real.

A utilização de sensores digitais em conjunto com plataformas microcontroladas, como o Arduino, facilita o processamento e a interpretação dos dados medidos,

especialmente em aplicações de engenharia automotiva e mecânica (SOUZA; FREITAS, 2021). Essa plataforma é conhecida por sua versatilidade e facilidade de uso, tornando-se uma das preferidas para sistemas de medição e controle em bancadas experimentais.

2.3 Instrumentação da Bancadas de Fluxo com Arduino

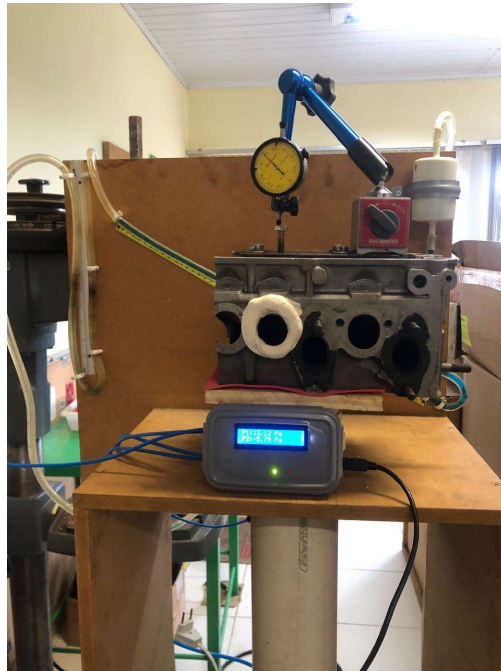
A integração de sensores de pressão com sistemas baseados em Arduino permite uma coleta de dados automática e em tempo real, o que facilita a análise do comportamento dos componentes testados sob diferentes condições de pressão e vazão (CASTRO; ALMEIDA, 2019). Segundo Santos et al. (2021), essa automação elimina a necessidade de medições manuais, proporcionando maior exatidão e repetibilidade nos resultados. Souza e Freitas (2021) destacam que essa integração também possibilita o desenvolvimento de algoritmos de controle, ajustando automaticamente os parâmetros do experimento em função dos resultados obtidos, tornando o sistema mais eficiente e confiável.

Além disso, o uso de sensores digitais permite que os dados sejam processados e armazenados diretamente em dispositivos eletrônicos, proporcionando uma integração eficiente com plataformas de análise de dados, que permitem a geração de gráficos e relatórios em tempo real (HOSSAIN et al., 2017). A modernização de bancadas de fluxo para medições de pressão e vazão com sensores eletrônicos e controle digital tem sido uma tendência crescente em laboratórios e oficinas especializadas, atendendo à demanda por maior precisão e automação nas medições experimentais.

Bancadas de fluxo digitalizadas, controladas por sensores de pressão e plataformas como o Arduino, possuem aplicações variadas, desde o ensino prático de mecânica dos fluidos até o desenvolvimento de componentes de alto desempenho para motores de competição (LOVISOLO et al., 2020). Segundo Santos et al. (2021), a transição para sistemas digitais melhora a capacidade de integração com softwares de análise e plataformas de simulação, oferecendo novas possibilidades para a otimização e desenvolvimento de motores de combustão interna mais eficientes e sustentáveis.

A figura 2 mostra a bancada com o sistema de medição original e mostrador LCD do Arduino e o mecanismo de elevação de válvula.

Figura 2 - Sistema montado com Arduino.



Fonte: do Autor

3 METODOLOGIA

O presente trabalho propõe a modernização de uma bancada de fluxo desenvolvida no projeto anterior de Bernardi (2015), substituindo o sistema de medição de pressão baseado em manômetros diferenciais de mangueira por sensores de pressão eletrônicos controlados por um microcontrolador Arduino. A metodologia empregada é dividida em duas fases: a fase de implementação do novo sistema de medição e a fase de testes comparativos entre o sistema tradicional e o sistema proposto.

O sistema de medição de pressão da bancada de fluxo original utilizava manômetros de coluna líquida e mangueiras de nível para medir a pressão diferencial ao longo do cabeçote (BERNARDI, 2015). Esse sistema permitia a leitura visual da diferença de pressão gerada pela perda de carga em componentes testados, utilizando colunas de água em equilíbrio. As leituras eram feitas manualmente e requeriam ajuste constante para garantir que a pressão de teste permanecesse estável.

a) Fase de Implementação do Sistema

Durante a implementação do sistema foi feita a seleção dos sensores, do microcontrolador qual modelo de Arduino e LCD a ser utilizado, também a forma de instalação dos sensores sem alterar as características do circuito de pressão já existente no equipamento.

b) Fase de Testes Comparativos

Na primeira fase de teste utilizando um manômetro de coluna líquida para medir e testar a precisão e repetibilidade dos resultados dos sensores.

Na segunda fase de testes foram comparados valores de vazão obtidos com os sensores e valores de simulações em CAD de uma válvula de admissão de um cabeçote de Motor Volkswagen 1.6 AP, feito por Moraes (2018).

c) Procedimentos de Teste

As medições foram feitas com levantamento de válvulas de admissão com incrementos de 20% do levantamento máximo de 9,3mm:

Medições com Sistema de Mangueiras de Nível: Realizou-se o teste tradicional com o sistema de medição de Bernardi (2015), registrando manualmente os valores de pressão diferencial.

Medições com o Novo Sistema: Os mesmos resultados para os testes foram obtidos simultaneamente com o sistema de sensores de pressão, comparando os dados obtidos pelos sensores com os manômetros diferenciais.

4 DESENVOLVIMENTO

4.1 Fase de Implementação do Sistema

4.1.1 Substituição por sensores de Pressão com Arduino

O sensor MPXV7002DP é um sensor de pressão diferencial analógico fabricado pela NXP Semiconductors. Ele é projetado para medir a diferença de pressão entre dois pontos, sendo utilizado em aplicações de baixa pressão, como sistemas de fluxo de ar, medição de gás e monitoramento ambiental.

Esse sensor foi escolhido por sua capacidade de medir pressões diferenciais com alta resolução, adequada para as medições de perda de carga na bancada de fluxo.

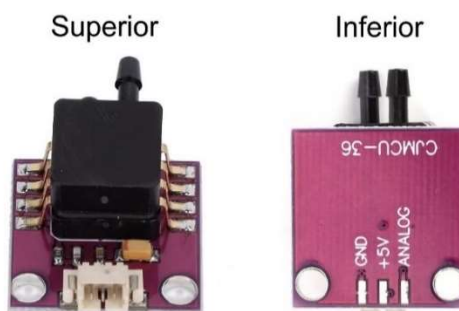
O sistema de sensores de pressão do modelo Mpxv7002dp, conectados a um microcontrolador Arduino Uno foi adicionado ao sistema de manômetros diferenciais de mangueiras.

O MPXV7002DP mostrado na Figura 3, utiliza um elemento piezorresistivo para detectar a pressão diferencial entre suas duas entradas.

A variação de pressão causa uma deformação no elemento sensível, alterando sua resistência elétrica. Essa alteração de resistência é convertida em um sinal de saída analógico proporcional à pressão diferencial.

Tendo uma faixa de operação indicada de 0,5V até 4,5V podendo operar com uma tensão máxima de até 5V onde chega a uma pressão diferencial limite de 2,5kPa que deve ser evitada para garantir uma boa vida útil e precisão e linearidade da sua faixa de utilização.

Figura 3 - Sensor MPVX7002DP.



Fonte: do Autor.

- **Montagem do Circuito**

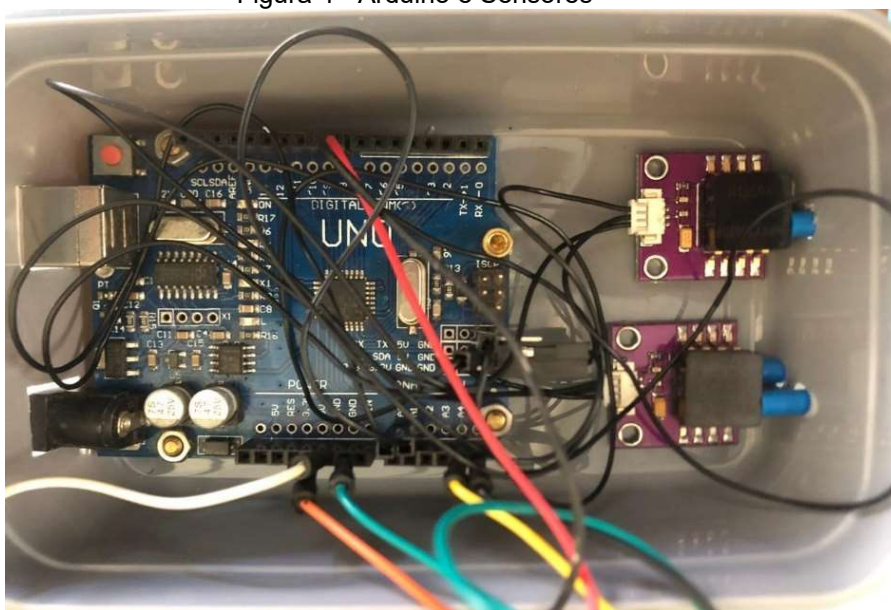
Os sensores de pressão foram conectados ao Arduino por meio de um circuito simples, seguindo o diagrama de tomada de pressão de Bernardi (2015), adaptado para incluir os sensores eletrônicos, e mantendo o sistema de medição já existente na bancada como mostra a Figura 5. Os componentes eletrônicos utilizados estão listados na Tabela 1 e a Figura 4 mostra os sensores conectados a placa do Arduino. Conforme diagrama elétrico do Apêndice C.

Tabela 1: Componentes do Sistema Elétrico

Quantidade	Descrição	Modelo	VALOR
1	Arduino	Uno	R\$ 50,00
2	Sensores pressão diferencia	Mpxv7002dp	R\$ 200,00
1	LCD	16x2 I2C	R\$ 50,00
1	Led vermelho	3mm	R\$ 0,10
1	Led verde	3mm	R\$ 0,10
1	Resistores	220Ω a 330Ω	R\$ 0,10

Fonte: do Autor.

Figura 4 - Arduino e Sensores



Fonte: do Autor

- **Desenvolvimento do Código**

Um código foi desenvolvido na IDE do Arduino para ler os valores dos sensores, convertê-los em unidades de medida (kPa) e exibir os dados em tempo real apresentado no Apêndice A.

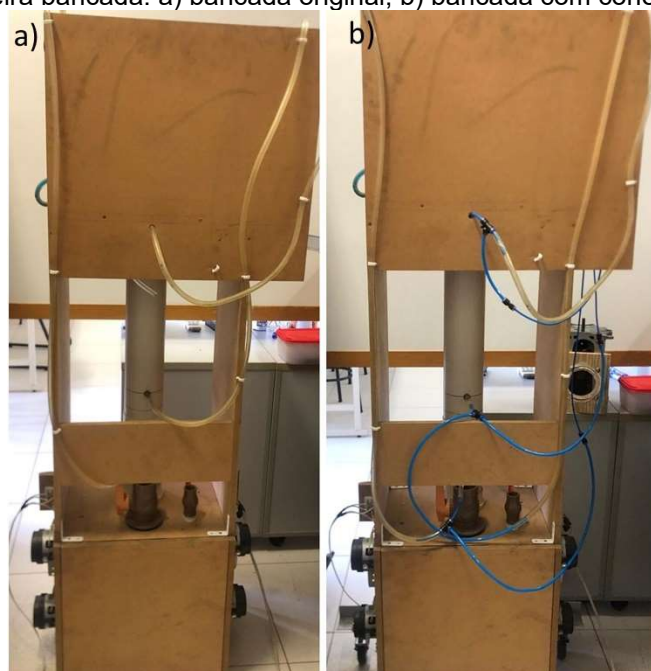
- **Calibração do Sensor**

Para garantir a exatidão das leituras, os sensores foram calibrados utilizando manômetros de referência, com ajustes de escala e offset no código do Arduino automaticamente quando o circuito elétrico do Arduino é inicializado. Durante a inicialização do Sistema Arduino/Sensores o sistema faz a média de 200 leituras para calibrar a sua pressão inicial com referência a pressão atmosférica como zero.

- **Instalação na Bancada de Fluxo**

Após a montagem e calibração, os sensores de pressão foram instalados na bancada, utilizando engates rápidos para ar comprimido, como mostra a Figura 5 b. Garantindo que não houvessem vazamentos nas conexões, mantendo o sistema original com manômetros diferenciais de mangueira, para obter resultados comparativos.

Figura 5 – Vista traseira bancada: a) bancada original; b) bancada com conexão para os sensores.



Fonte: do Autor

4.2 Fase de Testes Comparativos

Os resultados obtidos com o novo sistema de medição digital foram comparados aos valores tradicionais do sistema de manômetro diferencial de mangueiras (BERNARDI, 2015) e com os valores simulados (MORAES, 2018). A análise dos dados incluiu a avaliação da precisão, repetibilidade e tempo de resposta de ambos os sistemas.

As diferenças das leituras realizadas com os sensores não ultrapassam o valor de 10Pa, o que é perfeitamente normal e aceitável considerando que este valor é equivale apenas 1mm de coluna d'água no manômetro o que pode ser considerado um erro de paralaxe.

4.2.1 Exatidão das Medições

Os resultados de pressão diferencial mostraram que o sistema baseado em sensores de pressão apresentou uma diferença menor entre comparando com os valores simulador conforme a Tabela 2.

Tabela 2: Resultado comparativo Simulado, Manômetro diferencial e sensores.

	Vazão [CFM] FT³/min				
	Posição 1	Posição 2	Posição 3	Posição 4	Posição 5
Simulação	37,29	43,44	60,18	66,32	71,19
Manômetro Diferencial	22,36	46,91	64,22	71,44	78,01
Sensores	23,04	45,9	61,62	67,17	72,86
Diferença % Simulado e Sensores	38%	6%	2%	1%	2%

Fonte: do Autor.

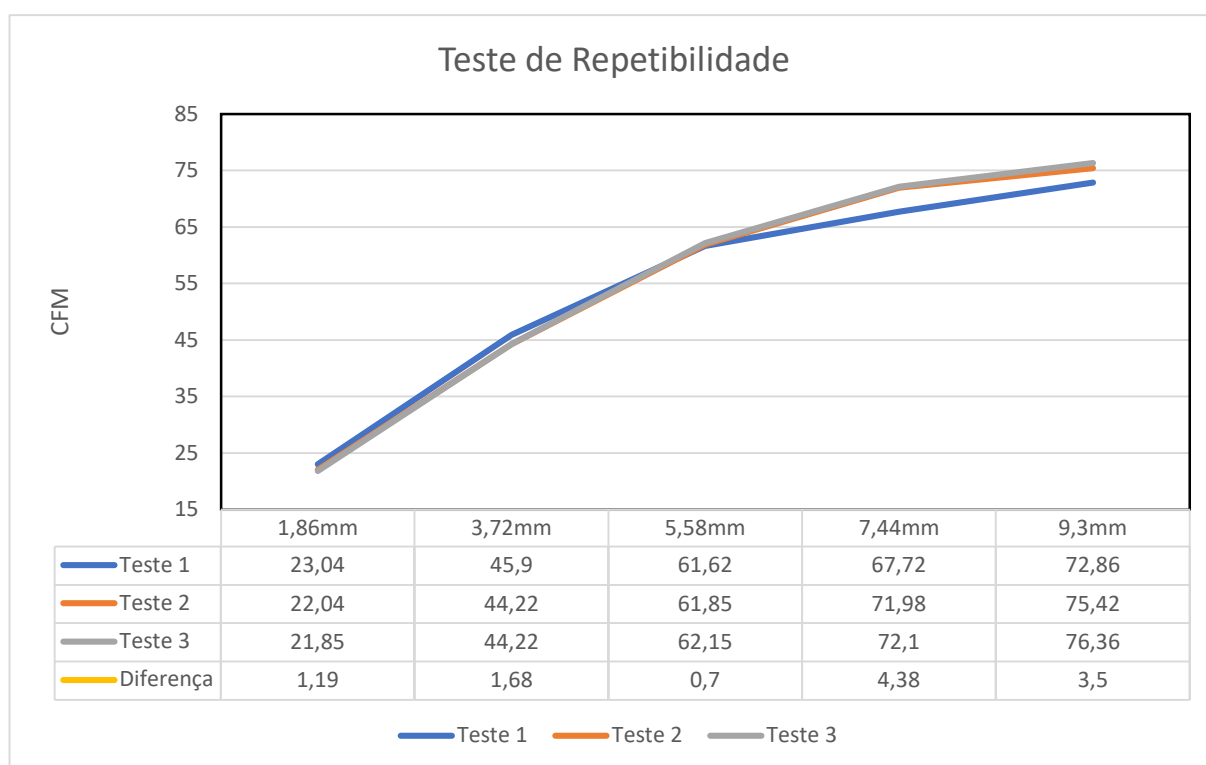
As diferenças entre o valor simulado por DE MORAES (2018) e o encontrado na bancada no primeiro levantamento equivalente a 1,86mm, pode ser relacionado ao processo de fabricação do cabeçote. Por se tratar de uma peça feita através do processo de fundição podem ocorrer pequenas movimentações na posição dos machos de fundição alterando a posição da sede de válvula dificultando o fluxo com baixos levantamentos de válvula. Além disso a diferença de rugosidade das superfícies dos cabeçotes e o cabeçote utilizado para teste da bancada trata-se de

um cabeçote usado, o qual já pode ter sofrido alterações nos ângulos da sede de válvulas ou empenamento de válvula, juntamente com alterações atmosféricas como variação de umidade e temperatura do ar podem corroborar para esta diferença de vazão no início do levantamento de válvula. Na simulação, o desenho é otimizado, não refletindo as perdas citadas.

4.2.2 Repetibilidade das Medições

A repetibilidade dos resultados mostrou-se um fator importante e vantajoso no sistema com sensores, como mostra a Figura 6. Considerando um desvio médio máximo de 1,92 CFM o que equivale a 2,72%. Para uma análise qualitativa de um cabeçote pode ser desprezada já que outros fatores como a temperatura e umidade do ar não foram considerados entre as medições, ou até a própria posição do observador poderia alterar o valor da leitura (já que 1cm de variação no manômetro inclinado equivale a 2% da escala total do manômetro inclinado).

Figura 6 - Gráfico comparativo dos testes.



Fonte: do Autor.

4.2.3 Tempo de Resposta

O tempo de resposta do sistema de sensores de pressão não foi significativamente mais rápido do que o método tradicional de manômetro diferencial de mangueiras, devido ao ajuste da pressão de referência ainda ser feito manualmente através das válvulas mostradas na Figura 7.

Figura 7 - Válvulas de Regulagem Pressão de Referência e Pontos de tomada de pressão.



Fonte: do Autor

A Figura 7 mostra também os pontos de tomada de pressão antes e depois da placa de orifício.

4.2.4 Facilidade de Uso

Com base na análise qualitativa, o sistema digital também se mostrou mais fácil de usar, já que permite a leitura direta dos dados de pressão de referência, pressão diferencial no orifício calibrado, vazão em m^3/s e em CFM, diretamente no monitor da máquina ou através de interface do Monitor Serial do Arduino IDE, como mostrado na figura 5 e no Apêndice B (Manual de utilização).

Figura 8 - Mostrador LCD.



Fonte: Aatoria própria.

5 Conclusões

Neste trabalho foi implementada uma forma alternativa para a aquisição de dados de uma bancada de fluxo de cabeçotes utilizando sensores e um microcontrolador de baixo custo e fácil operação, que facilita a aquisição de dados podendo estes dados serem coletados diretamente do LCD do conjunto Arduino/Sensores ou através do monitor serial do Arduino IDE facilitando o tratamento destes dados.

O sistema com Arduino e sensores eletrônicos demonstra excelente repetibilidade, como mostra a Figura 6 - Gráfico comparativo dos testes. Com desvio médio máximo de 2,72% entre as medições realizadas.

A aquisição de dados pelo novo sistema é mais ágil e confiável já que o mostrador apresenta leitura direta de valores de pressão e vazão.

Além de poder ser reposicionado para facilitar a leitura, que no sistema de manômetro diferencial fica atrás do cabeçote dificultado a visualização da escala do manômetro.

É importante lembrar que para esta faixa de operação o sistema de manômetros diferenciais com mangueiras não precisa ser desabilitado.

Para se trabalhar com faixas de pressão mais elevadas é indispensável a troca dos sensores MPVX7002DP por sensores com uma faixa de operação maior como o sensor MPX5010, que pode operar com uma pressão diferencial de até 10kPa sem necessidade de grandes alterações no código ou na bancada, mas será necessário desativar os manômetros diferenciais de mangueira pois a diferença de pressão será maior que a escala deles.

6 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Futuramente o sistema de aquisição de dados da bancada pode ser automatizado gerando um conjunto de informações que podem ser utilizados de forma mais rápida e associadas a um banco de dados com padrões dos cabeçotes testados podendo ser utilizados como referencias para modificações em cabeçotes podendo comparar desempenhos com os já testados.

Uma possibilidade é a automatização do controle de pressão de referência o qual tem um custo mais elevado considerando a necessidade de controladores eletrônicos ou inversores de frequência para controlar a velocidade dos motores da banca, mas esta alteração pode permitir a inversão de fluxo podendo ser atualizada também o sistema de exaustão do cabeçote.

Outra possibilidade que é a alteração e melhoria do sistema de medição de levantamento de válvula possibilitando um sistema genérico que possa ser utilizado em diversos cabeçotes, facilitando a utilização da bancada.

7 REFERÊNCIAS

BERNARDI, Sander. Projeto de uma bancada de fluxo para cabeçotes de motores de baixa cilindrada unitária. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Pampa, Alegrete, 2015.

CASTRO, M.; ALMEIDA, J. “Arduino-based platform for real-time monitoring and control in fluid mechanics applications.” *Journal of Engineering Education*, v. 14, n. 3, p. 56-62, 2019.

FERNANDES, R. et al. “Comparative study on pressure measurement techniques in engine test benches.” *Journal of Automotive Engineering*, v. 32, n. 5, p. 441-447, 2018.

HOSSAIN, M.; GUPTA, R.; RASHID, M. “Piezoresistive pressure sensors: A review on their fabrication and applications.” *Sensors*, v. 17, n. 1, p. 186-195, 2017.

LARESE, M. et al. “Advances in flow bench testing for automotive applications.” *Automotive and Mechanical Engineering Journal*, v. 9, n. 2, p. 215-223, 2015.

LOVISOLO, L. et al. “Application of digital pressure sensors in flow test benches for small displacement engines.” *Fluid Mechanics and Applications*, v. 19, n. 4, p. 301-311, 2020.

MORAES, Jonatan Rafael Zimmermann de. Estudo de viabilidade de arranjos de válvulas primárias e secundárias para cabeçotes de motores. 62 p. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Pampa, Campus Alegrete, Alegrete, 2018.

SOUZA, P.; FREITAS, T. “Development and automation of low-cost flow benches using Arduino for automotive applications.” *Mechanical Engineering Review*, v. 28, n. 1, p. 19-25, 2021.

SANTOS, A.; MOREIRA, F.; PINHEIRO, L. “Real-time data acquisition in engineering laboratories using Arduino and LabVIEW.” *International Journal of Engineering Education*, v. 37, n. 2, p. 150-160, 2021.

APÊNDICE A – Código em Arduino IDE

```
#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>

LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 16, 2); // Endereço I2C padrão (0x27), 16 colunas, 2
linhas

// Pinos LCD
// GND -> GND do Arduino
// VCC -> 5V do Arduino
// SDA -> Pino A4 (SDA) do Arduino Uno
// SCL -> Pino A5 (SCL) do Arduino Uno

const int pinoSensor1 = A0; // Pino analógico do primeiro sensor
const int pinoSensor2 = A1; // Pino analógico do segundo sensor
const int ledVermelho = 8; // Pino digital para o LED vermelho
const int ledVerde = 9; // Pino digital para o LED verde
const float Vcc = 5.0; // Tensão de alimentação do Arduino
const float VoutOffset = 0.5 * Vcc; // Offset do sensor (0.5 * Vcc)
const float sensibilidade = 0.001; // Sensibilidade de 0.001 V/Pa

// Parâmetros para cálculo de vazão
const float densidade = 1.225; // Densidade do ar em kg/m³
const float diametro = 0.04; // Diâmetro do orifício em metros (20 mm)
const float coeficienteDescarga = 0.6; // Coeficiente de descarga

float offsetSensor1 = 0;
float offsetSensor2 = 0;

int numeroLeituras = 200; // Número de leituras para média
```

```
void setup() {  
  Serial.begin(9600); // Inicializa a comunicação serial  
  lcd.init();        // Inicializa o LCD I2C  
  lcd.backlight();  // Liga a retroiluminação do LCD  
  
  pinMode(ledVermelho, OUTPUT); // Configura o LED vermelho como saída  
  pinMode(ledVerde, OUTPUT);   // Configura o LED verde como saída  
  
  // Mostra informações iniciais no LCD  
  lcd.setCursor(0, 0);  
  lcd.print("Versao 2024");  
  delay(2000);  
  
  lcd.clear();  
  lcd.setCursor(0, 0);  
  lcd.print("Diametro orif:");  
  lcd.setCursor(0, 1);  
  lcd.print(diametro, 3);  
  lcd.print(" m");  
  delay(3000);  
  
  lcd.clear();  
  lcd.setCursor(0, 0);  
  lcd.print("Coef. de desc:");  
  lcd.setCursor(0, 1);  
  lcd.print(coeficienteDescarga, 2);  
  delay(3000);  
}
```

```
lcd.clear();  
lcd.setCursor(0, 0);  
lcd.print("Densidade:");  
lcd.setCursor(0, 1);  
lcd.print(densidade, 3);  
lcd.print(" kg/m3");  
delay(3000);
```

```
lcd.clear();  
lcd.setCursor(0, 0);  
lcd.print("Velocidade COM:");  
lcd.setCursor(0, 1);  
lcd.print(9600);  
lcd.print(" bps");  
delay(3000);
```

```
lcd.clear();
```

```
// Acende o LED vermelho durante a calibração
```

```
digitalWrite(ledVermelho, HIGH);
```

```
digitalWrite(ledVerde, LOW);
```

```
// Mensagem de calibração no LCD
```

```
lcd.setCursor(0, 0);
```

```
lcd.print("Calibrando...");
```

```
Serial.println("Calibrando...");
```

```
// Calibração inicial dinâmica: média de 100 leituras
```

```
for (int i = 0; i < 100; i++) {  
    offsetSensor1 += analogRead(pinoSensor1);  
    offsetSensor2 += analogRead(pinoSensor2);  
    delay(10); // Intervalo de estabilização entre leituras  
}  
  
// Faz a média das leituras iniciais e converte para tensão  
offsetSensor1 = (offsetSensor1 / 100.0) * (Vcc / 1023.0);  
offsetSensor2 = (offsetSensor2 / 100.0) * (Vcc / 1023.0);  
  
Serial.println("Calibracao inicial concluida");  
Serial.print("Offset Sensor 1: ");  
Serial.print(offsetSensor1);  
Serial.println(" V");  
Serial.print("Offset Sensor 2: ");  
Serial.print(offsetSensor2);  
Serial.println(" V");  
  
// Atualiza a mensagem no LCD  
lcd.clear();  
lcd.setCursor(0, 0);  
lcd.print("Calibracao OK");  
delay(2000); // Tempo para o operador visualizar a mensagem  
lcd.clear();  
  
// Apaga o LED vermelho e acende o LED verde para indicar que está pronto  
digitalWrite(ledVermelho, LOW);  
digitalWrite(ledVerde, HIGH);  
}
```

```
void loop() {  
    float somaTensao1 = 0;  
    float somaTensao2 = 0;  
  
    // Calcula a média com 200 leituras para maior precisão, quantidade declarada na  
    // variavel numeroLeituras  
    for (int i = 0; i < numeroLeituras; i++) {  
        somaTensao1 += analogRead(pinoSensor1) * (Vcc / 1023.0);  
        somaTensao2 += analogRead(pinoSensor2) * (Vcc / 1023.0);  
        delay(10); // Intervalo entre as leituras para reduzir ruído  
    }  
  
    // Calcula a média de tensão lida  
    float mediaTensao1 = somaTensao1 / numeroLeituras;  
    float mediaTensao2 = somaTensao2 / numeroLeituras;  
  
    // Calcula a pressão em Pa subtraindo os offsets iniciais  
    float pressao1 = (mediaTensao1 - offsetSensor1) / sensibilidade;  
    float pressao2 = (mediaTensao2 - offsetSensor2) / sensibilidade;  
  
    // Calcula a diferença de pressão para usar no cálculo da vazão  
    // float deltaP = abs(pressao2 - pressao1);  
    // usa pressao2 já é pressão diferencial entre os lados da placa de orifício  
  
    // Cálculo da vazão volumétrica (m³/s)  
    float area = (3.14159 * pow(diametro, 2)) / 4; // Área do orifício  
    float vazao = coeficienteDescarga * area * sqrt(2 * pressao2 / densidade);  
  
    // Converte a vazão para CFM (pés cúbicos por minuto)  
    float vazaoCFM = vazao * 2118.88; // 1 m³/s = 2118.88 CFM
```

```
// Exibe as leituras de pressão e a vazão no monitor serial e no Serial Plotter
Serial.print("Pressao1: ");
Serial.print(pressao1);
Serial.print(" Pa\t");
Serial.print("Pressao2: ");
Serial.print(pressao2);
Serial.print(" Pa\t");
Serial.print("Vazao: ");
Serial.print(vazao, 6);
Serial.print(" m³/s\t");
Serial.print("Vazao: ");
Serial.print(vazaoCFM, 2);
Serial.println(" CFM\t");

// Exibe as leituras de pressão e vazão no LCD
// Exibe P1
lcd.setCursor(0, 0);
lcd.print("P1:");
lcd.print(pressao1);
lcd.print(" Pa ");

// Exibe P2
lcd.setCursor(0, 1);
lcd.print("P2:");
lcd.print(pressao2);
lcd.print(" Pa ");
delay(1000); // Intervalo exibir pressão
```



```
// Exibe vazão no LCD em CFM
lcd.clear();
lcd.setCursor(0, 0);
lcd.print("Q:");
lcd.print(vazaoCFM, 2);
lcd.print(" CFM ");

delay(1000); // Intervalo entre as leituras médias
}
```

APÊNDICE B – Manual de Utilização

Inicialização do Sistema

1. Ligar o Arduino e certificar-se de que todos os componentes estão devidamente conectados.

A ligação do Arduino pode ser feita pela tomada USB ligada a um PC ou a um carregador USB de 5V ou por uma fonte de alimentação de até 9V ou uma bateria de 9V com o adaptador específico.

2. O display LCD apresentará uma sequência inicial com as seguintes informações:
 - **Versão do sistema:** "Versao 2024"
 - **Diâmetro do orifício:** Exibido em metros
 - **Coefficiente de descarga:** Valor utilizado no cálculo de vazão
 - **Densidade do ar:** Valor em kg/m^3
 - **Velocidade de comunicação serial:** Indicando a taxa de baud (bps)

Cada uma dessas informações é exibida por aproximadamente 3 segundos.

Caso haja a necessidade de alterar alguma destes parâmetros basta alterar os valores das variáveis e reenviar o código para o microcontrolador.

Tabela 3 - Parâmetros para cálculo de vazão

Parametro	Variavel	Posição no codigo
Densidade do ar em kg/m^3	densidade	Linha 21
Diâmetro do orifício em metros	diametro	Linha 22
Coefficiente de descarga	coeficienteDescarga	Linha 23

Fonte: Autoria própria

Calibração dos Sensores

1. LED vermelho aceso indica que o sistema está em calibração.
2. Durante a calibração, o sistema faz a média de 100 leituras dos sensores de pressão para calcular os offsets iniciais.
3. Após a calibração, o display exibirá a mensagem "Calibração OK" e o LED verde será aceso, indicando que o sistema está pronto para uso.

Operação

1. Aquisição de Dados:

- O sistema realiza a média de 200 leituras dos sensores para maior precisão, calculando as pressões em cada sensor.
- A diferença de pressão é utilizada para calcular a vazão volumétrica em m^3/s .

2. Exibição dos Resultados:

- **Monitor Serial:** Apresenta os valores de pressão (em Pa), vazão volumétrica em m^3/s e a vazão convertida para CFM (pés cúbicos por minuto).
- **Display LCD:** Exibe os valores de pressão dos sensores (P1 e P2) e a vazão em CFM.

Indicadores de Status

- **LED Vermelho:** Indica que o sistema está em processo de calibração.
- **LED Verde:** Indica que o sistema está pronto para operação e coleta de dados.

Manutenção e Cuidados

- **Verifique as conexões** regularmente para garantir que não haja fios soltos ou mal conectados.
- **Calibração** deve ser realizada sempre que o sistema for reiniciado para garantir a precisão das medições.
- **Evite expor** o sistema a ambientes excessivamente úmidos ou poeirentos, pois isso pode afetar o funcionamento dos sensores.

Conversão de Unidades

- O código converte a vazão volumétrica de m^3/s para CFM (pés cúbicos por minuto), utilizando o fator de conversão: **$1 m^3/s = 2118,88 CFM$** .
- Esta conversão é útil para aplicações que utilizam unidades do sistema imperial, facilitando a interpretação dos dados.

Resolução de Problemas

- **Nenhuma informação no LCD:** Verifique se o módulo I2C está conectado corretamente e se o endereço (0x27) corresponde ao seu dispositivo.
- **LED vermelho não apaga:** Pode indicar falha na calibração. Verifique os sensores de pressão e repita o processo.
- **Valores incorretos de pressão ou vazão:** Certifique-se de que os sensores estejam calibrados corretamente e que não há obstrução no sistema de medição.

Sequência de teste de vazamentos e utilização da bancada.

- **Com o cabeçote instalado na bancada:**
 - ligar um dos motores para geração de pressão diferencial dentro do sistema.
 - Ainda com a válvula de admissão fechada ajuste a pressão de referência desejada para P1, a vazão neste momento deve ser igual a zero, caso haja alguma vazão verifique possíveis vazamentos no sistema.
 - Não havendo vazamentos, altere o levantamento de válvula até o valor desejado e ajuste novamente a pressão de referência P1, assim que ajustada a pressão de referência o valor de vazão esta estabilizara e poderá ser lido tanto no LCD em CFM ou no Monitor Serial em m³/s ou em CFM. Repita o procedimento até o levantamento desejado. Caso necessário acione mais um motor para chegar à pressão de referência.

APÊNDICE C – Circuito Elétrico

