

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALFENAS CAMPUS POÇOS DE CALDAS
BACHARELADO INTERDISCIPLINAR EM CIÊNCIAS E TECNOLOGIA

LUIS GUILHERME STEFANI POSSANI

DESENVOLVIMENTO DE UM MEDIDOR DE VISCOSIDADE BASEADO NA LEI DE
HUGGEN-POISEUILLE

POÇOS DE CALDAS/MG

Setembro/2024

LUIS GUILHERME STEFANI POSSANI

DESENVOLVIMENTO DE UM MEDIDOR DE VISCOSIDADE BASEADO NA LEI DE
HUGGEN-POISEUILLE

Trabalho apresentado ao Instituto de Ciências
Sociais Aplicadas da Universidade Federal de
Alfenas como requisito parcial à obtenção do
título de Bacharel Interdisciplinar em Ciência e
Tecnologia.

Orientador: Prof. Dr Laos Alexandre Hirano

Co-orientador: Prof. Dr. Marcos Vinícius
Rodrigues

POÇOS DE CALDAS/MG

Setembro/2024

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiro a Deus, que me deu força, esperança e sabedoria para chegar até aqui, mesmo em meio a tantos desafios.

Dedico este trabalho aos meus pais, Luizinho e Mara, que sempre foram e sempre serão as maiores inspirações da minha vida.

Este ano foi o mais difícil da minha vida, em todos os sentidos: acadêmico, profissional e familiar. Minha família enfrentou uma batalha dura contra o câncer que tirou de nós um dos nossos maiores pilares, meu pai. Ele lutou com coragem e dignidade, ensinando a todos nós sobre força e amor mesmo nos momentos mais difíceis. Durante esse tempo, estivemos ao lado dele, oferecendo todo o suporte e carinho que podíamos.

Pai, espero que o senhor, de algum lugar, esteja comemorando comigo. Sua falta é sentida todos os dias, e essa conquista é por você e por tudo o que a nossa família representa. Eu te amo muito!

Minha mãe, minha grande guerreira, merece tanto quanto ele essa dedicatória. Sua força, carinho e amor incondicional foram o que sustentaram nossa família nos momentos mais difíceis. A senhora é o maior exemplo de superação e dedicação que eu conheço. Essa conquista também é sua, mãe, e eu espero retribuir, mesmo que só um pouquinho, tudo o que a senhora já me deu. Te amo muito!

Ao Iago, meu companheiro de vida, meu muito obrigado por sempre estar ao meu lado. Nos momentos difíceis e nos felizes, você foi meu alívio, meu suporte e minha motivação para seguir em frente.

Aos meus orientadores, professores Laos e Marcos, meu agradecimento especial. O apoio e a orientação de vocês foram essenciais para que eu conseguisse concluir este trabalho. Aprender com professores tão dedicados e humanos foi um privilégio que vou levar para a vida.

A todos que, de alguma forma, estiveram presentes nessa caminhada, meu mais sincero obrigado. Este trabalho não é apenas uma conquista pessoal, mas o reflexo do apoio, amor e dedicação de cada um de vocês.

Afinal, tudo o que fazemos na vida carrega um propósito maior: o amor por aqueles que sempre estiveram ao nosso lado. Nossas conquistas, grandes ou pequenas, só fazem sentido porque são compartilhadas com as pessoas que amamos.

RESUMO

Este trabalho desenvolve um medidor de viscosidade baseado na Lei de Hagen-Poiseuille, destinado à determinação indireta da viscosidade de fluidos por meio de medições de pressão e vazão. A pesquisa focou na concepção, construção e validação experimental de um sistema capaz de medir a viscosidade com precisão e confiabilidade, utilizando sensores de pressão calibrados. A metodologia envolveu a montagem de um dispositivo experimental equipado com sensores de pressão MPS20N0040D, calibrados conforme procedimentos específicos para assegurar a precisão das medições. O sistema foi testado utilizando água e soluções detergentes, a fim de avaliar sua aplicabilidade em diferentes fluidos. Os resultados indicaram que o medidor desenvolvido proporciona estimativas de viscosidade consistentes com os valores padrões dos fluidos testados, confirmando a eficácia do método utilizado. A alta sensibilidade dos sensores permitiu detectar variações sutis na pressão, elemento crucial para a precisão das medições de viscosidade. Conclui-se que o medidor de viscosidade desenvolvido é uma ferramenta eficaz e confiável para a medição de viscosidade, oferecendo uma base robusta para futuras investigações e aplicações práticas no campo da dinâmica de fluidos.

Palavras-chave: viscosidade; Lei de Hagen-Poiseuille; sensores de pressão; medição de viscosidade; dinâmica de fluidos.

ABSTRACT

This study develops a viscosity meter based on the Hagen-Poiseuille Law, aimed at indirectly determining the viscosity of fluids through pressure and flow measurements. The focus of the research was on designing, constructing, and experimentally validating a system capable of measuring viscosity with precision and reliability, utilizing calibrated pressure sensors. The methodology involved setting up an experimental circuit equipped with MPS20N0040D pressure sensors, calibrated according to specific procedures to ensure the accuracy of measurements. The system was tested using water and detergent solutions to assess its applicability across different fluids. The results demonstrated that the developed meter provides viscosity estimates consistent with the standard values for the tested fluids, confirming the effectiveness of the employed method. The high sensitivity of the sensors allowed for the detection of subtle pressure variations, crucial for the precision of viscosity measurements. It is concluded that the developed viscosity meter is an effective and reliable tool for viscosity measurement, offering a solid foundation for future research and practical applications in the field of fluid dynamics.

Keywords: viscosity; Hagen-Poiseuille Law; pressure sensors; viscosity measurement; fluid dynamics.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diagrama de Fluxo Laminar em um Fluido.....	12
Figura 2 Placa do Arduino UNO	15
Figura 3 Módulo Sensor de Pressão Diferencial MPS20N0040D.....	16
Figura 4 Circuito interno do sensor MPS20N0040D.....	17
Figura 5 Ilustração da montagem do protótipo	19
Figura 6 Protótipo montado	20
Figura 7 Circuito acoplado entre a cadeira	20
Figura 8 Visão geral do sistema de calibração.....	22
Figura 9 Montagem do circuito para calibração	Erro! Indicador não definido.
Figura 10 Detalhe dos manômetros mostrando a pressão aplicada. Erro! Indicador	
não definido.	
Figura 11 Calibração do sensor 1.....	29
Figura 12 Calibração do sensor 2.....	31

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Resultado dos dados obtidos de diferença de pressão e viscosidade	32
--	----

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	9
2.	OBJETIVOS	9
2.1	OBJETIVO GERAL	9
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	10
3.	REFERENCIAL TEÓRICO	10
3.1	VISCOSIDADE DE UM FLUIDO	10
3.1	LEI DE HAGEN-POISEUILLE	12
3.1.1	Formula da Lei de Hagen-Poiseuille	13
3.1.2	Aplicações na Engenharia	14
3.1.3	Influência da Temperatura na Viscosidade	14
3.2	ARDUINO	14
3.3	SENSOR DE PRESSÃO MPS20N0040D.....	15
3.3.2	Principais Características.....	15
3.3.3	Estrutura Física e Pinos do MPS20N0040D.....	15
3.3.4	Funcionamento do Sensor	16
3.3.5	Curva de Resposta	16
3.3.6	Conexão Elétrica.....	17
3.3.6	Informações Técnicas Detalhadas	17
4.	METODOLOGIA	18
4.1	MATERIAIS UTILIZADOS	18
4.2	DESCRIÇÃO GERAL DO PROTÓTIPO	18
4.3	MONTAGEM DO PROTÓTIPO.....	18
4.4	CALIBRAÇÃO DOS SENSORES.....	21
4.4.1	Programação	22

4.4.2	Setup experimental	22
4.4.3	Ajuste da reta (Método Chi-Quadrado)	23
4.4.4	Análise de desvio padrão	24
4.4.5	Método dos Mínimos Quadrados (MMQ)	24
4.4	INCERTEZAS	25
4.5.1	Fontes de Incerteza	25
4.4.2	Cálculo da Incerteza	26
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	27
5.1	RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO DOS SENSORES	27
5.1.1	Calibração do sensor 1	27
5.1.2	Calibração do sensor 2	30
5.2	ANÁLISE DA VAZÃO E DO RAIOS	31
5.2.1	Resultado da Vazão	31
5.2.2	Resultado do Raio	32
5.3	RESULTADOS OBTIDOS DE PRESSÃO E VISCOSIDADE	32
6.	CONCLUSÃO	34
7.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	35
8.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	35

1. INTRODUÇÃO

A viscosidade é uma propriedade crítica dos fluidos que influencia uma ampla gama de processos industriais e fenômenos naturais. No contexto da engenharia, a viscosidade afeta diretamente a eficiência e a eficácia de sistemas que envolvem fluxo de fluidos, como os encontrados em reatores químicos, sistemas de lubrificação de máquinas e métodos de processamento de materiais. Conforme destacado por Munson, Young e Okiishi (2013, p. 12), "A viscosidade de um fluido é uma medida de sua resistência ao escoamento e é de vital importância no projeto de muitos elementos de máquinas, como rolamentos e engrenagens." Essa resistência ao fluxo é crucial para engenheiros ao projetar sistemas que dependem de uma transferência precisa de fluidos.

Além disso, a capacidade de medir e controlar a viscosidade é fundamental em aplicações como a formulação de medicamentos e a produção de alimentos, onde a consistência do produto é essencial para a segurança e a qualidade. A medição da viscosidade é comumente realizada através de viscosímetros rotacionais, capilares e de queda de bola, cada um adequado para diferentes tipos de fluidos e condições de operação.

Dada a importância crítica da viscosidade, métodos precisos e eficientes para sua medição são essenciais. A Lei de Hagen-Poiseuille, um princípio fundamental na mecânica dos fluidos, oferece uma base para o desenvolvimento de tais métodos. Esta lei demonstra que a vazão volumétrica através de um tubo é diretamente proporcional ao gradiente de pressão e inversamente proporcional à viscosidade do fluido, permitindo assim que a viscosidade seja determinada indiretamente a partir de medidas de pressão e vazão.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste projeto é desenvolver um medidor de viscosidade baseado na Lei de Hagen-Poiseuille, utilizando um sistema integrado que realiza as seguintes funções: seleção e calibração de sensores de pressão para medir a pressão em dois pontos distintos de um tubo; desenvolvimento de um sistema capaz de medir e registrar a diferença de pressão entre esses pontos de forma precisa; e montagem e validação experimental do sistema para

garantir a precisão nas medições de pressão e vazão, essenciais para a determinação da viscosidade dos fluidos testados.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

a) Selecionar e calibrar sensores de pressão adequados para medir a pressão em dois pontos distintos de um tubo.

b) Construir um sistema para medir e registrar a diferença de pressão de forma precisa.

c) Integrar e validar experimentalmente o sistema para assegurar precisão nas medições de pressão e vazão.

d) Analisar os dados coletados para estabelecer uma relação entre as leituras de pressão e vazão e a viscosidade do fluido.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 VISCOSIDADE DE UM FLUIDO

A viscosidade é uma propriedade fundamental dos fluidos que mede a resistência interna ao fluxo. Essa propriedade é crucial para entender como os fluidos se comportam sob a aplicação de forças externas e tem implicações significativas em diversos campos da engenharia. Munson e Young destacam que “a viscosidade de um fluido pode ser considerada uma medida de sua espessura ou uma medida de sua resistência ao cisalhamento” (MUNSON; YOUNG, 2001, p. 19).

Este conceito é vital para o design e análise de sistemas que envolvem o fluxo de fluidos, desde tubulações industriais até dispositivos médicos, onde é necessário controlar com precisão o movimento dos fluidos. A resistência ao fluxo, caracterizada pela viscosidade, influencia diretamente a dinâmica de escoamento e os requisitos de energia para sistemas hidráulicos e processos químicos. “A viscosidade dinâmica (μ), que é uma medida direta dessa resistência, é descrita matematicamente pela relação:

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (1)$$

onde τ representa o estresse de cisalhamento e $\frac{du}{dy}$ é o gradiente de velocidade perpendicular à direção do fluxo” (MUNSON; YOUNG, 2001, p. 19).

Conforme Bird, Stewart e Lightfoot explicam, a viscosidade afeta tudo, desde o escoamento de petróleo em oleodutos até o comportamento de agentes de revestimento em processos de fabricação. Eles destacam que "a viscosidade desempenha um papel fundamental na determinação de como um fluido se comporta sob diferentes condições de fluxo" (BIRD; STEWART; LIGHTFOOT, 2002, p. 18). A relação entre viscosidade e taxa de deformação é essencial para o projeto de equipamentos e para a previsão de desempenho operacional.

A viscosidade pode ser influenciada por vários fatores, incluindo temperatura, pressão e a natureza química do fluido. Segundo White (2011), "a viscosidade dos líquidos diminui com o aumento da temperatura, enquanto que para os gases, aumenta" (WHITE, 2011, p. 234). Esta distinção é fundamental para engenheiros e cientistas ao projetar sistemas que operam sob uma gama de condições térmicas e pressóricas.

Munson e Young também discutem como a viscosidade afeta o fluxo laminar e turbulento em tubos e outros canais de fluxo. Eles descrevem que "em regimes de fluxo laminar, a viscosidade do fluido é o principal fator de resistência ao fluxo, enquanto em fluxo turbulento, as características da turbulência dominam" (MUNSON; YOUNG, 2001, p. 421). Esta diferenciação é crucial para a correta especificação e desenho de sistemas de transporte de fluidos.

Expandido além dos processos industriais, “a viscosidade também é crítica em aplicações biológicas, como no comportamento do sangue nas artérias, onde a viscosidade afeta diretamente a pressão arterial e o transporte de nutrientes e oxigênio” (FAWCETT, 2014). Em polímeros e sistemas coloidais, “a viscosidade determina propriedades como a elasticidade e o tempo de relaxamento, essenciais para a formulação de produtos como géis e suspensões” (LARSON, 1999).

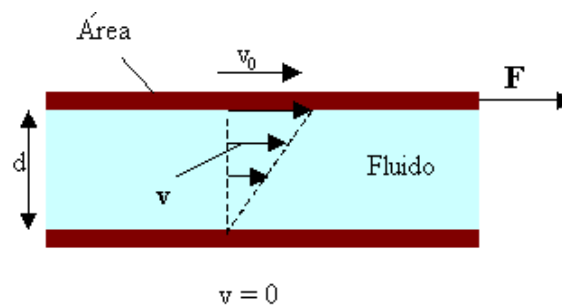
“A viscosidade é descrita como a medida da resistência de um fluido ao fluxo, uma propriedade que é essencial para compreender seu comportamento em diferentes condições e aplicações. É particularmente crucial em situações onde fluidos como água, óleo, ou sangue fluem através de tubos ou outros canais” (BERTULANI, 1999).

Fluidos com viscosidade mais alta, como xaropes ou shampoos, demonstram uma resistência consideravelmente maior ao fluxo comparados a líquidos com baixa viscosidade, como a água. “A viscosidade de um fluido também é influenciada por sua temperatura; por

exemplo, o óleo do motor torna-se menos viscoso e mais fluido em temperaturas mais altas” (BERTULANI, 1999).

A viscosidade é responsável por uma força resistiva em fluidos que se movem através de tubos, atuando como uma força de atrito entre as camadas do fluido que se movem a velocidades diferentes. “Para medir essa resistência, pode-se calcular a força necessária para manter uma placa se movendo a uma velocidade constante sobre o fluido. A relação entre a força aplicada e a velocidade da placa é usada para calcular a viscosidade do fluido” (BERTULANI, 1999). A figura 1 ilustra o diagrama de fluxo laminar em um fluido.

Figura 1 - Diagrama de Fluxo Laminar em um Fluido



Fonte: BERTULANI, 1999.

Se medirmos a força necessária para manter a placa superior movendo-se a uma velocidade constante v_0 , acharemos que ela é proporcional à área da placa, e a $\frac{v_0}{d}$, onde d é a distância entre as placas. Ou seja,

$$\frac{F}{A} = \eta \frac{v_0}{d} \quad (2)$$

A constante de proporcionalidade η é chamada de viscosidade. As unidades de η no MKS são Pa-s.

3.1 LEI DE HAGEN-POISEUILLE

A Lei de Hagen-Poiseuille é uma solução clássica das equações de Navier-Stokes, crucial para compreender o fluxo laminar de fluidos incompressíveis em tubos circulares. Esta lei não apenas descreve o comportamento dos fluidos em condições controladas, mas também tem aplicações práticas em diversas áreas da engenharia.

Munson e Young (2001, p. 357) ressaltam que ela representa “a melhor solução conhecida para o fluxo laminar incompressível e estacionário através de tubos circulares

retos”. Além disso, Frank M. White (2011, p. 302) detalha como “a viscosidade e o gradiente de pressão influenciam o fluxo em tubos, enfatizando a importância prática desta lei em áreas como a engenharia petroquímica e o processamento de alimentos, onde é essencial o controle preciso do fluxo”.

White também explica que a viscosidade do fluido e o gradiente de pressão são determinantes para o perfil de velocidade em um tubo, conforme descrito pela Lei de Hagen-Poiseuille.

3.1.1 Formula da Lei de Hagen-Poiseuille

A fórmula da Lei de Hagen-Poiseuille descreve o fluxo laminar de um fluido viscoso incompressível em um tubo circular longo e reto, calculando a vazão volumétrica Q com base na viscosidade do fluido (μ), o raio do tubo (R), o comprimento do tubo (L) e a diferença de pressão ao longo do tubo (ΔP):

$$V = \frac{R^2 \Delta \rho}{8 \mu \ell} \quad (3)$$

A equação 3 ilustra a relação entre o fluxo e a resistência oferecida pela viscosidade e pelas características geométricas do tubo.

- Raio do tubo (R): A vazão aumenta com o quadrado do raio do tubo, indicando que tubos mais largos permitem um fluxo muito maior, uma característica crucial no design de sistemas de tubulação.
- Diferença de pressão (ΔP): Um gradiente de pressão maior impulsiona o fluido mais rapidamente através do tubo, aumentando a vazão.
- Viscosidade do fluido (μ): Fluidos mais viscosos oferecem maior resistência ao fluxo, reduzindo a vazão.
- Comprimento do tubo (L): Tubos mais longos aumentam a resistência ao fluxo, diminuindo a vazão.

Esta equação é fundamental para engenheiros ao projetar sistemas que dependem de transporte eficiente de fluidos, como em sistemas hidráulicos, redes de abastecimento de água, e instalações industriais de processamento de fluidos. Ela permite uma compreensão quantitativa de como as alterações nas propriedades físicas e nas condições operacionais afetam o desempenho do sistema.

3.1.2 Aplicações na Engenharia

A Lei de Hagen-Poiseuille tem implicações significativas em várias áreas da engenharia, não apenas como um princípio teórico, mas também em aplicações práticas que exigem controle preciso de fluxos de fluidos:

Engenharia Petroquímica: Na engenharia petroquímica, essa lei é fundamental para projetar oleodutos eficientes. Ela ajuda a calcular o fluxo ideal e a resistência ao fluxo, otimizando o transporte de óleo bruto e reduzindo as perdas energéticas associadas à fricção interna dos tubos.

Processamento de Alimentos: Na indústria alimentícia, a Lei de Hagen-Poiseuille é utilizada para projetar sistemas de processamento líquido, como os usados em pasteurização e esterilização. A correta aplicação dessa lei assegura que os líquidos sejam movimentados de maneira eficiente através dos sistemas de tubulação, garantindo a qualidade e a segurança dos produtos alimentícios.

Engenharia Civil: No campo da engenharia civil, a aplicação dessa lei é crucial para o design e a manutenção de redes de abastecimento de água e esgoto. Compreender como a viscosidade e outros fatores afetam o fluxo através de tubos permite aos engenheiros projetar sistemas mais eficientes e sustentáveis, que são capazes de atender às demandas urbanas crescentes.

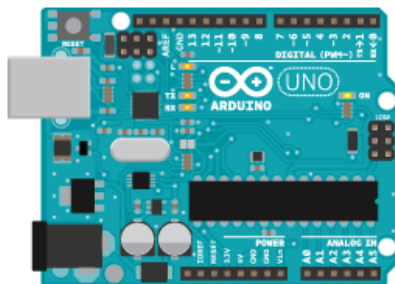
3.1.3 Influência da Temperatura na Viscosidade

A temperatura tem um efeito significativo na viscosidade dos fluidos, alterando consequentemente o fluxo conforme a Lei de Hagen-Poiseuille. "Fundamentals of Fluid Mechanics" por Munson et al. discute como a viscosidade varia com a temperatura e como isso afeta o fluxo em tubos (MUNSON et al., 2001).

3.2 ARDUINO

O Arduino é uma plataforma de desenvolvimento eletrônico de código aberto que combina hardware e software flexíveis e fáceis de usar. A figura 2 ilustra a placa de um Arduino UNO que utilizada. É ideal para prototipagem rápida de projetos eletrônicos devido à sua interface amigável e à vasta comunidade de usuários e desenvolvedores que oferecem suporte extenso e bibliotecas prontas.

Figura 2 Placa do Arduino UNO



Fonte: arduino.cc

Amplamente usado em educação, arte, e design de produtos, o Arduino permite aos usuários criar sistemas interativos que podem responder a uma variedade de entradas sensoriais.

3.3 SENSOR DE PRESSÃO MPS20N0040D

O MPS20N0040D é um sensor piezoresistivo que mede pressões relativas com uma faixa de operação de 0 a 40 kPa. Este tipo de sensor é amplamente utilizado em aplicações que requerem a detecção de pequenas variações de pressão, como em projetos de monitoramento de pressão atmosférica, sistemas de controle de fluidos, entre outros.

3.3.2 Principais Características

O sensor de pressão especificado possui uma faixa de medição de 0 a 40 kPa, com uma sensibilidade de cerca de 1.2 mV/kPa e opera com uma tensão de 5V DC. Ele oferece uma precisão de $\pm 0.25\%$ do alcance total (Full Scale) e funciona em uma ampla faixa de temperatura, de -40°C a $+85^{\circ}\text{C}$. A saída do sensor é um sinal analógico de tensão que é diretamente proporcional à pressão aplicada, permitindo medições precisas em diversas aplicações.

3.3.3 Estrutura Física e Pinos do MPS20N0040D

O sensor MPS20N0040D ilustrado na figura 3, possui um encapsulamento simples com quatro pinos de conexão:

- VCC (Pino 1): Fornecimento de tensão (5V DC)
- GND (Pino 2): Terra (referência)
- OUT+ (Pino 3): Saída de tensão positiva
- OUT- (Pino 4): Saída de tensão negativa (em algumas versões, pode ser conectada ao terra ou funcionar como sinal diferencial).

Figura 3 Módulo Sensor de Pressão Diferencial MPS20N0040D



Fonte: smartkits.com.br

3.3.4 Funcionamento do Sensor

O funcionamento do MPS20N0040D é baseado na deformação de um diafragma flexível quando a pressão é aplicada. Esta deformação altera as resistências piezoresistivas que compõem a ponte de Wheatstone no sensor. A saída da ponte é uma pequena variação de tensão que é diretamente proporcional à pressão exercida no sensor.

3.3.5 Curva de Resposta

A saída analógica do sensor é linear dentro da faixa de operação (0 a 40 kPa), o que facilita o processo de calibração e leitura de dados. A fórmula básica para a saída de tensão do sensor é dada por:

$$V_{out} = S \times P + V_{offset}$$

Onde:

- V_{out} é a tensão de saída,
- S é a sensibilidade do sensor (em mV/kPa),
- P é a pressão aplicada (em kPa),

- V_{offset} é o valor de tensão em zero pressão (geralmente próximo de zero para sensores piezoresistivos calibrados).

3.3.6 Conexão Elétrica

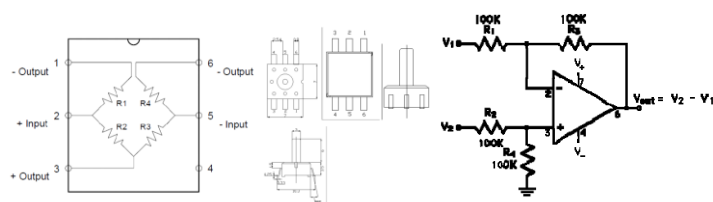
- Alimentação: O sensor deve ser alimentado com uma tensão estável de 5V DC no pino VCC, e o pino GND deve estar conectado à referência do sistema.
- Leitura de Saída: A saída analógica (OUT+) pode ser conectada diretamente a um ADC (Conversor Analógico-Digital) de um microcontrolador, como o Arduino ou qualquer outro sistema de leitura de sinais analógicos. É importante garantir que a resolução do ADC seja suficiente para capturar variações pequenas de tensão, o que é crucial para medições precisas.

3.3.6 Informações Técnicas Detalhadas

O *datasheet* do MPS20N0040D, representado na figura 4, oferece todas as especificações técnicas necessárias para sua correta operação. Ele inclui gráficos de linearidade, faixa de resposta e variações de saída em função da pressão aplicada. Informações relevantes incluem:

- Linearidade: O sensor apresenta uma linearidade melhor que 0,2% FS em toda a faixa de medição, garantindo que a saída seja proporcional à pressão.
- Tempo de resposta: O tempo de resposta do sensor é extremamente rápido (na ordem de milissegundos), adequado para medições dinâmicas de pressão.
- Compensação térmica: Embora o sensor opere em uma ampla faixa de temperaturas, variações térmicas podem introduzir pequenos desvios na medição de pressão, necessitando de compensação em experimentos sensíveis.

Figura 4 Circuito interno do sensor MPS20N0040D



Fonte: smarkits.com.br

4. METODOLOGIA

4.1 MATERIAIS UTILIZADOS

Para este experimento utilizamos os seguintes materiais:

- 2x Sensores de Pressão MPS20N0040D;
- 1x Arduino Uno;
- 1x Protoboard;
- 1x Conjunto de Jumpers;
- 1x Manômetro Analógico;
- 1x Tubo Capilar e Conexões Pneumáticas;
- 1x Bulbo de Pressão Manual (Bomba de Pressão);
- 1x Recipiente com 10 litros de capacidade;
- 1x Cadeira de Madeira;
- 1x Computador com Software de Monitoramento (Arduino IDE)

4.2 DESCRIÇÃO GERAL DO PROTÓTIPO

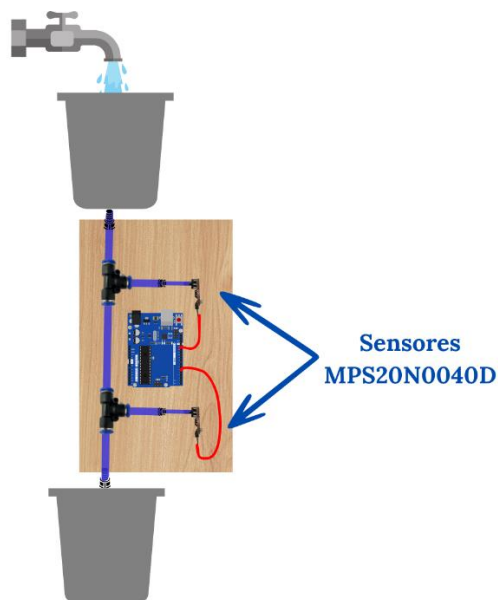
O protótipo desenvolvido para este estudo consiste em um sistema de medição de fluxo utilizando 2 sensores de pressão MPS20N0040D, conectados a um microcontrolador Arduino. O sistema inclui um reservatório de 10 litros, de onde o fluido passa por tubos com raio de 0.002 m e comprimento de 0.20 m. Um mecanismo de ladrão controla o nível da água para evitar transbordamentos.

4.3 MONTAGEM DO PROTÓTIPO

Na montagem do protótipo, conforme ilustrado na figura 5, um reservatório superior é conectado a tubulações equipadas com dois sensores de pressão MPS20N0040D, todos controlados por uma placa Arduino. O sistema inclui uma torneira para manter um fluxo constante de água e um dispositivo de ladrão para regular o nível e evitar transbordamentos. Os sensores de pressão, posicionados a 20 centímetros um do outro, são utilizados para medir

a variação de pressão ao longo do fluxo do fluido. Uma estrutura de madeira serve de suporte ao protótipo, garantindo estabilidade e permitindo o início do fluxo sob a influência da pressão atmosférica.

Figura 5 Ilustração da montagem do protótipo



Fonte: Imagem feita pelo autor no aplicativo Canva.

O protótipo desenvolvido para a medição de viscosidade foi construído utilizando componentes acessíveis e uma montagem simples, como demonstrado nas Figuras 6 e 7.

Para realizar a medição de viscosidade, utilizamos um recipiente plástico que armazena o fluido a ser analisado, posicionado sobre uma base elevada. Este recipiente é conectado a um sistema de mangueiras, fixadas na lateral de uma estrutura de madeira. As mangueiras permitem a condução do fluido até os sensores de pressão em diferentes alturas.

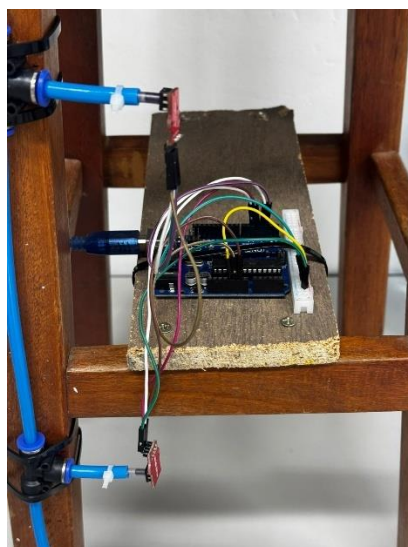
Dois sensores de pressão modelo MPS20N0040D foram fixados em alturas distintas ao longo da estrutura, como indicado na figura 6 e 7. O sensor superior mede a pressão na parte superior da coluna de fluido, enquanto o sensor inferior mede a pressão na parte mais baixa do sistema. Essa diferença de pressão entre os dois sensores é essencial para o cálculo da viscosidade, pois permite estimar a resistência do fluido ao escoamento.

Figura 6 Protótipo montado



Fonte: Autoria própria.

Figura 7 Circuito acoplado entre a cadeira



Fonte: Autoria própria.

A leitura dos dados de pressão foi realizada através de uma placa Arduino, posicionada na base da estrutura, conforme mostrado na Figura Y. Os sensores de pressão foram conectados ao Arduino através de uma montagem simples com fios, permitindo a leitura contínua e precisa das variações de pressão. A escolha do Arduino como interface de leitura foi motivada pela sua simplicidade e compatibilidade com sensores de pressão, além de possibilitar o envio de dados para análise posterior.

Antes das medições, os sensores de pressão foram calibrados para garantir a precisão dos dados. Esta calibração foi realizada medindo pressões conhecidas e ajustando os valores de leitura do Arduino para corresponder a essas referências.

Com o sistema calibrado, o fluido foi introduzido no recipiente superior, preenchendo as mangueiras até cobrir ambos os sensores. Em seguida, o Arduino iniciou a coleta de dados, registrando a pressão em cada sensor com intervalos regulares de tempo.

Os dados de pressão foram então exportados para um software de análise, onde foi calculada a diferença de pressão entre os sensores. Essa diferença de pressão é utilizada para calcular a viscosidade do fluido, conforme o método estabelecido.

4.4 CALIBRAÇÃO DOS SENSORES

Para a calibração dos sensores de pressão MPS20N0040D, foi utilizada uma bancada de teste que permite o controle preciso da pressão nas tubulações como ilustrado na figura 6. Os sensores foram submetidos a três séries de testes, cada uma consistindo em dez medições sob diversas pressões. As leituras de pressão, capturadas em atmosferas (atm), foram utilizadas para analisar a resposta dos sensores às variações de pressão.

A programação no Arduino foi empregada para automatizar a coleta de dados. Posteriormente, os dados foram analisados pelo Método dos Mínimos Quadrados (MMQ) no Excel, permitindo estabelecer uma relação linear entre a pressão medida e a saída do sensor. Os coeficientes ‘a’ e ‘b’ obtidos da equação de calibração são essenciais para programar o Arduino para calcular a diferença de pressão entre os dois sensores nos experimentos subsequentes.

Essa metodologia assegurou a precisão das medidas de pressão e permitiu a quantificação e correção dos erros intrínsecos dos sensores, garantindo a confiabilidade dos dados coletados para os experimentos futuros.

4.4.1 Programação

O programa desenvolvido visa calibrar e medir a pressão usando dois sensores MPS20N0040D, além de calcular a viscosidade da água com base na equação de Hagen-Poiseuille. O sistema coleta múltiplas amostras dos sensores, calcula a média e o desvio padrão, e converte as leituras para unidades de pressão. A diferença de pressão entre os sensores é então utilizada, juntamente com parâmetros do sistema como raio e vazão, para determinar a viscosidade do fluido, conforme a equação 3.

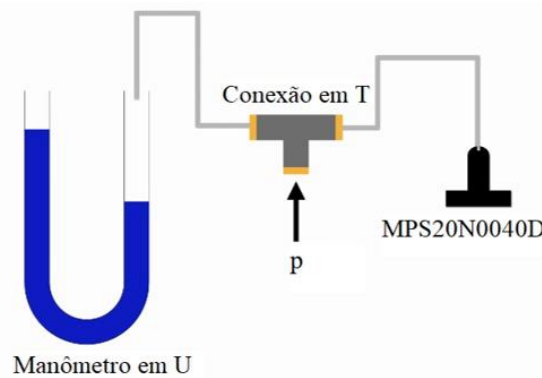
O programa (ANEXO 1) foi desenvolvido em linguagem C/C++ utilizando as bibliotecas Wire.h, Q2HX711.h e SPI.h, permitindo comunicação eficiente entre o Arduino e os sensores, e uma coleta de dados automatizada para análises subsequentes.

4.4.2 Setup experimental

O setup de calibração consistiu em um painel equipado com instrumentos (indicado na figura 8) para a calibração dos sensores de pressão MPS20N0040D, utilizados para medir a viscosidade dos fluidos. O sistema foi configurado com os seguintes componentes principais:

- **Manômetros:** Dois manômetros foram instalados para monitorar a pressão aplicada aos sensores durante os testes de calibração, permitindo a leitura precisa das pressões alcançadas.
- **Tubulação:** Uma série de tubos transparentes foi usada para conectar os componentes do sistema, facilitando a visualização do fluxo e da dinâmica do fluido.
- **Sensores de Pressão:** Os sensores MPS20N0040D foram acoplados diretamente na linha de pressão, permitindo que capturassem dados de pressão em tempo real à medida que diferentes pressões eram manualmente induzidas.
- **Pera de Vácuo:** Uma pera de vácuo foi utilizada para aplicar variações de pressão no sistema, simulando diferentes condições de operação que os sensores podem encontrar em um ambiente real de aplicação;
- **Arduino Uno e computador para monitoramento.**

Figura 8 Visão geral do sistema de calibração



Fonte: Autoria própria

O procedimento de calibração dos sensores de pressão MPS20N0040D iniciou-se com a configuração do sistema onde os sensores foram conectados ao Arduino e um sistema de monitoramento com manômetros. A calibração foi ativada por um botão, permitindo o controle total do início das medições. Durante o processo, foram realizadas 30 leituras de pressão para cada sensor, com intervalos de 10 milissegundos, proporcionando tempo suficiente para a estabilização da pressão. Após cada medição, a média e o desvio padrão foram calculados e exibidos em tempo real no monitor serial. Esses dados permitiram análises imediatas e ajustes nos coeficientes de calibração, assegurando que os sensores operem com precisão e confiabilidade em futuras aplicações práticas.

4.4.3 Ajuste da reta (Método Chi-Quadrado)

O ajuste da reta pelo Método Chi-Quadrado foi aplicado para garantir a linearidade entre as leituras brutas de pressão dos sensores e os valores ajustados. Esse método estatístico busca a linha de melhor ajuste minimizando a soma dos quadrados das diferenças entre os valores observados e os valores esperados. Matematicamente, o chi-quadrado é calculado como:

$$\chi^2 = \sum \left(\frac{O_i - E_i^2}{E_i} \right) \quad (4)$$

onde O_i são os valores observados, E_i são os valores esperados da linha de melhor ajuste.

O método Chi-Quadrado minimiza a soma dos quadrados das diferenças entre as leituras de pressão brutas e a linha ajustada, resultando em uma curva de calibração que pode ser usada para ajustar futuras leituras de pressão de forma precisa.

4.4.4 Análise de desvio padrão

O desvio padrão é uma medida de dispersão que indica o quanto os dados se afastam da média. No contexto de calibração, foi usado para avaliar a consistência das leituras dos sensores. O desvio padrão é calculado pela raiz quadrada da média dos quadrados das diferenças entre cada leitura e a média das leituras:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum (x_i - \mu)^2} \quad (5)$$

onde x_i são as leituras individuais, μ é a média das leituras, e N é o número total de leituras.

Estes métodos são essenciais para aferir a precisão das leituras dos sensores e ajustar adequadamente os dados coletados durante os experimentos.

4.4.5 Método dos Mínimos Quadrados (MMQ)

O MMQ é uma técnica estatística usada para encontrar a linha de melhor ajuste através de um conjunto de pontos de dados, minimizando a soma dos quadrados das diferenças entre os valores observados e os valores previstos pela linha de regressão. Aqui estão as principais fórmulas e componentes do MMQ da Equação da Reta de Regressão:

$$y = ax + by \quad (6)$$

Onde:

- y é o valor dependente (previsão ou saída),
- x é o valor independente (entrada),
- a é o coeficiente angular (inclinação),
- b é o coeficiente linear (intercepto).

Coeficiente Angular (a):

$$a = \frac{N(\sum xy) - (\sum x)(\sum y)}{N(\sum x^2) - (\sum x)^2} \quad (7)$$

- N é o número de dados,
- $\sum xy$ é a soma do produto de pares correspondentes de dados,
- $\sum x$ são as somas dos valores de x e y,
- $\sum x^2$ é a soma dos quadrados dos valores de x.

Coeficiente Angular (a):

$$b = \frac{(\sum y) - a(\sum x)}{N} \quad (8)$$

4.4 INCERTEZAS

Em qualquer experimento, é fundamental considerar as incertezas envolvidas para que os resultados obtidos possam ser analisados com confiabilidade e precisão. No caso do presente trabalho, que visa medir a viscosidade através de sensores de pressão do modelo MPS20N0040D, as incertezas são provenientes de diferentes fontes e devem ser corretamente combinadas para fornecer uma estimativa mais realista do erro associado à viscosidade medida.

4.5.1 Fontes de Incerteza

Cada sensor de pressão apresenta uma incerteza inerente que está relacionada ao erro de medição do equipamento. Esses valores estão indicados na tabela dos resultados e variam para cada ponto experimental.

De acordo com o datasheet do sensor MPS20N0040D, a linearidade do sensor é de $\pm 1,5\%$ do valor de escala total (Full Scale - F.S.). Esta é uma fonte adicional de incerteza que afeta diretamente a precisão das leituras de pressão, pois o comportamento linear do sensor pode não ser perfeitamente mantido.

A incerteza estatística é dada pelo desvio padrão das medidas de viscosidade obtidas ao longo do experimento. Esta incerteza nos fornece uma ideia da variabilidade dos resultados e é utilizada para representar a reprodutibilidade dos valores.

4.4.2 Cálculo da Incerteza

Para determinar a incerteza dos dados obtidos de viscosidade, é utilizado o princípio da propagação de incertezas, onde as diferentes contribuições são combinadas por meio da soma dos quadrados das incertezas individuais, seguida pela raiz quadrada da soma:

$$\mu c = \sqrt{\mu^2 \text{erro sens} + \mu^2 \text{linearidade} + \mu^2 \text{estat}} \quad (9)$$

Onde:

- u erro sens: Incerteza associada aos erros dos sensores.
- u linearidade: Incerteza associada à linearidade do sensor.
- u estat: Incerteza estatística (desvio padrão dos valores de viscosidade).

A incerteza associada aos sensores de pressão pode ser dada pelo erro fornecido para cada sensor na tabela. Para calcular a diferença de pressão com base nos valores dos dois sensores e somar suas incertezas:

$$\mu c = \sqrt{\mu^2 \text{erro sensor 1} + \mu^2 \text{erro sensor 2}} \quad (10)$$

A linearidade do sensor MPS20N0040D é $\pm 1,5\%$ do valor de escala total e sua escala é de 0 a 40 kPa, então:

$$\mu \text{ linearidade} = \text{linearidade do sensor} \times \text{escala do sensor} \quad (11)$$

Em seguida, foi calculada a incerteza expandida utilizando um fator de cobertura, para obter um intervalo de confiança de aproximadamente 95%:

$$U = k \times \mu c \quad (12)$$

4.4 ANÁLISE DA VAZÃO E DO RAO NA MEDIÇÃO DA VISCOSIDADE

A vazão foi determinada através de uma metodologia prática e direta, envolvendo a medição do tempo necessário para que um volume conhecido de água atravessasse

completamente o tubo. Foram realizados cinco ensaios distintos, utilizando um volume constante de 1 litro de água em cada teste. O tempo que levou para toda a água passar pelo tubo foi cuidadosamente cronometrado, e a vazão foi calculada utilizando a fórmula básica de vazão

$$Q = \frac{V}{t} \quad (13)$$

onde:

- V é o volume de água (em metros cúbicos);
- t é o tempo (em segundos).

Esta equação descreve como a vazão depende do raio do tubo elevado à quarta potência, mostrando que pequenas variações no raio podem ter um grande impacto na vazão medida. A vazão também é inversamente proporcional à viscosidade do fluido e ao comprimento do tubo, implicando que fluidos mais viscosos ou tubos mais longos reduzem a vazão.

O raio do tubo é outro parâmetro crítico no estudo da dinâmica dos fluidos, especialmente quando combinado com as leis de fluxo como a Lei de Hagen-Poiseuille. O raio afeta não apenas a vazão, conforme discutido, mas também a velocidade do fluxo e a distribuição de pressão ao longo do tubo. O raio entra na equação da vazão elevado à quarta potência, o que amplifica sua influência na determinação das características do fluxo. A relação entre o raio e a vazão é tal que um aumento no raio do tubo leva a um aumento significativo na vazão, assumindo que todas as outras variáveis se mantenham constantes.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO DOS SENSORES

5.1.1 Calibração do sensor 1

A análise dos resultados mostra que o Sensor 1 manteve uma boa estabilidade nas medições, com variações de erro percentual contidas. O erro foi mais perceptível em valores extremos, mas, dada a sensibilidade do sensor, essas variações não afetam de forma relevante os dados de pressão obtidos.

5.1.1.1 Coeficientes encontrados

Para a montagem do gráfico do Sensor 1, após os cálculos e a aplicação do método MMQ (equação 7 e 8), os valores obtidos foram:

- $a = 77,38000$
- $\sigma_a = 0,00006$
- $b = 100948,1$
- $\sigma_b = 2,9$

A calibração do Sensor 1 demonstrou sua alta precisão e confiabilidade em resposta a variações de pressão. O coeficiente angular, $a=77,38$, indica a boa sensibilidade do sensor, com um desvio padrão baixo ($\sigma_a = 0,000065$), refletindo medições consistentes. O coeficiente linear, $b=100948,12b$, alinha-se com a pressão atmosférica padrão, validando a precisão do sensor. O desvio padrão para b ($\sigma_b = 2,76$) ainda mostra uma ótima precisão. Estes resultados confirmam a eficácia do sensor e do método de calibração em fornecer leituras precisas e estáveis.

5.1.1.2 Chi-Quadrado

O valor do qui-quadrado (equação 4) é usado para analisar o ajuste entre os dados experimentais e o modelo teórico proposto, através da minimização da soma dos quadrados das diferenças entre os valores observados e os valores esperados. Este método estatístico é essencial para confirmar se o modelo é apropriado para descrever o comportamento dos dados, sendo um indicador chave na avaliação da adequação do ajuste da reta nos dados de calibração. Para o Sensor 1, os valores obtidos foram:

- $\chi^2 = 3771,24$
- $\chi^2 \text{ reduzido} = 471,40$

O valor de $\chi^2 = 3771,24$ parece elevado à primeira vista, mas é importante considerar que estamos lidando com medições de pressão em uma escala alta, o que justifica esse valor. No entanto, em proporção, esse valor não é significativo, pois a variação relativa do sensor é pequena comparada ao intervalo de pressão. O valor do chi-quadrado ajustado

(χ^2 reduzido = 471,40) mostra que o ajuste da reta é bom e representa de maneira precisa os dados experimentais.

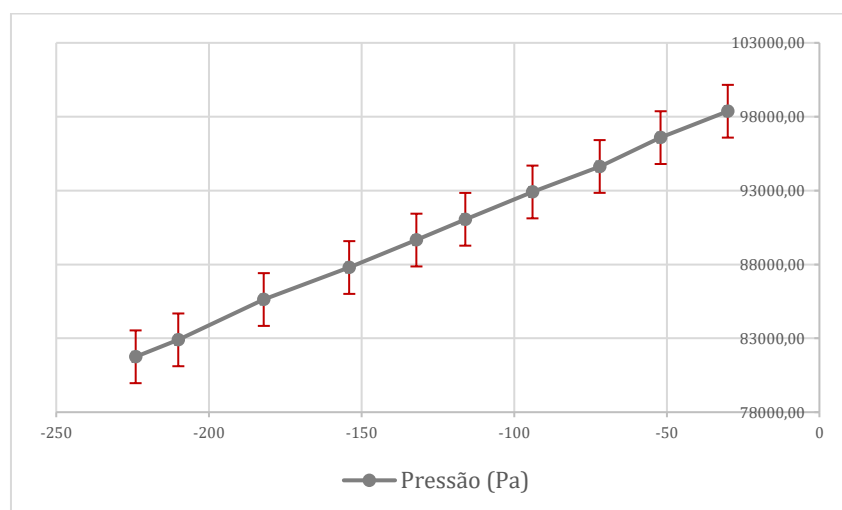
5.1.1.3 Desvio Padrão

Os valores de desvio padrão calculados pela equação 5, obtidos nos testes com o sensor de pressão indicam uma variação considerável, com o menor valor em 82 e o maior em 4000. Apesar de alguns valores altos, como 1100 e 4000, a maioria dos desvios não foi excepcionalmente alta, o que sugere que o sensor, embora sensível, oferece uma confiabilidade razoável na maioria das condições. Este comportamento é típico para sensores sensíveis que, embora propensos a algumas leituras fora do padrão devido à sua alta sensibilidade, ainda conseguem fornecer dados úteis e precisos na maioria das vezes.

5.1.1.4 Gráfico de pressão do sensor 1

O gráfico de pressão, indicado na figura 11, mostra uma boa linearidade ao longo da faixa de medições, e a dispersão observada nos extremos da curva pode ser atribuída às margens esperadas para sensores com essa precisão e sensibilidade. O sensor foi capaz de capturar variações mínimas de pressão, o que reflete sua capacidade de operar de forma eficiente em aplicações que demandam leituras de alta precisão.

Figura 9 Calibração do sensor 1



Fonte: Autoria própria.

5.1.2 Calibração do sensor 2

A análise dos dados indica que os maiores erros percentuais ocorreram nos pontos iniciais da calibração. No entanto, à medida que a calibração prosseguiu, os erros percentuais diminuíram de forma significativa, estabilizando-se em valores mais aceitáveis.

5.1.2.1 Coeficientes encontrados

Para a montagem do gráfico do Sensor 2, após os cálculos, os valores obtidos foram:

- $a = 85,37$
- $\sigma a = 0,00028$
- $b = 100963,78$
- $\sigma b = 4.06$

O coeficiente angular (a) do Sensor 2 é 85,37, que representa a inclinação da reta de calibração. Um valor de (a) ligeiramente maior que o do Sensor 1 indica que este sensor pode ser um pouco mais sensível a variações de pressão. Isso mostra que o sensor 2 responde de maneira eficaz e apresenta uma boa precisão na medição.

O valor de (b), o coeficiente linear, está em 100963,78, que também está próximo da pressão atmosférica padrão. Assim como no Sensor 1, o valor de (b) próximo de 101325 Pa indica que o sensor foi calibrado corretamente e está funcionando dentro dos parâmetros esperados.

5.1.2.2 Chi-Quadrado

Para o Sensor 1, os valores obtidos foram:

- $\chi^2 = 10143,53$
- $\chi^2 \text{ reduzido} = 1267,94$

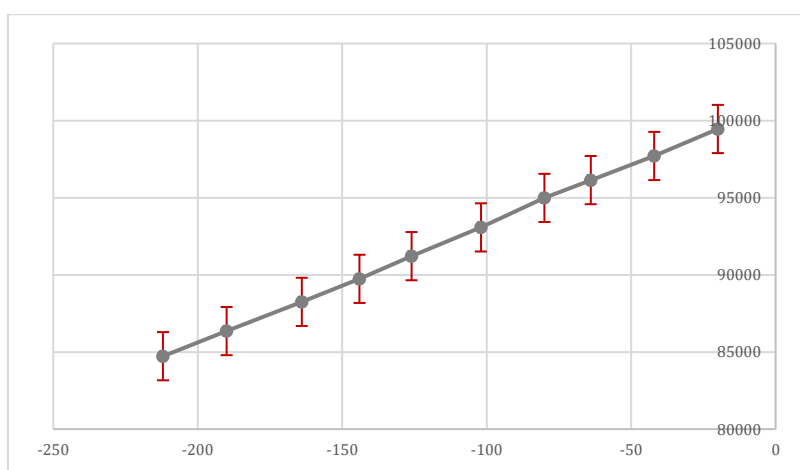
O valor de $\chi^2 = 10143,53$ é maior que o valor obtido no Sensor 1, mas, novamente, devido à alta escala de pressão com que estamos trabalhando, o valor é proporcional e aceitável dentro do contexto do experimento. O chi-quadrado reduzido, $\chi^2 \text{ reduzido} =$

1267,94, indica que o ajuste é adequado, com boa correspondência entre os dados experimentais e a reta ajustada.

5.1.2.3 Gráfico de pressão do sensor 2

Na figura 12, é possível observar os resultados teóricos e práticos obtidos da calibração.

Figura 10 Calibração do sensor 2



Fonte: Autoria própria

O gráfico de pressão mostra uma boa linearidade ao longo da calibração, o que reforça a ideia de que os erros percentuais elevados nos pontos iniciais não comprometem a confiabilidade geral das medições. O sensor mostrou-se capaz de capturar as variações de pressão com precisão, especialmente nas faixas intermediárias, onde os erros foram bem menores e a linearidade foi mantida.

5.2 ANÁLISE DA VAZÃO E DO RAIÃO

5.2.1 Resultado da Vazão

Os resultados obtidos para a vazão, calculados a partir da equação 13 previamente discutida, indicaram uma média de 0,013 litros por segundo (l/s) para o escoamento de 1 litro

de água. Este valor representa a capacidade do sistema em manter um fluxo consistente ao longo do experimento.

A consistência do valor médio de vazão demonstra a estabilidade do sistema montado, o que é fundamental para a precisão nos testes de viscosidade, onde o controle rigoroso da taxa de fluxo é essencial. A repetibilidade dos ensaios, com cinco medidas distintas resultando em uma média de vazão uniforme, reforça a confiabilidade dos procedimentos adotados e a adequação do setup experimental.

5.2.2 Resultado do Raio

O raio do tubo utilizado nos experimentos foi determinado com a ajuda de um manômetro e verificado através de medições precisas, resultando em um valor de 0,002 metros (2 mm). Este parâmetro é essencial para o entendimento da dinâmica do fluxo dentro do tubo, visto que o raio influencia diretamente a velocidade e a pressão do fluido em trânsito.

5.3 RESULTADOS OBTIDOS DE PRESSÃO E VISCOSIDADE

Para o primeiro experimento com o protótipo, utilizamos água como fluido para verificarmos a viscosidade.

Na tabela 3, é apresentado os resultados obtidos da medição da pressão nos dois sensores (sensor 1 e sensor 2), suas respectivas incertezas, a diferença de pressão calculada entre eles e os valores de viscosidade determinados a partir dessas diferenças usando a equação de Hagen-Poiseuille (3).

Tabela 1 Resultado dos dados obtidos de diferença de pressão e viscosidade

Pressão Sensor 1	Erro Sensor 1	Pressão sensor 2	Erro Sensor 2	Diferença de Pressão	Viscosidade (Pa.s)
101640,08	3500	101869,63	3000	229,55	0,00072
101593,55	3500	101875,83	2500	282,28	0,00089
101557,79	2500	101880,78	3000	322,98	0,00101
101500,96	3000	101869,18	3000	368,23	0,00116
101473,13	4000	101876,39	35000	403,26	0,00127

101406,64	3500	101879,5	3000	472,86	0,00149
101398,25	3500	101836,53	3000	438,27	0,00138
101307,53	3000	101847,03	3000	539,51	0,00169
101272,35	3000	101863,31	3000	590,96	0,00186
101233,88	3000	101866,68	2500	632,8	0,00199
101207,95	3000	101837,86	2000	629,91	0,00198
102453,24	6000	102089,74	6000	363,5	0,00114
101760,07	6500	101325,22	6500	434,84	0,00137

Fonte: Autoria própria

A viscosidade dinâmica, em Pascal-segundo (Pa.s), foi calculada utilizando a equação 3. Os valores de viscosidade variam ao longo das medições, principalmente devido à variação nas diferenças de pressão e às incertezas nas leituras dos sensores.

Os resultados mostram que a viscosidade medida varia proporcionalmente com a diferença de pressão observada, o que está de acordo com o comportamento esperado para um fluxo laminar de um fluido.

O valor obtido para a viscosidade da água, conforme apresentado na tabela e após os cálculos de incerteza utilizando as equações 9, 10, 11 e 12, foi de $0,00138 \pm 0,00082$ Pa.s. Esse resultado está alinhado com o valor de referência da viscosidade da água a 20°C, que é aproximadamente 0,001 Pa.s.

A sensibilidade do sensor impacta significativamente essas medições, capturando flutuações mínimas que podem ser atribuídas a variações nas condições experimentais ou a pequenos erros de medição. Os erros associados aos sensores, que variam de 2500 a 6500, refletem a precisão das medições de pressão e influenciam diretamente os cálculos da viscosidade. Tais erros podem levar a estimativas mais altas ou mais baixas da viscosidade real.

As diferenças de pressão observadas, que vão de 229,55 a 629,91, são críticas para o cálculo da viscosidade e qualquer imprecisão nessas diferenças pode significativamente alterar os resultados. Dada a alta sensibilidade dos sensores, eles são capazes de detectar variações sutis, o que é ideal para medições precisas, mas também os torna suscetíveis a variações decorrentes de perturbações experimentais.

Em suma, os valores de viscosidade obtidos estão consistentes com o esperado para a água, considerando as variações introduzidas pela sensibilidade dos sensores e pelos erros de

medição. Esses fatores devem ser cuidadosamente controlados e calibrados para garantir a precisão das futuras medições, e a variabilidade observada nos dados oferece uma oportunidade para investigar as condições ótimas de operação dos sensores

6. CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como foco o desenvolvimento de um medidor de viscosidade baseado na Lei de Hagen-Poiseuille, capaz de determinar a viscosidade de fluidos de forma indireta através de medidas de pressão e vazão. O protótipo desenvolvido integrou com sucesso sensores de pressão calibrados e testados, assegurando a precisão necessária para as medições de viscosidade em condições controladas de laboratório.

Os resultados obtidos confirmaram a eficácia do sistema em medir a viscosidade de fluidos como a água, com valores encontrados alinhados com o esperado para a viscosidade da água a 20°C, reforçando a validade do método e das configurações experimentais utilizadas. A sensibilidade dos sensores MPS20N0040D permitiu detectar variações sutis de pressão, crucial para a precisão das medições de viscosidade, apesar das pequenas variações devidas a fatores como a temperatura ambiente e a estabilidade do sistema de medição.

O projeto não apenas demonstrou a viabilidade técnica da utilização da Lei de Hagen-Poiseuille para o desenvolvimento de medidores de viscosidade mais acessíveis e eficientes, mas também contribuiu para a compreensão mais ampla de como as variações nas condições experimentais podem afetar os resultados das medições de viscosidade. Essa pesquisa abre caminho para futuras investigações que podem explorar a aplicação deste método em uma variedade maior de fluidos industriais e biológicos, ampliando o entendimento e o controle dos processos que dependem criticamente da viscosidade.

Este estudo também destaca a importância da calibração precisa dos instrumentos e da verificação rigorosa dos dados, aspectos essenciais para garantir a confiabilidade e a aplicabilidade dos resultados em contextos práticos de engenharia. A implementação de melhorias contínuas no design e na metodologia experimental será crucial para avançar na precisão e na utilidade dos medidores de viscosidade baseados neste princípio.

Por fim, este trabalho não só contribui para o campo da engenharia e ciência de fluidos mas também serve como uma valiosa referência prática para a construção e calibração de equipamentos experimentais destinados à pesquisa em dinâmica de fluidos.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com o intuito de aprimorar os estudos na área de medição de viscosidade utilizando sensores de pressão, recomenda-se explorar a possibilidade de melhorar a qualidade dos sensores utilizados. Isso poderia envolver a calibração mais precisa dos sensores existentes ou até mesmo a adoção de tecnologias mais avançadas e sensíveis.

Além disso, sugere-se a extensão deste estudo para a análise de diferentes tipos de fluidos. Por exemplo, a medição da viscosidade de soluções detergentes poderia fornecer insights valiosos sobre as propriedades físico-químicas desses materiais em diversos contextos industriais e de pesquisa. A comparação entre os resultados obtidos com água e outros fluidos pode ajudar a validar a aplicabilidade e a precisão do método em um espectro mais amplo de substâncias.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CACPNRJ. Calibração do sensor de pressão MPS20N0040D com Arduino. Cap Sistema, 2020. Disponível em: <https://capsistema.com.br/index.php/2020/12/01/calibracao-do-sensor-de-pressao-mps20n0040d-com-arduino/>. Acesso em: 10 set. 2024.

GOMES, A. F. Calibração e Compensação de Sensores de Pressão Piezorresistivos. São Paulo, 2009. 180 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. Disponível em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3140/tde-08092010-121153/publico/Dissertaca_Alex_Fukunaga_Gomes.pdf. Acesso em: 10 set. 2024.

HRISKO, J. MPS20N0040D Pressure Sensor Calibration with Arduino. Makers Portal, 2020. Disponível em: <https://makersportal.com/blog/2020/6/4/mps20n0040d-pressure-sensor-calibration-with-arduino>. Acesso em: 10 set. 2024.

ALEXANDER, Randy. Pressão manométrica: explicação, fórmulas, equações, exemplos. Warbletoncouncil.org, 2021. Disponível em: <https://pt1.warbletoncouncil.org/presion-manometrica-5311/>. Acesso em: 10 set. 2024.

MUNSON, B. R.; YOUNG, D. F. Fundamentos de Mecânica dos Fluidos. 4. ed. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2001.

VISWANATH, D. S. et al. Viscosidade dos Líquidos: Teoria, Estimação, Experimento e Dados. [S.l.]: Springer, 2007.

BIRD, R. B.; STEWART, W. E.; LIGHTFOOT, E. N. Fenômenos de Transporte. 2ª ed. Nova York: John Wiley & Sons, 2002.

WHITE, F. M. Mecânica dos Fluidos. 7ª ed. Nova York: McGraw-Hill, 2011.

FAWCETT, D. W. Um Atlas de Anatomia para Artistas. 3ª ed. Nova York: Dover Publications, 2014.

LARSON, R. G. A Estrutura e Reologia de Fluidos Complexos. Nova York: Oxford University Press, 1999.