

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALFENAS

LUÍS HENRIQUE NARCISO

DESENVOLVIMENTO DE UM VISCOSÍMETRO DE STOKES AUTOMATIZADO

**POÇOS DE CALDAS/MG
2024**

LUIS HENRIQUE NARCISO

DESENVOLVIMENTO DE UM VISCOSÍMETRO DE STOKES AUTOMATIZADO

Produto de Conclusão PIEPEX apresentado como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Ciência e Tecnologia, pela Universidade Federal de Alfenas.

Orientador: Prof. Dr. Laos Alexandre Hirano
Co- Orientador: Prof. Dr. Marcos Rodrigues

POÇOS DE CALDAS/MG
2024

LUIS HENRIQUE NARCISO

DESENVOLVIMENTO DE UM VISCOSÍMETRO DE STOKES AUTOMATIZADO

A Banca examinadora abaixo-assinada, aprova o Produto de Conclusão PIEPEX apresentado como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Ciência e Tecnologia pela Universidade Federal de Alfenas.

Aprovado em: _____ de _____ de 2024

Prof^a. Dra. Erika Coaglia

Assinatura:

Universidade Federal de Alfenas

_____.

Prof. Dr. Laos Alexandre Hirano

Assinatura:

Universidade Federal de Alfenas

_____.

Prof. Me. Bruno Dias de Souza :

Assinatura:

Universidade Federal de Alfenas

_____.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, rendo graças a Deus, fonte inesgotável de sabedoria, força e inspiração. A Ele dedico este trabalho, pois, sua presença foi o farol que iluminou meus passos, especialmente nos momentos de maior dúvida e dificuldade. Deus foi o amparo nas horas de incerteza e o consolo nas adversidades, renovando minha fé e coragem para persistir neste caminho.

Aos ilustres professores Doutor Laos Hirano e Doutor Marcos Vinícius, dedico palavras que, embora sinceras, jamais serão suficientes para expressar minha profunda gratidão. A ambos, agradeço não apenas pelas orientações que enriqueceram e lapidaram cada detalhe deste trabalho, mas também pela paciência, pela dedicação e, acima de tudo, pela confiança depositada em mim. Suas valiosas contribuições não se limitaram a direcionar meu projeto; elas moldaram minha visão acadêmica, instigaram meu espírito crítico e expandiram meus horizontes de conhecimento. A generosidade com que compartilharam sua vasta experiência e o exemplo de excelência que representam serão sempre uma inspiração para minha vida acadêmica e profissional.

Gostaria de expressar também minha imensa gratidão aos técnicos Bruno e Marcos, cujas contribuições foram absolutamente indispensáveis para o desenvolvimento do protótipo que integra este trabalho. A competência, a disponibilidade e o comprometimento de vocês foram além do apoio técnico; foram alicerces que sustentaram a concretização de cada ideia e solução desenvolvida. O trabalho conjunto que compartilhamos, marcado por profissionalismo e parceria, foi um dos grandes pilares deste projeto, e sou extremamente grato por isso.

A cada um de vocês, professores e técnicos, meu mais profundo reconhecimento. Este trabalho é fruto não apenas do meu esforço, mas também de uma soma de talentos, sabedorias e generosidades que cruzaram meu caminho e tornaram possível a realização deste sonho. Muito obrigado, do fundo do coração!

RESUMO

O viscosímetro de Stokes é um dispositivo simples que mede a viscosidade de um fluido através da velocidade de queda de um objeto imerso no fluido em questão. Usualmente nas aulas práticas do ICT, este experimento é realizado manualmente através de observações cronometradas que vêm resultando em medidas com desvios grosseiros. Com a finalidade em minimizar estes erros, este trabalho descreve o desenvolvimento de um viscosímetro de Stokes automatizado, que mede automaticamente o tempo de queda de esferas de Neodímio em diferentes fluidos. O protótipo possui dois gatilhos para detectar o início e o final da queda desta esfera dentro de um percurso com distância conhecida. O primeiro gatilho foi desenvolvido com um mecanismo que prende esta esfera e reconhece o instante exato que esta é arremessada dentro do fluido. O segundo gatilho foi desenvolvido com uma bobina que, baseada na Lei de Faraday, detecta o momento da passagem da esfera de Neodímio gerando um pequeno sinal elétrico em seus terminais. O módulo ADS1115 foi utilizado para ampliar este pequeno sinal para garantir sua detecção. Uma placa de Arduino UNO foi utilizada para medir o sinal e a diferença de tempos destes gatilhos. Para validar a eficácia do dispositivo, foram realizados testes com diferentes fluidos, como água, detergente e ar. Os resultados experimentais obtidos foram comparados com os valores teóricos conhecidos, apresentando desvios médios de 28% para água e de 10% para o detergente. Dessa forma, o viscosímetro desenvolvido. Mostrou ter potencial para ser aplicado nas aulas práticas com a possibilidade real em minimizar os erros observados nas medidas manuais

Palavras-chave: Viscosímetro de Stokes, Automação, Lei de Faraday.

ABSTRACT

This work describes the development of an automated Stokes viscometer designed to accurately measure the viscosity of fluids. The device was built using sensors and microcontrollers, specifically an Arduino, to automate the measurement process and eliminate manual errors. The primary function of the viscometer is to automatically identify the falling time of spheres in different types of fluids, a method essential for determining viscosity according to Stokes' Law. The prototype uses a detection system based on coils and the ADS1115 module to ensure precise and consistent measurements, which are crucial for accurate viscosity evaluation. These components allow for efficient signal acquisition and processing, providing a robust solution for automated measurement. To validate the device's effectiveness, tests were conducted with different fluids, such as water, detergent, and air. The experimental results obtained were compared with known theoretical values, demonstrating that the automated viscometer provides accurate and reliable measurements. The precision of the data confirmed the consistency of the results, validating the performance of the prototype. Automation of the process simplified laboratory procedures and increased the reliability of analyses, reducing the possibility of human errors. Thus, the developed viscometer not only optimizes work in academic laboratories but also expands its applications in industrial environments, where rapid and precise viscosity measurements are crucial for quality control and production processes.

Keywords: Stokes Viscometer, Automation, Faraday's Law

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Fotografia do equipamento.....	22
Figura 2 – Viscosímetro de Stokes.....	23
Figura 3 – Fluxograma do funcionamento do protótipo.....	24

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Medidas coletadas pelo protótipo (ar).....	28
Tabela 2: - Medidas coletadas pelo protótipo (água)	30
Tabela 3 - Medidas coletadas pelo protótipo (Detergente)	32
Tabela 4 – Análise dos resultados obtidos	33

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	9
1.1 OBJETIVOS	11
1.1.1 Objetivo Geral	11
1.1.2. Objetivo Específico.....	11
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
2.1. O VISCOSÍMETRO DE STOKES	14
2.1.1 Lei de Faraday	16
2.1.2 Tempo de queda da esfera em queda livre	18
2.1.3 Arduino	19
3. METODOLOGIA	22
3.1. DESENVOLVIMENTO DO PROTÓTIPO	22
3.1.1 Estrutura física	23
3.1.2 Módulo de detecção:.....	24
3.1.3 Sistema de controle e Processamento	25
3.1.4 Montagem e Integração.....	25
3.1.5 Fluxograma completo do Sistema	26
3.1.6. Execução dos Testes	27
3.1.8. Procedimento Experimental.....	29
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	32
4.1. TEMPO DE QUEDA EM RELAÇÃO A CADA ESFERA	32
4.1.1. Teste no ar.....	32
4.1.2 Teste na água.....	35
4.1.3. Testes no detergente	36
4.1.4 Análise geral	38
CONCLUSÕES	41
SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS.....	42
REFERÊNCIAS	44
ANEXO A - Código utilizado para calcular a velocidade terminal.....	45

1 INTRODUÇÃO

A viscosidade é uma propriedade física essencial que descreve a resistência de um fluido ao escoamento. Essa característica é fundamental em diversas aplicações industriais, como na fabricação de produtos químicos, alimentos e farmacêuticos. Além de afetar a fluidez dos materiais, a viscosidade também desempenha um papel crucial em processos como mistura, bombeamento e transporte de fluidos. De acordo com o engenheiro químico John Smith, "a viscosidade é um dos parâmetros mais críticos na formulação de produtos, pois determina não apenas a fluidez, mas também a estabilidade e o desempenho do produto final" (Smith, 2020). Portanto, medir a viscosidade de maneira precisa é imprescindível para garantir a qualidade e a eficiência na produção desses materiais. A automação do processo, ao otimizar o controle das medições, possibilitou a obtenção de resultados mais rápidos e com maior confiabilidade, o que é essencial para aplicações industriais e acadêmicas.

Um dos métodos mais utilizados para determinar a viscosidade é o viscosímetro de Stokes, que se baseia na queda de uma esfera através de um fluido. A viscosidade é estimada a partir da Lei de Stokes, que estabelece que a força viscosa atuante sobre uma esfera em movimento laminar é proporcional à sua velocidade e ao raio da esfera. O viscosímetro de Stokes é valorizado por sua simplicidade e eficácia: uma esfera é lançada a partir do repouso em um tubo vertical preenchido com o fluido em análise. A partir da velocidade constante de queda da esfera, é possível calcular a viscosidade do fluido utilizando uma equação que relaciona as forças envolvidas, como a força gravitacional e a força de arrasto.

No entanto, o equipamento utilizado atualmente na Universidade Federal de Alfenas (Unifal) apresenta algumas limitações técnicas que comprometem sua precisão e eficiência. Entre os principais problemas, destacam-se a dificuldade em medir com precisão o tempo de queda da esfera e a necessidade de monitoramento manual durante o processo, o que pode resultar em erros significativos nas medições. Como destaca o físico Carlos Almeida, "a automação dos processos de medição é fundamental para aumentar a precisão e reduzir as variáveis humanas que podem afetar os resultados" (Almeida, 2021). Essas dificuldades não só prejudicam a obtenção de dados confiáveis, mas também limitam a aplicabilidade do viscosímetro em ambientes laboratoriais onde a precisão é essencial.

Este trabalho tem como objetivo desenvolver um viscosímetro de Stokes automatizado, projetado para medir o tempo de queda de uma esfera de forma precisa e eficiente. O sistema utilizou componentes eletrônicos, como sensores e microcontroladores, para automatizar o processo, aumentando a precisão ~~da precisão~~ e facilitando seu uso em ambientes laboratoriais. Esperou-se que o equipamento fosse uma prática alternativa para análises relacionadas a assuntos de fluidos.

O cálculo do tempo de queda foi realizado por meio de um sistema automatizado que emprega bobinas para detectar o movimento da esfera de neodímio. Quando a esfera passa pelas bobinas, esta perturba o fluxo magnético em seu interior, gerando um sinal que é ~~processado-detectado~~ pelo microcontrolador. A Lei de Indução de Faraday ~~é aplicada para detectar esse movimento~~ explica como a passagem da esfera de Neodímio pela bobina gera um sinal de tensão a ser detectado, e o sistema utiliza sendo este um dos gatilhos automáticos para a contagem do tempo de queda da esfera. Com esse método, a expectativa foi de que a precisão do cálculo da viscosidade fosse aprimorada, eliminando assim, os erros humanos e garantindo a obtenção de dados consistentes e confiáveis em tempo real.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Desenvolver um viscosímetro de Stokes com um sistema automático de monitoramento da velocidade de queda da esfera, visando aumentar a precisão das medições de viscosidade.

1.1.2. Objetivo Específico

- a) Desenvolver um sistema de detecção baseado em bobinas e microcontroladores para monitorar a passagem da esfera;
- b) Estudar a influência do raio da esfera na resposta da bobina
- c) Realizar experimentos com diversos fluidos e comparar os resultados obtidos com os valores teóricos descritos na literatura.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O conceito de viscosidade é abordado por vários autores, segundo Franco Brunetti (2008), expressa-se que a viscosidade dos fluidos é originada por uma coesão entre as moléculas e pelo choque entre elas. O autor ressalta que, em prática: Viscosidade é a propriedade que indica a maior ou a menor dificuldade de o fluido escoar (escorrer).

A compreensão deste entendimento origina-se da Lei de Newton da Viscosidade, absoluta ou dinâmica, onde destaca que em muitos fluidos a tensão de cisalhamento é proporcional ao gradiente de velocidade. Pontuando-se, tensão de cisalhamento (τ), segundo Franco Brunetti (2008), define que é a força tangencial por unidade de área.

Segundo Franco Brunetti (2008), os gases e líquidos se comportam de maneira diferentes, pois nos líquidos a viscosidade diminui quando há um aumento na temperatura, e já nos gases é o inverso, ou seja, a viscosidade aumenta com o aumento da temperatura.

Pode-se dizer que existem vários métodos para determinar o coeficiente de viscosidade de líquido, como as leis de Poiseuille e de Stokes. Nesta prática em questão, o experimento é realizado através do Viscosímetro de Stokes, no caso, o estudo se baseia na queda de um corpo esférico através do líquido, ou seja, por meio de uma queda livre.

O princípio operacional do Viscosímetro de Stokes determina a velocidade por meio da queda livre de uma esfera através do fluido cuja viscosidade deseja-se determinar. Essa movimentação é influenciada por diversos fatores, como a massa específica, o tamanho, o formato do corpo, suas propriedades e a resultante das forças atuantes. Vale ressaltar que a equação a seguir é válida apenas para o regime de Stokes, ou seja, para baixos valores de velocidade de queda da esfera, onde o escoamento do fluido é laminar e a resistência viscosa predomina sobre outras forças.

A movimentação da esfera no fluido viscoso é dada pela ação de uma força viscosa F_v , proporcional à velocidade v , e essa relação é expressa na Equação (1):

13

$$F_v = 6\pi\mu Rv \quad (1)$$

Em que, μ é a viscosidade (Cp), R é o raio da esfera (m) e v é o módulo da velocidade de queda da esfera (m/s).

Para que v seja igual a uma constante, dada a Equação (2):

$$F_v + E = P, \quad (2)$$

Em que, Força peso (P) e Força empuxo (E), são definidas como, respectivamente, Equação (3) e (4):

$$P = mg = \rho_s \frac{4}{3} \pi R^3 g \quad (3)$$

$$E = \frac{4}{3} \pi R^3 \rho_f g \quad (4)$$

Em que, ρ_f é a massa específica do fluido, m a massa da esfera, ρ_s a

Comentado [LAH1]: $\rho_s \rightarrow \rho_f$

densidade da esfera e g a gravidade.

Substituindo as equações (2), (3) e (4) na equação (1), e reorganizando em termos de viscosidade, tem-se a Equação (5) e (6) - Lei de Stokes:

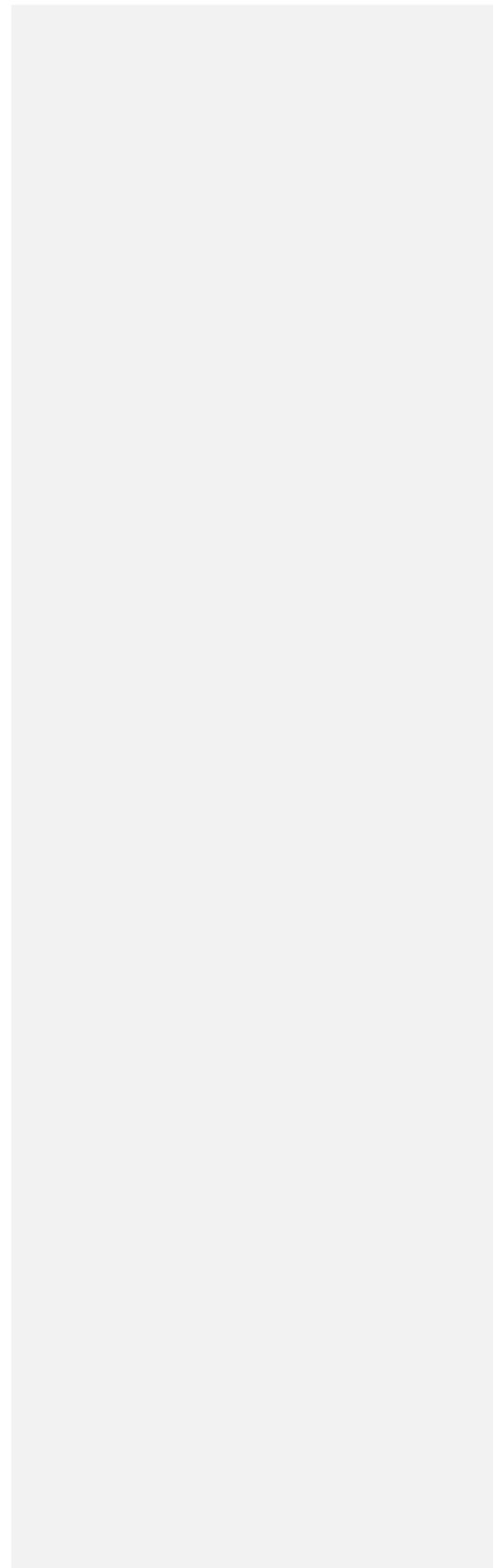
$$F_d = 6\pi\eta Rv \quad (5)$$

Reorganizada:

$$\eta = \frac{2r^2(\rho_s - \rho_f)g}{9vt}$$

Comentado [LAH2]: Idem

(b)



2.1. O VISCOSÍMETRO DE STOKES

O viscosímetro de Stokes é um dispositivo amplamente utilizado para medir a viscosidade de fluidos, fundamentando-se no princípio da queda de uma esfera em um líquido viscoso. Este método é baseado na Lei de Stokes, que descreve a relação entre a força de arrasto atuando sobre uma esfera e a viscosidade do fluido. A operação do viscosímetro é simples, mas eficaz, envolvendo várias etapas e considerações técnicas.

Quando uma esfera de densidade conhecida é liberada em um fluido, sua velocidade inicial é zero. À medida que a esfera começa a cair, ela inicialmente acelera sob a influência da gravidade. No entanto, à medida que sua velocidade aumenta, a força de arrasto (ou força viscosa) também aumenta até que se equilibre com a força gravitacional e o empuxo. Neste ponto, a esfera atinge uma velocidade terminal constante, onde as forças se equilibram.

O viscosímetro de Stokes consiste em um tubo vertical transparente que deve ser suficientemente longo para permitir que a esfera atinja sua velocidade terminal antes de atingir o fundo. A escolha das dimensões do tubo e da esfera é crucial para garantir medições precisas. As dimensões típicas incluem:

- **Diâmetro do tubo:** Deve ser pelo menos 10 vezes maior que o diâmetro da esfera para evitar efeitos de parede que possam alterar as medições.
- **Altura do tubo:** Deve ser suficiente para permitir que a esfera caia livremente e alcance sua velocidade terminal.

O viscosímetro de Stokes é particularmente útil para medir viscosidades de fluidos transparentes e não particulados, permitindo uma observação direta da queda da esfera. Como afirmam McCabe et al. (2005), "a viscosidade é um dos principais fatores que afetam o comportamento de fluidos em movimento e suas interações com sólidos" (p. 123). No entanto, o dispositivo apresenta algumas limitações:

- **Viscosidades Altas:** Não é adequado para fluidos muito viscosos, pois a força de arrasto pode não seguir o comportamento previsto pela Lei de Stokes.
- **Partículas Suspensas:** A presença de partículas no fluido pode afetar o movimento da esfera e comprometer a precisão das medições.

- **Regime Laminar:** O método é válido apenas para números de Reynolds inferiores a 1, o que significa que deve ser utilizado em condições em que o escoamento seja laminar.

O número de Reynolds (Re) é uma grandeza adimensional utilizada para caracterizar o regime de escoamento de um fluido ao redor de um objeto. Ele é definido como a razão entre as forças inerciais e as forças viscosas, sendo essencial para determinar se o escoamento é laminar ou turbulento. Para o caso de uma esfera em movimento em um fluido, o número de Reynolds é calculado pela seguinte equação (7):

$$Re = \frac{\rho f v d p}{\eta} \quad (7)$$

Na equação ρf representa a densidade do fluido (Kg/m^3), v é a velocidade relativa entre a esfera e o fluido (m/s), $d p$ é o diâmetro da partícula (m) e η é a viscosidade dinâmica do fluido (cP).

Quando $Re \leq 1$, o escoamento é considerado laminar, o que indica o predomínio das forças viscosas sobre as forças inerciais. Nesse regime, é possível aplicar a lei de Stokes equação (6), a qual relaciona a força de arrasto (F_d) à viscosidade do fluido. Dessa forma, o número de Reynolds torna-se uma condição indispensável para a validação da referida lei.

2.1.1 Lei de Faraday

A Lei de Faraday da indução eletromagnética é um princípio fundamental da física que descreve como uma variação no fluxo magnético através de um circuito elétrico pode induzir uma força eletromotriz (fem). Este fenômeno é crucial em diversas aplicações, incluindo a geração de eletricidade em geradores e 14 transformadores, bem como em dispositivos de medição como o viscosímetro de Stokes.

A Lei de Faraday pode ser expressa matematicamente pela equação 7 a seguir:

$$\mathcal{E} = -N \frac{d\Phi_B}{dt} \quad (8)$$

Onde:

- $\mathcal{E}$: FEM induzida (em volts)

- N: número de voltas da bobina
- $d\Phi_B$: variação do fluxo magnético ($\Phi_B = \int \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A}$) em weber (Wb)
- B: densidade de fluxo magnético (em tesla, T)
- dt : taxa de variação do tempo

17

Assim, a variação do fluxo magnético ao longo do tempo resulta em uma tensão induzida na bobina. Essa tensão pode ser influenciada por diversos fatores, como a área da bobina, o número de voltas, a variação do campo magnético e a velocidade com que um objeto (como uma esfera) passa pela bobina.

Quando uma esfera se move através de um campo magnético, ela altera o fluxo magnético que atravessa a bobina. A tensão induzida pode ser expressa considerando esses fatores:

1. **Área da Bobina:** A área da seção transversal da bobina (A) influencia diretamente o fluxo magnético. Quanto maior a área, maior será o fluxo magnético para um dado campo magnético.
2. **Número de Voltas:** O número de voltas (N) na bobina também afeta a tensão gerada. Um maior número de voltas resulta em uma maior força eletromotriz induzida, pois cada volta contribui para a soma total da tensão.
3. **Variação do Campo Magnético:** A taxa de variação do campo magnético (dB/dt) é crucial. Se o campo magnético muda rapidamente, haverá uma maior mudança no fluxo magnético, resultando em uma tensão induzida mais alta.
4. **Velocidade da Esfera:** A velocidade com que a esfera se move através do campo magnético influencia diretamente a taxa de variação do fluxo magnético. Uma esfera que se move mais rapidamente gera uma maior tensão induzida devido à rápida alteração no fluxo.

2.1.2 Tempo de queda da esfera em queda livre

O tempo de queda de uma esfera em queda livre, desconsiderando a resistência do ar e outros efeitos externos, é determinado pela equação do movimento uniformemente acelerado sob a ação da gravidade, posição vertical da esfera $y(t)$ em função do tempo t é dada conforme a equação 8

$$y(t) = y_0 - \frac{1}{2} g t^2$$

(9)

Onde:

- y_0 : altura inicial da esfera (em metros);
- g : aceleração da gravidade (9,81m/s²);
- t : tempo de queda (em segundos)
- $y(t)$: posição vertical da esfera no instante t (em metros)

Formatado: Subscrito

Reorganizando para t , tem-se:

10.

$$\frac{1}{2} g t^2 = y_0$$

$$t^2 = \frac{2 y_0}{g}$$

$$t = \sqrt{\frac{2 y_0}{g}}$$

(10)

Essa expressão final mostra que o tempo de queda depende exclusivamente da altura inicial y_0 e da aceleração gravitacional g .

2.1.3 Arduíno

O Arduino é uma plataforma de prototipagem eletrônica baseada em hardware e software de código aberto. Ele utiliza microcontroladores programáveis para realizar tarefas que envolvem controle e monitoramento de dispositivos eletrônicos. A plataforma é composta por placas de diferentes modelos (como Uno, Mega e Nano), além de um ambiente de desenvolvimento integrado (IDE) onde o código é escrito em uma linguagem semelhante a C/C++ e enviado para o microcontrolador. A simplicidade, a vasta documentação e a comunidade ativa fazem do Arduino uma ferramenta ideal para iniciantes e profissionais, em áreas como automação, robótica, Internet das Coisas (IoT) e educação.

2.1.4. Função millis ()

O código referente à função `millis()`, utilizada no Arduino para medir o tempo decorrido, em milissegundos, desde o início da execução do programa. Diferente de funções bloqueantes, como o `delay()`, a função `millis()` permite que o programa execute outras tarefas simultaneamente enquanto monitora o tempo. Isso é crucial para implementar sistemas multitarefa de forma eficiente. A estrutura do código básico envolve salvar o tempo inicial e, posteriormente, verificar o tempo decorrido, possibilitando temporizações precisas sem interromper o fluxo do programa.

2.1.5 - Características principais do ADS1115:

Para garantir a precisão na detecção da passagem da esfera, é essencial aumentar a sensibilidade do sistema que monitora o sinal gerado pelas bobinas. Como o objetivo é detectar a posição exata da esfera enquanto ela se move através do fluido, qualquer variação ou interferência no sinal pode comprometer a precisão das medições de tempo. A sensibilidade das bobinas deve ser otimizada para que até as pequenas mudanças no campo magnético, causadas pela esfera de Neodímio, possam ser registradas com clareza. A sensibilidade desempenha um papel central em sistemas de medição reológica, especialmente ao avaliar fluidos cuja viscosidade varia em intervalos sutis. Essa característica é fundamental para detectar pequenas diferenças nos tempos de queda e, por conseguinte, medir a viscosidade com maior precisão. A alta sensibilidade é indispensável em aplicações que demandam extrema exatidão, como controle de qualidade em processos industriais, estudos científicos envolvendo fluidos complexos e desenvolvimento de materiais com propriedades específicas.

Um sistema mais sensível é capaz de minimizar os efeitos de fatores externos, como ruídos nos sinais captados, garantindo maior confiabilidade nos resultados experimentais. Tecnologias como o módulo ADS1115, um conversor analógico-digital de alta resolução, desempenham um papel essencial ao proporcionar medições elétricas mais precisas e detalhadas, mesmo em condições experimentais adversas. Com uma resolução de 16 bits, o ADS1115 é capaz de capturar variações sutis nos sinais induzidos pela passagem das esferas, melhorando significativamente a precisão na determinação dos tempos de queda.

Além de aumentar a precisão, a sensibilidade ampliada potencializa a versatilidade do sistema, permitindo sua aplicação em um espectro mais amplo de

cenários experimentais e industriais. Com isso, o protótipo pode ser utilizado para analisar fluidos de baixa viscosidade, como água ou solventes, assim como fluidos de alta viscosidade, como óleos e resinas. Essa flexibilidade assegura que o sistema atenda às demandas específicas de diferentes indústrias e áreas de pesquisa, adaptando-se tanto a medições detalhadas quanto a condições de alta produtividade.

Essa melhoria é crucial, especialmente quando se trabalha com fluidos de diferentes viscosidades ou com esferas de tamanhos variados, que podem gerar sinais mais sutis. A implementação de circuitos amplificadores ou o ajuste fino das bobinas pode ser necessária para garantir que o sinal seja suficientemente forte e claro para ser detectado com precisão. Além disso, o aumento da sensibilidade também ajuda a minimizar erros provocados por ruídos ou flutuações ambientais, como variações na temperatura ou campos magnéticos externos, que poderiam interferir nas medições e afetar a confiabilidade do sistema.

- **Alta resolução:** 16 bits, permitindo medições precisas (comparado aos 10 bits do Arduino Uno).
- **Taxa de amostragem:** Ajustável até 860 amostras por segundo.
- **Faixas de medição:** Configuráveis através do PGA, útil para aplicações que variam de sensores de baixa potência a tensões mais altas.

O ADS1115 é uma alternativa interessante para utilizar em aplicações onde a sensibilidade é crítica, como monitoramento de sensores de temperatura, sistemas de aquisição de dados e medições de baixa tensão.

3. METODOLOGIA

A metodologia deste trabalho foi desenvolvida para garantir a precisão e sensibilidade das medições, combinando fundamentos teóricos sólidos com tecnologias para superar as limitações dos viscosímetros de Stokes convencionais. O protótipo foi construído com materiais e componentes acessíveis, como bobinas de detecção e microcontroladores Arduino, para automatizar a detecção da esfera em queda. A automação, aliada ao módulo ADS1115, assegura a precisão na captura e processamento dos dados em tempo real, minimizando erros e melhorando a sensibilidade do sistema. Os testes experimentais foram realizados com diversos fluidos e esferas de diferentes tamanhos, garantindo a replicabilidade e a consistência dos resultados. A metodologia combina simplicidade estrutural com inovações

tecnológicas, resultando em um protótipo eficiente e preciso.

A construção do protótipo e os procedimentos experimentais foram complementados por um algoritmo que automatiza a detecção da esfera e o cálculo da velocidade de queda, essencial para a determinação da viscosidade do fluido. O fluxograma que ilustra esse algoritmo foi elaborado para detalhar as etapas do processo, desde a detecção inicial até o cálculo final da viscosidade.

O algoritmo descrito no Anexo A abrange as etapas de monitoramento do sinal da bobina, o registro dos tempos de detecção da esfera, e a determinação do tempo de queda, que são processados pelo microcontrolador Arduino. O código utilizado para calcular a velocidade de queda, essencial para determinar a viscosidade do fluido, segue a lógica descrita no fluxograma e foi implementado de forma eficiente, utilizando a função `millis()` para medir os intervalos de tempo com alta precisão.

3.1. DESENVOLVIMENTO DO PROTÓTIPO

A construção do protótipo foi desenvolvida com foco em uma estrutura simples e especificação precisa, integrando componentes selecionados para atender à funcionalidade do sistema. A seguir, cada parte do protótipo é detalhada, desde a escolha dos materiais até a configuração do sistema eletrônico.

3.1.1 Estrutura física

A base do protótipo é constituída por um tubo de acrílico transparente, com $40 \pm xx$ centímetros de comprimento e $10 \pm xx$ centímetros de diâmetro interno. A escolha do acrílico se dá pelas suas características: alta resistência mecânica, transparência que permite a observação visual do processo, e compatibilidade com uma ampla variedade de fluidos, o que torna o material ideal para as condições experimentais. A estrutura possui:

- **Tubo de Acrílico:** Funciona como o recipiente onde o fluido a ser analisado é colocado. O tubo é instalado verticalmente sobre uma base estável, garantindo que vibrações externas não interfiram nos experimentos e proporcionando uma estrutura firme e segura.
- **Rolha de Escoamento:** Localizada na base do tubo, a rolha permite o esvaziamento rápido e controlado do fluido após os testes, facilitando a troca de amostras para novos experimentos e garantindo a praticidade na realização

Comentado [LAH3]: Insira o valor

Comentado [LAH4]: Insira o valor

de múltiplas medições.

3.1.2 Módulo de detecção:

O sistema de detecção foi projetado para identificar com precisão a passagem da esfera no interior do tubo. Ele é composto por uma bobina de detecção, estrategicamente posicionada no meio do tubo, conectada a um módulo conversor de sinal (ADS1115) e a um microcontrolador Arduino.

Componentes do Sistema de Detecção:

- **Prendedor Superior:** Este componente serve como o primeiro gatilho do protótipo, sendo utilizado para segurar a esfera antes do início de cada experimento. Sua função é garantir que a esfera comece a queda a partir de um ponto fixo e controlado, assegurando a repetibilidade e a precisão dos testes.
- **Bobina:** Atuando como o segundo gatilho do sistema, a bobina é fundamental para a detecção precisa do movimento da esfera. Ela trabalha em conjunto com o sistema automatizado para monitorar e registrar a velocidade de queda da esfera, permitindo o cálculo exato da viscosidade do fluido.
- **Esfera de Neodímio:** Utilizada como corpo de teste devido à sua alta densidade e propriedades magnéticas. Esferas de diferentes tamanhos (10 mm, 12 mm e 13 mm de diâmetro) foram utilizadas para analisar o impacto do tamanho na tensão gerada e na precisão dos resultados.
- **Módulo ADS1115:** Um conversor analógico-digital de 16 bits que amplifica e converte o sinal de tensão gerado pela bobina em dados digitais, os quais são processados pelo Arduino. O módulo foi configurado para medir tensões na faixa de $\pm 0,512$ V, garantindo alta sensibilidade.
- **Arduino Uno:** O Arduino processa os sinais da bobina, calcula o tempo de queda da esfera e exibe os resultados no monitor serial. Sua integração com o ADS1115 permite medições rápidas e precisas, essenciais para a análise eficiente dos dados.

A Figura 1 apresenta uma Fotografia do equipamento utilizado para medir a viscosidade de fluidos. O diagrama mostra o funcionamento básico do equipamento, no qual uma esfera é deixada cair dentro de um tubo preenchido com o fluido a ser

analisado. A partir da velocidade constante de queda da esfera, é possível calcular a viscosidade do fluido com base na Lei de Stokes, que relaciona a força viscosa, o raio da esfera e a velocidade de descida. O esquema serve para ilustrar a simplicidade e a eficácia do método, destacando os principais componentes e o processo de medição.

Figura 1 - Fotografia do equipamento



Fonte: Autor (2024)

Comentado [LAH5]: Amplie a imagem até que as letras da Figura fiquem do mesmo tamanho que as do texto

Este protótipo foi projetado para assegurar medições, utilizando a tecnologia de detecção magnética e conversão digital para fornecer resultados durante os experimentos.

3.1.3 Sistema de Processamento

A detecção e o processamento dos dados foram automatizados por meio de programação no Arduino. O sistema foi configurado para capturar o tempo exato da passagem da esfera pela bobina, calcular o tempo de queda e armazenar os resultados.

Funcionamento do sistema:

- **Detecção Inicial:** O sistema monitora continuamente o sinal da bobina. Quando a esfera é solta e passa pela bobina, uma tensão é induzida.
- **Registro do Tempo:** O Arduino registra o momento exato em que a esfera é detectada pela bobina, utilizando a função `millis()` para calcular o tempo de

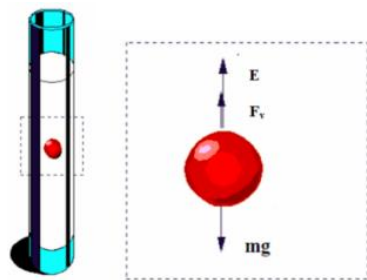
queda com uma resolução de milissegundos.

- **Cálculo da Viscosidade:** Com base no tempo de queda e nos parâmetros do experimento, a viscosidade do fluido é calculada utilizando a equação da lei de Stokes.

3.1.4 Montagem e Integração

A montagem do protótipo foi realizada com etapas bem definidas para garantir a funcionalidade do sistema como um todo, conforme demonstrato esquematicamente na Figura 2:

Figura 2 – Viscosímetro de Stokes



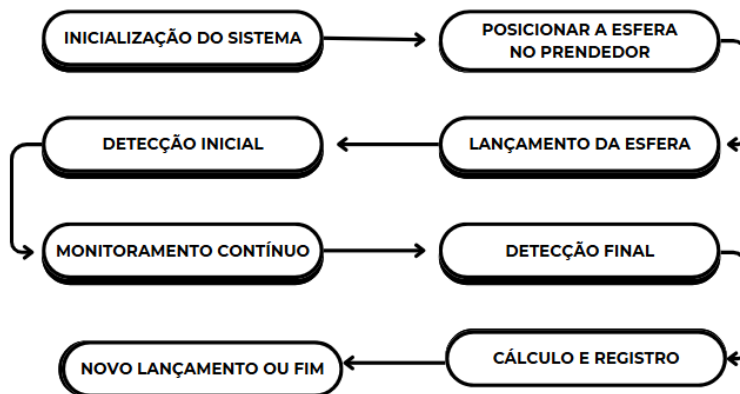
Fonte: Silva et al. (2017)

- O tubo de acrílico foi fixado verticalmente em uma estrutura de madeira, garantindo estabilidade durante os experimentos.
- A bobina foi cuidadosamente posicionada e fixada antes do fim do tubo, alinhada de forma que a esfera passasse exatamente pelo centro do campo magnético gerado.
- O módulo ADS1115 foi conectado ao Arduino por meio da interface I2C (pinos SDA e SCL), enquanto a bobina foi conectada às entradas analógicas do ADS1115.
- O Arduino foi programado para processar os sinais recebidos do ADS1115 e calcular o tempo de queda. Os resultados são exibidos no monitor serial para análise.

3.1.5 Fluxograma completo do Sistema

A figura 3 representa um fluxograma que resume o funcionamento do protótipo

FIGURA 3 – FLUXOGRAMA DO FUNCIONAMENTO DO PROTÓTIPO



Fonte: Autor (2024)

Início:

- Inicialização do sistema: conexão do módulo ADS1115 ao Arduino e verificação da comunicação I2C.
- Configuração do pino de entrada digital para monitorar o estado inicial do sistema.
- Mensagem exibida no monitor serial: "Arremesse a esfera."

Preparação:

- Operador: Preenche o tubo com o fluido a ser analisado.
- Operador: Seleciona e posiciona a esfera no prendedor superior.

Lançamento da Esfera:

- O operador solta a esfera no topo do tubo.
- O sistema monitora o valor do pino digital configurado para verificar se o lançamento foi realizado com sucesso.

Deteção Inicial:

- A bobina de detecção monitora o campo magnético.

- O Arduino registra o tempo inicial (t_i) utilizando a função `millis()` assim que o valor de tensão ($V_{inicial}$) atinge o limite configurado.

Monitoramento Contínuo:

- Enquanto o valor da tensão induzida na bobina for maior que o limite estabelecido (0,1V), o sistema mantém a contagem.
- Pequenos intervalos (10 ms) são utilizados para estabilizar a leitura e evitar flutuações indevidas.

Deteção Final:

- O Arduino registra o tempo final (t_f) quando o valor da tensão na bobina cai abaixo do limite configurado.
- O valor final da tensão (V_{final}) é capturado para posterior análise.

Cálculo e Registro:

- O tempo de queda ($\Delta t = t_f - t_i$) é calculado.
- Todas as informações capturadas são exibidas no monitor serial:
- Tempo inicial (t_i),
- Tempo final (t_f),
- Tempo de queda (Δt),
- Tensão inicial ($V_{inicial}$),
- Tensão final (V_{final}).
- Mensagens informam que o experimento foi concluído e que o sistema está pronto para uma nova execução.

Cálculo da Viscosidade:

- Com base no tempo de queda (Δt) e nas propriedades físicas da esfera e do fluido, a viscosidade é calculada utilizando a fórmula da lei de Stokes.

Novo Experimento ou Fim:

- O sistema retorna ao estado inicial, aguardando novo comando ou a repetição do experimento.

3.1.6. Execução dos Testes

Na execução dos testes foram realizados 10 arremessos utilizando a fórmula

da esfera em queda livre, conforme descrito na revisão bibliográfica. O cálculo baseou-se nessa mesma fórmula, considerando a gravidade local de Poços de Caldas. É importante destacar que, devido às particularidades geográficas da região, o valor padrão de $9,8 \text{ m/s}^2$ pode não ser totalmente preciso, havendo pequenas variações que podem influenciar os resultados.

A altura de queda foi definida em 40 cm, e o tempo teórico calculado para a esfera foi de 285 ms. Com base nesse valor, os testes experimentais foram conduzidos. A incerteza associada às medições está detalhada na tabela de resultados, proporcionando uma análise mais completa e precisa da confiabilidade do sistema.

Diversas fontes de incerteza podem afetar os resultados de medições de viscosidade, especialmente em um sistema que envolve sensores eletrônicos e movimentos de esferas. As incertezas foram classificadas e quantificadas, considerando as principais variáveis do sistema. As incertezas mais relevantes incluem:

1. Incerteza na detecção do tempo de queda: A precisão na medição do tempo de queda da esfera é fundamental para o cálculo da viscosidade. O Arduino, com a função `millis()`, tem uma resolução de 1 milissegundo, o que já implica uma incerteza associada a essa medida.

2. Incerteza na posição da esfera: A altura percorrida pela esfera ao passar pelos gatilhos é uma outra fonte de incerteza. Eventuais desvios na posição exata da esfera no momento de sua liberação ou variações nos parâmetros dos fluidos (ex.: viscosidade variável) podem afetar a medição. Para este tipo de incerteza, um erro típico poderá ser estimado pela precisão dos sensores de detecção e pela posição da esfera no momento do lançamento.

3. Incerteza devido ao método de cálculo da viscosidade: A viscosidade é calculada a partir do tempo de queda e da fórmula de Stokes. As incertezas associadas à determinação do tempo de queda impactam diretamente na precisão do valor final da viscosidade. A fórmula da viscosidade é dada conforme a equação (6)

4. Incertezas associadas à medida do sinal magnético: O módulo ADS1115 utilizado para capturar os sinais da bobina também tem um erro de conversão analógico-digital, o qual deverá ser observado nas medições do

tempo de queda e no cálculo do sinal gerado pela variação do fluxo magnético.

3.1.8. Procedimento Experimental

Testes no Ar:

- **Racionalidade:** O ar foi escolhido inicialmente como um meio de baixa resistência viscosa. Contudo, como a viscosidade do ar não é significativa neste contexto, o foco foi apenas no registro do tempo de queda livre das esferas, para validar o funcionamento do sistema.
- **Execução:**
 - Cada esfera foi solta do topo do tubo, registrando o tempo de queda.
 - Foram realizados 10 arremessos para cada esfera.
 - O tempo médio de queda foi calculado para verificar a consistência dos resultados.

Observação: A partir dos testes no ar, constatou-se que o sistema estava apto para medir tempos de queda em meios mais viscosos, como líquidos.

Testes na Água

- **Racionalidade:** A água foi utilizada como fluido de referência devido à sua viscosidade conhecida (1.0cP a 20°C). Além disso, o comportamento da esfera na água é bem documentado, permitindo comparações diretas com valores teóricos.
- **Execução:**
 - O tubo foi preenchido com água destilada a 20°C, garantindo a homogeneidade do fluido.
 - Cada esfera foi lançada 10 vezes, e o tempo de queda foi registrado.
 - O tempo médio e o desvio padrão (σ) foram calculados.
 - A viscosidade foi estimada com base nos dados experimentais, comparando-a com o valor teórico.

Testes no Detergente

- **Racionalidade:** O detergente foi escolhido por apresentar maior viscosidade (200 – 400cP), oferecendo um contraste significativo em relação ao ar e à água.
- Execução:
 - O tubo foi limpo e preenchido com detergente líquido, garantindo a ausência de contaminantes.
 - Foram realizados 10 arremessos para cada esfera, registrando o tempo de queda.
 - Assim como nos testes anteriores, foram calculados o tempo médio e o desvio padrão (σ).
 - A viscosidade do detergente foi estimada e comparada com os valores teóricos.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. TEMPO DE QUEDA EM RELAÇÃO A CADA ESFERA

Os experimentos conduzidos investigaram o comportamento de esferas com diâmetros de 13 mm, 12 mm e 10 mm em três meios distintos: ar (queda livre), água e detergente. Para assegurar a consistência estatística dos dados, foram realizados 10 lançamentos por esfera em cada meio. Os tempos de queda registrados foram analisados com base em métricas estatísticas, incluindo a média, o desvio-padrão e a incerteza associada às medições. Além disso, os intervalos de confiança para os resultados foram calculados com um nível de confiança de 95%, garantindo maior rigor na análise dos dados experimentais. A seguir, os resultados obtidos são apresentados e discutidos para cada meio avaliado.

4.1.1. Teste no ar

[A Tabela 1 apresenta os tempos de queda registrados para cada esfera no ar](#)

Tabela 1 - Medidas coletadas pelo protótipo (ar)

Esfera 1 – 13 mm		Esfera 2 - 12mm		Esfera 3 - 10mm	
Lançamento	Tempo(ms)	Lançamento	Tempo(ms)	Lançamento	Tempo(ms)
1	277	1	267	1	233
2	244	2	262	2	231
3	244	3	277	3	234

4	253	4	268	4	231
5	254	5	271	5	233
6	279	6	275	6	241
7	281	7	276	7	244
8	278	8	271	8	235
9	277	9	275	9	232
10	271	10	277	10	244
DESVPADA	15,22278993	DESVPADA	5,02106673	DESVPADA	5,181162461
Média amostral	264,8	Média amostral	271,9	Média amostral	235,8
Incerteza	IC95%=265,8 +4,8	Incerteza	IC95%=271,9 +2,1	Incerteza	IC95%=235,8 +1,6

Fonte: Autor (2024)

A queda livre das esferas foi analisada em um meio onde a resistência viscosa é praticamente desprezível devido à baixa densidade e viscosidade do ar. Nesse cenário, o movimento das esferas é regido pela equação do movimento uniformemente acelerado, considerando apenas a aceleração gravitacional (g), equação (10)

Com essa equação, o tempo teórico para a queda livre pode ser calculado:

Os resultados experimentais obtidos para cada diâmetro, conforme a médias amostral das esferas foram os seguintes:

1. Esfera 1 de 13 mm:

- Tempo médio: 265,8 ms
- Intervalo de confiança (IC95%): 265,8 $\pm$ 4,8 ms
- Desvio padrão: 15,2 ms

2. Esfera 2 de 12 mm:

- Tempo médio: 271,9 ms
- Intervalo de confiança (IC95%): 271,9 $\pm$ 2,1 ms
- Desvio padrão: 5,02 ms.

3. Esfera 3 de 10 mm:

- Tempo médio: 235,8 ms
- Intervalo de confiança (IC95%): 235,8 $\pm$ 1,6 ms
- Desvio padrão: 5,18 ms

Os tempos experimentais se aproximam do valor teórico de 285 ms, embora apresentem diferenças devido a fatores como:

- **Variação na aceleração gravitacional local:** Poços de Caldas apresenta pequenas diferenças na gravidade em relação ao valor padrão de $9,8 \text{ m/s}^2$, o que pode influenciar os resultados.

- **Influência do formato e do diâmetro das esferas:** Apesar da resistência viscosa ser desprezível, pequenas perturbações no movimento podem surgir de variações na aerodinâmica das esferas.

Os dados obtidos confirmam a validade do sistema de detecção para medir tempos de queda com precisão. As diferenças entre as esferas evidenciam a necessidade de ajustes na análise para considerar pequenas variações nos fatores ambientais e geométricos. A aplicação da fórmula do movimento uniformemente acelerado para validação teórica comprova a consistência dos resultados experimentais com os modelos físicos.

4.1.2 Teste na água

Na água ($\eta = 1.0 \text{ cP}$ à 20°C), os tempos de queda registrados foram maiores do que no ar devido à resistência viscosa do fluido. Para determinar a viscosidade experimental da água (η_{exp}), utilizou-se a média amostral dos tempos de queda medidos em 10 lançamentos para cada esfera, conforme registrado na Tabela 2.

Com os valores obtidos, foi possível calcular a viscosidade dinâmica da água utilizando a equação de Stokes mencionada na revisão bibliográfica. A viscosidade experimental obtida foi:

$$\eta_{exp} = 1,28 \text{ cP}$$

Comparando com o valor teórico da água ($\eta = 1,0 \text{ cP}$), percebe-se um leve desvio, provavelmente causado por variações na temperatura do fluido ou pela gravidade.

A Tabela 2 apresenta os tempos de queda registrados para cada esfera em água

Tabela 2: - Medidas coletadas pelo protótipo (água)

Esfera 1 – 13 mm		Esfera 2 - 12mm		Esfera 3 - 10mm	
Lançamento	Tempo(ms)	Lançamento	Tempo(ms)	Lançamento	Tempo(ms)
1	476	1	453	1	453
2	453	2	432	2	432

3	475	3	435	3	435
4	444	4	467	4	467
5	467	5	465	5	465
6	469	6	466	6	466
7	452	7	433	7	433
8	444	8	452	8	452
9	455	9	463	9	463
10	457	10	445	10	445
Média	459,2	Média	451,1	Média	435,7
DESVAPA	11,84905059	DESVAPA	14,15352331	DESVAPA	14,15352331
Incerteza	IC95%=459,2 +3,8	Incerteza	IC95%=451,1 +4,5	Incerteza	IC95%=435,7 ± 1,4

Fonte: Autor (2024)

Ao realizar os testes na água, observou-se uma maior resistência devido à viscosidade do fluido, resultando em tempos de queda mais elevados conforme a média amostral:

• **Esfera 1 de 13 mm:**

Média: 459,2 ms, IC95%: 459,2 ± 3,8 ms.

Desvio-padrão: 11,8 ms.

• **Esfera 2 de 12 mm:**

Média: 451,1 ms, IC95%: 451,1 ± 4,5 ms.

Desvio-padrão: 14,1 ms.

• **Esfera 3 de 10 mm:**

Média: 435,7 ms, IC95%: 435,7 ± 1,4 ms.

Desvio-padrão: 4,37 ms.

Com os valores obtidos, foi possível calcular a viscosidade dinâmica da água utilizando a equação de Stokes (6) mencionada na revisão bibliográfica

A viscosidade experimental obtida foi:

$$\eta_{exp} = 1,28 \text{ cP} \quad \eta_{exp} = 1,28 \text{ cP}$$

Comparando com o valor teórico da água (1,0 cP) percebe-se um leve desvio, porém quase irrelevante comparado ao valor teórico.

4.1.3. Testes no detergente

A Tabela 3 apresenta os tempos de queda registrados para cada esfera em detergente.

Tabela 3 - Medidas coletadas pelo protótipo (Detergente)

Esfera 1 – 13 mm		Esfera 2 - 12mm		Esfera 3 - 10mm	
Lançamento	Tempo(ms)	Lançamento	Tempo(ms)	Lançamento	Tempo(ms)
1	1889	1	1866	1	1989
2	1887	2	1865	2	8
3	1886	3	1887	3	1987
4	1856	4	1900	4	1994
5	1880	5	1876	5	1997
6	1868	6	1865	6	1987
7	1865	7	1868	7	1986
8	1865	8	1866	8	1998
9	1846	9	1871	9	1997
10	1865	10	1867	10	2001
Média	1868,7	Média	1873,1	Média	1998,7
DESVAPA	13,33374999	DESVAPA	11.66619047	DESVAPA	10.38214279
Incerteza	IC95%=1868,7+-4,2	Incerteza	IC95%=1873,1+-3,7	Incerteza	IC95%=1995,7+-3,3

Fonte: Autor (2024)

O detergente, com uma viscosidade de 200 - 400cP, apresentou tempos de queda significativamente mais longos, confirmando a relação direta entre a resistência viscosa e a viscosidade do fluido. Para os testes realizados com fluidos cujas viscosidades teóricas variam entre 200 e 400 cP, o protótipo obteve um valor médio de viscosidade de 315cP. A Tabela 3 apresenta os tempos de queda médios para cada esfera, suas respectivas incertezas e desvios-padrão. Os valores experimentais foram analisados conforme descrito a seguir:

• **Esfera 1 de 13 mm:**

Média: 1868,7 ms

Desvio-padrão: 13,33 ms

Intervalo de Confiança (IC95%): 1868,7±4,2 ms

• **Esfera 2 de 12 mm:**

Média: 1873,1 ms

Desvio-padrão: 11,67 ms

Intervalo de Confiança (IC95%): 1873,1±3,7 ms

• **Esfera 3 de 10 mm:**

Média: 1998,7 ms
Desvio-padrão: 10,38 ms10,38
Intervalo de Confiança (IC95%): 1998,7±3,3 ms

Os tempos de queda crescentes com a diminuição do diâmetro das esferas indicam que esferas menores sofrem maior influência da resistência viscosa, o que reduz sua velocidade terminal. Isso está de acordo com a previsão teórica baseada na Lei de Stokes.

Os resultados confirmam que o protótipo é capaz de medir viscosidades de forma precisa, mesmo em fluidos com características desafiadoras como o detergente. A concordância entre os valores experimentais e os teóricos ressalta a eficácia do sistema e sua aplicabilidade em medições práticas. A análise detalhada dos tempos de queda e a utilização de esferas de diferentes tamanhos comprovam a versatilidade e a capacidade do protótipo de adaptar-se a diferentes condições experimentais.

4.1.4 Análise geral

Tabela 4 – análise dos resultados

Fluido	Viscosidade Teórica	Viscosidade Experimental
Água	1 cP	1,28 cP
Detergente	200-400 cP	315 cP

Fonte: Autor (2024)

Os resultados experimentais obtidos neste estudo confirmaram e validaram a teoria física das forças de gravidade e viscosidade em diferentes meios. Os testes realizados com esferas em ar, água e detergente permitiram uma análise aprofundada das interações entre as propriedades do meio e os tempos de queda das esferas, oferecendo insights relevantes tanto para a dinâmica do movimento em meios ideais quanto em fluidos com alta viscosidade.

No caso do ar, a análise confirmou a teoria do movimento livre sob a influência apenas da força gravitacional. A resistência do ar foi desprezível, e os tempos de queda das esferas seguiram a equação clássica de movimento uniformemente acelerado. As pequenas variações entre os resultados experimentais e os valores teóricos podem ser atribuídas a fatores ambientais, como pequenas mudanças na

gravidade local ou perturbações aerodinâmicas mínimas. Ainda assim, os resultados mostram que o protótipo é robusto e confiável em capturar os fenômenos físicos fundamentais do movimento em meios gasosos.

Já nos testes realizados na água, a influência da viscosidade foi notável. A viscosidade da água alterou significativamente os tempos de queda das esferas, especialmente para as esferas menores. Isso foi bem representado pelos dados experimentais e pela comparação com os valores teóricos. A diferença entre os valores experimentais e os teóricos (erro de 28%) pode ser atribuída a possíveis variações experimentais, como temperatura do meio, precisão dos sensores e ruídos mecânicos. No entanto, esses resultados mostram que o protótipo é capaz de fornecer medições experimentais precisas e relevantes, adequando-se ao uso em estudos reológicos e físicos práticos.

No caso do detergente, os resultados demonstraram a interação intensificada entre a força gravitacional e a resistência viscosa em fluidos com alta viscosidade. A viscosidade do detergente, que varia entre 200 e 400 cP, teve um impacto significativo nos tempos de queda das esferas. O protótipo estimou uma viscosidade experimental média de 315 cP, valor próximo ao estimado teoricamente. Isso não apenas torna válida a eficácia do sistema, mas também comprova sua capacidade de realizar medições precisas em fluidos complexos e viscosos.

Os testes revelaram que esferas menores apresentaram tempos de queda mais longos em comparação com esferas maiores, devido ao aumento da influência relativa das forças viscosas. Essa tendência confirma o modelo teórico de que a resistência viscosa é mais impactante em objetos menores. Assim, o protótipo demonstrou ser um dispositivo confiável para a caracterização das propriedades viscosas e dinâmicas de fluidos, sendo aplicável a análises industriais e laboratoriais.

As pequenas discrepâncias entre os valores experimentais e os teóricos podem ser atribuídas a fatores externos, como imprecisão na temperatura do fluido, propriedades não uniformes do meio e possíveis ruídos mecânicos do protótipo. No entanto, os dados experimentais mantêm intervalos de confiança estreitos e desvios-padrão baixos, indicando alta precisão e confiabilidade das medições.

Os resultados deste estudo mostram que o protótipo é uma ferramenta robusta e precisa para medições dinâmicas em sistemas físicos e reológicos. Sua capacidade de diferenciar propriedades viscosas e de responder às mudanças das interações fluidas em diferentes meios destaca seu potencial para aplicações em áreas científicas e industriais, como na engenharia, na pesquisa reológica e em testes de

materiais. O protótipo apresenta-se como um dispositivo valioso para o desenvolvimento de análises experimentais em dinâmica de fluidos e para estudos em diversas áreas que envolvem o comportamento de materiais em movimento e interações complexas entre forças físicas.

CONCLUSÕES

O desenvolvimento de um viscosímetro de Stokes automatizado, baseado em bobinas e microcontroladores, trouxe avanços significativos na medição de viscosidade, ao combinar precisão e eficiência com a eliminação de incertezas comuns às técnicas manuais tradicionais. O sistema demonstrou flexibilidade para atender a uma ampla gama de características de fluidos, validando sua eficácia por meio de experimentos que apresentaram excelente concordância com valores teóricos e alta repetibilidade nos resultados.

A análise do impacto do tamanho da esfera mostrou-se crucial, evidenciando como a escolha adequada pode otimizar a sensibilidade e a precisão das medições dependendo da viscosidade do fluido. O sistema automatizado também simplificou o processo de medição, reduzindo intervenções manuais e permitindo integração com softwares para análise e armazenamento de dados em tempo real, características que tornam o equipamento ideal para aplicações acadêmicas e industriais.

Além de melhorar a confiabilidade e produtividade em medições laboratoriais, o viscosímetro desenvolvido apresenta potencial para uso em estudos avançados de reologia, desenvolvimento de novos materiais e controle de processos industriais, destacando-se como uma ferramenta versátil para diversas áreas.

SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS

Com base nos resultados obtidos e nas limitações observadas durante o experimento, várias melhorias e expansões podem ser propostas para o protótipo, visando aumentar sua precisão, eficiência e aplicabilidade em futuros estudos.

1. Controle de Temperatura

A viscosidade dos fluidos é altamente dependente da temperatura. Assim, a integração de um sistema de controle térmico, como termostatos ou resistências com sensores precisos, poderia garantir condições térmicas constantes durante os experimentos. Isso minimizaria variações nos resultados causadas por flutuações de temperatura e permitiria investigações mais detalhadas sobre o comportamento de fluidos em diferentes regimes térmicos.

2. Melhoria no Sistema de Remoção de Esferas

Atualmente, o protótipo utiliza uma rolha para a remoção das esferas, o que pode ser considerado uma abordagem rudimentar. A substituição por um sistema automatizado, como uma válvula controlada mecanicamente ou eletronicamente, facilitaria o processo de recuperação das esferas, reduziria o tempo de preparação entre experimentos e minimizaria a interferência manual, aumentando a eficiência e a reprodutibilidade do experimento.

3. Integração de um Sistema Digital de Interface

A adição de uma interface digital que registre e analise os dados em tempo real tornaria o protótipo mais moderno e eficiente. Um software acoplado poderia calcular automaticamente parâmetros como viscosidade, velocidade terminal e forças atuantes, além de gerar gráficos e relatórios instantâneos. Isso facilitaria o uso do protótipo, especialmente em ambientes educacionais e industriais, e reduziria erros humanos na coleta de dados.

4. Exploração de Novos Tipos de Fluidos

O protótipo poderia ser adaptado para o estudo de fluidos não-newtonianos, cuja viscosidade varia com a taxa de deformação. Para isso, seria necessário ajustar o sistema de detecção de movimento das esferas e adicionar sensores mais sensíveis. Tal modificação permitiria investigações em uma gama mais ampla de aplicações, como no setor alimentício, farmacêutico e petroquímico.

5. Uso de Diferentes Geometrias de Objetos

Atualmente, o experimento é limitado ao uso de esferas. O desenvolvimento de adaptações para testar objetos com diferentes geometrias (como cilindros ou discos) possibilitaria estudar como a forma influencia o movimento e a resistência em fluidos. Essa abordagem ampliaria o alcance do protótipo para aplicações práticas em design de materiais e análise de transporte em fluidos.

6. Automatização Completa do Sistema Experimental

A implementação de um sistema automatizado que controle desde o posicionamento das esferas até o registro completo dos dados experimentais traria maior precisão e eficiência ao protótipo. Esse tipo de melhoria seria particularmente útil para realizar experimentos repetitivos em ambientes industriais ou acadêmicos, onde a confiabilidade e a padronização são essenciais.

7. Estudo de Parâmetros Adicionais

Investigar a interação entre diferentes parâmetros, como densidade, temperatura e pressão, poderia expandir o uso do protótipo para estudos avançados. Além disso, incorporar sensores para medir pressão interna no fluido ou densidade em tempo real poderia fornecer insights adicionais sobre os fenômenos observados.

Essas melhorias e expansões propostas não só tornariam o protótipo mais robusto e versátil, mas também possibilitariam seu uso em um espectro maior de aplicações científicas e tecnológicas. Além disso, elas abriram caminho para o desenvolvimento de novos métodos e ferramentas para o estudo da dinâmica de fluidos, contribuindo significativamente para a pesquisa em áreas como física, engenharia e ciência dos materiais.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, C. **Automação em Processos Químicos: Desafios e Oportunidades**. Editora Química, 2021.

APPLICATION of Stokes' Law: a didactic experiment in Transport Phenomena. *JCEC: The Journal of Engineering and Exact Sciences*, [s. l.], 16 abr. 2022. Disponível em: <https://periodicos.ufv.br/jcec/article/view/14140/7283>. Acesso em: novembro de 2024.

BRUNETTI, Franco. **Mecânica dos fluidos**. 2. ed. rev. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.

McCABE, W. L.; SMITH, J. C.; HARRIOTT, P. **Unit Operations of Chemical Engineering**. 7. ed. McGraw-Hill, 2005.

MUNDO EDUCAÇÃO. **Indução Eletromagnética: O que é, resumo, exercícios**. Disponível em: <https://www.mundoeducacao.com.br/estudos>. Acesso em: novembro de 2024.

PROGRAMMING ELECTRONICS ACADEMY. **Arduino Sketch with millis() instead of delay**. Disponível em: <https://www.programmingelectronics.com>. Acesso em: novembro de 2024.

RAGHAVAN, S. R. **Colloidal Science in Pharmaceutical Nanotechnology**. CRC Press, 2015.

SILVA, Rodrigo Ernesto Andrade *et al.* **DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DA VISCOSIDADE CINEMÁTICA E DINÂMICA ATRAVÉS DO VISCOSÍMETRO DE STOKES**. 2017. Disponível em: https://editorarealize.com.br/editora/anais/join/2017/TRABALHO_EV081_MD4_SA45_ID1591_15092017203027.pdf. Acesso em: 10 dez. 2024 – Figura 2.

SMITH, J. **Viscosidade: Teoria e Aplicações Práticas**. Editora Científica, 2020.

SP LABOR. **Entendendo a Viscosidade: Conceitos, Medição e Aplicações**. Disponível em: <https://www.splabor.com.br>. Acesso em: novembro de 2024.

WIKIPEDIA CONTRIBUTORS. **Indução eletromagnética**. *Wikipédia, a enciclopédia livre*. Disponível em: https://pt.wikipedia.org/wiki/Indu%C3%A7%C3%A3o_eletromagn%C3%A9tica. Acesso em: novembro de 2024.

WIKIPEDIA CONTRIBUTORS. **Lei de Stokes**. *Wikipédia, a enciclopédia livre*. Disponível em: https://pt.wikipedia.org/wiki/Lei_de_Stokes. Acesso em: novembro de 2024.

ANEXO A - Código utilizado para calcular a velocidade terminal

```
#include<ADS1115_WE.h>
#include<Wire.h>
#define I2C_ADDRESS 0x48

ADS1115_WE adc = ADS1115_WE(I2C_ADDRESS);

int trig_pin = 2;
int val;

float voltage_inicial = 0.0;
float voltage_final = 0.0;
long ti, tf;
int limite = 0.10;
int tempo;

void setup() {
  Wire.begin();
  pinMode(trig_pin, INPUT_PULLUP);
  Serial.begin(9600);
  if(!adc.init()){
    Serial.println("ADS1115 not connected!");
  }

  adc.setVoltageRange_mV(ADS1115_RANGE_0512);
  adc.setCompareChannels(ADS1115_COMP_0_GND);
  adc.setConvRate(ADS1115_128_SPS);
  adc.setMeasureMode(ADS1115_CONTINUOUS);
  Serial.println("Arremesse a esfera");
}

void loop() {
  val = digitalRead(trig_pin);

  if (val == 1) {
    ti = millis();
    voltage_inicial = adc.getResult_V(); // Captura o valor inicial de tensão

    while (adc.getResult_V() > limite) {
      // Aguarda até que o valor de tensão diminua abaixo do limite
      delay(10);
    }

    tf = millis();
    voltage_final = adc.getResult_V(); // Captura o valor final de tensão
    tempo = tf - ti; // Calcula a variação de tempo

    // Exibe os valores capturados
    Serial.print("Tempo inicial (ti) = ");
    Serial.println(ti);
    Serial.print("Tempo final (tf) = ");
    Serial.println(tf);
    Serial.print("Tempo de variação (delta t) = ");
    Serial.println(tempo);
    Serial.print("Tensão inicial = ");
    Serial.println(voltage_inicial);
    Serial.print("Tensão final = ");
    Serial.println(voltage_final);
    delay(50); // Pequena pausa para estabilidade
  }

  delay(10);
}
```