



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO  
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO  
CENTRO MULTIDISCIPLINAR DE PAU DOS FERROS  
BACHARELADO INTERDISCIPLINAR EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA

MELLISSA NOGUEIRA COSTA DIÓGENES

**DETERMINAÇÃO DA VISCOSIDADE DO ÓLEO SAE 20W50 SL USANDO ARDUINO E  
VALIDAÇÃO DA AUTOMAÇÃO**

PAU DOS FERROS - RN  
2021

MELLISSA NOGUEIRA COSTA DIÓGENES

**DETERMINAÇÃO DA VISCOSIDADE DO ÓLEO SAE 20W50 SL USANDO ARDUINO E  
VALIDAÇÃO DA AUTOMAÇÃO**

Trabalho de conclusão de curso  
apresentado à Universidade Federal  
Rural do Semi-Árido - UFERSA,  
*Campus* Pau dos Ferros, como requisito  
para a obtenção do título de Bacharel em  
Ciência e Tecnologia.

Orientador: Prof.º Dr.º Sharon Dantas da  
Cunha

PAU DOS FERROS - RN

2021

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

N5915 NOGUEIRA COSTA DIÓGENES, MELLISSA.  
674d DETERMINAÇÃO DA VISCOSIDADE DO ÓLEO SAE 20W50  
SL USANDO ARDUINO E VALIDAÇÃO DA AUTOMAÇÃO /  
MELLISSA NOGUEIRA COSTA DIÓGENES. - 2021.  
48 f. : il.

Orientador: Sharon Dantas da Cunha.  
Monografia (graduação) - Universidade Federal  
Rural do Semi-árido, Curso de Ciência e  
Tecnologia, 2021.

1. Viscosímetro de Stokes. 2. Óleo 20W50 SL. 3.  
Arduino. 4. Tracker. I. Dantas da Cunha, Sharon ,  
orient. II. Título.

MELLISSA NOGUEIRA COSTA DIÓGENES

**DETERMINAÇÃO DA VISCOSIDADE DO ÓLEO SAE 20W50 SL USANDO  
ARDUINO E VALIDAÇÃO DA AUTOMAÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado, a Universidade Federal  
Rural do Semi-Árido - UFERSA,  
Campus Pau dos Ferros, como requisito  
para a obtenção do título de Bacharel  
Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia

Defendida em: 31/ 05/ 2021

**BANCA EXAMINADORA**

SHARON DANTAS DA  
CUNHA:01085089436

Assinado de forma digital por SHARON  
DANTAS DA CUNHA:01085089436  
Dados: 2021.06.07 16:48:07 -03'00'

Prof. Dr. Sharon Dantas da Cunha (UFERSA)  
Presidente

HIDALYN THEODORY CLEMENTE  
MATTOS DE SOUZA:02755259450

Assinado de forma digital por HIDALYN THEODORY  
CLEMENTE MATTOS DE SOUZA:02755259450  
Dados: 2021.06.07 11:18:26 -03'00'

Prof. Dr. Hidalyn Theodory Clemente Mattos de Souza (UFERSA)  
Examinador

WESLEY DE OLIVEIRA  
SANTOS:01354154380

Assinado de forma digital por WESLEY  
DE OLIVEIRA SANTOS:01354154380  
Dados: 2021.06.07 10:20:36 -03'00'

Prof. Dr. Wesley de Oliveira Santos (UFERSA)  
Examinador

*Dedico este trabalho a minha mãe Raquel, ao meu irmão Jônatas e ao meu sobrinho Renan Tobias. Dedico também a todos aqueles que amam a ciência.*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha mãe Raquel, que deu tudo de si para garantir o meu sucesso e permanência nessa jornada acadêmica, me apoiou e nunca me deixou fraquejar, sem ela nada disso seria possível. Continuo na luta para fazer seu esforço valer a pena.

Agradeço ao meu irmão Jônatas pelo apoio e a minha cunhada Deizylanne por ter cuidado de mim nesse tempo. Agradeço por terem me dado um lindo sobrinho, que com suas belas fotos fizeram os dias mais difíceis dessa graduação serem mais alegres.

Agradeço aos meus avós, por terem sido o alicerce de todo o caminho trilhado. Agradeço ao meu tio Isac e sua esposa Lirica que me apoiou e esteve ao meu lado em todos os momentos. Agradeço a todos os meus tios e primos por estarem sempre torcendo pelo meu sucesso.

Agradeço ao meu companheiro de vida Mateus, que esteve comigo durante toda a graduação, que nunca soltou a minha mão, foi o meu fiel confidente e com seu amor fez essa jornada mais feliz.

Agradeço aos meus amigos Marcos e Anderson, sem eles eu não teria conseguido, seus apoios me mantiveram firme. Agradeço a Ernildo, meu braço direito nesse trabalho, que com sua ajuda, paciência e companheirismo fez esse TCC ser possível do jeito que desejei.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Sharon Dantas da Cunha, que aceitou me orientar no momento mais importante da graduação, confiou em mim, me passou a segurança que precisava e não mediu esforços para colaborar com este trabalho.

Agradeço a todos os professores que fizeram parte da minha formação, à todos minha admiração. Agradeço a todos os servidores da UFERSA, que mantiveram tudo funcionando na mais perfeita ordem.

Agradeço as minhas amigas sinceras que fiz durante o curso, principalmente Chaguinhas, Ismael, Kercia, Bianca, Janneson, Davi Euclides e John Lennon, juntos compartilhamos nossas ansiedades, risadas e choro, e por vocês eu só tenho a admiração dos profissionais que estão se formando, pois amam a excelência. A vocês eu desejo sucesso.

Agradeço ao meu Thor, que só por existir fez meus dias mais felizes, mesmo de longe.

“Eu prefiro o erro do entusiasmo à  
indiferença do bom senso.”

*Anatole France*

## RESUMO

A humanidade vivencia hoje a era das máquinas, elas estão presentes em todos os lugares, sejam de grande ou pequeno porte. Para o bom funcionamento dessas máquinas é essencial o uso de lubrificantes que dentre suas inúmeras contribuições, podemos citar a diminuição do atrito entre peças metálicas e em consequência disto diminuição das folgas e vibrações. No cotidiano é comum os próprios proprietários realizarem a troca do óleo lubrificante dos motores de seus veículos e para a escolha dos mesmos são apresentados diversos tipos de óleos que se diferem de acordo com as suas classificações de viscosidade e qualidade, que são a SAE e API respectivamente. A principal propriedade desses óleos lubrificantes são a sua viscosidade, que resumidamente é definida como sendo a resistência do fluido ao escoamento. Dessa forma, o presente trabalho tem como objetivo realizar uma análise experimental do óleo 20W50 SL por meio do método de Stokes “automatizado”. As medições da viscosidade foram realizadas em um viscosímetro de Stokes de baixo custo, com leitura dos dados das velocidade terminal das esferas de plástico em queda livre através do Arduino do tipo Uno. Foi constatado então que o protótipo apresentou resultados satisfatórios, podendo assim ser utilizado para determinar a viscosidade de óleos lubrificantes.

**PALAVRAS-CHAVE:** Viscosímetro de Stokes. Óleo 20W50 SL. Arduino. Tracker.

## ABSTRACT

Humanity lives today in the era of machines, they are present everywhere, whether large or small. For the proper functioning of these machines, the use of lubricants is essential. Among their contributions, we can mention the reduction of friction between metal parts and, as a consequence, a decrease in gaps and vibrations. In everyday life, it is common for owners to change the lubricating oil of their vehicles' engines and for their choice, different types of oils are presented, which differ according to their viscosity and quality classifications, which are SAE and API respectively. The main property of these lubricating oils is their viscosity, which we can briefly define as the fluid's resistance to flow. Thus, the present work aims to carry out an experimental analysis of the 20W50 SL oil using the “automated” Stokes method. Viscosity measurements were performed on a low-cost Stokes viscometer, with data on the terminal velocities of the plastic spheres in free fall through the Arduino of the Uno type. It was then verified that the prototype presented satisfactory results, and could thus be used to determine the viscosity of lubricating oils.

**KEYWORDS:** Stokes viscometer. Oil 20W50 SL. Arduino. Tracker.

## LISTA DE FIGURAS

|                   |                                                                          |    |
|-------------------|--------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figura 1:</b>  | Viscosidade dinâmica.....                                                | 15 |
| <b>Figura 2:</b>  | Viscosímetros de Ostwald.....                                            | 18 |
| <b>Figura 3:</b>  | Viscosímetro de orifício tipo Copo Ford.....                             | 19 |
| <b>Figura 4:</b>  | Viscosímetro rotacional.....                                             | 19 |
| <b>Figura 5:</b>  | Viscosímetro de Stokes.....                                              | 20 |
| <b>Figura 6:</b>  | Diagrama de força da esfera imersa em regime laminar.....                | 21 |
| <b>Figura 7:</b>  | Aerodinâmica da esfera com sulcos.....                                   | 23 |
| <b>Figura 8:</b>  | Arduino Uno Rev3.....                                                    | 25 |
| <b>Figura 9:</b>  | Protoboards.....                                                         | 26 |
| <b>Figura 10:</b> | Sensores infravermelhos.....                                             | 27 |
| <b>Figura 11:</b> | Módulo cotado .....                                                      | 27 |
| <b>Figura 12:</b> | Vista Superior dos módulos.....                                          | 27 |
| <b>Figura 13:</b> | Vista Frontal cotada dos módulos.....                                    | 28 |
| <b>Figura 14:</b> | Módulos em 3D.....                                                       | 28 |
| <b>Figura 15:</b> | Esquema do circuito.....                                                 | 29 |
| <b>Figura 16:</b> | Esferas utilizadas.....                                                  | 29 |
| <b>Figura 17:</b> | Óleo lubrificante 20W50.....                                             | 30 |
| <b>Figura 18:</b> | Garrafa PET de 510 ml .....                                              | 30 |
| <b>Figura 19:</b> | Termômetro de mercúrio.....                                              | 31 |
| <b>Figura 20:</b> | Interface do Tracker.....                                                | 31 |
| <b>Figura 21:</b> | Protótipo finalizado.....                                                | 33 |
| <b>Figura 22:</b> | Velocidades terminais obtidas pelo Arduino e do Tracker.....             | 36 |
| <b>Figura 23:</b> | Viscosidade encontrada pelo Tracker e o arduino.....                     | 37 |
| <b>Figura 24:</b> | Coeficiente da viscosidade corrigido com $\lambda_1$ .....               | 38 |
| <b>Figura 25:</b> | Coeficiente da viscosidade corrigido com $\lambda_1$ e $\lambda_2$ ..... | 38 |
| <b>Figura 26:</b> | Erro relativo entre a viscosidade obtida por Vogel e $\eta_{12}$ .....   | 40 |

## LISTA DE TABELAS

|                   |                                                     |    |
|-------------------|-----------------------------------------------------|----|
| <b>Tabela 1 :</b> | Diâmetro das esferas.....                           | 29 |
| <b>Tabela 2 :</b> | Lançamento 1 a 21°C.....                            | 34 |
| <b>Tabela 3 :</b> | Lançamento 2 a 25°C.....                            | 34 |
| <b>Tabela 4 :</b> | Lançamento 3 a 28°C.....                            | 34 |
| <b>Tabela 5 :</b> | Lançamento 4 a 29,5°C.....                          | 35 |
| <b>Tabela 6 :</b> | Valores médios dos lançamentos.....                 | 35 |
| <b>Tabela 7 :</b> | Velocidades terminais do arduino e do Tracker.....  | 35 |
| <b>Tabela 8 :</b> | Temperaturas e densidades dos óleos utilizados..... | 36 |
| <b>Tabela 9 :</b> | Parâmetros da equação de Vogel.....                 | 39 |
| <b>Tabela 10:</b> | Viscosidade obtida pela equação de Vogel.....       | 39 |

## SUMÁRIO

|              |                                                     |           |
|--------------|-----------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b>     | <b>INTRODUÇÃO.....</b>                              | <b>12</b> |
| <b>2</b>     | <b>OBJETIVOS.....</b>                               | <b>14</b> |
| 2.1          | GERAL.....                                          | 14        |
| 2.2          | ESPECÍFICOS .....                                   | 14        |
| <b>3</b>     | <b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>                   | <b>15</b> |
| 3.1          | VISCOSIDADE.....                                    | 15        |
| 3.2          | ÓLEOS LUBRIFICANTE.....                             | 16        |
| 3.3          | CLASSIFICAÇÃO SAE E API DOS ÓLEOS LUBRIFICANTES.... | 17        |
| 3.4          | VISCOSÍMETROS.....                                  | 18        |
| <b>3.4.1</b> | <b>Viscosímetro de Stokes.....</b>                  | <b>20</b> |
| 3.5          | INFLUÊNCIA DAS CAVIDADES NA ESFERA.....             | 23        |
| <b>4</b>     | <b>MATERIAL E MÉTODOS .....</b>                     | <b>24</b> |
| 4.1          | ARDUINO UNO Rev3.....                               | 24        |
| 4.2          | SENSORES INFRAVERMELHOS.....                        | 26        |
| 4.3          | PROTÓTIPO.....                                      | 27        |
| 4.4          | ESQUEMA DO CIRCUITO.....                            | 28        |
| 4.5          | ESFERAS E FLUIDO.....                               | 29        |
| 4.6          | TRACKER.....                                        | 31        |
| 4.7          | ALGORITMO.....                                      | 32        |
| <b>5</b>     | <b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>                | <b>33</b> |
| <b>6</b>     | <b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>                    | <b>41</b> |
| <b>7</b>     | <b>REFERÊNCIAS.....</b>                             | <b>42</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

O século XXI pode ser descrito como o período de desenvolvimento e popularização das máquinas, que antes eram muito limitadas e de difícil comercialização. Óleos lubrificantes são elementos essenciais para o bom funcionamento e desempenho do maquinário industrial, automotivo e residencial, por esse motivo ele é alvo de pesquisas da engenharia, já que é primordial que ele atenda da maneira mais eficiente possível as especificidades de cada aplicação. Dentre as muitas funcionalidades do óleo lubrificante, tem-se a diminuição do atrito entre as superfícies em contato direto (PETROBRAS, 2020). Foi com essa finalidade (redução do atrito) que surgiram os primeiros óleos lubrificantes que eram de origem animal. Esses produtos eram usados pelos egípcios por volta de 2500 a.C nos trenós que transportavam as pedras para a construção das pirâmides. Somente séculos depois iniciou-se o uso de óleos derivados do petróleo (OLIVEIRA, 2020).

Os lubrificantes mais modernos e sofisticados são os sintéticos. Enquanto os lubrificantes minerais são extraídos do petróleo e tem como base os óleos minerais, os sintéticos apresentam como base da sua formulação os óleos sintéticos. Dentre as vantagens dos óleos sintéticos em relação aos minerais podemos citar a sua maior resistência a temperaturas mais elevadas, vida útil prolongada, como ainda podem ser usados em temperaturas extremamente baixas, além de apresentar baixa toxicidade, o que possibilita sua aplicação na indústria farmacêutica e alimentícia (MIRANDA *et.al.*, 2016)

A viscosidade, que de modo sucinto podemos definir como a resistência do fluido ao escoamento, é a propriedade mais relevante do óleo, pois em termos de lubrificação é primordial conhecermos o seu comportamento em relação às variações de temperaturas, uma vez que a viscosidade dinâmica possui uma considerável influência na espessura mínima do filme que o óleo lubrificante produz para separar as superfícies em contato (PROFITO, 2010 apud CANCIAM, 2013).

Os óleos lubrificantes automotivos possuem diferentes classificações, sendo a mais conhecida a implementada pela Sociedade dos Engenheiros Automotivos dos Estados Unidos (SAE). É possível chegar aos resultados dessas classificações por meio de experimentação simples, usando o método de Stokes. Esse método é embasado pela lei de Stokes, que relaciona a velocidade terminal da esfera em queda livre em um determinado fluido em um tubo vertical, chamado de viscosímetro de Stokes, com o diâmetro da esfera e do tubo, como

também com a densidade do fluido. No modelo ideal o diâmetro do tubo é infinito, como na prática não é possível essa configuração, é necessário utilizar a correção de Ladenburg que prevê justamente o efeito da aproximação da esfera com as paredes do tubo e assim consegue-se obter o valor da viscosidade com o mínimo de erro (VERTCHENKO; VERTCHENKO, 2017).

É realizado em laboratório os testes para encontrar o coeficiente de viscosidade, geralmente utilizando o método de Stokes por se tratar de um experimento simples e de baixo custo. Porém, para apresentar resultados satisfatórios tem uma série de condições rigorosas que precisam ser atendidas. Sendo assim, é possível visualizar no decorrer do trabalho que esse método apresenta uma falsa simplicidade e que é necessário aplicar correções matemáticas para garantir sua eficácia.

Diante disto, neste trabalho analisaremos a viscosidade do óleo 20W50 SL utilizando ferramentas de baixo custo como esferas de plástico, arduino e sensores infravermelho, como também recursos digitais gratuitos, nesse caso o software Tracker que é uma ferramenta de modelagem e análise de vídeo que será empregado para validar os dados de velocidades obtidos pela protótipo automatizado (BROWN; CHRISTIAN; HANSON, 2020).

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 GERAL**

Desenvolver um sistema, utilizando Arduino, para determinar a viscosidade de óleos através do método de Stokes

### **2.2 ESPECÍFICOS**

- Validar a velocidade terminal das esferas obtidas com o sistema Arduino com as velocidade obtidas com o Software Livre Tracker
- Analisar o efeito da temperatura na viscosidade dinâmica utilizando as velocidades obtidas com o sistema Arduino e o Tracker.
- Comparar os valores obtidos de viscosidade dinâmica com a equação de Vogel.

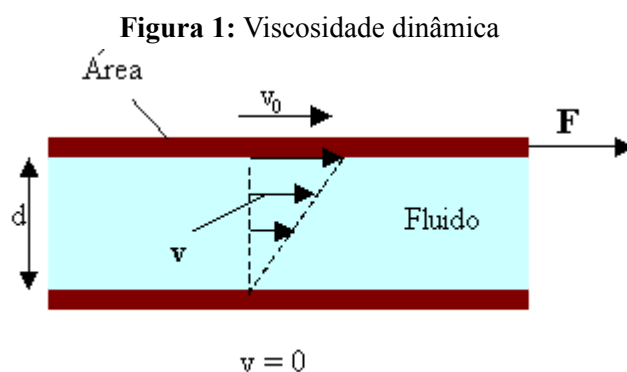
### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 VISCOSIDADE

Podemos definir brevemente viscosidade como a resistência de um fluido ao escoamento. Essa resistência pode ser relacionada ao atrito interno resultante do movimento de uma camada do fluido em relação a outra. Assim como está relacionada a capacidade de fluir, também está relacionada com forças intermoleculares. Uma das principais propriedades dos óleos é a viscosidade, nesse sentido:

Ela pode ser entendida como uma espécie de atrito interno que causa fricção entre as camadas do fluido que se movimentam com velocidades diferentes e pode ser explicada microscopicamente como sendo a transferência do momento linear entre as partículas que compõem o fluido. A mesma é caracterizada pelo coeficiente de viscosidade dinâmico  $\eta$ , que é definido como a razão entre a força de cisalhamento por unidade de área, à qual se é submetido o fluido, como também pelo gradiente de velocidade perpendicular a essa força (VERTCHENKO; VERTCHENKO, 2017).

Existem dois tipos de viscosidade: a cinemática ( $\nu$ ) e a dinâmica ( $\mu$ ). A primeira ( $\nu$ ) se apresenta de forma bem simples, sendo relacionada apenas a razão entre a viscosidade dinâmica ( $\mu$ ) e a densidade do fluido. Já a segunda, também conhecida como viscosidade absoluta, se dá por meio da força necessária para mover uma unidade de área a uma unidade de distância. Viscosidade dinâmica é a propriedade que determina o grau de resistência de um fluido a uma força de cisalhamento como representado na figura 1. Brunetti (2008) ressalta que a viscosidade dinâmica é diretamente proporcional à força de atração entre as moléculas; se aumentarmos a temperatura essa atração diminui e consequentemente a viscosidade também diminui.



Fonte: Bertulani Apud Dantas, 2018.

Em termos de lubrificação é importante enfatizar que a viscosidade dinâmica influencia diretamente nas dimensões da espessura mínima do filme lubrificante, filme esse responsável por separar as superfícies em contato (PROFITO, 2010).

### 3.2 ÓLEOS LUBRIFICANTE

Os óleos lubrificantes podem se apresentar na forma gasosa, líquida (como os óleos em geral), semi sólidos como as graxas e na forma sólida como o grafite e a mica. Por apresentarem maior praticidade, os mais usados são os lubrificantes líquidos e os semi sólidos. Os óleos lubrificantes podem ser de origem animal, derivados de petróleo (óleos minerais) ou até mesmo produzidos em laboratório, como é o caso dos óleos sintéticos. Pode-se ainda ter uma mistura dos tipos, resultando nos óleos compostos (CYRINO, 2015).

Os óleos lubrificantes servem para diminuir o atrito entre duas superfícies em movimento relativo e consequentemente reduzir o desgaste das peças por meio da formação de uma película protetora entre as áreas em contato. No caso dos motores, os óleos também são responsáveis pelo controle da temperatura e realização da limpeza das peças. Também atua como agente de vedação, impedindo a oxidação dos componentes do sistema. Diante das suas importantes funções é necessário que a produção dos lubrificantes seja submetida a um rigoroso padrão de qualidade, para isso é realizado uma série de ensaios físicos, tais como: ensaio de viscosidade, índice de viscosidade, densidade relativa, ponto de fulgor, ponto de combustão, ponto de mínima fluidez e resíduos de carvão (CYRINO, 2015).

Os lubrificantes líquidos são divididos em duas classificações de acordo com a aplicação: industrial e automotivo. Neste trabalho nos aprofundaremos no automotivo, que são constituídos de aditivos (de 10 à 20% da sua composição), e principalmente de óleos básicos (80 à 90%) (SANTOS JUNIOR, 2011). Os óleos básicos minerais são classificados de acordo com a natureza dos hidrocarbonetos predominantes na sua composição em parafínicos ou naftênicos. Os parafínicos apresentam pouca variação de viscosidade com a temperatura, já os naftênicos tem aplicação em baixas temperaturas (FARAH, 2012). Ao final do processo, se os óleos apresentarem níveis de lubrificação insuficiente, são adicionados aditivos a fim de melhorar o desempenho e qualidade dos óleos básicos, logo, foi adicionado a eles a

capacidade de eliminar ou reduzir características indesejáveis como a formação de espumas, eliminar ácidos ligados à corrosão, antioxidantes (ROCCO *et al.*, 2016).

### 3.3 CLASSIFICAÇÃO SAE E API DOS ÓLEOS LUBRIFICANTES

Uma consequência da globalização foi a exportação e importação de máquinas e isso gerou a necessidade de normatizar o método de fabricação, os elementos constituintes e os produtos adequados para a manutenção. Os óleos lubrificantes são elementos essenciais para a manutenção e bom funcionamento de mecanismos mecânicos; levando isso em consideração surgiu a necessidade de uma classificação comercial para os lubrificantes de acordo com suas especificidades. Delimitando em óleos lubrificantes para a indústria automobilística, temos o SAE (*Society of Automotive Engineers*) e o API (*American Petroleum Institute*) que criaram padrões de fabricação para que os óleos atendam o índice de qualidade requerida pela indústria automobilística. Segundo Andrade (2014), a classificação do SAE se dá em relação a um número puro de viscosidade determinado em ensaios realizados em laboratório e quanto maior for esse número, maior a viscosidade. Essa classificação tem três subdivisões:

- Óleos de inverno - óleos mais indicados para condições de frio rigoroso ou em partida a frio de motor, já que possibilitam uma movimentação mais fácil e rápida dos mecanismos e do próprio óleo. Para referenciar este óleo se usa a letra W (*winter* - inverno) acompanhando o número de classificação.
- Óleos de verão - trabalham em temperaturas elevadas, sem que ocorra o rompimento da sua película lubrificante, pois sua viscosidade diminui com o aumento da temperatura. Logo ele tem sua viscosidade medida em altas temperaturas e não possui a letra W na sua classificação.
- Óleos multiviscosos - Ele atende às duas condições anteriores, dessa forma um óleo multigrado SAE 20W50 apresenta comportamento a baixa temperatura de um óleo 20W assim reduzindo o desgaste na partida do motor ainda frio e em alta temperatura apresenta comportamento de um óleo SAE 50 não comprometendo assim o funcionamento do motor (ANDRADE, 2014).

O API é uma classificação comercial de óleos lubrificantes para motores de combustão interna e é dividida em duas séries: S e C. A série S é para óleos de motores com vela de

ignição e a série C é para motores a diesel. Em cada série, segue-se uma letra. Quanto mais avançada no alfabeto, melhor o desempenho do lubrificante (ANDRADE, 2014).

### 3.4 VISCOSÍMETROS

O viscosímetro é justamente o instrumento usado para fazer a medição da viscosidade de um fluido. Em caso de fluidos que a viscosidade varia de acordo com as condições do fluxo é utilizado o reômetro, pois os viscosímetros medem a viscosidade apenas sob uma condição de fluxo. É necessário ter em mente o tipo de líquido a ser inspecionado para assim fazer a escolha do viscosímetro adequado, pois existe uma vasta variedade para atender as especificidades de cada fluido. Segundo Faria *et al.* (2011), existem quatro tipos básicos de viscosímetro:

1. Viscosímetro capilar: Se determina a viscosidade por meio da velocidade de escoamento (medida por meio do tempo que o líquido leva para escoar entre duas marcas) do fluido em um tubo capilar de vidro.

**Figura 2** - Viscosímetros de Ostwald



Fonte: Mecânica apud Oliveira, 2020

2. Viscosímetro de orifício: é marcado o tempo que um líquido de volume fixo gasta para escoar por um orifício localizado no fundo do recipiente e assim encontra-se a viscosidade.

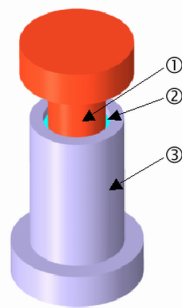
**Figura 3** - Viscosímetro de orifício tipo Copo Ford.



Fonte: SPLABOR, 2021.

3. Viscosímetro rotacional: A viscosidade é medida pela velocidade angular de uma parte móvel separada de uma parte fixa pelo líquido. Nos viscosímetros de cilindros concêntricos, a parte fixa é, em geral, a parede do próprio recipiente cilíndrico onde está o líquido. A parte móvel pode ser no formato de palhetas ou um cilindro. Nos viscosímetros de cone-placa, um cone é girado sobre o líquido colocado entre o cone e uma placa fixa.

**Figura 4** - Viscosímetro rotacional.



Fonte: Esquemático apud Oliveira, 2020

4. Viscosímetro de esfera: Em tubo de vidro vertical contendo um fluido é colocado uma esfera em queda livre e por meio da velocidade terminal se calcula a viscosidade.

**Figura 5 - Viscosímetro de Stokes**



Fonte: Vertchenko e Vertchenko, 2017

Neste trabalho será utilizado o viscosímetro de esfera com o auxílio de sensores infravermelhos e arduino, fazendo uso do método de Stokes.

### **3.4.1 Viscosímetro de Stokes**

O viscosímetro de esfera utiliza o princípio do método de Stokes, que trata-se de um tubo de vidro posicionado verticalmente, preenchido com fluido em repouso. Nele é liberada uma esfera de diâmetro conhecido, bem inferior ao do tubo, e densidade também conhecida. Mede-se então o tempo que a esfera leva para atravessar duas marcas no tubo para assim calcular a velocidade terminal (limite). É possível automatizar esse processo de medição do tempo por meio de cronômetros eletrônicos e ferramentas digitais que possibilitam realizar análises minuciosas do processo. Com o valor da velocidade terminal, da densidade, do diâmetro da esfera e da densidade do líquido é possível encontrar a viscosidade do fluido pela lei por George Gabriel Stokes, formulada em 1851 (VERTCHENKO; VERTCHENKO, 2017). Com o intuito de obter um maior banco de dados para refino e melhora na precisão dos resultados, geralmente usa-se três esferas de diâmetros distintos. (PILLING, 2019).

Stokes formulou uma equação onde relaciona a influência da força de atrito que atua em objetos esféricos em um fluido viscoso de fluxo laminar e com pequeno número de

Reynolds. Essa força é diretamente proporcional a velocidade  $v$ , e a expressão resultante foi a equação 1:

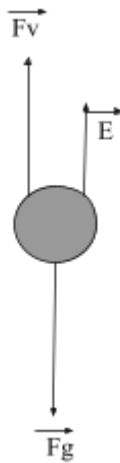
$$F_{Stokes} = 6\pi r\eta v \quad (1)$$

onde:

- $F_{Stokes}$  é a força de Stokes;
- $r$  é o raio da esfera;
- $\eta$  é a viscosidade do fluido;
- $v$  é a velocidade da partícula;

Quando um objeto esférico com diâmetro e densidade conhecidos se desloca verticalmente dentro de um fluido, ele sofre influência de três forças: a força da gravidade que é sentida para baixo e as forças de empuxo e atrito viscoso, sentido para cima, com podemos observar na figura 6.

**Figura 6** - Diagrama de força da esfera imersa em regime laminar



Fonte: Autor, 2021.

A velocidade depois da esfera adentrar no fluido aumenta de maneira não uniforme com o tempo e atinge a velocidade terminal quando a força resultante for nula, ou seja, a partir desse instante a esfera assume um movimento retilíneo uniforme. Como é possível observar na figura 6 as três forças atuando na esfera são a força viscosa  $F_v$ , força gravitacional  $F_g$ , e o empuxo (PILLING, 2019). Disso temos:

$$F_{Stokes} + Empuxo - F_g = ma \quad (2)$$

$$6\pi r\eta v + \rho_{líquido} V_{desl} - m_{esfera} g = 0.$$

Substituindo  $m_{esfera}$  pelo produto do seu volume e densidade e além disso, considerando que o corpo está totalmente imerso no fluido, o volume deslocado é igual ao volume da esfera ( $V_{esfera} = V_{desl} = (4/3)\pi r^3$ ). Reescrevendo a equação 2 levando em conta as considerações anteriores, obtém-se:

$$6\pi r\eta v + \rho_{fluido}(4/3)\pi r^3 g = \rho_{esfera}(4/3)\pi r^3 g. \quad (3)$$

Reescrevendo a equação 3, obtém-se a velocidade limite  $v$  da esfera caindo dentro do fluido:

$$v = \frac{2r^2 g(\rho_{esfera} - \rho_{fluido})}{9\eta}. \quad (4)$$

Reescrevendo a equação 4, a viscosidade é dada pela equação 5:

$$\eta = \frac{2r^2 g(\rho_{esfera} - \rho_{fluido})}{9v}. \quad (5)$$

Em relação ao diâmetro do tubo é importante enfatizar que o mesmo deve ser grande o suficiente para que não influencie no escoamento, pois ocorre um aumento no gradiente da velocidade do fluido com a aproximação da esfera nas paredes do tubo e isso ocasiona aumento da força viscosa (OLIVEIRA, 2020). Dessa forma, há um problema em usar a viscosidade da equação 5, já que os resultados são dependentes do diâmetro. Com isso, segundo Vertchenko e Vertchenko (2017) é necessário uma correção na equação (1) e isso é feito aplicando um fator de correção adimensional  $\lambda_1$ , chamado de fator de Ladenburg, que relaciona o diâmetro da esfera com o diâmetro interno do tubo, resultando assim na equação:

$$F_{stokes} = 6\pi r\eta\lambda_1 v \quad (6)$$

no qual  $\lambda_1$  é dada por

$$\lambda_1 = 1 + 2,1 \frac{d}{D} \quad (7)$$

Em que  $d$  é o diâmetro da esfera e  $D$  é o diâmetro do tubo. Em decorrência disso, usando a velocidade terminal medida dentro do tubo, a expressão para o coeficiente de viscosidade dada pela equação 6, fica:

$$\eta = \frac{2r^2 g(\rho_{esfera} - \rho_{fluido})}{9 v \lambda_1}. \quad (8)$$

Vertchenko e Vertchenko (2017) citam que esse método para a obtenção do coeficiente de viscosidade foi analisado por Sandoval, Caram e Salinas e os mesmos argumentam que cumprindo a relação entre o diâmetro  $d$  da esfera e o diâmetro interno  $D$  do tubo,  $\frac{d}{D} < 0,2$  em conjunto com a condição  $d \ll H$  no qual  $H$  é a altura da coluna do líquido, obtém-se resultados satisfatórios.

A equação 7 pode também ser relacionada à velocidade, tendo  $v_{\text{corr}} = \lambda_1 v$  como sendo a velocidade que a esfera teria caso o diâmetro do tubo fosse infinito. Vertchenko e Vertchenko (2017) propõe ainda um segundo fator adimensional  $\lambda_2$ , obtido de maneira experimental e que leva em consideração a altura do fluido, expressa na equação 9:

$$\lambda_2 = 1 + 3,3 \frac{r}{h} \quad (9)$$

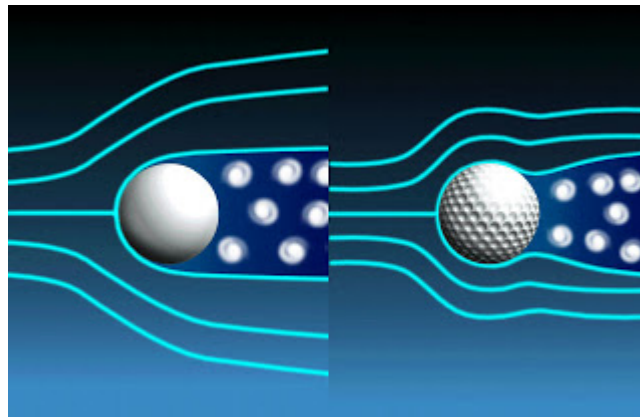
onde  $r$  e  $h$  são, respectivamente, o raio da esfera, o raio do tubo e a altura total do fluido no tubo (PILLING apud OLIVEIRA, 2020). Logo, a expressão da viscosidade se dá pela equação 10:

$$\eta = \frac{2r^2 g (\rho_{\text{esfera}} - \rho_{\text{fluido}})}{9 v \lambda_1 \lambda_2} \quad (10)$$

### 3.5 INFLUÊNCIA DAS CAVIDADES NA ESFERA

Esferas com sulcos em sua superfície são bastante comuns no mundo do golfe, sendo essas cavidades conhecidas como *dimples*. Esta geometria é usada porque apresenta influência na direção e intensidade da força de sustentação (principalmente em baixas velocidades), pois os seus sulcos agem induzindo turbulência na camada limite e isso reduz a resistência do ar, como ilustra a figura 7 (BRASIL GOLF, 2012).

**Figura 7** - Aerodinâmica da esfera com sulcos



Fonte: Valeria (2011 ).

Em comparação com a esfera de superfície lisa, a esfera com *dimples* apresenta cerca de 50% a menos de força de arraste (BRASIL GOLF, 2012).

## 4 MATERIAL E MÉTODOS

Para o desenvolvimento deste trabalho foi realizado primeiramente uma pesquisa bibliográfica, para assim construir o embasamento teórico necessário para reproduzir as práticas laboratoriais do método de Stokes. Esse método determina a viscosidade dinâmica dos fluidos, neste caso o do óleo lubrificante automotivo 20W50 SL.

Com o intuito de diminuir os erros relacionados à medição e captação dos dados, o experimento foi automatizado com a utilização de seis pares de sensores infravermelhos ligados em um circuito no arduino Uno Rev3. A programação foi realizada na própria interface do arduino, o software Arduino IDE, no qual o código implementa um cronômetro que é acionado quando a esfera lançada intercepta o primeiro grupo de sensores localizados no módulo 1, assim ocorrendo a captura do tempo no qual ela leva até interceptar os sensores do módulo 2, ou seja, ele faz a leitura da velocidade terminal da esfera em movimento no viscosímetro contendo o óleo lubrificante. Para validação dos dados obtidos pelo arduino, foi utilizado o software Tracker, ele registra a posição da esfera em queda dentro do fluido e também a sua velocidade ao longo do percurso.

### 4.1 ARDUINO UNO REV3

O Arduino Uno Rev3 é uma placa microcontroladora baseada em ATmega328P, sendo a primeira lançada pela marca e é modelo de referência da plataforma Arduino. Possui 14 pinos digitais de entrada/saída no qual apenas três destes foram usados e 6 entradas analógicas, sendo apenas três utilizadas (figura 8). Possui ainda uma conexão USB e um botão de reinicialização.

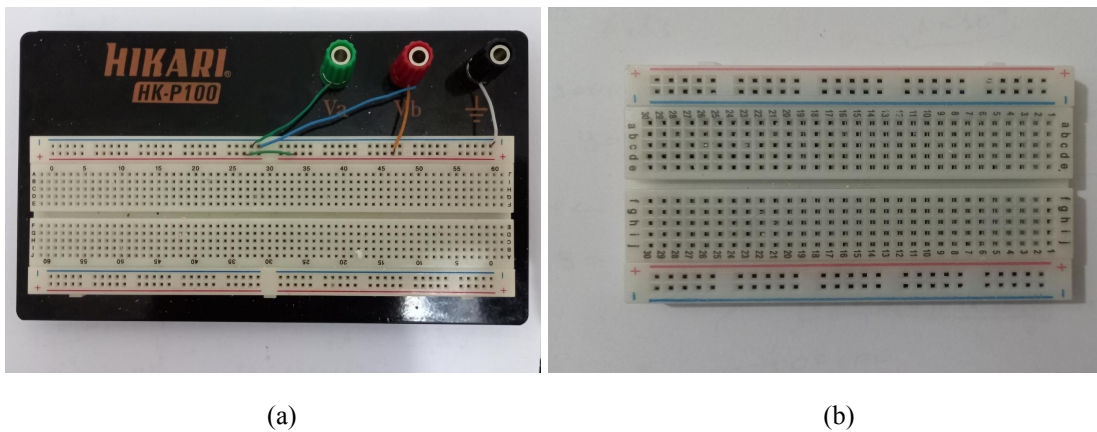
**Figura 8 - Arduino Uno Rev3**



Fonte: Autor, 2021.

O circuito montado é constituído de dois módulos de sensores, cada módulo (com formato externo quadrado) possui duas faces paralelas a distribuição de três LEDs. Em uma face é acoplado três LEDs emissores de maneira equidistante e na outra face é colocado os outros três LEDs receptores, dispostos de maneira alinhada, reconhecendo seu par na face oposta. O grupo dos seis emissores são conectados a protoboard (a) e o grupo dos receptores a protoboard (b) da figura 9.

**Figura 9 - Protoboards**



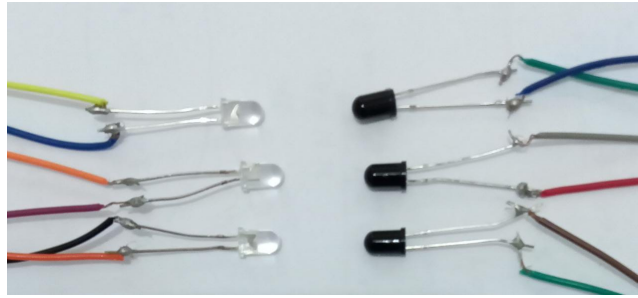
Fonte: Autor, 2021.

A protoboard (a) conta com a ligação de seis resistores de  $390\ \Omega$  em série conectados na saída positiva dos LEDs emissores, enquanto todos os negativos são conectados ao terra. Já a protoboard (b) recebe somente os negativos dos LEDs receptores e faz a ligação com a protoboard (a). O positivo dos LEDs receptores do Módulo 1 são ligados às portas analógicas A0, A1 e A2 e do Módulo 2 as portas digitais 8, 9 e 10. O positivo das protoboards são então conectadas no pino de alimentação da placa, que fornece 5V e o negativo ao GND.

## 4.2 SENSORES INFRAVERMELHOS

Sensores infravermelhos são dispositivos que detectam e respondem a estímulos de movimentos. No experimento ele atua capturando o momento em que as esferas interceptam a luz infravermelha, que é uma radiação eletromagnética de baixa frequência, indetectável a olho nu. Esses estímulos são então interpretados pelo arduino e os dados são salvos no programa (MATTEDE, 2021). Em cada módulo foram usados três pares de sensores infravermelhos com seus terminais soldados, conforme a figura 10.

**Figura 10 - Sensores infravermelhos**

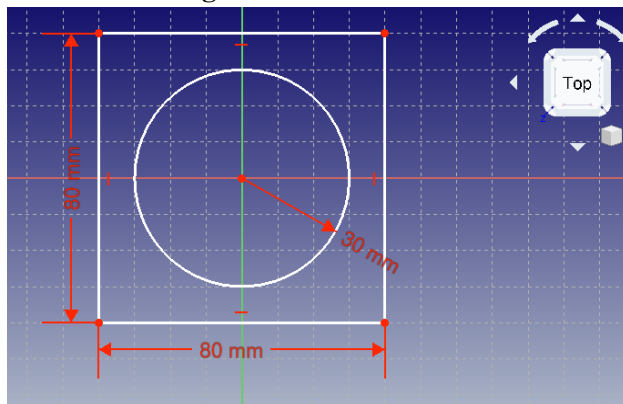


Fonte: Autor, 2021

### 4.3 PROTÓTIPO

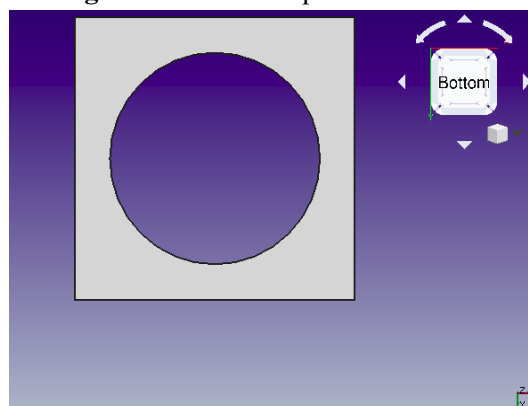
Os módulos nos quais estão fixados os sensores tem o formato externo de um quadrado de laterais de 80mm e diâmetro interno de 60mm para ficar acoplado na garrafa de 59,8 mm de diâmetro, como mostra a figura 11. Esses dois módulos foram primeiramente projetados no software gratuito multiplataforma de modelagem 3D CAD, Free CAD e depois moldados em isopor, que é um material de fácil manipulação e acesso.

**Figura 11 - Módulo cotado**



Fonte: Autor, 2021.

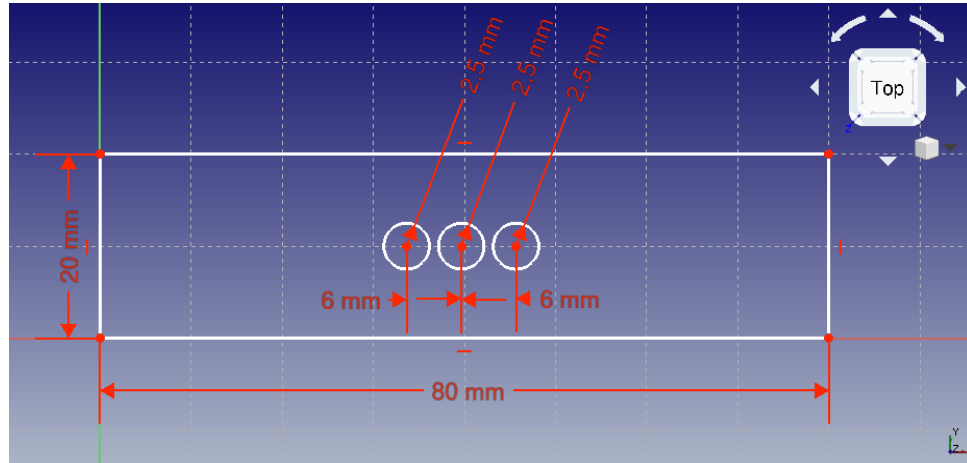
**Figura 12 - Vista Superior dos módulos**



Fonte: Autor, 2021.

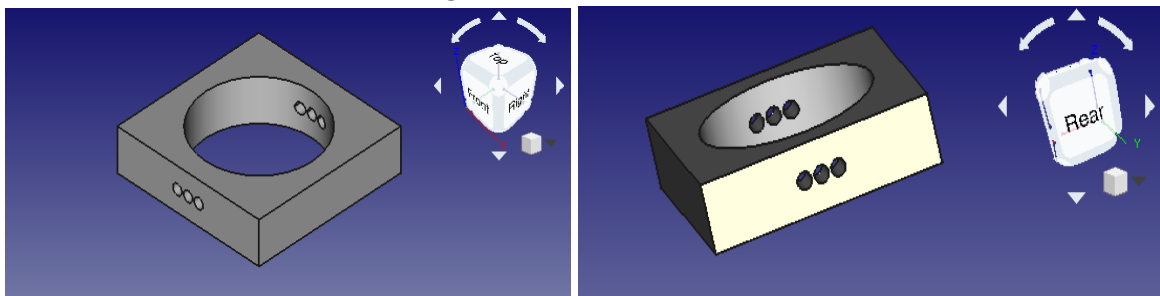
O módulo contém espessura de 20 mm e conta com um total de seis furos de 5mm de diâmetro, sendo estes distribuídos em duas faces paralelas, cada uma com três furos equidistantes.

**Figura 13 - Vista Frontal cotada dos módulos**



Fonte: Autor, 2021.

**Figura 14 - Módulos em 3D**

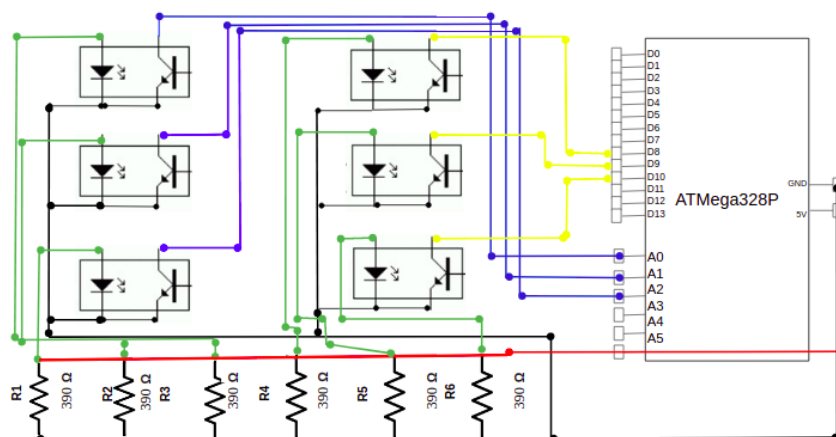


Fonte: Autor, 2021

#### 4.4 ESQUEMA DO CIRCUITO

O esquema do circuito representado pela figura 15 ilustra as ligações eletrônicas entre os LEDs emissores e receptores com a placa Uno Rev 3. Todos os fios pretos estão conectados entre si e vão para o GND do arduino. A cor dos fios verdes representa a saída positiva dos LEDs emissores para os resistores. Os fios azuis representam a saída positiva dos LEDs receptores do módulo 1, que são direcionados para as portas A0, A1 e A2. Os fios amarelos dizem respeito à saída positiva dos receptores do Módulo 2, que são ligados às portas 8, 9 e 10.

**Figura 15** - Esquema do circuito

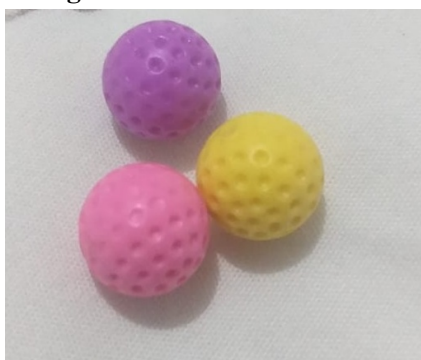


Fonte: Autor, 2021.

#### 4.5 ESFERAS E FLUIDO

Para a realização do experimento foram utilizadas três esferas de diâmetros aproximados, onde cada uma foi lançada por vez no fluido.

**Figura 16** - Esferas utilizadas



Fonte: Autor, 2021

**Tabela 1** - Diâmetro das esferas

| Esfera        | 1 (Lilás) | 2 (Rosa) | 3 (Amarela) |
|---------------|-----------|----------|-------------|
| Diâmetro (mm) | 9,80      | 9,75     | 9,80        |
| Massa (g)     | 0,6541    | 0,6582   | 0,6632      |

Fonte: Autor, 2021

O valor médio do diâmetro das esferas é de 9,783 mm e da massa é de 0,6585 g. Já o desvio padrão, obtido pela seguinte fórmula:

$$Dp = \sqrt{\frac{\sum (X_i - \bar{X})^2}{n-1}} \quad (11)$$

Nos dá para o valor do diâmetro um desvio de 0,0164 mm. Para a massa temos um pequeno desvio padrão de 0,0189 g.

O fluido usado neste experimento foi o óleo lubrificante automotivo multiviscoso de SAE 20W50 e API SL. Ele possui coloração intermediária, o que é coerente para a nossa necessidade de capturar o percurso da esfera dentro do mesmo.

**Figura 17** - Óleo lubrificante 20W50



Fonte: Autor, 2021

O fluido foi transportado para uma garrafa PET de 510 ml, de cilindro uniforme com 5,98 cm de diâmetro e 15 cm de altura útil. A escolha da garrafa mostrada na figura 18 se deu por sua coloração transparente, superfície uniforme e baixo custo, uma vez que é reutilizável.

**Figura 18** - Garrafa PET de 510 ml



Fonte: Autor, 2021

Foi usado ainda um termômetro de mercúrio, mostrado na figura 19, para registro da temperatura do fluido e a influência da mesma no registro da viscosidade.

**Figura 19** - Termômetro de mercúrio

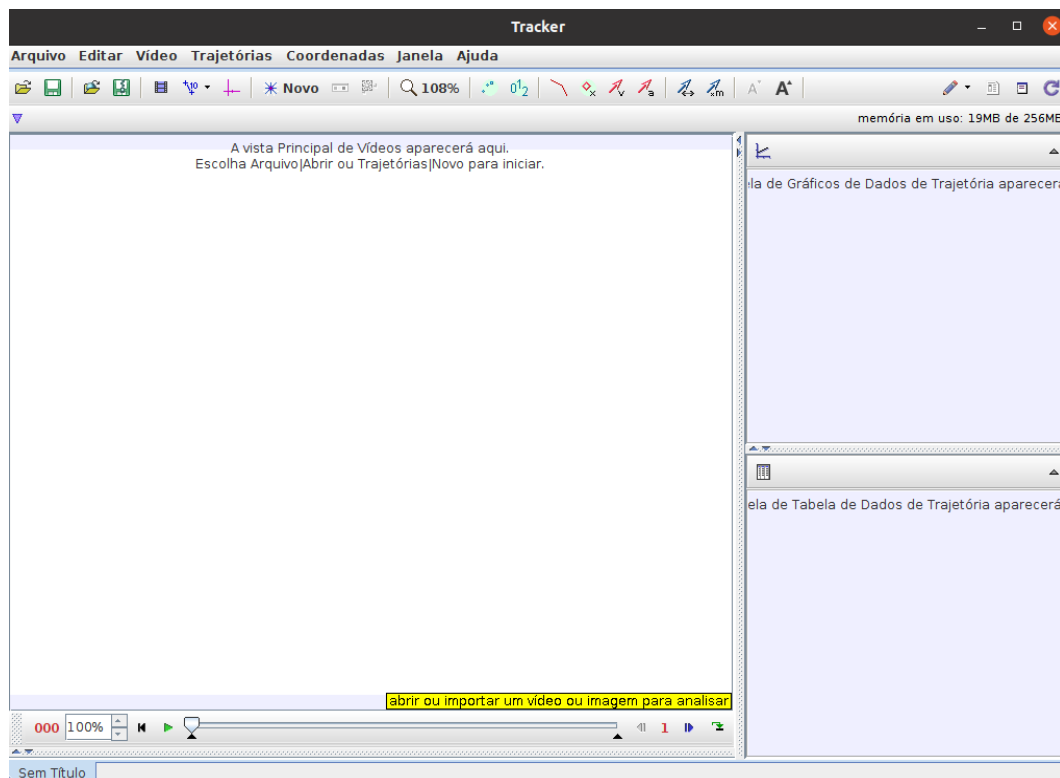


Fonte: Autor, 2021.

#### 4.6 TRACKER

O Tracker é um software de modelagem e análise de vídeo gratuito e de código aberto que pode ser instalado nos sistemas operacionais Windows, OS X e Linux. Este software foi utilizado para validar os valores encontrados por meio do circuito automatizado. O software é capaz de descrever a trajetória das esferas por meio de uma sequência de *frames* (quadros) e por fim constrói gráficos.

**Figura 20** - Interface do Tracker



Fonte: Autor, 2021.

#### 4.7 ALGORITMO

A programação foi realizada na própria IDE do arduino, que possui uma linguagem de programação própria, mas que é baseada nas linguagens de programação C/C++ (ARDUINO, 2011). Em linhas gerais a programação reconhece os três pares de sensores infravermelho de cada um dos módulos, que estão conectados nas portas da placa.

Quando a esfera passa pelo Módulo 1, ela intercepta um dos três sensores infravermelhos que estão ligados às portas analógicas e nisto inicia o cronômetro pela função “millis”, que é disponibilizada em uma das bibliotecas do arduino.

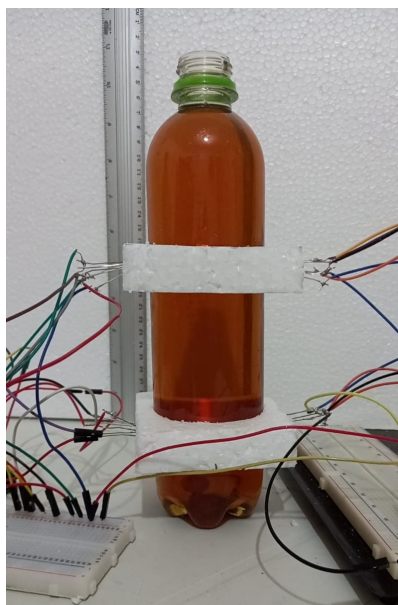
Já com passar da esfera pelo Módulo 2 (com conexão nas portas digitais) e sua detecção por um dos sensores infravermelhos, o cronômetro é então pausado e os dados do intervalo de tempo durante o percurso da esfera entre os dois módulos são apresentados no Monitor serial com a seguinte mensagem: “Tempo:”. Ao final disto, o tempo é então resetado para fazer a medição do lançamento seguinte. A estrutura do algoritmo pode ser vista no Apêndice A.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para a realização do experimento foram utilizadas três esferas de plástico com massas e diâmetros conhecidos, citados na tabela 1, para obter-se o coeficiente de viscosidade por meio da análise da velocidade terminal da queda das esferas no óleo lubrificante 20W50. Quanto ao material que constitui a esfera, foi utilizado as de plástico por sua queda no fluido ser em baixa velocidade, assim garantindo a leitura da sua passagem pelos sensores. O efeito dos sulcos das esferas não foram abordados; para análise da sua influência seria necessário realizar o experimento nas mesmas condições com uma esfera lisas de mesmo diâmetro e massa.

A garrafa que possui 5,98 cm de diâmetro teve dois módulos de sensores acoplados no seu corpo, com uma distância entre eles de  $d = (8,2 \pm 0,2)cm$ . Cada módulo possui três pares de sensores infravermelho (figura 21), para assim aumentar a superfície de contato e garantir a captura da esfera, uma vez que a esfera pode sofrer desvios na queda. O Módulo 1 está posicionado mais a baixo de modo a garantir que a esfera entre em regime estacionário (velocidade constante).

**Figura 21** - Protótipo finalizado



Fonte: Autor, 2021.

Cada esfera foi lançada um total de quatro vezes no tubo, cada lançamento a uma temperatura diferente. O primeiro lançamento foi a 21°C e os dados obtidos estão expostos na Tabela 2.

**Tabela 2** - Lançamento 1 a 21°C

| Esfera      | Tempo medido |
|-------------|--------------|
| 1 (lilás)   | 2,323 s      |
| 2 (rosa)    | 2,290 s      |
| 3 (amarela) | 2,301 s      |

Fonte: Autor, 2021.

Este tempo medido equivale ao intervalo de tempo que a esfera levou para percorrer do módulo 1 até o módulo 2. Como pode-se observar os valores são bem próximos e isto é coerente, uma vez que as massas e os diâmetros são bem aproximados. No segundo lançamento (tabela 3) é possível observar a alta influência da temperatura na viscosidade, que são inversamente proporcionais.

**Tabela 3** - Lançamento 2 a 25°C

| Esfera      | Tempo medido |
|-------------|--------------|
| 1 (lilás)   | 1,802 s      |
| 2 (rosa)    | 1,809 s      |
| 3 (amarela) | 1,799 s      |

Fonte: Autor, 2021.

Nas tabelas 4 e 5, onde a variação da temperatura é apenas 1,5°C, reafirmamos a influência da temperatura na leitura da viscosidade. O difícil alinhamento dos sensores pode influenciar na precisão das medidas, resultando em algumas discrepâncias como mostra a tabela 4.

**Tabela 4** - Lançamento 3 a 28°C

| Esfera      | Tempo medido |
|-------------|--------------|
| 1 (lilás)   | 1,683 s      |
| 2 (rosa)    | 1,722 s      |
| 3 (amarela) | 1,656 s      |

Fonte: Autor, 2021.

**Tabela 5** - Lançamento 4 a 29,5°C

| Esfera      | Tempo medido |
|-------------|--------------|
| 1 (lilás)   | 1,456 s      |
| 2 (rosa)    | 1,436 s      |
| 3 (amarela) | 1,421 s      |

Fonte: Autor, 2021.

Na tabela 6 temos os valores médios de cada temperatura medida, uma vez que as esferas apresentam dimensões semelhantes.

**Tabela 6** - Valores médios dos lançamentos

| T(°C) | Tempo medido | Desvio Padrão |
|-------|--------------|---------------|
| 21    | 2,305 s      | 0,014 s       |
| 25    | 1,803 s      | 0,004 s       |
| 28    | 1,687 s      | 0,027 s       |
| 29,5  | 1,438 s      | 0,014 s       |

Fonte: Autores, 2021.

Como trata-se de um primeiro protótipo, viu-se a necessidade de validar os dados obtidos pelo arduino com o software Tracker. Dessa forma na tabela 7 temos a comparação das velocidades terminais encontrada pelo arduino e pelo Tracker.

**Tabela 7** - Velocidades terminais do arduino e do Tracker

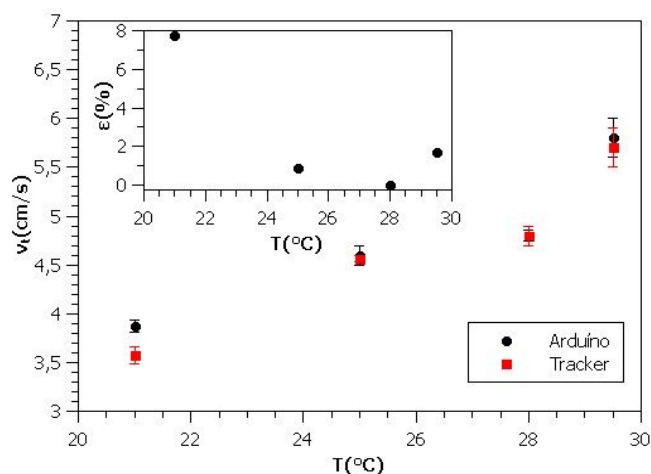
| T (°C) | Arduino      |                         | Tracker      |                         | $\varepsilon$ (%) |
|--------|--------------|-------------------------|--------------|-------------------------|-------------------|
|        | $V_t$ (cm/s) | $\Delta \bar{v}$ (cm/s) | $V_t$ (cm/s) | $\Delta \bar{v}$ (cm/s) |                   |
| 21     | 3,57         | 0,09                    | 3,87         | 0,3                     | 7,75              |
| 25     | 4,56         | 0,03                    | 4,6          | 0,6                     | 0,87              |
| 28     | 4,8          | 0,1                     | 4,8          | 0,6                     | 0                 |
| 29,5   | 5,7          | 0,2                     | 5,8          | 0,1                     | 1,72              |

Fonte: Autores, 2021.

Como pode-se observar, os valores obtidos foram bem próximos, configurando assim que o protótipo obteve dados satisfatórios. Essa relação pode ser observada na figura 22. Para

a construção dos gráficos foram utilizado o Excel Online, para realizar os cálculos e o software QtiPlot para plotar os gráficos (IONDEV SRL, 2011)

**Figura 22** - Velocidades terminais obtidas pelo Arduino e do Tracker. O gráfico menor é o erro relativo percentual.



Fonte: Autores, 2021.

Levando em consideração que existem erros inerentes ao sistema de medição, bem como os erros relacionados à leitura da distância entre os módulos e o alinhamento dos sensores, a tabela 7 mostra os erros relativos presentes neste experimento. Pensando em um comportamento linear dos outros três pontos, um fato a se observar é que os valores da temperatura 28°C aparentemente estão fora da curva.

A temperatura que apresentou o melhor resultado foi a de 28°C, enquanto a que apresentou maior erro relativo foi a de 21°C. Foi observado que o vídeo do experimento analisado para 21°C não estava bem enquadrado, fator esse que pode ser responsável por essa diferença.

Quanto à densidade do fluido foi adotada a média das medidas (tabela 8) realizadas em laboratório pelo Oliveira (2020), uma vez que devido a pandemia da Covid-19 os laboratórios ficaram indisponíveis para fazer procedimentos de medição.

**Tabela 8** - Temperaturas e densidades dos óleos utilizados.

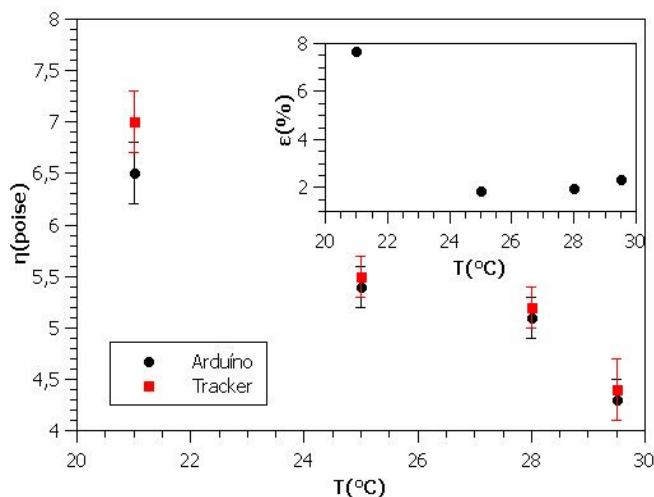
| Óleo  | T (°C) | $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> ) |
|-------|--------|-----------------------------|
| 20W50 | 20     | 0,870                       |
|       | 24     | 0,870                       |
|       | 30     | 0,865                       |

|       |       |
|-------|-------|
| Média | 0,863 |
|-------|-------|

Fonte: Oliveira, 2020

Logo, conseguimos chegar aos valores de viscosidade obtidos no experimento por meio do arduino e do tracker, como mostra a figura 23. Para chegar a esses valores foi utilizada a equação 5.

**Figura 23** - Viscosidade encontrada pelo Tracker e o arduino

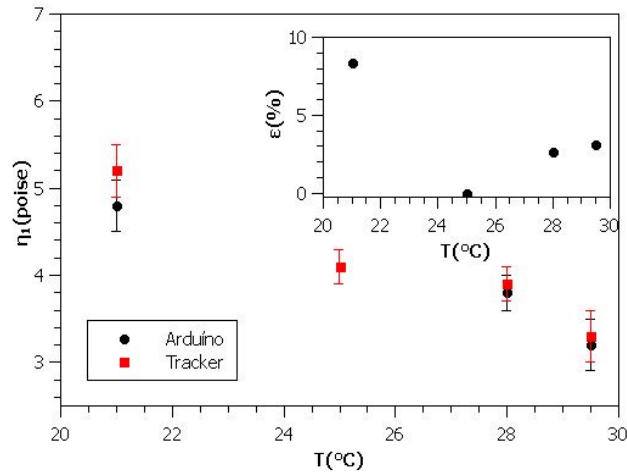


Fonte: Autores, 2021.

Como era de se esperar pela observação dos dados anteriores, a maior discrepância na viscosidade foi encontrada na menor temperatura testada, a de 21°C. Por meio do gráfico é possível identificar facilmente a relação entre a temperatura e a viscosidade, que tem uma inversa proporcionalidade, quanto maior a temperatura, menor a viscosidade. A temperatura de 30°C apresentou a menor viscosidade, que fazendo uma média entre o valor do Tracker e do arduino temos  $\eta = 4,4$  poise e na temperatura de 21°C  $\eta = 6,75$  poise. O gráfico menor, que expressa o erro relativo percentual, considerando o valor correto o calculado pelos dados do arduino, evidencia que os dados do Tracker se distanciaram cerca de aproximadamente 8% dos valores do arduino.

Como a aproximação da esfera com as paredes da garrafa gera um aumento no gradiente da velocidade no fluido em torno da esfera, aumentando assim a força viscosa, é necessário corrigir esse fator aplicando a primeira correção de Ladenburg ( $\lambda_1$ ) que é a relação entre o diâmetro da esfera e o diâmetro externo da garrafa. Disto, aplicando  $\lambda_1$  e substituindo a equação 8, chegamos aos resultados da figura 24.

**Figura 24** - Coeficiente da viscosidade corrigido com  $\lambda_1$

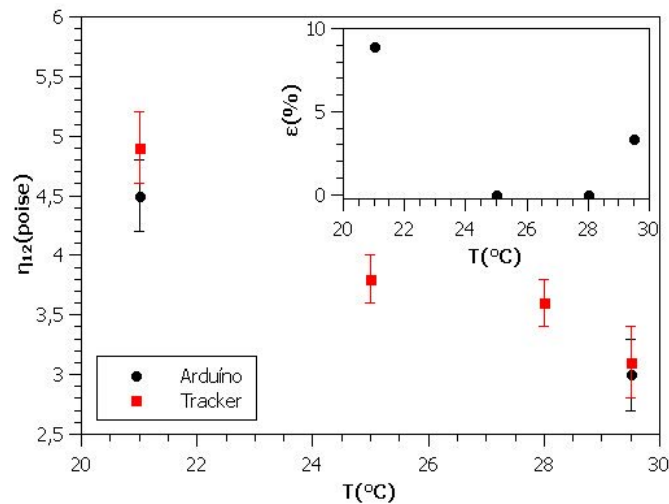


Fonte: Autores, 2021.

A introdução do  $\lambda_1$  apresentou mudanças significativas nos dados. Na temperatura de 25°C foi possível obter o melhor alinhamento entre os dados do Tracker com o arduino, com coeficiente de viscosidade aproximadamente  $\eta_1=4,05$  poise.

Já o gráfico da figura 25 adiciona ainda o segundo fator adimensional  $\lambda_2$ , que incorpora o efeito das paredes da garrafa no movimento das esferas.

**Figura 25** - Coeficiente da viscosidade corrigida com  $\lambda_1$  e  $\lambda_2$



Fonte: Autores, 2021.

Ao aplicar as correções de Ladenburg foi observado que os valores da viscosidade coincidiam nas temperaturas de 25 e 28°C. Consequentemente o erro relativo nessas duas temperaturas zero.

Para a validação da viscosidade foi usada a formulação de Vogel (equação 12), que é uma equação com coeficientes empíricos muito aplicado na engenharia e que apresenta resultados precisos (PROFITO, 2010).

$$\mu = a \cdot e^{\left(\frac{b}{T+c}\right)} \quad (12)$$

Os valores dos coeficientes são tabelados, como mostra a tabela 9:

**Tabela 9** - Parâmetros da equação de Vogel

| Lubrificante | Parâmetros da equação de Vogel |              |          |         |
|--------------|--------------------------------|--------------|----------|---------|
|              | a                              |              | b (°C)   | c (°C)  |
|              | cSt                            | Pa.s         |          |         |
| 10W30A       | 0.140300                       | 1.192550E-04 | 869.720  | 104.400 |
| 10W30B       | 0.091300                       | 7.760500E-05 | 1022.700 | 110.930 |
| 10W50A       | 0.035200                       | 2.992000E-05 | 1658.880 | 163.540 |
| 10W50B       | 0.050700                       | 4.309500E-05 | 1362.400 | 129.800 |
| 20W30        | 0.160600                       | 1.413280E-04 | 811.962  | 93.458  |
| 20W40        | 0.185200                       | 1.639020E-04 | 793.329  | 83.931  |
| 20W50        | 0.063900                       | 5.431500E-05 | 1255.460 | 117.700 |

Fonte: Profito (2010)

Aplicando a equação de Vogel para o lubrificante (20W50) e temperatura utilizados no experimento, obtém-se a tabela 10 o valor da viscosidade corrigida:

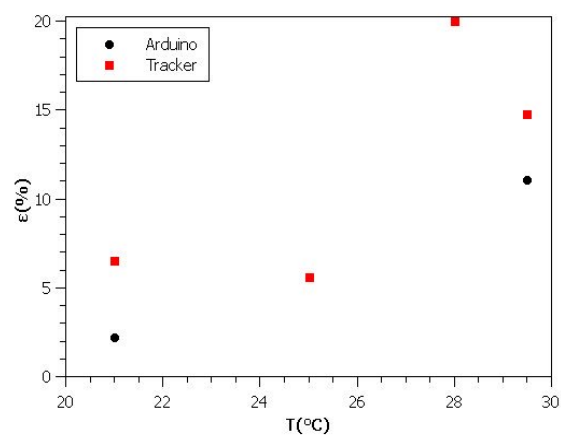
**Tabela 10** - Viscosidade obtida pela equação de Vogel

| T(°C) | $\eta_{\text{Vogel}}$ (poise) | $\varepsilon_{\text{Arduino}}$ (%) | $\varepsilon_{\text{Tracker}}$ (%) |
|-------|-------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| 21    | 4,6                           | 6,5                                | 2,2                                |
| 25    | 3,6                           | 5,6                                | 5,6                                |
| 28    | 3,0                           | 20                                 | 20                                 |
| 29,5  | 2,7                           | 14,8                               | 11,1                               |

Fonte: Autor, 2021.

O erro relativo percentual mostrado na tabela 10 se dá pela comparação da viscosidade dinâmica com as duas correções  $\lambda_1$  e  $\lambda_2$  ( $\eta_{12}$ ), que vamos chamar de  $\eta_{12}$ , tanto do Tracker como do arduino, com os valores da viscosidade obtidos pela equação de Vogel. Pode-se observar na figura 26 que o maior erro está nos dados da viscosidade da temperatura de 28°C e isto provavelmente está relacionado com imprecisão na medida da temperatura.

**Figura 26** - Erro relativo entre a viscosidade obtida por Vogel e  $\eta_{12}$ .



Fonte: Autores, 2021.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

No presente trabalho foi proposto uma comparação dos valores obtidos pelo protótipo com o software Tracker. Foi possível observar que o protótipo 1 obteve resultados satisfatórios, com erros relativos inferiores a 10% se comparado ao Tracker. Foi observado também a influência da temperatura no coeficiente de viscosidade, que atendeu os critérios de proporcionalidade inversa, ou seja, os maiores valores de viscosidade se apresentaram nas temperaturas mais baixas e vice-versa. As correções inseridas nas análises de dados atuaram diminuindo a discrepância dos dados e evidenciando os erros inerentes ao experimento.

Os erros evidenciados pelos dados provavelmente partiu do difícil controle da temperatura, ou de erro de medição devido o uso de ferramentas com baixa precisão, ou de problemas relacionados a conexão no próprio circuito, como também descalibragem do alinhamento dos sensores infravermelhos, já que os módulos foram construídos de isopor e o mesmo apresentava folgas devido o peso dos fios, dessa forma os LEDs sofriam leves deslocamentos com ângulos variados. É possível ainda ter erros na leitura do Track por enquadramento do vídeo inadequado.

Em projetos futuros é possível diminuir esses erros por meio da construção dos módulos em impressora 3D, melhorando assim a precisão das dimensões, como também realizar as medições em laboratório, fazendo-se uso de equipamentos mais precisos e tendo um melhor controle da temperatura. O acesso ao laboratório também possibilitaria o uso dos viscosímetros de Stokes, que com longos comprimentos e boa visualização agregaria mais resultados satisfatórios. Quanto a captação das esferas em quedas, poderia ser feito módulos com mais sensores, aumentando assim a superfície de contato, gerando uma espécie de “plano” em cada módulo, assim não teríamos problema de desvio da esfera no feixe do infravermelho. Tudo isso aliado com um circuito mais seguro, com todas as conexões soldadas, incremento de um dispositivo de tempo real (RTC) e um algoritmo mais sofisticado, podemos possivelmente captar esferas de aço de variados diâmetros e massa, pois devido suas características tem uma queda muito rápida no fluido que o atual protótipo não conseguia captar bem, apresentando uma leitura muito instável, lendo em média apenas um a quatro lançamento. Com esse novo modelo proposto conseguiríamos ainda analisar se os sulcos nas esferas de plástico utilizadas têm grande influência nos dados obtidos.

## 7 REFERÊNCIAS

ANDRADE, Victor. **Viscosidade, API, classificação SAE?? O que é isso?** Disponível em: <<http://www.autolubse.com.br/viscosidade-api-classificacao-sae-o-que-e-isso/>>. Acesso em: 10 set. 2020.

ARDUINO. **Arduino - Home**. Disponível em: <https://www.arduino.cc/>. Acesso em: 27 jan. 2021.

BRASIL GOLF. **Aerodinâmica das bolas de golfe**. Disponível em: <<http://www.abgs.com.br/novo/aerodinamica-das-bolas-de-golfe/#:~:text=a%20Aerodin%C3%A2mica%20I%3A-,Quando%20uma%20bola%20de%20golfe%20ou%20qualquer%20objeto%20s%C3%B3lido%20move,%C3%A9%20irrelevante%20e%20sem%20significado>>. Acesso em: 24 mai. 2021.

BROWN, Douglas; CHRISTIAN, Wolfgang Christian e HANSON, Robert. **Tracker**. Disponível em: <<https://tracker.physlets.org/>>. Acesso em: 08 set. 2020.

BRUNETTI, F. **Mecânica dos Fluidos**: 2. ed. São Paulo: Pearson Education, 2008.

CYRINO, Luis. **Óleos lubrificantes e suas aplicações**. Disponível em: <<https://www.manutencaoemfoco.com.br/oleos-lubrificantes/>>. Acesso em: 08 set. 2020.

DANTAS, Felipe Gama. **Ativação de bentonita para aplicação em fluidos de perfuração**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2018.

FARAH, M. A. Petróleo e seus derivados: **Definição, Constituição, Aplicação, Especificações e Características de Qualidade**. 1.ed. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2012.

FARIA, Agatha. **Trabalho Fenômenos de Transportes (Viscosidade, óleos lubrificantes e viscosímetros), Trabalhos de Engenharia Mecânica**. Disponível em: <<https://www.docsity.com/pt/documentos/downloading/?id=4765133>>. Acesso em: 09 out. 2020.

IONDEV SRL. **QtPlot**. Disponível em: <<http://www.qtiplot.com/download.html>>. Acesso em: 28 mai. 2021.

MATTEDE, Henrique. **Sensor infravermelho- O que é e como funciona!** Disponível em: <<https://www.mundodaeletrica.com.br/sensor-infravermelho-o-que-e-como-funciona/#:~:text=O%20sensor%20infravermelho%20ativo%20irradia,desse%20mesmo%20tipo%20de%20luz.&text=O%20sensor%20de%20infravermelho%20detecta,da%20luz%20em%20espectro%20vis%C3%ADvel>>. Acesso em: 18 abr. 2021.

MIRANDA, Ramon. PENHALVER, Paulo. **Lubrificantes sintéticos ou minerais**. 2016. Disponível em: <<https://penhalverconsultoria.wixsite.com/dicasdelubrificazione/single-post/2016/03/07/Lubrificantes-sint%C3%A9ticos-x-minerais>>. Acesso em: 08 set. 2020.

OLIVEIRA, Ronildo Marley Carvalho. **Análise da viscosidade dinâmica de óleos lubrificantes**. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Pau dos Ferros, 2020.

PETROBRAS. **Óleos básicos lubrificantes**. Disponível em: <<http://sites.petrobras.com.br/minisite/assistenciatecnica/public/downloads/Manual-de-Oleos-Basicos-Lubrificantes.pdf>>. Acesso em: 08 set. 2020.

PILLING, Sergio. **Prática 9 - Determinação da viscosidade dinâmica de fluidos pelo método de Stokes**. São José dos Campos: Universidade do Vale do Paraíba.

PROFITO, Francisco José. **Modelagem Unidimensional do Regime Misto de Lubrificação Aplicada a Superfícies Texturizadas**. 2010. 193 f. Dissertação de Mestrado - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

SANTOS JUNIOR, Araci Araujo. **Determinação de parâmetros de óleos lubrificantes de motores de ciclo Otto e ciclo Diesel através da Espectroscopia no Infravermelho, métodos multivariados e cartas de controle**. 2011. Trabalho de Dissertação de Mestrado - Universidade de Brasília Instituto de Química, Brasília, 2011.

SPLABOR. **6 diferentes tipos de viscosímetros e como eles funcionam**. Disponível em: <<https://www.splabor.com.br/blog/viscosimetros-2/6-diferentes-tipos-de-viscosimetros-e-como-eles-funcionam/>>. Acesso em: 04. Jun. 2021.

VALERIA. **Por que as bolas de golfe têm cavidades?**. Disponível em: <<http://fisicanossa.blogspot.com/2011/11/por-que-as-bolas-de-golfe-tem-cavidades.html>>. Acesso em: 24 mai. 2021.

VERTCHENKO, Lev; VERTCHENKO, Larissa. **Determinação da viscosidade por meio da velocidade terminal: uso da força de arrasto com termo quadrático na velocidade**. Revista Brasileira de Ensino de Física, São Paulo, v. 39, n. 4, p.1-11, 2017.

## APÊNDICE A - Algoritmo usada no experimento

```
#include <TimerOne.h>

// Macros auxiliares
#define set_reg(_REG) (_REG = 0xFF)
#define clr_reg(_REG) (_REG = 0x00)
#define inv_reg(_REG) (_REG != _REG)
#define inv_bit(_REG, _BIT) (_REG ^= _BIT)
#define clr_bit(_REG, _BIT) (_REG &= ~_BIT)
#define set_bit(_REG, _BIT) (_REG |= _BIT)

// pinos Px0, Px1, Px2
#define PIN_MODULES 0x07

boolean testModuleA() {
    return ((PINC & PIN_MODULES) > 0);
}

boolean testModuleB() {
    return ((PINB & PIN_MODULES) > 0);
}

boolean lock = false;
int segundos = 0;
void contar() {
    segundos++;
    Serial.println(segundos);
}

unsigned long times = 0;

void setup() {

    //--- configurações de entrada para o módulo A
    clr_bit(DDRC, PIN_MODULES);
    set_bit(PORTC, PIN_MODULES);

    //--- configurações de entradas para o módulo B
    clr_bit(DDRB, PIN_MODULES);
    set_bit(PORTB, PIN_MODULES);

    Timer1.initialize();
    Serial.begin(9600);
}

void loop() {
```

```
if (testModuleA()) {  
  if (!lock) {  
    times = millis();  
    lock = true;  
  }  
}  
  
if (testModuleB()) {  
  if (lock) {  
    unsigned long rest = millis() - times;  
    Serial.print("Tempo: ");  
    Serial.println(rest);  
    lock = false;  
  }  
}  
}
```