Fundação Universidade Federal do ABC

Pró reitoria de pesquisa

Av. dos Estados, 5001, Santa Terezinha, Santo André/SP, CEP 09210-580

Bloco L, 3ºAndar, Fone (11) 3356-7617

iniciacao@ufabc.edu.br

Relatório Final de Iniciação Científica referente ao Edital: 03/2019

Nome do aluno: Henrique Guimarães Coutinho.

Assinatura do aluno:

Nome do orientador: Cesar Monzu Freire

Assinatura do orientador:

Título do projeto: Caracterização de túneis de vento e correlação entre a velocidade de escoamento dentro da seção de teste e a frequência de rotação do motor do equipamento.

Palavras-chave do projeto: Escoamento, fluido, rotação e velocidade.

Área do conhecimento do projeto: Engenharia Mecânica com ênfase em Projetos de Máquinas e Fenômenos de Transporte

Bolsista: Sim. A modalidade é Ampla Concorrência.

São Bernardo do Campo - SP

27 de agosto de 2020

Sumário

Resumo

O presente trabalho visou estudar e analisar qual é a relação entre o escoamento de ar no interior de um túnel de vento e a frequência de rotação de seu motor. O projeto se insere no contexto da demanda dos grupos de pesquisa da Universidade Federal do ABC (UFABC) que realiza experimentos no túnel de vento, porém, hoje esses experimentos dependem exclusivamente do uso das sondas de Pitot como medidor de velocidade do escoamento dentro da seção de testes do túnel. O projeto em questão propôs o desenvolvimento de um sensor com uma resistência fotossensível que permitiria medir a frequência de rotação do motor do túnel de vento e conhecer a relação desta frequência com o escoamento de fluido para estudos futuros. No entanto, o primeiro sensor criado não foi capaz de fornecer valores de frequência de rotação amplos o suficiente para a implementação no túnel de vento. Nesse contexto, visou-se a atualização da rotina para Arduino para melhor precisão de medidas e, também, estudar novos receptores e módulos para a leitura da rotação de um objeto em movimento oscilatório. Nenhuma das peças utilizadas substituíram o LDR de forma eficiente. Além disso, modelou-se um sistema com servomotor a fim de analisar a amplitude de funcionamento da resistência dependente de luz. Após essa etapa, implantou-se um aplicativo simulador de osciloscópio para observar o comportamento das leituras mais precisamente. Seguidamente, o sensor com a resistência elétrica fotossensível (LDR) foi estudado através de sua curva de resposta e foi possível aferir o intervalo de frequência para o qual funciona – para a voltagem de 2,80V, o sensor possui resposta que pode atingir até 9000,0 RPM. O sensor óptico foi então implantado em um miniventilador como forma de simular o rotor do túnel de vento, e sua rotação foi aferida. Uma vez implantado o sensor no laboratório, seria possível comparar os dados retornados de frequência com a velocidade de escoamento do ar dentro da seção de teste do túnel. Os dados medidos seriam muito importantes para atividades futuras no laboratório, tais como o controle de velocidade do túnel e também medições automáticas, ainda que indiretas, da velocidade de escoamento. No entanto, devido a pandemia da covid-19, essa última etapa não pôde ser concluída.

1 Introdução

1.1 Motivação e contexto

Na contemporaneidade, surgiram diversos debates acerca do desenvolvimento científico e suas relações com os aspectos sociais de um país. Nesse contexto, emerge o questionamento de quanto um setor científico bem desenvolvido impacta diretamente na economia de um país. Diante dessa problemática, é nítido, portanto, que países que direcionaram partes de seus orçamentos de desenvolvimento para o setor aeroespacial ganham notoriedade em âmbito internacional. Como exemplo, é possível citar o investimento pesado no setor pela União Soviética e Estados Unidos durante a Guerra Fria (1945-1991). Na briga pela hegemonia global, as duas maiores potências da época desenvolveram durante anos novas tecnologias para o setor aeroespacial como forma de demonstrar sua superioridade científica.

Passados quase 30 anos do fim da Guerra Fria, a corrida espacial deu lugar ao desenvolvimento de novas tecnologias, como satélites, novos foguetes e aeronaves mais modernas. O investimento constante se faz necessário para que novas descobertas e pesquisas ainda sejam feitas, como no caso dos projetos desenvolvidos na Universidade Federal do ABC (UFABC).

Para as pesquisas, faz-se necessário o uso diversos aparatos que permitam medir, em laboratório, comportamentos de estruturas aeroespaciais em diferentes tipos de interação com o meio externo, de forma a testar comportamentos e inferir dados que terão influência na efetiva construção de um transporte aeroespacial. Nesse contexto, um dos equipamentos de maior importância para tais medições é o Túnel de Vento. O equipamento possibilita criar um escoamento de fluido – nesse caso, o ar – que permite recriar diversas situações onde estruturas aeronáuticas poderiam se encontrar. Ele também é fundamental para promover análises comparativas, em escala, do que aconteceria, de fato, com uma estrutura aeroespacial de grandes escalas nas mesmas condições.

A UFABC possui um túnel de vento disponibilizado aos discentes e docentes para uso em estudos da instituição. O mesmo possui, inclusive, um certo protagonismo nos estudos de Interações Fluido-Estrutura na área da Engenharia Aeroespacial. A velocidade do escoamento médio, dentro da seção de teste do túnel, é medida por intermédio de sondas de Pitot. Assume-se, ainda, que uma determinada frequência de rotação do motor, implica, necessariamente, em uma única e bem definida velocidade de escoamento do fluido. No entanto, para velocidades de escoamento muito grandes a precisão de valores de velocidade fornecidos pelas sondas Pitot diminuem, uma vez que a medição dos tubos se dá em relação à altura de um fluido frente a uma tabela de valores: a calibração do equipamento acontece com base nessas condições limitadas. Nesse cenário é que se enquadra o projeto em questão: a pergunta na qual se deu o desenvolvimento do mesmo é o questionamento de que se, para uma frequência do motor, existe uma única e definida velocidade de escoamento resultante dentro do aparato. O presente projeto se valeu, portanto, de um emissor de um feixe de laser e de um sensor fotossensível, assim como de um microcontrolador Arduino, a fim de contabilizar e inferir a frequência de rotação do motor.

O sensor foi criado, porém observou-se que a resistência utilizada não possuía uma resposta coerente para a aferição da frequência de rotação do motor. Tendo em vista esse impasse, buscou-se analisar, então, a velocidade de resposta do sensor criado com a resistência elétrica fotossensível (LDR) a fim de determinar a sua amplitude de funcionamento. Após isso, estudou-se e buscou-se outros sensores que possuíssem uma curva de resposta mais eficiente

para possível substituição ao LDR no sensor de medição de frequência de rotação do motor. Para essa finalidade, a rotina de calibração para Arduino foi atualizada e personalizada para cada receptor utilizado. Posteriormente, foi montado um sistema com um ventilador USB e diversos testes foram realizados, de maneira análoga à implementação no túnel de vento da UFABC, para observar o comportamento de diversos sensores na função de aferir, indiretamente, a frequência de rotação de um rotor. Ademais, foram realizados testes com um servomotor, de forma que o servo funcionasse igual a uma pá, interferindo no funcionamento dos sensores em frequências estipuladas em programação a fim de observar o mínimo de rotações que os sensores eram capazes de retornar valores fidedignos. Após essas etapas, buscou, ainda, implantar um aplicativo de osciloscópio para analisar mais detalhadamente o comportamento dos sensores na medição de frequências de rotação. Dessa forma, foi possível analisar o máximo de rotação para o qual o LDR retorna valores fidedignos e modelar a estratégia mais adequada para implementação no túnel de vento. No entanto, devido à suspensão das atividades presenciais devido à pandemia da covid-19, essa última etapa não pôde ser concluída.

1.2 Objetivos

O objetivo geral do trabalho de pesquisa em questão consistiu em compreender a relação estabelecida entre a velocidade de escoamento e a frequência de rotação do motor que gera dada grandeza dentro do túnel de vento.

Em termos específicos, o objetivo do trabalho consistiu em um projeto de desenvolvimento de um sensor a laser que possibilitaria medir a frequência de rotação do motor do túnel de vento de forma não invasiva. Uma vez coletados tais dados, visava-se relacioná-los com a velocidade de escoamento de fluido dentro do aparato em questão, por intermédio da aplicação de uma metodologia específica.

Objetivou-se, ainda, oferecer ao aluno ingressante a possibilidade de obter contato com o desenvolvimento de um produto, por intermédio da visualização e familiarização das etapas de concepção, projeto e efetiva construção que constituem o processo. Da mesma maneira, visou-se antecipar o contato do aluno com equipamentos, como o Túnel de Vento, Tubos de Pitot e microprocessadores Arduino, que são muito comumente utilizados por estudantes da engenharia. Porém, geralmente, o contato com os mesmos dá-se apenas em disciplinas mais avançadas do curso. Devido a pandemia da covid-19, os objetivos citados acima foram parcialmente atingidos dada as metas estipuladas pelo cronograma.

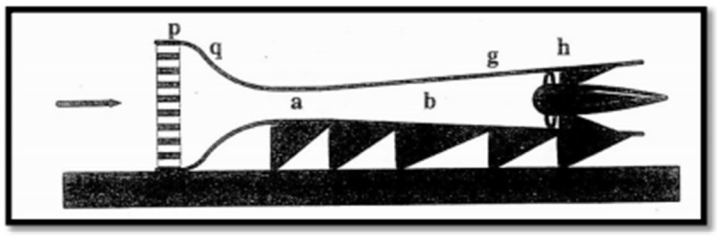
2 Fundamentação teórica

Na primeira etapa do projeto, visou-se o estudo e a pesquisa acerca dos elementos que fariam parte do desenvolvimento do projeto. Dessa forma, foram abordados tópicos relacionados a ventiladores, propulsores, escoamento de fluido, programação e criação de circuitos elétricos. Além disso, pesquisou-se sobre projetos de sensores com Arduino, especialmente os que utilizavam sensores de luminosidade como base.

2.1. Túnel de vento

Os túneis de vento são equipamentos empregados no estudo de aerodinâmica nos quais, basicamente, o ar circula de uma extremidade a outra de uma seção de teste, impulsionado por hélices, onde pode ser posta uma certa estrutura aeronáutica que se deseja testar. A funcionalidade do equipamento faz-se valer do conceito da física de referência: ao invés de permitir que a estrutura se mova pelo ar, faz-se com que o ar mova-se ao redor do modelo. Dessa maneira, mesmo com a estrutura estática, é possível apresentar os mesmos efeitos que seriam observadas no modelo em voo. Na figura 1 está apresentada uma figura esquematizada de um túnel de vento.

Figura 1 - Túnel de vento de sucção



Fonte: Barlow et al., 1999.

Esses instrumentos são usados para diversas finalidades no estudo de aerodinâmica em estruturas aeronáuticas, como para visualizar o escoamento e melhorar o entendimento acerca do mesmo, para medir forças e momentos na estrutura com a finalidade de definir mecânica de voo e desempenho, para medir a vibração das estruturas em determinadas condições, entre outros. O túnel de vento é a ferramenta com maior fidelidade para observar comportamentos e obter dados relativos ao comportamento de estruturas aeronáuticas em voo (Sorbilli, Rodrigo), fato esse que aumenta a confiabilidade de um projeto que passe por testes no presente equipamento.

Vale ressaltar, também, que dada a incapacidade de se testar estruturas aeronáuticas de grandes dimensões em um túnel de vento fechado, salvo exceções, trabalha-se comumente, nesses aparatos, com modelos em escala das mesmas a fim de observar o comportamento. Para fins de correção, dois parâmetros aeronáuticos são usados: o Número de Mach e o Número de Reynolds. Em essência, quanto mais similar a condições reais de voo os números de Mach e Reynolds obtidos no aparato forem, maior efeito de confiabilidade os testes no túnel de vento terão.

$$\mathbf{R} = \boldsymbol{VD\rho/\mu} \qquad M = \frac{u}{a}.$$

Sendo, na equação de Reynolds, ρ: densidade do fluido (quilograma por metro cúbico); V: velocidade média do fluido; D: longitude característica do fluido/diâmetro para o fluxo no tubo e μ: viscosidade dinâmica do fluido [26].

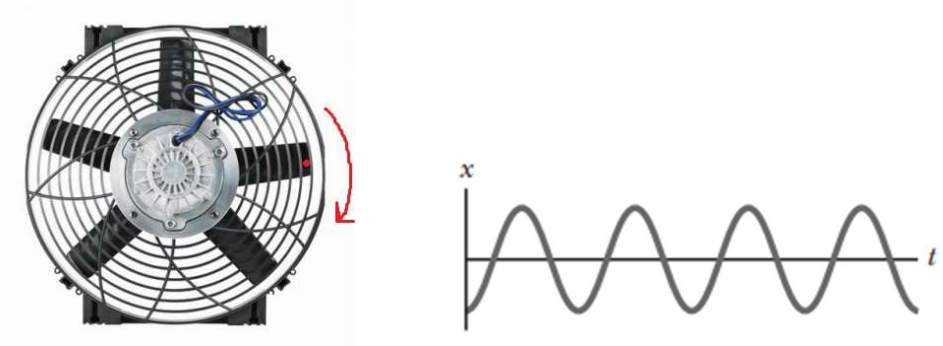
Na equação de Mach, M: número de Mach; υ: velocidade do fluido; a: velocidade do som local [27].

2.2 Movimento Circular

Ao iniciar-se o projeto, os primeiros tópicos de pesquisa a serem abordados foram os elementos que compõem um movimento circular, de forma a se entender com clareza como ocorre o cálculo da frequência de rotação de um motor. Após esse contato inicial, visou-se buscar eventuais correlações que poderiam ser estudadas para se obter, como resultado final, a frequência de rotação de um objeto giratório – nesse caso, o propulsor do túnel de vento.

Para calcular a frequência de rotação de um objeto giratório, utiliza-se princípios de ondulatória. Tomando um ponto na extremidade de uma das pás do ventilador, observa-se que o movimento de rotação da pá descreve um movimento ondulatório do eixo y de rotação do ventilador em função do tempo, como demonstrado nas figuras 2 e 3.

Figura 2: Figura de um ventilador, adaptada. **Figura 3:** Imagem de uma partícula em movimento oscilatório.



Fonte figura 2: *Thermatic Fan History, Innovation and Wind Tunnel Testing* at Davies Craig 2019. Adaptada pelo autor. **Fonte figura 3:** Serway, R. A.; Jewett Jr., J. W. Princípios de Física, Volume II.

Tendo em vista que o período é o tempo necessário para que uma partícula complete uma oscilação completa de seu movimento, obtemos, a partir do estudo da onda, a frequência de rotação baseando-se na seguinte equação, que relaciona o período da rotação com a frequência de oscilação, onde F = Frequência de oscilação (em Hz, no sistema internacional) e T = Período de oscilação (em segundos, no sistema internacional) [12]:

$$f = \frac{1}{T}$$

2.3 Circuitos Elétricos

Foram estudados, também, quais elementos compõem um circuito elétrico e como se dá a criação de um circuito, com revisão de fundamentos como resistência, corrente e tensão elétrica.

Corrente elétrica sempre existe quando houver um fluxo líquido de cargas perpendicular a uma seção transversal de um condutor. O conceito de resistência elétrica parte da análise do fluxo de cargas dado uma diferença de potencial. Em um condutor com seção transversal uniforme a variação de potencial é proporcional ao valor do campo elétrico presente. Dessa forma, quando uma diferença de potencial é aplicada nas extremidades do condutor, a corrente será proporcional a tensão aplicada. Essa proporcionalidade pode ser demonstrada pela equação que apresenta a resistência do condutor:

$$R \equiv \frac{\Delta V}{I}$$

Onde R = Resistência do condutor (em ohms, no Sistema Internacional); ΔV = Tensão (em Volts, no Sistema Internacional); I = Intensidade da corrente elétrica (em Ampere, no Sistema Internacional).

Além disso, tem-se que um resistor é um elemento de um circuito que fornece uma resistência específica ao circuito elétrico.

Ademais, circuitos podem ter elementos associados em série ou em paralelo. O conhecimento das peculiaridades de cada tipo de associação é de extrema importância para a criação de um circuito.

Na associação em série a mesma quantidade de carga passa pelos elementos do circuito em um determinado intervalo de tempo. Portanto, a corrente que flui sobre essa associação é a mesma para todos os componentes. A diferença de potencial, em contrapartida, divide-se entre os integrantes do sistema. Dessa maneira, ΔV é a soma das tensões em cada elemento. Por último, a resistência equivalente do circuito é a soma das resistências individuais de cada componente.

Em segundo lugar, na associação em paralelo ΔV é numericamente igual a cada tensão individual. Já em relação a corrente, ela é a somatória de todas as correntes que se dividem em um nó. Nó é qualquer ponto em um circuito no qual uma corrente pode se dividir. [11]

Após a revisão de tais conceitos, foi possível a criação dos circuitos elétricos utilizados para o sensor.

2.4 Hidrostática e Hidrodinâmica

Com o objetivo de entender como acontece o escoamento de fluidos, foram revisados tópicos da Hidrostática e Hidrodinâmica. Esses conceitos foram fundamentais para o entendimento da funcionalidade de uma sonda de Pitot e de como se dá sua leitura, e posterior determinação da velocidade de escoamento de fluido dentro do túnel de vento.

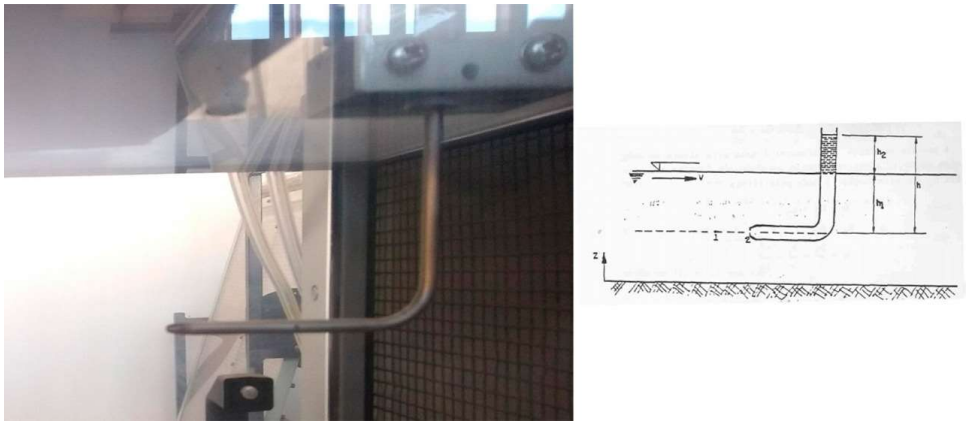
Para o estudo do escoamento de um fluido foi retomado um dos princípios físicos mais importantes da hidrodinâmica, desenvolvido pelo matemático Daniel Bernoulli. O princípio de Bernoulli afirma que, em condições de um fluxo constante de fluido, quando a seção transversal da estrutura por onde o fluxo ocorre diminui, a velocidade nessa seção aumenta. A partir desse aumento de velocidade, a pressão na mesma seção transversal diminui, dado que a velocidade e pressão configuram um par inversamente proporcional. A situação é explícita pela equação a seguir [12].

$$P + \frac{1}{2}\rho v^2 + \rho g y = \text{constante}$$

Sendo P: pressão em um dado ponto; ρ: densidade do líquido; v: velocidade de escoamento e y: altura relativa.

Um dos exemplos do emprego de tal princípio são os tubos de Pitot. Esses aparatos são equipamentos empregados para medir velocidades, principalmente referentes ao escoamento de fluidos, tendo grande importância na área da aviação para medição da velocidade do ar. Dessa forma, por mais que seja impossível determinar o valor de uma velocidade em um ponto - visto que essa é uma grandeza dependente de um deslocamento -, pode-se obter a velocidade média em certo volume ou área.

Figura 4 - Tubo de Pitot acoplado ao túnel de vento da UFABC e desenho teórico de Tubo de Pitot em canal aberto.



Fontes: Compilado de fotografia do próprio autor e desenho teórico de Tubo de Pitot, retirado de <https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/1902439/mod_resource/content/1/Experiencia_Tubo_de_Pitot.pdf>.

Para a finalidade de se determinar a velocidade de escoamento do ar, o tubo de Pitot utiliza o método de cálculo a partir da medição da diferença entre a pressão total e a estática, criado por Henri Pitot em 1732. Sendo a pressão estática a pressão medida na entrada do primeiro tubo, e a pressão total (ou pressão de estagnação) a soma entre a pressão estática e a pressão dinâmica, o tubo de Pitot opera fazendo-se valer das duas seguintes equações:

$$p_t = p_s + \left(\frac{\rho V^2}{2}\right) \qquad V = \sqrt{\frac{2(p_t - p_s)}{\rho}}$$

Sendo Pt: pressão total ou de estagnação (Pascal); Ps: pressão estática (Pascal); V: velocidade do escoamento (metro por segundo); e ρ: densidade do fluido (quilograma por metro cúbico) [12].

Dessa maneira, o aparato consegue fornecer a velocidade de escoamento de forma eficiente.

2.5 Programação em C/C++ para Arduino

Para a implementação do código na plataforma foi necessário o estudo dos elementos componentes da linguagem C/C++ e também de como ocorre o *upload* do código no Arduino. Para realizar o upload do código no microcontrolador é necessária a utilização do *Software* do Arduino (IDE) [15].

O código a ser exportado para o Arduino deve estar em linguagem C/C++ e ter um formato específico e básico de estrutura a ser seguido. O código é dividido em duas principais partes: uma estrutura *void setup* para a implementação da configuração do circuito e uma estrutura *void loop* que rodará o código em seu interior enquanto o Arduino estiver conectado em uma fonte de energia [16].

Além disso, algumas características básicas de programação em C++ foram revisadas. Primeiramente, revisou-se os tipos de variáveis que existem nessa linguagem. Em outra instância, foi necessário o conhecimento acerca dos operadores de comparação utilizados pela linguagem. Em último lugar, foram revisados conceitos de estrutura condicional na programação.

A partir da revisão desses conceitos, a programação para o Arduino pôde ser implantada de forma eficiente e organizada [14].

3 Metodologia

3.1 Materiais e Métodos

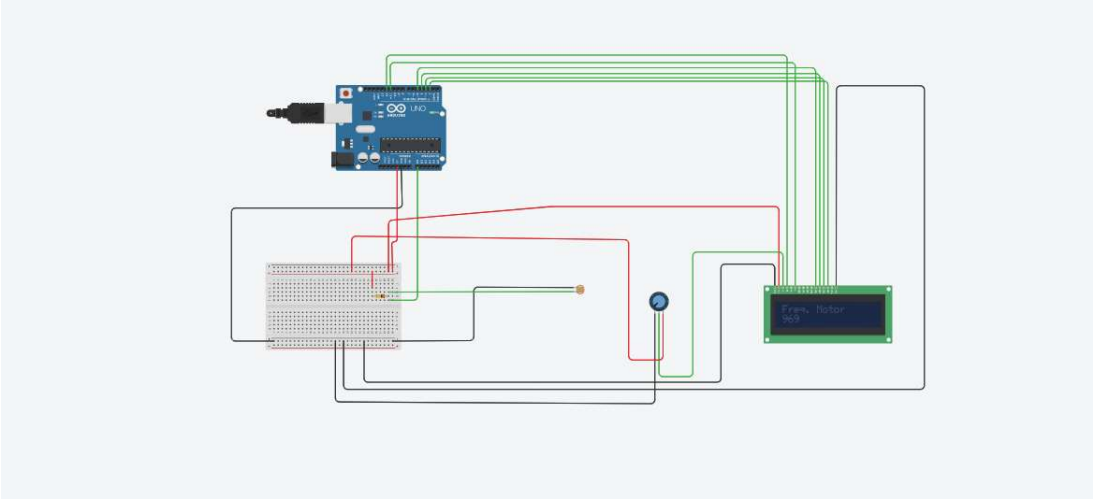
A primeira etapa consistiu na revisão bibliográfica dos temas envolvidos no projeto, que consistem em fundamentos da mecânica de fluidos e do subcampo aerodinâmica, também como temas que abrangem propulsores, bombas e ventiladores. Também foram revisados tópicos da eletrônica, para o desenvolvimento do sensor.

A segunda, por sua vez, consistiu na familiarização do discente com os equipamentos com os quais o mesmo teve contato durante o desenvolvimento da pesquisa, sendo esses o túnel de vento, o microcontrolador Arduino, a resistência elétrica fotossensível (LDR) e o tubo de Pitot. Dessa forma, entendeu-se como administrar e manusear tais equipamentos, da mesma forma que habituou-se à interpretação de seus dados.

A terceira etapa consistiu no efetivo projeto e implementação do circuito a laser com LDR. O sistema funcionaria, em termos ideais, da seguinte forma: para determinar a frequência de rotação do motor, um feixe de laser seria posto *a posteriori* do ventilador do túnel de vento, de forma não invasiva, ou seja, que não implicasse em modificações fatais do escoamento de ar dentro da seção de teste, e direcionado para outra extremidade, de forma com que as pás do ventilador interrompessem o feixe de laser. O emissor de feixe a laser estaria apontado para o componente óptico que receberia o feixe de luz em sua superfície nos intervalos de lacuna entre a rotação das hélices do ventilador, de forma que o componente apresente valores específicos quando o feixe de luz for interrompido por alguma das pás do motor. Diante do exposto, o microcontrolador Arduino, acoplado ao sensor conseguiria, dessa forma, contar quantas vezes o feixe de luz foi interrompido: estabelecendo-se, então, uma relação com a quantidade de pás presentes no motor, seria capaz de determinar a frequência de rotação do mesmo.

O circuito foi criado *a priori* em uma plataforma de simulação, evitando assim possíveis queimas de equipamentos. A plataforma on-line utilizada foi o *Tinkercad*, da *Autodesk*. Na mesma foi possível a criação da primeira versão do circuito, assim como a simulação do funcionamento do mesmo – a plataforma consegue rodar o código de programação para o Arduino e simular seu comportamento. Como demonstrado na figura 5, foram adicionados à plataforma um Arduino UNO R3, articulado a um *protoboard* de 400 pontos, um resistor de 10kΩ, uma resistência LDR e um LCD, por sua vez conectado a um potenciômetro de 100Ω para controle de seu brilho. Todas as fiações foram criadas utilizando-se cores que representavam o funcionamento das ligações. A fiação vermelha representa uma fiação energizada. O fio preto, uma fiação de terra. As demais cores estão associadas a conexões que não se enquadram nessas duas características. Nessa etapa foi possível testar o circuito para retorno, no LCD, dos valores de resistência captados pelo LDR.

Figura 5 – Circuito preliminar criado no *Tinkercad*.



Fonte: Próprio autor. Imagem exportada da plataforma *Tinkercad*.

Ainda no circuito de teste foi criada uma programação teste, que posteriormente foi utilizada para a calibração do sistema. O objetivo dessa programação é retornar os valores de resistência que o sensor LDR está lendo e apresentá-los na tela LCD. Assim, é possível saber os valores de resistência que abrangem a luminosidade ambiente, o momento em que o sensor é barrado por algum objeto e também o valor referente ao momento em que o sensor é iluminado pelo laser. O código de calibração está, portanto, apresentado na figura 6.

Figura 6– Código de Calibração do sensor.

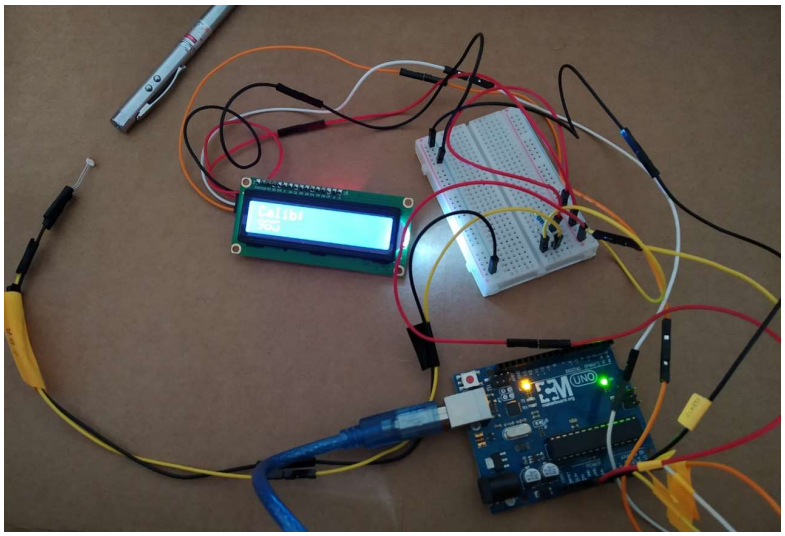
c > Users > henri > Documents > Estudos - UFABC > PDPD > Códigos VSCode > Calib.cpp > loop()

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

LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 16, 2);

int ldrPin = 0;
int ldrValor = 0;

void setup()
{
    pinMode(ldrPin, OUTPUT);
    Serial.begin(9600);
    lcd.init();
    lcd.backlight();

}

void loop()
{
    ldrValor = analogRead(ldrPin);
    if (ldrValor<=600)
    {
        lcd.clear();
        lcd.setCursor(0,0);
        lcd.print("Calib");
        lcd.setCursor(0,1);
        lcd.print(ldrValor);
        delay(500);
    }
    else
    {
        lcd.clear();
        lcd.setCursor(0,0);
        lcd.print("Calib");
        lcd.setCursor(0,1);
        lcd.print(ldrValor);
        delay(500);
    }
```

Fonte: Próprio autor. Captura de tela do aplicativo *Microsoft Visual Studio Code*.

Após os testes na plataforma de simulação, foi possível transplantar o circuito para uma plataforma real. Foram utilizados, então, um Arduino UNO R3 ATMEGA328 com cabo USB B4, um resistor de 10kΩ ¼ 10PCS, um LDR Sensor de Luminosidade 5mm de 10kΩ, um LCD 16x2 azul acoplado com um módulo I2C. A montagem do circuito pode ser visualizada na figura 7.

Figura 7 - Circuito criado.

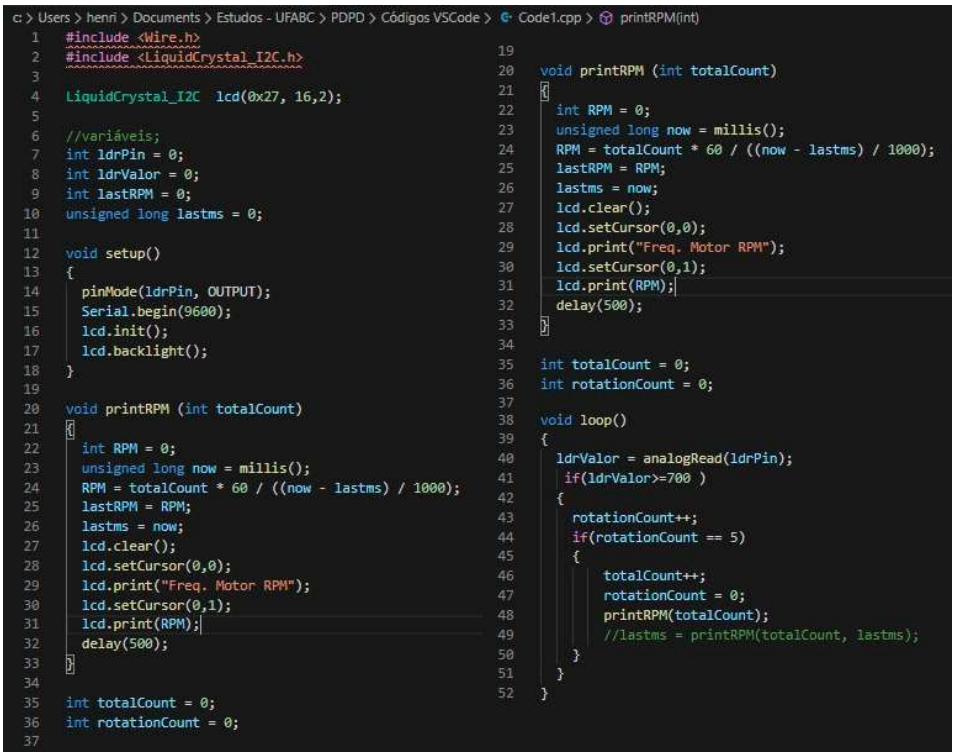


Fonte: Fotografia do próprio autor.

O uso do módulo I2C na tela LCD diminui o número de conexões necessárias ao seu funcionamento, assim como dispensa o uso de um potenciômetro para controle do brilho da tela, uma vez que já possui um acoplado. [18] Todos os componentes foram conectados com o uso de cabos macho-fêmea e macho-macho em ligações diretas. Uma caneta laser comum foi utilizada para a iluminação do sensor.

Após a criação do circuito foram realizados testes preliminares para visualização da funcionalidade do sensor. Foi visualizado que o sensor retornava valores oscilatórios para cada estado de excitação. Foi criado, então, o código para o cálculo de Rotações por Minuto (RPM), a partir dos valores retornados pelo sensor. O código está demonstrado na figura 8.

Figura 8 – Código para Cálculo de Frequência a partir dos valores retornados pelo LDR



```
c: > Users > henri > Documents > Estudos - UFABC > PDPD > Códigos VSCode > Code1.cpp > printRPM(int)
#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>

LiquidCrystal_I2C  lcd(0x27, 16,2);

//variáveis;
int ldrPin = 0;
int ldrValor = 0;
int lastRPM = 0;
unsigned long lastms = 0;

void setup()
{
  pinMode(ldrPin, OUTPUT);
  Serial.begin(9600);
  lcd.init();
  lcd.backlight();
}

void printRPM (int totalCount)
{
  int RPM = 0;
  unsigned long now = millis();
  RPM = totalCount * 60 / ((now - lastms) / 1000);
  lastRPM = RPM;
  lastms = now;
  lcd.clear();
  lcd.setCursor(0,0);
  lcd.print("Freq. Motor RPM");
  lcd.setCursor(0,1);
  lcd.print(RPM);
  delay(500);
}

int totalCount = 0;
int rotationCount = 0;

void printRPM (int totalCount)
{
  int RPM = 0;
  unsigned long now = millis();
  RPM = totalCount * 60 / ((now - lastms) / 1000);
  lastRPM = RPM;
  lastms = now;
  lcd.clear();
  lcd.setCursor(0,0);
  lcd.print("Freq. Motor RPM");
  lcd.setCursor(0,1);
  lcd.print(RPM);
  delay(500);
}

int totalCount = 0;
int rotationCount = 0;

void loop()
{
  ldrValor = analogRead(ldrPin);
   if(ldrValor>=700 )
  {
    rotationCount++;
    if(rotationCount == 5)
    {
        totalCount++;
        rotationCount = 0;
        printRPM(totalCount);
        //lastms = printRPM(totalCount, lastms);
    }
  }
}
```

Fonte: Próprio autor. Captura de tela do aplicativo *Microsoft Visual Studio Code*.

Após a criação do código, foram realizados diversos testes para verificar a funcionalidade do sensor para retorno de valores de RPM. Para isso, foi implantado o circuito em um ventilador comum. A partir da análise dos valores de RPM retornados, observou-se uma incongruência: os valores retornados oscilavam de valores baixos a valores altos. Tendo em vista esse impasse, a metodologia se deu, a partir desse momento, visando o estudo do sensor já criado e de sensores que poderiam posteriormente substituir o sensor fotossensível para que se conseguisse aferir o valor de frequência de rotação do motor do túnel de vento.

Então, foi montado um segundo sistema para testes. Primeiramente, o código para o cálculo do RPM foi atualizado, a fim de melhorar a precisão de suas medições, e incluir o cálculo também de rotações por segundo do aparato - Hz. O novo código, agora, foca em contabilizar o tempo necessário para o sensor mudar de seu estado escuro para seu estado claro, ou vice-versa. Diante do exposto, o microcontrolador Arduino estaria acoplado ao sensor e, assim, seria capaz de contar o tempo necessário para o sensor mudar de estado, estabelecendo-se, então, uma relação com a quantidade de pás presentes em um motor, seria possível determinar a frequência de rotação do mesmo. Em segunda instância, a biblioteca *ElapsedMillis* foi implementada para facilitar a tomada de tempo para a aferição do período de rotação - devido ao fato de que possibilita utilizar uma variável que aumenta de valor conforme o tempo corre, como um contador simples, em milissegundos. Dessa maneira, é possível realizar atividades no código simultaneamente à contagem de tempo [20]. O código está expresso na figura 9. Também houve a inserção do Módulo Laser 5v Arduino 5mW para a criação do feixe a laser, dispensando a caneta a laser utilizada anteriormente, dependente de pilhas para seu

funcionamento. Além dessas modificações, um LED verde foi implantado de forma a oferecer um retorno visual do funcionamento do sensor. Um resistor de 680Ω foi implantado para que o LED não queimasse ao ser conectado à porta digital 10 do controlador.

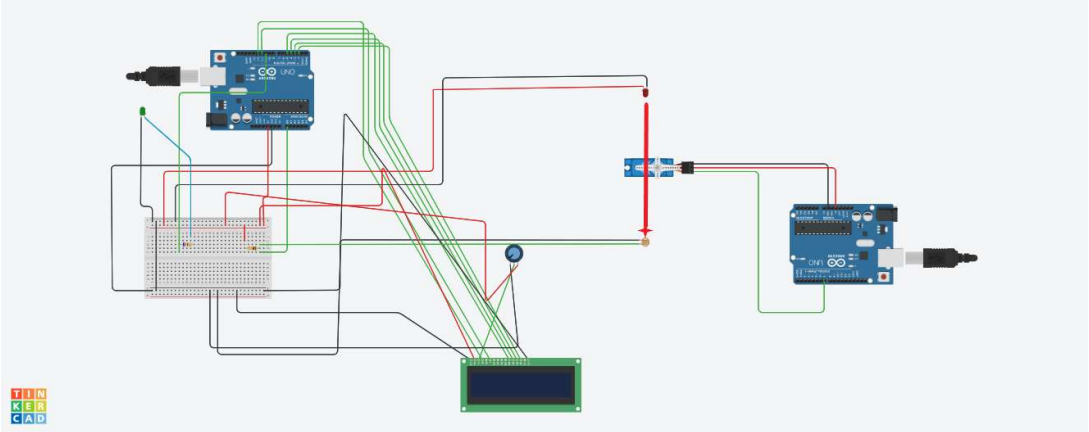
Figuras 9 – Código atualizado para cálculo de RPM e Hz.

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



LiquidCrystal_I2C lcd (0x27, 16, 2);

///inicializar variáveis globais
int ledPin = 10;
int ldrPin = 0;
int ldrValor = 0;
boolean luz;

void setup()
{
    pinMode(ldrPin, OUTPUT);
    Serial.begin(9600);
    lcd.init();
    lcd.backlight();
    lcd.print("Iniciando...");
    digitalWrite(ledPin, HIGH);
    delay(1000);
    digitalWrite(ledPin, LOW);
    lcd.clear();
}

void loop()
{
   float hz, rpm;
   hz = CalcHz();
   rpm = hz * 60.00;
   //lcd.clear();
   //lcd.setCursor(0,0);
   //lcd.print(hz);
   //delay(500);
   printar_tela(rpm, hz);
   printar_lcd(rpm, hz);
}

void printar_lcd(float rpm, float hz)
{
    lcd.clear();
    lcd.setCursor(0,0);
    lcd.print("RPM");
    lcd.setCursor(0,1);
    lcd.print(rpm);
    lcd.setCursor(8,0);
    lcd.print("HZ");
    lcd.setCursor(8,1);
    lcd.print(hz);
    delay(400); //pra ser legível.
}

void printar_tela(float rpm, float hz)
{
    Serial.print("RPM Count: ");
    Serial.println(rpm);
    Serial.print("Hz Count: ");
    Serial.println(hz);
    Serial.print("\n");
}

float CalcHz()
{
    float periodo;
    float freqHz = 0.00;

    ldrValor = analogRead(ldrPin);

////parte especifica pra LDR/////

    if(ldrValor<200)
    {
    luz = true;
    }
    else
    {
    luz = false;
    }

/////parte geral/////

    if ((luz == true))
    {
        digitalWrite(ledPin, HIGH);
        elapsedMillis tempoPercorrido; //declarando pra inicar a contagem;
        while(ldrValor<200)
        {
            ldrValor = analogRead(ldrPin);
        }
        periodo = tempoPercorrido / 1000.00; //valor retornado em seg
        tempoPercorrido = 0;
    }

    else
    {
        digitalWrite(ledPin, HIGH);
        elapsedMillis tempoPercorrido; //declarando pra inicar a contagem;
        while(ldrValor>400)
        {
            ldrValor = analogRead(ldrPin);
        }
        periodo = tempoPercorrido / 1000.00;  //valor retornado em seg
        tempoPercorrido = 0;
    }
    digitalWrite(ledPin, LOW);
    freqHz = 1.00/(periodo*3.00); //3 -- é o número de pás do ventilador!!//
    return freqHz;
}
```

Fonte: Próprio autor. Captura de tela do aplicativo *Microsoft Visual Studio Code*.

Foi implantado, portanto, um segundo Arduino UNO R3 independente acoplado a um Micro Servo Motor SG92R *TowerPro*. O sistema completo está esquematizado e apresentado na figura 10.

Figura 10 – Esquematização do sistema completo na plataforma *Tinkercad.*



Fonte: Próprio autor. Imagem exportada da plataforma *Tinkercad*.

Além do mais, nesse microcontrolador foi rodada uma rotina a fim de fazer com que o servo funcionasse como uma pá de rotor. Então, foi implantado um código no Arduino acoplado ao servo de forma que ele retornasse a frequência de rotação do motor na tela do computador: ao alterar-se o valor de demora para o motor realizar a transição entre uma posição e outra, alterava-se, também, a frequência de rotação que o movimento do motor representava. Foram estipuladas 5 frequências para o funcionamento do servomotor. Os valores de *delay* foram alterados no código do Arduino que controlava o servomotor, através da inserção das medidas de 5, 10, 15, 20 e 25 milissegundos para essa grandeza. Cada uma dessas configurações retornou uma frequência específica que foi apresentada na tela do computador. O código utilizado para o movimento do servomotor está expresso na figura 11.

Figura 11 - Código utilizado para a movimentação do Micro Servo.

```
#include <Servo.h>


Servo servo;
int angulo = 0;

void setup()
{
  servo.attach(9);
  Serial.begin(9600);
  servo.write(angulo);
}

void loop()
  {
  unsigned long  time, time2 = 0;

  for(int pos = 0; pos<180; pos++)
    {
      servo.write(pos);
      delay(20); //valor variavel
    }
  time = millis();
  Serial.println("\n");
  Serial.println(time);
  delay(20); //valor variavel
    for(int pos = 180; pos>0; pos--)
    {
      servo.write(pos);
      delay(20); //valor variavel.
    }
  time2 = millis();
  Serial.println(time2);
  //periodo=time2-time;
  Serial.print("PERIODO (s): ");
  float periodo = ((time2-time))/1000.00;
  //Serial.print(time2-time);
  Serial.println(periodo);
 // Serial.println("\n");
  float hz = (1.00)/(periodo*2.00); //duas pás
  Serial.print("hz: ");
  Serial.println(hz);
  float rpm = hz * 60.00;
  Serial.print("rpm: ");
  Serial.println(rpm);
  }
```

Fonte: Próprio autor. Captura de tela do aplicativo *Microsoft Visual Studio Code*.

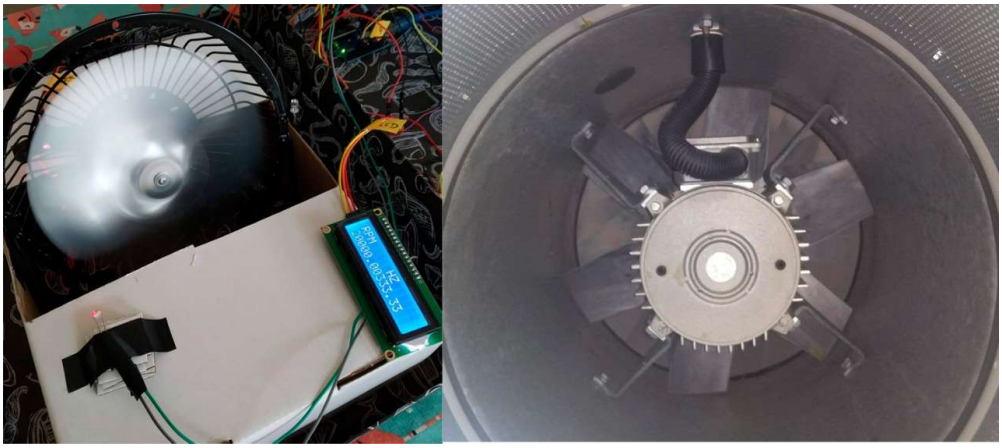
Para a quarta etapa do desenvolvimento da pesquisa, diversos testes foram realizados com o sensor utilizando o LDR com o servomotor de frequência de rotação definida, consistente e conhecida. Foram tomados 10 dados de aferição de frequência para cada uma das 5 configurações de funcionamento do servo.

Para a quinta etapa, foram testados dispositivos que poderiam substituir o LDR para a aferição da frequência de rotação. Foram testados ao todo 5 novos receptores: LED Difuso 5mm, LED Alto Brilho 5mm Verde, Receptor Infravermelho IR, Sensor de Obstáculos Reflexivo Infravermelho e Sensor de Distância Ultrassônico HC-SR04. O código de calibração foi personalizado para adequar-se a cada sensor e observar o retorno de suas medições para o Arduino. Os sensores foram posicionados à frente do feixe a laser e os valores retornados foram identificados. Logo em seguida, o feixe a laser foi interrompido e os valores retornados foram novamente visualizados. Nenhum dos novos sensores testados responderam de forma proporcional à exposição ao laser. No entanto, o sensor de distância ultrassônico e o sensor de obstáculos infravermelho alteraram seus valores mediante a proximidade do objeto bloqueador do feixe a laser. Ademais, o teste com o sensor ultrassônico demonstrou que o mesmo necessitava de uma grande área próxima para reflexão de seu sinal ultrassônico para uma aferição precisa de distância, e o teste com o sensor de obstáculos infravermelho expôs que o mesmo necessitava de curtas distâncias para seu pleno funcionamento. Por isso, a utilização do módulo por ultrassom para o propósito de medir a rotação da pá do servo foi descartada, tendo em vista sua pequena escala, assim como para medir a rotação do rotor do túnel de vento, tendo em vista a grande distância que existiria entre o sensor e a pá. Em contrapartida, o módulo para avaliação de obstáculos por infravermelho demonstrou que necessitava de uma proximidade de cerca de 20cm para identificar um obstáculo. Então, esse sensor também foi descartado para uso no túnel de vento, porém mantido para testes com o servomotor, para critérios de comparação aos valores apresentados pelo LDR. Prosseguindo, foram realizados os mesmos testes submetidos ao LDR com o módulo de sensor de obstáculo IR. Novamente, portanto, foram realizadas 10 medições em cada frequência de funcionamento do servomotor.

A sexta fase da pesquisa foi, então, o tratamento estatístico dos dados retornados pelo sensor LDR e pelo sensor de infravermelho. Os resultados dessa etapa estão expostos e desenvolvidos na seção “Resultados e discussão dos resultados”.

A sétima etapa do desenvolvimento do trabalho consistiu na implementação do sistema para visualização da frequência de rotação de um motor. Devido a pandemia do vírus Sars-Cov-2, o sistema não pôde ser implementado diretamente no túnel de vento. Dessa maneira, foi necessário simular o aparato em escala. Um miniventilador USB 5+ ChipSce foi adaptado e implantado para a interrupção do feixe a laser. As grades dianteiras do equipamento foram retiradas para facilitar a passagem da luz. O sistema está demonstrado na imagem 12, a esquerda. A direita, está apresentado o rotor do túnel de vento da UFABC.

Figura 12 – Sistema adaptado com Mini Ventilador USB



Fonte: Fotografias do próprio autor.

O código de calibração foi rodado e o sensor LDR, calibrado de forma com que o avanço das pás em rotação não interferisse na contagem do giro. Após esse passo ser realizado para garantir a integralidade do sistema, o código para cálculo do RPM e Hz foi rodado e o ventilador, ligado. Foram coletados, por fim, 100 dados consecutivos de RPM retornados no sensor LCD. Analogamente, as mesmas etapas foram executadas utilizando o módulo reflexivo infravermelho. Coletados tais dados, passou-se à etapa oito de desenvolvimento, que consistiu no tratamento estatístico dessa centena de dados coletados. Novamente, os resultados dessa etapa estão expressos na seção “Resultados e discussão dos resultados”.

Após o tratamento estatístico dos dados, observou-se que os valores calculados com o LDR e com o Sensor de Obstáculo para a rotação do Mini Ventilador foram levemente discrepantes. A partir dessa verificação, buscou-se realizar novos testes para o estudo da rotação do ventilador e também procurou-se uma maneira de se aferir a rotação máxima capaz de contabilizar-se com o sensor LDR.

Considerando tais visualizações, modelou-se quatro novas etapas de pesquisa. Nas próximas etapas de pesquisa, foi inserido um novo método: foi utilizado um aplicativo de osciloscópio que funciona utilizando as portas analógicas do Arduíno como entrada de sinal. O osciloscópio é um aparato que permite medir sinais elétricos e apresentá-los graficamente através do percorrer do tempo. O gráfico é moldado de forma que o eixo X represente o tempo e o eixo Y a amplitude do sinal – correspondente à tensão fornecida à porta do aparelho [21]. Logo, foi implantado o aplicativo BegOscopio v1.5 desenvolvido por Rogério Bego. [22]. O aplicativo em questão possibilita que se utilize o Arduíno como um meio de leitura de sinais, e os sinais são expostos na tela do computador no aplicativo. Ademais, o aplicativo ainda é capaz de analisar as ondas expressas e retornar a frequência de oscilação dos valores. Para a funcionalidade do programa, uma rotina específica deve ser rodada no Arduino responsável pela coleta de informações. Essa rotina pode ser encontrada no arquivo disponibilizado em <https://www.instructables.com/id/Oscilloscope-Arduino-Processing/>, e é de autoria de Rogério Bego.

Para a nona etapa da pesquisa, o sistema foi calibrado e realizou-se, novamente, 10 medições com o servomotor em cada uma das 5 frequências já citadas utilizando o aplicativo em questão, analogamente ao que havia sido feito na quarta etapa de desenvolvimento do trabalho. As medições foram realizadas com o LDR e o Sensor de Reflexão Infravermelho, conectados ao Arduino através da porta analógica de número 0 (AO). A décima etapa consistiu

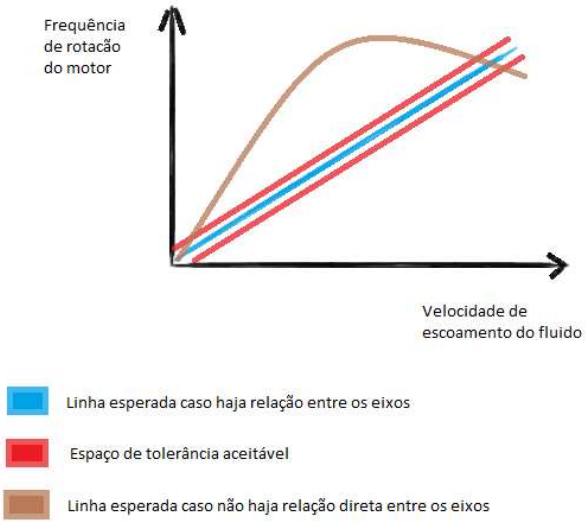
no tratamento estatístico dos dados obtidos e está desenvolvida na seção “Resultados e discussão dos resultados”.

A décima primeira etapa de progressão do trabalho consistiu na implementação do Arduino com o auxílio do programa osciloscópio no sistema com o miniventilador 5+ ChipSce, equivalentemente ao que havia sido executado na etapa sete de andamento do estudo. Os resultados utilizando o LDR e o sensor de proximidade foram sólidos e nada oscilatórios.

Na décima segunda, e penúltima etapa, focou-se em analisar a máxima amplitude de funcionamento do sensor LDR. A máxima frequência pode ser apresentada calculando-se o inverso do tempo de resposta típico do sensor – representado pelo período, como demonstrado pela equação de cálculo de frequência de um movimento oscilatório [12]. Assim foi executado, e o máximo de frequência possível de ser retornado pelo sensor fotossensível foi diagnosticado. Esse resultado está explícito na seção própria. Portanto, conclui-se que a melhor maneira de realizar o estudo da frequência de rotação do motor do túnel de vento da UFABC é implantando o sensor LDR no Arduino conectado ao computador para utilização do aplicativo do osciloscópio, e realizar as medições dentro da limitação da faixa de operação do sensor de luz.

A última fase do desenvolvimento do projeto consistiria em, uma vez implementado o sensor óptico para a determinação da frequência de rotação do rotor do túnel de vento, impor ao sistema diferentes testes capazes de fazer uma correlação entre velocidade do escoamento do túnel de vento e frequência de rotação do motor: o motor seria ligado em diferentes potencias e seria levantada a efetiva relação dos valores de frequência de rotação com a velocidade de escoamento, esses fornecidos pelos Tubos de Pitot. Objetivava-se, então, estudar essa relação e eventualmente determinar a curva de calibração do equipamento, como mostra a figura 13. Devido ao distanciamento social implicado pela pandemia da covid-19, não foi possível desenvolver essa etapa do projeto que seria integralmente dependente do uso do laboratório com o túnel de vento.

Figura 13 - Esboço de resultados possíveis.



Fonte: Próprio autor. Esquema realizado no software *Paint.*

3.2 Etapas da pesquisa

Para o desenvolvimento da pesquisa dividiu-se o projeto em diversas etapas, seguindo um cronograma.

As atividades foram divididas da seguinte forma: A1: Revisão bibliográfica; A2: Familiarização com tubo de Pitot e túnel de vento; A3: Familiarização com o microcontrolador Arduino; A4: Projeto e implementação do circuito a laser com LDR; A5: Relatório Parcial; A6: Projeto e implementação do circuito a laser com outro sensor; A7: Desenvolvimento da rotina para Arduino; A8: Testes preliminares do sensor; A9: Análise da amplitude de leitura do sensor com LDR; A10: Determinação da curva de calibração representada pela Velocidade do escoamento *versus* Frequência de Rotação do motor e A11: Elaboração do Relatório Final.

Observação: as etapas em negrito, descritas no quadro abaixo, foram executadas. A partir da análise do cronograma observa-se que o desenvolvimento do projeto foi concluído integralmente com exceção da etapa 10, devido às dificuldades encontradas pela pandemia da Covid-19.

O cronograma do projeto está exposto na tabela 1.

Tabela 1 – Cronograma do projeto.

Atividade/ Bimestre	B1	B2	B3	B4	B5
A1	**XX**				
A2	**XX**	**XX**			
A3		**XX**			
A4		**XX**	**XX**		
A5			**XX**		
A6			**XX**		
A7				**XX**	
A8				**XX**	
A9				**XX**	
A10					XX
A11					**XX**

Fonte: Elaborada pelo Autor no *software Libre Office Calc.*

4 Resultados e discussão dos resultados

Os resultados do trabalho de pesquisa em questão estão relacionados aos vários testes executados e o retorno foi apresentado em análises tanto qualitativas, quanto quantitativas. Aqui, apresenta-se os resultados conforme a enumeração de etapas descritas na seção "Metodologia".

Na terceira etapa de desenvolvimento do projeto, a rotina para a aferição do RPM foi primeiramente rodada com o auxílio de um ventilador comum. Foi visualizado, então, que os valores retornados pelo microcontrolador na tela de LCD eram muito oscilatórios e muito pequenos para o esperado para a frequência de rotação de um ventilador. Além disso, os valores retornados não eram proporcionais aos modos de velocidade do ventilador: o valor de RPM não era maior para os modos em que a velocidade do ventilador era maior. As hipóteses formuladas para tentar explicar essa incongruência eram a de que o sistema com a resistência fotossensível possuía uma oscilação grande de valores para cada estado de excitação – como visualizado pelo código de calibração, e que seu tempo de resposta era lento demais para calcular rotações por

minutos altas, típicos de funcionamento de um ventilador. A partir desses resultados visou aprofundar-se em suas características, e, a partir de metodologias específicas, aferir o valor máximo de frequência para o qual o sensor retorna valores fidedignos e esperados para o sistema.

Na quarta etapa, com o código atualizado e o sistema modelado com o servo motor, foram coletados 10 dados de RPM e Hz consecutivos retornados na tela LCD do sistema. Com os dados coletados, foi-se necessário tratá-los estatisticamente. Uma vez que nenhuma grandeza física é totalmente exata, dados coletados sempre possuem erros associados. A origem dessa limitação pode ser devido a sofisticação do equipamento usado no processo, do manuseio no momento da medição, entre outros [23]. Portanto, os experimentos executados nesse trabalho estiveram sujeitos às mesmas ações. A fim de aferir o erro padrão da estimativa, calculou-se primeiramente a média e o desvio padrão dessas medidas. A partir desse resultado, utilizou-se a fórmula a seguir para aferir o valor da incerteza associada, onde Sx é o erro padrão da média, S o desvio padrão e n o número de amostras.

$$S_x = \frac{s}{\sqrt{n}}$$

Os valores com suas incertezas estão demonstrados na tabela 2.

Tabela 2 – Resultados do teste com servo motor com a rotina do Arduino.

Testes com Servo Motor – Rotina Arduino					
Frequências	**LDR**	**Sensor de Obstáculos IR**	**Valor retornado pelo servo**	**Erros entre LDR – Servo**	**Erros entre IR – Servo**
	RPM	**RPM**	**RPM**	**RPM**	**RPM**
1	(16,0±5,1)·10	(3,6±3,3)·10^3	6,61	(15,4±5,1)·10	(3,6±3,3)·10^3
2	9,9±0,6	9,39±0,03	8,26	1,7±0,6	1,13±0,03
3	13,6±0,9	13,11±0,03	11,01	2,6±0,9	2,10±0,03
4	22,7±1,6	21,67±0,08	16,47	6,2±1,6	5,20±0,08
5	35,3±3,3	31,2±0,2	32,75	2,5±3,3	-1,6±0,2

Fonte: Elaborada pelo Autor no *software Libre Office Calc.*

Ao analisar-se a tabela de testes com servomotor com a rotina Arduino observou-se que os sensores com LDR e sensor IR não retornaram valores próximos do esperado para a frequência 1 de rotação do servo. Alguns pontos importantes foram observados conforme o experimento foi rodado: primeiramente, no teste com LDR na configuração 1 do servo era possível visualizar pelo LED associado que o sensor estava realizando uma medição com “meia luz”, ao atingir a borda do obstáculo. No teste com o sensor IR na mesma velocidade, foi possível observar algo similar: o módulo estava realizando uma medição extra entre o início da passagem da pá e o final do movimento. Provavelmente as características descritas foram responsáveis pelos valores muito discrepantes do esperado em ambos os testes com o servo motor com a

rotina no Arduino na frequência 1. Em segundo lugar, foi visualizado que em todas as configurações de frequência de rotação do servo para os testes do LDR haviam duas colunas muito específicas de valor que estavam sendo retornadas. Isso se deve ao fato de que, antes de rodar para uma nova posição, o servo não atinge completamente 180º. O sistema opera em valores um pouco menores que a amplitude de 180º. Por fim, um sentido de rotação acaba possuindo maior tempo para a realização. Possivelmente, essa propriedade influenciou o valor dos erros nos testes com o servomotor.

Pela tabela 2 nota-se ainda que os valores a partir da frequência 2 do motor foram suficientemente próximos dos esperados para a rotação do servomotor. Ainda analisou-se que conforme maior o valor de rotação, maior também o erro padrão da estimativa associado à medida. Mediante esses testes, conclui-se que a medição com o sensor LDR e o sensor de obstáculo utilizando a rotina no microcontrolador para cálculo das variáveis de rotação foram suficientemente fidedignos acima de 8,26 RPM até 32,75 RPM.

Na quinta etapa da pesquisa, diversos sensores foram testados para verificar sua possível substituição pelo LDR. O código de calibração foi personalizado e adequado para atender a cada receptor. Os resultados obtidos a partir da visualização do retorno dos sensores com a calibração estão expressos na tabela 3.

Tabela 3 – Resultados do teste de calibração com 6 sensores previamente escolhidos

Testes de Calibração		
LDR	**Receptor IR**	**LED Difuso 5mm**
Valores de cerca de 800 foram detectados para o estado escuro e próximos de 50 para claro.	Não respondeu de forma proporcional ao laser.	Não respondeu de forma proporcional ao laser.
Sensor de Obstáculos IR	**Sensor de Distância Ultrassônico HCSR04**	**LED Alto Brilho 5mm Verde**
Valores de 1 foram detectados para o estado sem detecção de proximidade e de 0 para com detecção.	Descartado devido à suas características de medição.	Não respondeu de forma proporcional ao laser.

Fonte: Elaborada pelo Autor no *software Libre Office Calc.*

Após esse passo, o sistema foi implantado em conjunto com um miniventilador USB a fim de desvendar sua frequência de rotação. Foram coletados 100 dados consecutivos de frequência apresentados no LCD respectivamente com o LDR e com o Sensor de Obstáculo IR. Os resultados foram tratados estatisticamente. Os resultados com suas incertezas estão expressos na tabela 4.

Tabela 4 – Resultados dos testes com Mini Ventilador utilizando a rotina Arduino.

Testes com Mini Ventilador – Rotina Arduino	
LDR	**Sensor de Obstáculos IR**
RPM	**RPM**
$(120\pm8)\cdot10^2$	$(148\pm9)\cdot10^2$

Fonte: Elaborada pelo Autor no *software Libre Office Calc.*

Na tabela 4, onde estão expressos os valores de rotação do ventilador com a rotina para Arduino, observa-se que o retorno para o módulo IR e para a resistência fotossensível divergem um pouco. Observou-se ainda que os erros obtidos correspondem a cerca de 6% dos valores. Com o fim de se obter mais dados e retornos mais precisos, foi, então, inserido a metodologia com o simulador de osciloscópio.

Devido às características descritas acima, agora focou-se em refazer os testes anteriores com o auxílio de um aplicativo de osciloscópio que roda no Arduino e é capaz de expressar, graficamente, a oscilação da tensão de entrada no Arduino em função do tempo. Na nona etapa, os testes com o servo motor foram refeitos e os dados retornados coletados. Na décima, os dados foram tratados utilizando as técnicas já apresentadas. Os resultados com seu erro padrão estão expressos na tabela 5.

Tabela 5 – Tabela com os resultados do teste com Servo Motor utilizando o BegOscopio

Testes com Servo Motor – Aplicativo BegOscopio v1.5					
Frequências	**LDR**	**Sensor de Obstáculos IR**	**Valor retornado pelo servo**	**Erros entre LDR – Servo**	**Erros entre IR – Servo**
	RPM	**RPM**	**RPM**	**RPM**	**RPM**
1	$(7,1\pm2,2)\cdot10$	$7,7\pm0,8$	6,61	$(8,7\pm2,2)\cdot10$	$1,1\pm0,8$
2	$(15,3\pm3,4)\cdot10$	$(50,0\pm1,5)\cdot10$	8,26	$(14,5\pm3,4)\cdot10$	$(4,2\pm1,5)\cdot10$
3	$11,0\pm0,4$	$11,0\pm0,9$	11,01	$0,0\pm0,4$	$0,0\pm0,9$
4	$16,8\pm0,5$	$16,8\pm1,4$	16,47	$0,3\pm0,5$	$0,3\pm1,4$
5	$31,6\pm0,8$	$37,6\pm2,6$	32,75	$-1,1\pm0,8$	$4,9\pm2,6$

Fonte: Elaborada pelo Autor no *software Libre Office Calc.*

Na tabela 5 que representa os dados do teste com o servomotor utilizando o aplicativo que simula o osciloscópio, observou-se que os resultados com as configurações 1 e 2, com o LDR, e 2 com o sensor de obstáculo IR estão muito discrepantes do esperado. Uma hipótese para explicar essa discrepância é a configuração manual do aparelho. Alguns parâmetros devem

ser ajustados para que ele retorne ondas visíveis e consistentes. Com isso em mente, tentou-se adequar somente a taxa de amostragem para adequação aos intervalos de dados. Nenhum outro parâmetro foi alterado com o objetivo de se obter a maior similaridade entre as medições estabelecidas. A partir da 3ª velocidade, no entanto, o retorno de frequência possui boa precisão e boa exatidão. Além disso, pode-se interpretar, a partir da mesma tabela, que o cálculo das frequências do movimento oscilatório foi extremamente próximo do esperado acima de 11,01 RPM.

Para a décima primeira fase, a aferição da rotação do motor do miniventilador foi o foco novamente. Ela foi analisada com o auxílio do aplicativo simulador do osciloscópio. Os dados foram sólidos e nada oscilatórios. Ademais, o aplicativo rodado não possui indicação de erros associados a suas medidas. Tendo em mente essas informações, decidiu-se omitir o erro excepcionalmente para essas medições. Além disso, vale ressaltar que os valores retornados pelo aplicativo são associados à oscilação provocada pelas três pás do miniventilador. Por esse motivo, para a pesquisa a cerca da rotação do rotor como um todo o valor retornado teve que ser divido pelo número de pás – nesse caso, igual a três. Na tabela 6 estão explícitas as averiguações.

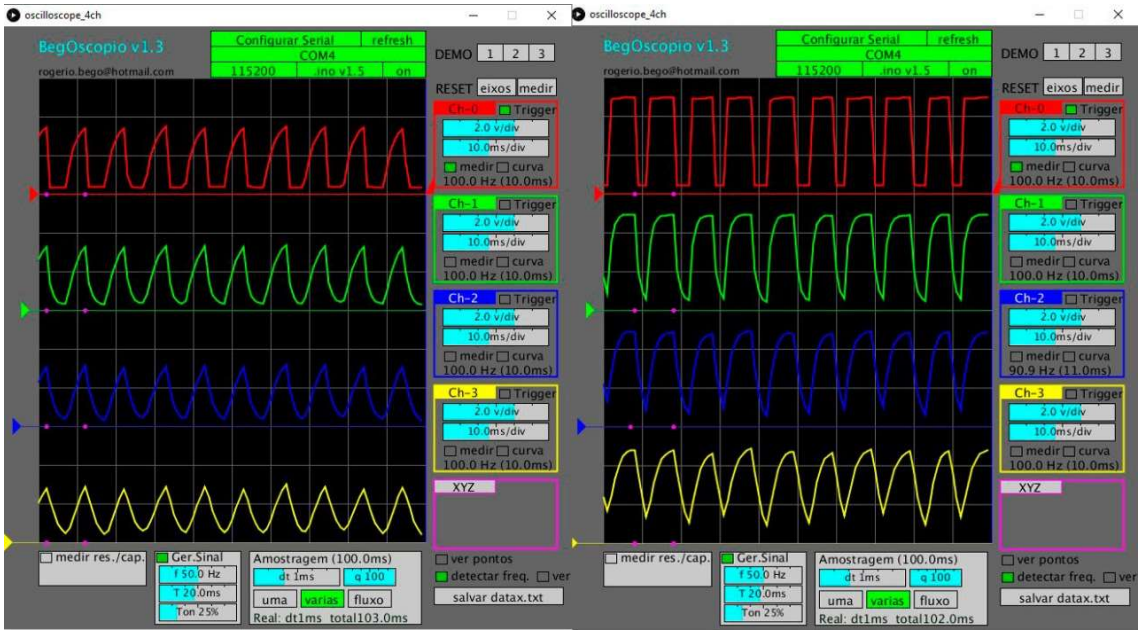
Tabela 6 – Resultados dos testes com MiniVentilador utilizando o osciloscópio.

Testes com Mini Ventilador – BegOscopio v1.5	
LDR	**Sensor de Obstáculos IR**
Para todas as pás	Para todas as pás
RPM	**RPM**
6.000,00	6.000,00
Para o motor	Para o motor
RPM	**RPM**
2.000,00	2.000,00

Fonte: Elaborada pelo Autor no *software Libre Office Calc.*

Na figura 14 demonstra-se o uso do aplicativo com ambos os receptores – LDR, e Sensor de Obstáculo, respectivamente apresentados da esquerda para a direita.

Figura 14 – Resultados do aplicativo BegOscopio da rotação do miniventilador, utilizando o LDR e o módulo de reflexão IR a esquerda e a direita, respectivamente.

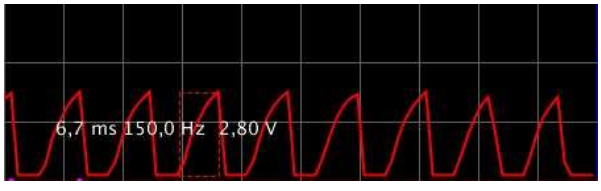


Fonte: Capturas de tela realizadas pelo autor do aplicativo BegOscopio.

Diante do exposto, conclui-se de que o sensor com a rotina Arduino retorna valores suficientemente precisos e próximos do esperado para taxas de medição entre 8,26 e 32,75 rotações por minuto. No entanto, ao elevar-se o giro o sistema retorna valores acompanhados de erros maiores. O aparato conectado ao BegOscopio, no entanto, retorna valores extremamente precisos e próximos do esperado para taxas de medição de 11,01 a 32,75 RPMs. Observou-se, também, que nos dois sistemas ao elevar-se a velocidade de giro o sistema retorna valores acompanhados, também, de incertezas maiores. Nos testes com o ventilador foi possível visualizar que os resultados rodados com o código no controlador possuíram erro associado de cerca de 6% e discrepância entre o uso do par de sensores. No entanto, utilizando o sistema BegOscopio, os valores foram íntegros e nada oscilatórios. Tendo em vista essas características descritas, expõe-se que a metodologia com o uso do simulador de osciloscópio é o mais adequado para analisar rotações grandes de rotores. Então, essa seria a melhor metodologia para implementação no rotor do túnel de vento da UFABC.

Em contrapartida, os dados obtidos anteriormente de nada inferem sobre o máximo de leitura de frequência possível de ser executado pelo sensor LDR. Dessa observação surgiu a modelagem que tinha como base a análise dos pulsos apresentados no programa BegOscopio. Utilizando a função “medir” presente no aplicativo obteve-se o seguinte resultado, com o LDR sendo interrompido com o ventilador em funcionamento, apresentado na imagem 15.

Figura 15 – Analisando a curva de resposta do LDR com o miniventilador em funcionamento.

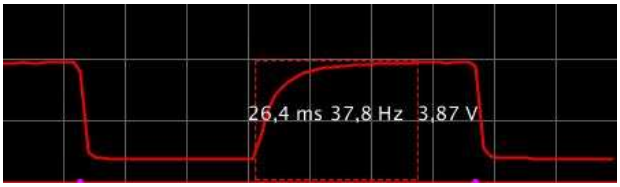


Fonte: Captura de tela realizada pelo autor do aplicativo BegOscopio.

A leitura analógica de um pino do microcontrolador Arduino funciona da seguinte forma: é mapeado tensões entre 0 a 5 volts e esses valores são convertidos para números inteiros de 0 a 1023. [25] Portanto, é interessante observar que a voltagem de retorno não atinge os dois ápices completamente – 0 e 5 volts. Então extrai-se a conclusão de que, para a voltagem de 2,80 volts a frequência máxima de operação do sensor é de 150,0Hz e consequentemente, 9000,0 RPM.

A partir da visualização apresentada anteriormente, buscou-se também interromper o sensor de forma com que ele atingisse seu máximo de voltagem possível para analisá-lo. Interpretando a curva gráfica da figura 16 tem-se que para a voltagem de 3,87V o sensor pode aferir até 37,8Hz, no caso, 2268,0 RPM.

Figura 16 – Análise da curva de resposta do LDR para atingir o máximo de voltagem possível.



Fonte: Captura de tela realizada pelo autor do aplicativo BegOscopio.

A partir das análises anteriores fica claro de que não se pode aferir, de forma geral, até qual oscilação o osciloscópio responderia de forma eficiente, uma vez que a medida que a frequência aumenta, a tensão máxima atingida também diminui. Porém, pode-se extrair das informações a conclusão de que para a voltagem de 3,87V a rotação máxima possível de ser aferida é a de 2268,0 RPM, e para volts de 2,80 o máximo de giro possível de ser reconhecido é de 9000,0 RPM. Vale ressaltar, também, que esse valor retornado se refere a todas as pás do rotor que bloqueia o feixe a laser. Dividindo pelo número de pás do motor, tem-se o máximo de rotação para o motor que o sistema retorna fidedignamente.

Devido a pandemia do vírus que provoca a covid-19 não foi possível extrair resultados a cerca da relação frequência de rotação do rotor do túnel de vento e escoamento de fluido na seção de testes, já que os testes no laboratório não puderam ser rodados.

5 Conclusões e perspectivas de trabalhos futuros

A partir da metodologia aplicada ao presente projeto, conclui-se que a criação de métodos para aferir a frequência de rotação do motor do túnel de vento foi executada com sucesso, no entanto, não foi possível confrontar esses valores com os de escoamento do fluido dentro do equipamento, devido à impossibilidade de testes no laboratório ocasionado pelas medidas de isolamento social decorrentes da pandemia do novo coronavirus. Ainda, o sensor LDR foi estudado a fundo a fim de saber sua amplitude de funcionamento.

Em termos específicos, constatou-se, a partir de testes com um servo motor que realizava oscilações de baixa frequência, que o sensor a laser criado com rotina em microcontrolador Arduino e resistência fotossensível LDR é capaz de aferir, de forma suficientemente fidedigna, valores de frequência de um motor entre 8,26 RPM e 32,75 RPM. Essas mesmas características foram observadas trocando-se o sensor LDR pelo sensor de obstáculos por infravermelho e realizando medições levando em conta a proximidade do objeto giratório com o aparato. Além disso, conectou-se o receptor LDR a um Arduino que se comunicava com um aplicativo de funcionalidade semelhante a um osciloscópio através do computador para analisar e confrontar dados com os obtidos através da rotina no Arduino. O

sensor a laser com o aplicativo simulador de osciloscópio e resistência fotossensível foi capaz de aferir, de forma precisa, intervalos de frequência entre 11,01 e 32,75 rotações por minuto. As mesmas características foram novamente observadas ao se substituir o LDR pelo sensor de proximidade IR. Confrontando os dados referentes às medições utilizando o aplicativo de osciloscópio e apenas a rotina no Arduino ainda se observou uma característica: os valores retornados pelo aplicativo foram mais próximos do esperado para cada medição, assim como foram acompanhados de incertezas estatísticas menores.

Foram testados ainda, sensores que poderiam substituir o LDR como receptores do feixe a laser, buscando equipamentos que fossem mais eficientes em suas medições do que a resistência utilizada. Foram testados ao todo 5 receptores: receptores LED Difuso 5mm, LED Alto Brilho 5mm Verde, Receptor Infravermelho IR, Sensor de Obstáculos Reflexivo Infravermelho e Sensor de Distância Ultrassônico HC-SR04. Após testes através de uma metodologia específica concluiu-se que os sensores em questão não se mostraram úteis para substituir o LDR na função de sensor a laser para identificar a rotação de um ventilador.

De forma a simular o motor do túnel de vento, implantou-se o sistema em um miniventilador USB e foi possível aferir seus valores de rotação com sucesso. Os resultados obtidos com os testes inferem, novamente, à conclusão de que as medições utilizando o aplicativo de osciloscópio são mais precisas e consistentes do que as obtidas a partir do sistema com a rotina Arduino. Assim, ao estabelecer relação com o número de interrupções por rotação do objeto em movimento oscilatório – como, por exemplo, o número de pás de um motor -, é possível aferir o valor de rotações por minuto do motor de forma precisa. Diante de todas as exposições prévias, conclui-se que para realizar o estudo da frequência de rotação de motor do túnel de vento a metodologia mais eficiente seria a implementação do sistema com Arduino utilizando o aplicativo de simulador de osciloscópio. Assim, possuindo os dados referentes a rotação do motor – nos limites impostos pelo sistema – e com os valores do escoamento de fluido na secção de testes do túnel, poder-se-ia indicar a relação entre essas duas grandezas.

Ademais, conclui-se, analisando a curva de resposta do sensor LDR em um aplicativo simulador de osciloscópio, que, com o retorno de 2,80 V na entrada analógica do controlador, o máximo de resposta que o receptor pode fornecer é de 9000,0 RPM, considerando todas interrupções no feixe a laser. Desta maneira, com essa diferença de potencial a máxima rotação que o sistema é capaz de devolver para um rotor de 3 pás é de 3000,0 RPM. Já para um de 6 pás, o máximo possível de ser diagnosticado é 1500,0 RPM.

Diante do exposto, as perspectivas de trabalhos futuros estão na continuação da pesquisa na área de Engenharia Mecânica com ênfase em Projetos de Máquinas e Fenômenos de Transporte em posteriores iniciações científicas, desenvolvendo aprofundamento do conhecimento nessas áreas. Além disso, as informações adquiridas a cerca do manuseio de equipamentos como microcontrolador e sensores na face eletrônica possibilitará a implementação dos mesmos objetos em diferentes aplicações das posteriores pesquisas.

Referências

[1] REIS, Maria L. Colucci da Costa. *Expressão da Incerteza de Medição Associada a um Ensaio Aeronáutico em Túnel de Vento Subsônico.* 2000. 62f. Tese de Doutorado - Unicamp, Campinas, 2000.

[2] Questões do Desenvolvimento - *A conquista do espaço* - 2010 - disponível em <http://www.ipea.gov.br/desafios/index.php?option=com_content&view=article&id=2346:catid=28&Itemid=23> acesso em: 21/07/2019 às 20:00.

[3] SORBILLI, Rodrigo. *Túnel de vento e sua contribuição para a Indústria Aeronáutica.* 2018 - disponível em <https://engenhariaaeronautica.com.br/blog/tunel-de-vento-na-industria-aeronautica/> acesso em 23/07/2019 às 23:43.

[4] COUTINHO, Felipe Rodrigues*. Projeto de um túnel de vento subsônico do tipo soprador.* 2014. 41f. Projeto de Graduação - UFRJ, Rio de Janeiro, 2014.

[5] *Tubo de Pitot* - disponível em: <https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/1902439/mod_resource/content/1/Experiencia_Tubo_de_Pitot.pdf> acesso em: 24/07/2019 às 15:00.

[6] THOMSEN, Adilson. *O que é Arduino?* - 2014 - disponível em <https://www.filipeflop.com/blog/o-que-e-arduino/> acesso em: 24/07/2019 às 17:00

[7] MENESES, André. *Tudo sobre LDR (Resistor Dependente da Luz)* - 2018 - disponível em <http://mundoengenharia.com.br/tudo-sobre-ldr-resistor-dependente-da-luz/> acesso em: 24/07/2019 às 16:00

[8] BARLOW, J; RAE, W. H.; POPE, A. *Low-Speed Wind Tunnel Testing.* 3 ed. Canadá: John Wiley & Sons, 1999.

[9] Rapoport - Anatol - *NEWTONIAN PHYSICS AND AVIATION CADETS* - disponível em <https://www.generalsemantics.org/wp-content/uploads/2011/05/articles/etc/1-3-rapoport.pdf> acesso em 24/07/2019 às 21:45.

[10] BOSQUETTI, Jairo. *Aplicação do Princípio de Bernoulli na aviação* - 2012 - disponível em: http://mecaflu.blogspot.com.br/2012/06/aplicacao-do-principio-de-bernoulli-na.html -Acesso em: 30/04/18, 00h45.

[11] SERWAY, R. A.; JEWETT Jr., J. W. Princípios de Física: Volume III, Eletromagnetismo. 1. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2014.

[12] SERWAY, R. A.; JEWETT Jr., J. W. Princípios de Física: Volume II, Oscilações, Ondas e Termodinâmica. São Paulo: Cengage Learning, 2014.

[13] SERWAY, R. A.; JEWETT Jr., J. W. Princípios de Física: Volume I, Mecânica Clássica e Relatividade. São Paulo: Censage Learning, 2014.

[14] HARA, Carmem; ZOLA, Wagner. *Linguagem C*: mai. 2008. 140 f. Notas de aula.

[15] Arduino Software. 2015. Disponível em: <https://www.arduino.cc/en/Guide/Environment>. Acesso em: 03/03/2020 às 15:15hrs.

[16] Language Reference. 2020. Disponível em: <https://www.arduino.cc/reference/en/>. Acesso em: 03/03/2020 às 15:40hrs.

[17] Void. 2020. Disponível em: <https://www.arduino.cc/reference/pt/language/variables/data-types/void/>. Acesso em: 03/03/2020 às 15:30hrs.

[18] Como utilizar o módulo I2C com display LCD. 2018. Disponível em: <>. Acesso em: 23/12/2020 às 20:00hrs.

[19] *Thermatic Fan History, Innovation and Wind Tunnel Testing at Davies Craig.* 2019. Disponível em: <https://daviescraig.com.au/blog/thermatic-fan-history-innovation-and-wind-tunnel-testing-at-davies-craig>. Acesso em: 01/03/2020 às 19:00hrs.

[20] ElapsedMillis. 2020. Disponível em <https://playground.arduino.cc/Code/ElapsedMillis/>. Acesso em: 28/08/2020 às 15:00hrs.

[21] ALVES, Mário Ferreira – *Abc Do Osciloscópio* – Departamento de Engenharia Electrotécnica, Instituto Politécnico do Porto – março de 1998 – 2ª Edição – pág. (1-63).

[**22]** BEGO, Rogério. *Osciloscope Arduino-Processing* – 2 de maio de 2017. Disponível em: <https://www.instructables.com/id/Oscilloscope-Arduino-Processing/ >. Acesso em: 29 de agosto de 2020 àss 16:20hrs.

[23] *Medição de dados experimentais, incerteza e propagação de erro*. - Unicamp - Disponível em <http://www.fem.unicamp.br/~instmed/Incerteza.htm>. Acesso em: 29 de agosto de 2020.

[24] RIGONATTO, Marcelo. *"Erro padrão da estimativa"* - Brasil Escola. Disponível em: <https://brasilescola.uol.com.br/matematica/erro-padrao-estimativa.htm>. Acesso em 20 de agosto de 2020 15:00hrs.

[25] analogRead(). 2020. Disponível em <https://www.arduino.cc/reference/pt/language/functions/analog-io/analogread/>. Acesso em 29 de agosto às 17:00hrs.

[26] STREETER, L. V.; WILIE, B. E. Mecânica dos Fluidos: 7 ed. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1982.

[27] INSTITUTO DE MATEMÁTICA PURA E APLICADA. Introdução aos Escoamentos Compressíveis. Rio de Janeiro: 2017.