

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA E PRODUÇÃO**  
**CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**RHILLAME VALÉRIA LAGO DA SILVA**

**ESTUDO DO SISTEMA PROPULSOR ELÉTRICO DE UM  
QUADRICÓPTERO**

**São Luís – MA**  
**2017**

**RHILLAME VALÉRIA LAGO DA SILVA**

**ESTUDO DO SISTEMA PROPULSOR ELÉTRICO DE UM  
QUADRICÓPTERO**

Monografia de graduação apresentada ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual do Maranhão, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Msc. Denner Robert Rodrigues  
Guilhon

**São Luís –MA  
2017**

Silva, Rhillame Valéria Lago da.  
Estudo do sistema propulsor elétrico de um quadricóptero / Rhillame  
Valéria Lago da Silva. – São Luís, 2017.  
49 f.

Monografia (Graduação) – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade  
Estadual do Maranhão, 2017.

Orientador: Prof. Me. Denner Robert Rodrigues Guilhon.

1. Quadricóptero. 2. Sistemas propulsor. 3. Vibração. 4. Toque. 5.  
Empuxo. I. Título.

CDU 62-83

**RHILLAME VALÉRIA LAGO DA SILVA**

**ESTUDO DO SISTEMA PROPULSOR ELÉTRICO DE UM  
QUADRICÓPTERO**

Monografia de graduação apresentada ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual do Maranhão, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título Bacharel em Engenharia Mecânica.

Monografia aprovada em 28 de Junho de 2017.

**BANCA EXAMINADORA:**

---

Prof<sup>o</sup>. Msc. Denner Robert Rodrigues Guilhon  
(Orientador)

---

Prof<sup>a</sup>. Dr. Mauro Sergio Silva Pinto  
(Membro da Banca Examinadora)

---

Prof<sup>o</sup>. Msc. Flávio Nunes Pereira  
(Membro da Banca Examinadora)

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus. Agradeço ao Professor Denner Guilhon pela orientação. Agradeço pelo suporte dado pelos meus colegas do Núcleo de Automação e Controle (NauCo) em especial a Flaianny Pacheco e aos meus colegas de turma pela colaboração.

## RESUMO

O objetivo deste trabalho é determinar o melhor sistema propulsor elétrico do quadricóptero. Para isso, inicialmente, buscou-se entender o funcionamento de cada componente necessário para controlar os quadricópteros. Em seguida, determina-se as características da bancada de teste, como o tipo de movimento que esta possuiria para suportar um quarto da propulsão da aeronave, utilizando um motor *brushless* AX-2810Q, hélices de 6x4,5”, 8x4,5” e 10x4,5” de diâmetro juntamente com controladores eletrônicos de velocidade.

Torque, empuxo são parâmetros importantes quando se estuda os quadricópteros. Logo, estes são o foco deste trabalho que juntamente com o sensor de vibração possibilitam a escolha adequada do Sistema propulsor (motor-hélice). A obtenção do torque e empuxo foram baseados no método da alavanca. Por fim, comparou-se os resultados de cada hélice, verificando a influência do diâmetro das hélices na eficácia da aeronave em voo.

**Palavras-chave:** Quadricóptero. Sistema Propulsor. Vibração. Torque. Empuxo

## **ABSTRACT**

The aim of the current study is to define the better propulsion system electric of the quadcopters. To do that, firstly, it is necessary to understand the operation of each necessary operation of the quadcopters. The following step is to determine the characteristics of the test stand, such as the kind of movement that it would have to support a quarter of the propulsion of the aircraft using a brushless motor AX-2810Q, propellers 6x4,5", 8x4,5" and 10x4,5" of diameter together with speed electronic controllers.

Torque and thrust are important parameters to consider in studies the quadcopters. Therefore, these are the focus of this study, that together with the vibration sensor make it possible to choose the propulsion system (motor-propeller). The torque and thrust were based on lever method. Finally, it was compared the result between each propeller, verifying the diameter influence of the propellers on effectiveness the aircraft in flight..

**Keywords:** Quadcopter. Propulsion System. Vibration. Torque. Thrust

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	Configurações de aeronaves de asa fixa	18
Figura 2	Configurações de aeronaves de asa rotativa	18
Figura 3	VANT (Quadricóptero) utilizado para realizar mapeamentos de ambiente	19
Figura 4	Estrutura dos quadricópteros	20
Figura 5	Motor brushless utilizado no projeto	22
Figura 6	Terminais de entrada e saída de um ESC e suas conexões	23
Figura 7	ESC Multistar 30 A	24
Figura 8	Bateria Zippy Compact (Lipo)	25
Figura 9	Anatomia das hélices	26
Figura 10	Perfis ao longo da pá	26
Figura 11	Forma em planta da pá	27
Figura 12	Diâmetro e passo das hélices bipás	28
Figura 13	Hélices 10x4,5" (cima), 8x4,5" (meio) e 6x4,5" (baixo)	28
Figura 14	Estrutura do frame de um quadricóptero	29
Figura 15	Sensor de Vibração SW-420	30
Figura 16	Placa Controladora Arduino Uno	31
Figura 17	Modelo da bancada de teste	33
Figura 18	Movimentos da bancada de teste	34
Figura 19	Circuito no Arduino UNO	34
Figura 20	Análise de resistência no SolidWorks	36
Figura 21	Bancada de testes	38
Gráfico 1	Vibração causada pela hélice durante a aceleração do motor	40
Gráfico 2	Média dos dados de Empuxo	41
Gráfico 3	Média dos dados de Torque	42

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1	Especificações do motor Brushless AX-2810Q	22
Tabela 2	Especificações do ESC Multistar	24
Tabela 3	Especificações da Bateria Zippy Compact (LIPO)	25
Tabela 4	Especificações do microcontrolador Arduíno UNO	30

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ANAC- Agência Nacional de Aviação Civil

BEC- Battery Eliminator Circuit

D- Distância

D0- Pino de saída digital

DEMECP- Departamento de Engenharia Mecânica e Produção

ESC- Eletronic Speed Control

Fem- Força de Empuxo

GND- Pino de alimentação

HD- Hyper Driver

Kg- Quilogramas

LIPO- Lithium Polymer Battery

M- Mach

M1- Motor 1

M2- Motor 2

M3- Motor 3

M4- Motor 4

MLP- Modulação Por Largura De Pulso

MPa- Mega Pascal

MHz- Mega Hertz

N- Newton

NAUCO- Núcleo de Automação e Controle

Nm- Newton-metro

PWM- Pulse Width Modulation

RPM- Rotação por Minuto

SI- Sistema Internacional de Medidas

SF- Slow Flyer

SP- Sport

T- Torque

UEMA- Universidade Estadual do Maranhão

VANT- Veículo Aéreo não Tripulado

VCC- Pino de Entrada

Vo- Velocidade do objeto

Vs- Velocidade do som

W- Watts

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	13
1.1 OBJETIVOS .....	14
1.1.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	14
1.2 JUSTIFICATIVA.....	14
1.3 METODOLOGIA.....	15
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	17
2.1 HISTÓRIA DOS QUADRICÓPTEROS.....	17
2.2 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DOS QUADRICÓPTEROS .....	19
<b>3 ESTUDO DOS COMPONENTES DA BANCADA</b> .....	21
3.1 MOTOR BRUSHLESS .....	21
3.2 ESC (ELECTRONIC SPEED CONTROLLER) .....	22
3.3 BATERIA LIPO.....	24
3.4 HÉLICES .....	25
3.5 FRAME.....	29
3.6 SENSOR DE VIBRAÇÃO .....	29
3.7 MICROCONTROLADOR .....	30
<b>4 PROJETO DA BANCADA DE TESTE</b> .....	32
4.1 SOLIDWORKS.....	32
4.2 BANCADA DE TESTE .....	32
<b>5 ANÁLISE EXPERIMENTAL</b> .....	36
5.1 ANÁLISE DA ESTRUTURA DA BANCADA .....	36
5.2 MEDIÇÃO DE TORQUE E EMPUXO .....	37
<b>6 RESULTADOS</b> .....	39
6.1 VIBRAÇÃO.....	39
6.2 EMPUXO (N) .....	40
6.3 TORQUE (Nm) .....	41
<b>7 CONCLUSÃO</b> .....	43
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	44
<b>ANEXOS</b> .....	46

## 1 INTRODUÇÃO

O quadricóptero é um veículo aéreo não tripulado (VANT) de asas rotativas que possui quatro rotores que geram empuxo através do movimento das hélices em voo. Para adquirir estabilidade da aeronave dois rotores precisam girar no sentido horário e os outros no sentido anti-horário. O controle de movimento da aeronave pode ser realizado variando-se a velocidade relativa de cada rotor para alterar o empuxo e o torque produzido por cada um.

Por ser de pequeno porte, os quadricópteros têm maior capacidade de manobra do que aviões e helicópteros, por exemplo. Segundo (GOMES, 2013), isto se dá graças a maior eficiência e baixo custo desses sistemas em relação as soluções tradicionalmente empregadas, como aeronaves tripuladas. Além disso, podem ser pilotados tanto em ambientes fechados (Indoor) quanto ao ar livre (Outdoor).

O campo de aplicações desta aeronave é vasto por serem mais fáceis de serem controlados em relação aos demais drones. No geral, são mais usados em aplicações que precisam de uma alta estabilidade de voo (COSTA, 2008) e concebidos para realizar tarefas arriscadas ao ser humano.

Para ser eficiente em quaisquer tarefas, o quadricóptero terá que ter um ótimo desempenho em voo. Este desempenho é influenciado pela eficiência do sistema de propulsão elétrico, ou seja, pelo conjunto motor/hélice. Como existem variedades de tipos e tamanhos deste conjunto se faz necessário um estudo específico para a escolha do par motor/hélice apropriado para o projeto em estudo. Isto é possível através de testes laboratoriais analisando os perfis de hélices e como se comportam no ar. Adicionalmente, o motor – que converte energia elétrica em mecânica – deverá possuir alto rendimento e proporcionar um empuxo suficiente para a elevação do quadricóptero. Tendo isto como premissa, este trabalho propõe o desenvolvimento de uma bancada de testes para a aquisição de dados de empuxo, torque e vibração do sistema propulsor elétrico, analisando os fatores que exercem maior influência em relação a estabilidade e desempenho dos quadricópteros.

## 1.1 OBJETIVOS

O objetivo desse projeto é realizar um estudo dos componentes necessários para construção de uma estrutura de teste que utilize  $\frac{1}{4}$  da propulsão, que corresponde à metade do frame (base de sustentação do quadricóptero), mais os componentes eletrônicos necessários para controlar e verificar a sustentação deste Vant. Ao final do projeto foi possível a escolha do sistema propulsor adequado. A ideia principal é determinar parâmetros para gerar maior eficiência e garantir o bom desempenho do quadricóptero em quaisquer aplicações.

### 1.1.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Como objetivos específicos deste projeto tem-se:

- Dar continuidade aos estudos relacionados ao quadricóptero já desenvolvidos pelo Núcleo de Automação e Controle (NAuCO), vinculado ao Departamento de Engenharia Mecânica e de Produção (Demecp) da UEMA, porém, o desenvolvimento deste projeto tem uma visão distinta em relação ao já desenvolvido. Este, parte da análise dos componentes do quadricóptero até a construção e validação do modelo de bancada de teste.
- Oportunidade de aplicar conhecimentos adquiridos na área de engenharia de controle, vibrações mecânicas e projeto de sistemas mecânicos, que foram de suma importância para o desenvolvimento deste trabalho.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

Os vants do tipo quadricóptero, estão sendo muito utilizados em praticamente todas as áreas de conhecimento atualmente, pois antes seu uso se limitava aos projetos militares ou de grande porte.

O estudo e construção deste veículo se tornaram mais fáceis devido à alta tecnologia de controle presente nos quadricópteros, além de, serem úteis para várias aplicações que dependem da necessidade do usuário, como para salvamento auxiliando os salva-vidas a localizar afogamentos, por exemplo.

A construção desde aeromodelo é simples mas precisa ter um conhecimento da atividade de cada componente dos quadricópteros para garantir segurança tanto na montagem

quanto ao funcionamento, pois caso os componentes necessários para a montagem não estejam trabalhando na mesma faixa de especificação causará acidentes e irá danificar o modelo.

Logo, a motivação deste projeto é de facilitar a escolha dos componentes, principalmente na determinação do sistema propulsor do quadricóptero.

### 1.3 METODOLOGIA

Para a realização deste trabalho, buscou-se materiais relevante ao problema para delimitação da sua abordagem teórico-prática. Assim, possibilitou determinar o foco de pesquisa, que é sobre o estudo do sistema propulsor elétrico, por este ser o ponto mais instigante no quesito estabilidade.

Para alcançar os objetivos, o projeto seguiu a metodologia abaixo.

#### **I – Estudo dos componentes da bancada**

Neste item, fez-se análises e estudos dos elementos indispensáveis para a montagem de um quadricóptero, como motor, hélices, ESCs, bateria.

Também, se verificou a compatibilidade dos elementos de modo que não houvesse danos aos materiais e nem ao pesquisador.

Determinou-se a escolha de cada elemento, assim como os softwares, hardwares e sensores que seriam usados para a execução dos testes.

#### **II – Projeto da Bancada de teste**

Nesta etapa, foram feitos os esboços do protótipo, determinando suas dimensões e estabelecendo seus componentes de acordo com a estrutura que seria construída, permitindo a coleta de parâmetros como torque, empuxo e vibração.

#### **III – Construção da bancada**

Nesta etapa foram confeccionados os componentes necessários para a montagem do protótipo. Parte dos componentes estavam disponíveis no Núcleo de Automação e Controle (NAuCO) da Universidade Estadual do Maranhão.

#### **IV – Realização de testes**

Foram determinados os fatores como empuxo, torque gerados de diversos pares de motores e hélices, sendo o modelo do motor fixo, variando-se os diâmetros da hélice de modo a estabelecer o sistema propulsor mais eficiente.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 HISTÓRIA DOS QUADRICÓPTEROS

A ideia de uma máquina voadora originou-se e foi concebida cerca de 2500 anos atrás, em 425 A.C., quando Archytas, cientista grego, criou o primeiro VANT (Veículos Aéreos Não Tripulados) de todos os tempos através da construção de um pássaro mecânico, um pombo (Pigeon) que podia voar movendo suas asas e obter energia a partir de um mecanismo em seu estômago. Alega-se que ele voou cerca de 200 metros antes de cair no chão, uma vez que toda a energia foi usada (VALAVANIS, 2007).

Nos tempos modernos, os VANTs apareceram durante a I Guerra Mundial (1917). Por mais de dez anos após o fim da Primeira Grande Guerra, o desenvolvimento de Veículos Aéreos Não Tripulados sofreu uma pequena estagnação, e a maioria dos projetos em andamento seriam utilizados para treinamento militar em aplicações que pudessem identificar os possíveis ataques de inimigos. Em meados da década de 40, durante a Segunda Guerra Mundial, a utilização de Veículos Aéreos Não Tripulados começou a serem utilizados para outros fins. Nas décadas que se seguiram, os avanços tecnológicos permitiram a utilização de VANTs em missões mais estratégicas, como tarefas de reconhecimento e espionagem (NETO, 2008).

Na década de 70, surgiu a era dos VANTs modernos, desenvolvidos para serem menores, mais baratos e mais eficientes. A Guerra do Vietnã e a Guerra Fria impulsionaram uma variedade de programas de desenvolvimento de VANTs (CAMACHO; YUHAS, 2004). Dessa época até então, diversos outros projetos de veículos aéreos foram desenvolvidos ao redor do mundo, tanto no setor militar quanto civil. Em (VALAVANIS, 2007), encontra-se um histórico mais completo sobre esses veículos não tripulados.

Os Veículos aéreos, em geral, são classificados segundo sua topologia como aeronaves de asa fixa (aviões), asa rotativa (helicópteros e multicópteros) (ALVES, 2012). Cada topologia possui suas características específicas em relação a cada aplicação. Por exemplo, para voos de alta duração, os aviões são mais usados, já para voos em altitudes mais baixas, os helicópteros são escolhidos pela capacidade de pairar, mover para trás e para os lados, e por serem mais precisos na coleta de dados em diversas situações. As figuras 1 e 2 apresentam as configurações de aeronaves de asa fixa e asa rotativa.

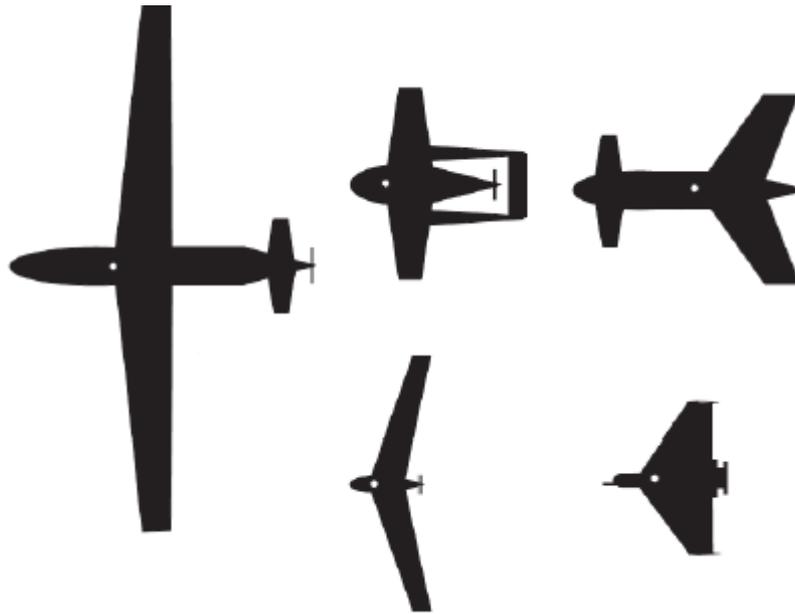


Figura 1-Configurações de aeronaves de asa fixa

Fonte: AUSTIN,2011

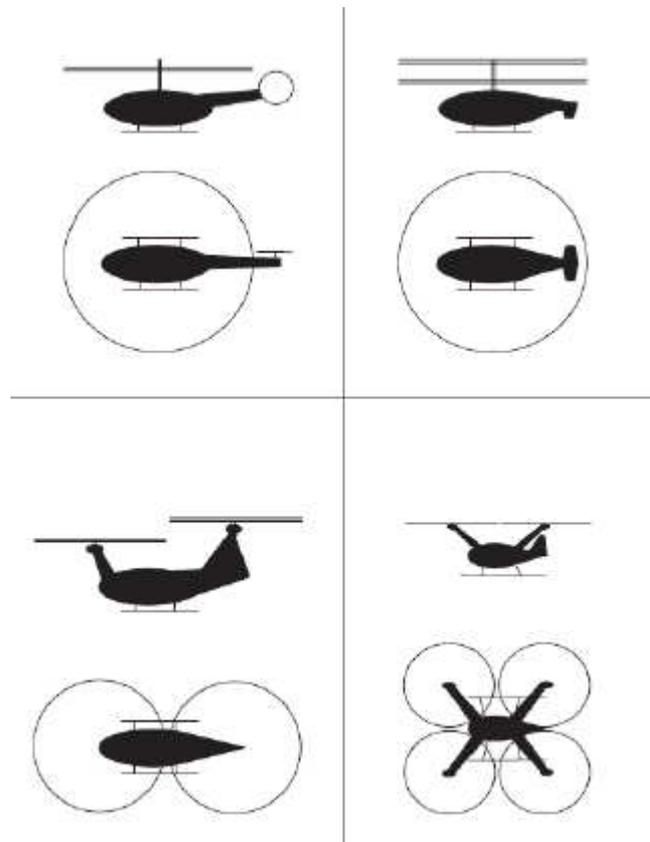


Figura 2-Configurações de aeronaves de asa rotativa

Fonte: AUSTIN,2011

Os VANTs são utilizados em várias aplicações como, monitoramento e busca em grandes áreas, inspeção de linhas de transmissão de energia, salvamentos, mapeamento de ambientes. Basicamente são usados em áreas de difícil acesso ao homem. A Figura 3, mostra um tipo de VANT usado para mapear ambientes.



Figura 3-VANT (Quadricóptero) utilizado para realizar mapeamentos de ambiente

Fonte: BACHRACH; HE; ROY, 2009

A maior parte das aplicações nasceram de órgãos militares para o combate contra inimigos, porém, atualmente, de acordo com NETO,2008, outras aplicações de maior interesse para o setor civil vem sendo alvo de pesquisa e desenvolvimento, possibilitando a utilização industrial e comercial desses veículos.

## 2.2 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DOS QUADRICÓPTEROS

Os quadricópteros são VANTs de asas rotativas, onde sua estrutura tem formato de X e não necessitam de piloto embarcado para funcionar. Estes são compostos de vários elementos eletrônicos como Esc's, baterias Lipo, motor *brushless* (motores sem escovas), hélices, que são controlados por meio de rádio ou por controle remoto, para se manterem voando com uma certa estabilidade. Tal estabilidade depende basicamente do sistema propulsor

elétrico. Este sistema, exige que o motor e a hélice sejam compatíveis de modo que atendam as expectativas de funcionamento.

Nas extremidades da estrutura dos quadricópteros, ficam localizados os motores e as hélices de modo que duas hélices precisam girar para esquerda e as demais para a direita, de modo que o momento seja anulado e o quadricóptero comece a voar, conforme Figura 4. Onde, M1, M2, M3 e M4, representam os quatro motores necessários para o funcionamento.

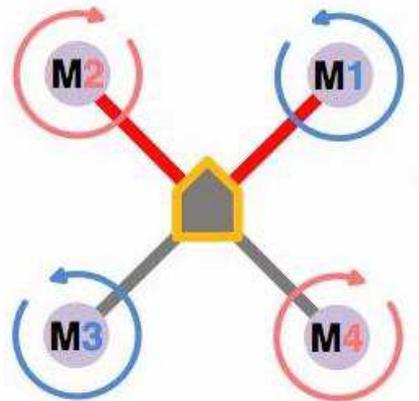


Figura 4- Estrutura dos quadricópteros

Fonte: [http://montandoumquadricoptero.blogspot.com.br/2014\\_02\\_01\\_archive.html](http://montandoumquadricoptero.blogspot.com.br/2014_02_01_archive.html)

### 3 ESTUDO DOS COMPONENTES DA BANCADA

Neste tópico serão abordados os componentes utilizados para o devido estudo do sistema propulsor elétrico dos quadricópteros e seus respectivos funcionamentos.

#### 3.1 MOTOR BRUSHLESS

Os motores de corrente contínua sem escovas ou motores BLDC (*brushless DC*) são motores elétricos síncronos alimentados por inversor (driver) através de alimentação de corrente contínua normalmente de baixa tensão. Oferecem diversas vantagens sobre os motores de corrente contínua com escovas (*brushed*), dentre as quais se podem destacar a confiabilidade mais elevada, o ruído reduzido, a vida útil mais longa (devido à ausência de desgaste da escova), a eliminação da ionização do comutador, e a redução total de interferência eletromagnética (MENDES,2016).

Essas características são interessantes para o desenvolvimento de quadricópteros, pois é importante que os motores gerem o mínimo ruído possível pelo fato do controlador eletrônico de velocidade se localizarem próximo a estes. Além disso, por não haver desgaste da escova, o rendimento do motor aumenta diminuindo o consumo de energia garantindo maior tempo e autonomia de voo.

Nos motores *brushless*, a passagem de energia passa somente pela carcaça, parte de fora do motor elétrico. Na parte interna ele utiliza ímã permanente. Estes tipos de motores têm como requisito a utilização de um ESC (controlador de velocidade), utilizados para controlar o fluxo de energia para os motores *brushless*. O design dos motores *brushless* permite uma rotação (RPM) relativamente baixa e com torque muito alto.

Nos experimentos realizados utilizou-se um motor elétrico modelo AX-2810Q do tipo *brushless*, ilustrado na Figura 5.



Figura 5- Motor brushless utilizado no projeto

Fonte: [https://hobbyking.com/en\\_us/ax-2810q-750kv-brushless-quadcopter-motor.html?\\_\\_store=en\\_us](https://hobbyking.com/en_us/ax-2810q-750kv-brushless-quadcopter-motor.html?__store=en_us)

Esse modelo possui as especificações apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Especificações do motor Brushless AX-2810Q

<b>Número de células (alimentação)</b>	3 S-4 S Lipo
<b>Corrente Máxima</b>	25 A
<b>Potência Máxima</b>	280 W (3S) / 370 W (4S)
<b>Velocidade</b>	750 KV (rpm/V)
<b>Peso</b>	72 g
<b>Corrente a vazio</b>	0,82 A
<b>Tipo de rotor</b>	Outrunner
<b>Tensão de alimentação</b>	14,8 V

### 3.2 ESC (ELECTRONIC SPEED CONTROLLER)

Um controle eletrônico de velocidade, ou ESC (*Electronic Speed Control*) é um componente que controla a velocidade de um motor *brushless* por meio de uma tecnologia conhecida como modulação por largura de pulso (MLP), mais conhecida pela sigla em inglês PWM (*Pulse-Width Modulation*).

O sinal PWM escolhido para controlar os motores possui um período de 2 ms. O tempo mínimo que o sinal permanece em nível lógico alto é de 1 ms, e o tempo máximo, 2 ms (ALVES,2012).

O controle da velocidade se dar variando a frequência e a amplitude do sinal de saída. Assim, os Esc's interpretam o sinal de controle e gera em sua saída um sinal trifásico, como mostra Figura 6.

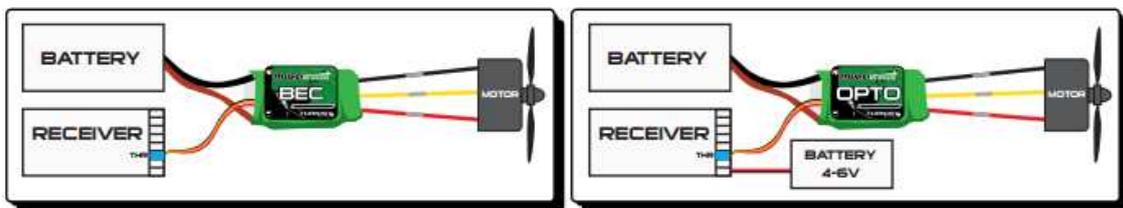


Figura 6- Terminais de entrada e saída de um ESC e suas conexões

Fonte: <https://hobbyking.com/media/file/1042307457X948945X43.pdf>

Basicamente os ESCs possuem três saídas trifásicas onde são conectadas ao motor *brushless* para que haja o devido controle da velocidade. Também possuem dois fios (preto e vermelho), localizados a esquerda, onde se deve conectar uma fonte de energia, que no caso é a bateria tipo Lipo.

Existem algumas configurações de ESC em que os terminais Vcc e gnd servem como fonte de alimentação para outros dispositivos, ou seja, ao invés de serem terminais de entrada para alimentação do ESC, funcionam como terminais de saída. Este tipo de ESC é chamado de BEC (*Battery Eliminator Circuit*), pois eliminam o uso de uma bateria extra para alimentar outros circuitos (ALVES,2009).

O modelo do ESC utilizado é da marca Multistar como mostra a Figura 7.



Figura 7- ESC Multistar 30 A

Fonte: [https://hobbyking.com/en\\_us/turnigy-multistar-30-amp-blheli-multi-rotor-brushless-esc-2-6s-v2-0.html](https://hobbyking.com/en_us/turnigy-multistar-30-amp-blheli-multi-rotor-brushless-esc-2-6s-v2-0.html)

Estes ESC's possuem uma elevada qualidade, quando se diz respeito a instalações simples e de fácil instalação. Na Tabela 2, estão representadas as características.

Tabela 2 – Especificações do ESC Multistar

<b>Corrente</b>	30 A
<b>Número de células (alimentação)</b>	2-6 Células Lipo
<b>Frequência</b>	20 – 500 Hz
<b>BEC</b>	Sim (Comutação)
<b>BEC saída</b>	5 V/ 4A PWM: 8 Hz
<b>Peso</b>	35 g
<b>Máxima Rotação (RPM)</b>	240.000 RPM para dois pólos do Motor Brushless

### 3.3 BATERIA LIPO

O tipo de bateria mais utilizadas para estudo dos quadricóptero é a bateria tipo Lipo (*Lithium-Polymer*), pois estas possuem maior capacidade em relação ao peso e de alto desempenho. Para que seja feita a escolha ideal do tipo de bateria que, precisa-se levar em consideração as propriedades do motor, como potência consumida, tensão de alimentação entre

outras. O conhecimento das características da bateria é importante pois, quanto maior for sua capacidade, mais autonomia o quadricóptero terá.



Figura 8- Bateria Zippy Compact (Lipo)

Fonte: [https://hobbyking.com/en\\_us/zippy-compact-2700mah-3s-25c-lipo-pack.html](https://hobbyking.com/en_us/zippy-compact-2700mah-3s-25c-lipo-pack.html)

A bateria utilizada é mostrada na Figura 8 e suas características são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 – Especificações da Bateria Zippy Compact (LIPO)

<b>Capacidade</b>	2700 mAh
<b>Voltagem</b>	11,1 V
<b>Número de células</b>	3
<b>Taxa de descarga</b>	25C (constant)/ 35C (Burst)
<b>Massa</b>	253g

### 3.4 HÉLICES

A hélice assim como o motor, compõe o que chamamos de Sistema propulsor. Sua função é transformar a energia mecânica vinda do motor, em movimento rotacional. Esta função, de acordo com a velocidade do motor, fornece força para a elevação e sustentação dos quadricópteros. Para isso, as hélices precisam ser duas direitas e duas esquerdas, para anular o momento entre elas e o quadricóptero se estabilizar no ar.

As Figuras 9 e 10 mostram, respectivamente, a anatomia de uma hélice de quadricóptero e os perfis ao longo da pá.

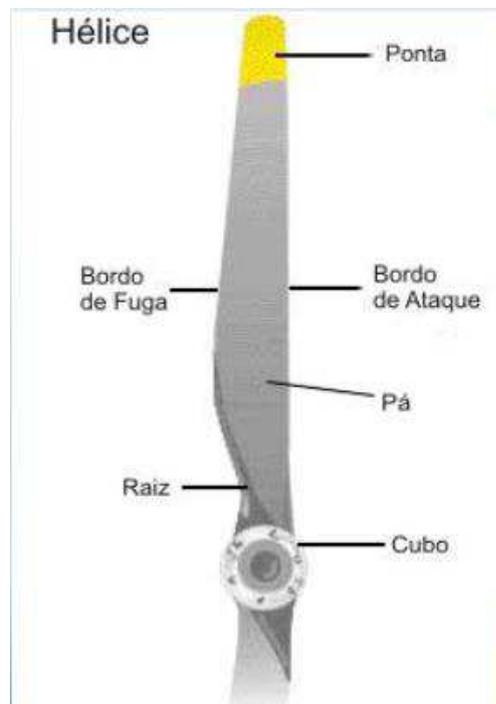


Figura 9- Anatomia das hélices

Fonte: [http://mautone.eng.br/apostilas/propulsao1/PropulsaoI\\_MotoresAHelice.pdf](http://mautone.eng.br/apostilas/propulsao1/PropulsaoI_MotoresAHelice.pdf)

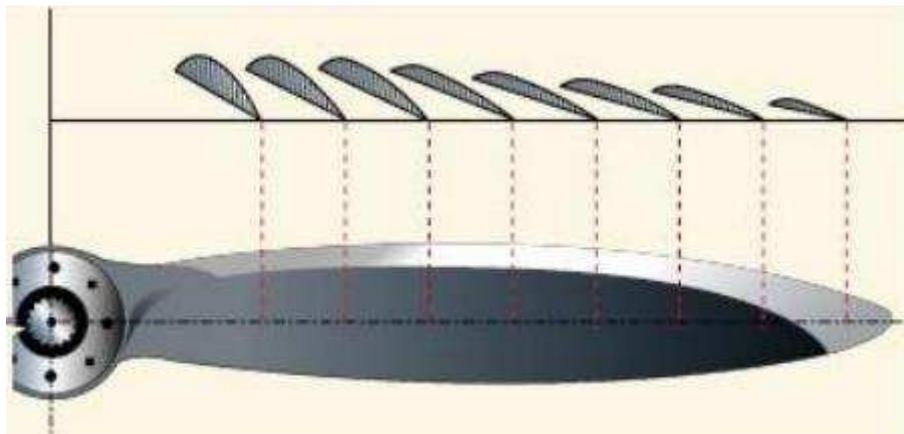


Figura 10- Perfis ao longo da pá

Fonte: [http://mautone.eng.br/apostilas/propulsao1/PropulsaoI\\_MotoresAHelice.pdf](http://mautone.eng.br/apostilas/propulsao1/PropulsaoI_MotoresAHelice.pdf)

Existem variados formatos de pá, sendo este variando de acordo com o número de *mach* ( $M$ ) da hélice, conforme Figura 11.

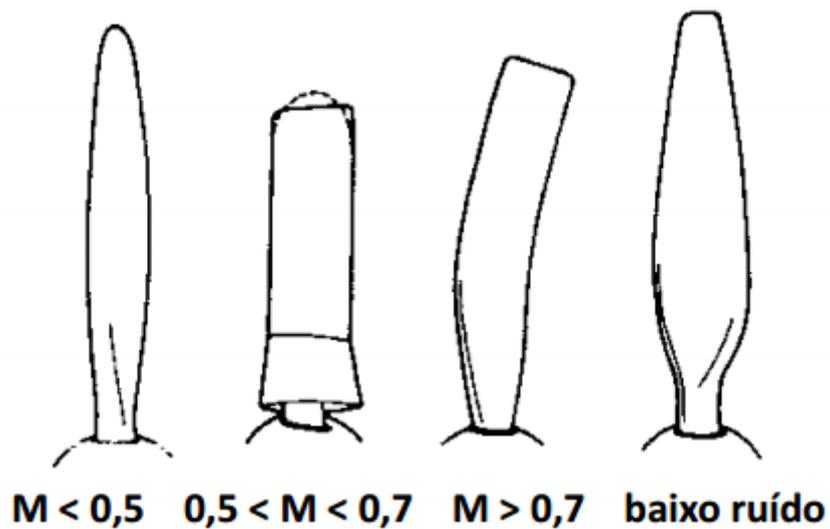


Figura 11- Forma em planta da pá

Fonte: [http://mautone.eng.br/apostilas/propulsao1/PropulsaoI\\_MotoresAHelice.pdf](http://mautone.eng.br/apostilas/propulsao1/PropulsaoI_MotoresAHelice.pdf)

O Número de *Mach* ou velocidade *Mach* ( $M$ ) é uma medida adimensional de velocidade e mostra a relação entre a velocidade do objeto e a velocidade do som. Este é obtido conforme Equação 1 (ANAC, 2008)

$$M = V_o/V_s$$

Equação (1)

Sendo

$M$ : número de *mach*

$V_o$ : velocidade do objeto

$V_s$ : velocidade do som

No mercado de automodelos existem vários modelos de hélices, mas basicamente pode-se resumi-los em dois grupos: para baixas rotações o modelo mais utilizado são as *Slow Flyers* (SF), já para medias e altas rotações são usadas os tipos E, HD e SPORT.

Suas características principais são o diâmetro e o passo.

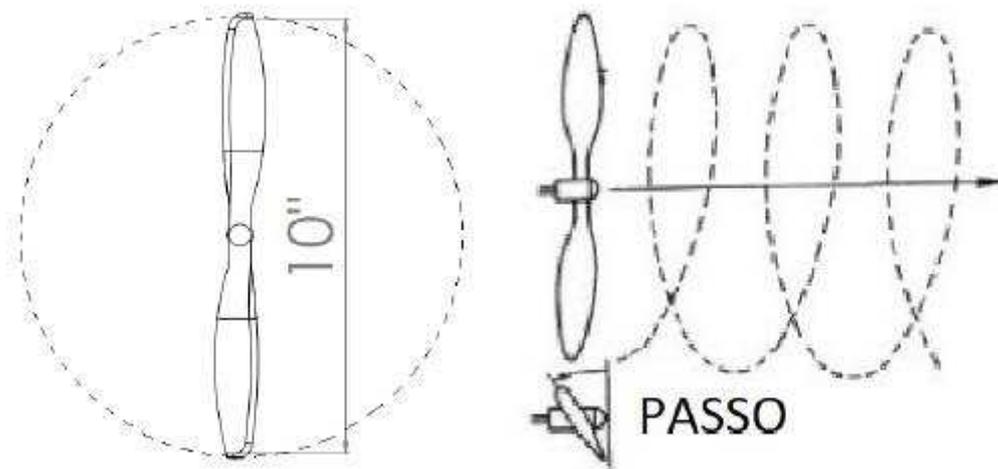


Figura 12- Diâmetro e passo das hélices bipás

Fonte: ALVES, 2012

O tamanho da hélice é obtido pelo diâmetro do círculo descrito quando a hélice gira, enquanto que o passo é a distância que a hélice percorre quando completa uma volta, como mostra Figura 12.

Para este projeto, utilizou-se as hélices *Slow Flyers* mantendo o passo (4,5") das mesmas e variando o diâmetro (6", 8" e 10") de modo a determinar a influência desse fator no desempenho do quadricóptero. O modelo das hélices está representado na Figura 13.



Figura 13- Hélices 10x4,5" (cima), 8x4,5" (meio) e 6x4,5" (baixo)

Fonte: autor

### 3.5 FRAME

O frame do quadricóptero define qual a estrutura deste, ou seja, o frame é a base de sustentação e é neste que estão localizados todos os componentes citados nas seções acima.

A sua estrutura é em formato de X, onde o Sistema motopropulsor se localiza na extremidade, conforme Figura 14.



Figura 14- Estrutura do frame de um quadricóptero

Fonte: <http://rj.olx.com.br/rio-de-janeiro-e-regiao/hobbies-e-colecoes/kit-quadricoptero-x525-17444111>

Para este trabalho, utilizou-se um quarto da propulsão do quadricóptero, ou seja, metade do frame contendo apenas um par motor-hélice. Sendo assim, a construção da bancada foi realizada para fixar a barra (metade do frame) para análise e coleta de dados.

### 3.6 SENSOR DE VIBRAÇÃO

O sensor utilizado no projeto é o sensor de vibração SW-420 (Figura 15). Este foi posto próximo ao motor (local de maior ocorrência desse fenômeno). Este sensor, possui três pinos, VCC (entrada), GND (alimentação) e o D0 (saída digital). Seu princípio de funcionamento se baseia simplesmente em indicar o instante que há e não há vibração de acordo com as leituras, sendo esta 1 ou 0, respectivamente. Este sensor fornece como resultado o tempo (microsegundos) de ativação do sensor, ou seja, verifica o instante em que há vibração e mostra

quanto tempo ela demora para ser desativada. Este resultado, é devido ao uso da função pulseIn no código de programação (Anexo A).

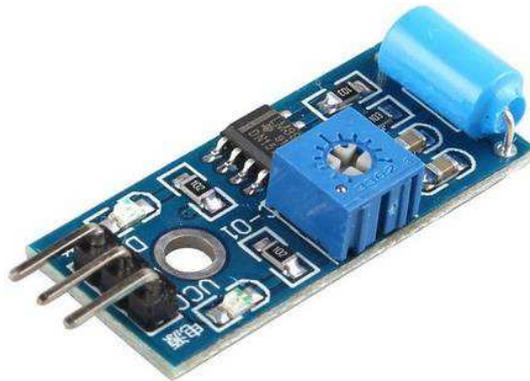


Figura 15-Sensor de Vibração SW-420

Fonte: <http://www.vidadesilicio.com.br/sensor-de-vibrac-o-sw-420.html>

### 3.7 MICROCONTROLADOR

O Arduino Uno é uma placa de microcontrolador baseado no ATmega328. Ele tem 14 pinos de entrada ou saída digital sendo 6 pinos usados como saídas PWM, 6 entradas analógicas, uma conexão USB. As demais características deste controlador podem ser vistas na Tabela 4.

Tabela 4 – Especificações do microcontrolador Arduino UNO

<b>Microcontrolador</b>	AT-Mega328
<b>Voltagem Operacional</b>	5V
<b>Voltagem de entrada (recomendada)</b>	7-12V
<b>Voltagem de entrada (limites)</b>	6-20V
<b>Pinos E/S digitais</b>	14
<b>Pinos de entrada analógica</b>	6
<b>Corrente CC por pino E/S</b>	40 mA
<b>Corrente CC para o pino 3,3V</b>	50 mA

Ele contém todos os componentes necessários para suportar os dados nele inseridos, bastando simplesmente conectar a um computador pela porta USB.

O microcontrolador utilizado no projeto pode ser visto na Figura 16. Nele foi criado um código de programação, onde este possui a responsabilidade de comandar as ações necessárias para movimentar o quadricóptero.



Figura 16-Placa Controladora Arduino Uno

Fonte: <http://comphaus.com.br/home/?wpsc-product=arduino-uno-r3>

O Arduino deve ler e interpretar os sinais dos sensores utilizados (sensor de vibração sw-420), rodar o programa, gerar os sinais que devem ser enviados para o ESC, para controle de velocidade do motor e por fim mostra os dados de interesse no serial monitor para facilitar na interpretação dos resultados.

## 4 PROJETO DA BANCADA DE TESTE

Neste tópico, será abordado sobre o modelo da bancada de teste em relação a sua estrutura. Para isso, foi indispensável o uso de Softwares de Prototipagem e Simulação como o SolidWorks.

### 4.1 SOLIDWORKS

O SolidWorks é uma ferramenta de projeto que utiliza a modelação paramétrica de sólidos, baseada em características e propriedades de cada elemento e ação, sendo possível alterá-las em qualquer altura do processo de modelagem (HUGO, 2002).

Este software fornece aos profissionais, como os engenheiros, as ferramentas necessárias para a criação de projetos. Ou seja, é possível verificar a estrutura e comportamentos das peças além de, ganhar tempo em relação à montagem das mesmas. Isto, é devido a facilidade de encontrar erros podendo estes ser evitados em uma montagem real por exemplo.

Outro ponto diz respeito à diminuição dos custos. De acordo com (HUGO,2002), uma pesquisa da MIT realizada em 2006 com usuários do SolidWorks, dizia que 54% dos entrevistados informaram que houve redução no tempo de lançamento do produto no mercado, com uma redução média de 20%, e uma economia de material de até 18%.

Logo verifica-se que o uso do SolidWorks é imprescindível para as empresas por apresentar diversas maneiras de utilização, além de ser eficiente na criação de projetos físicos.

### 4.2 BANCADA DE TESTE

Como dito na seção 3.5, o modelo de bancada conteria metade do frame de um quadricóptero. A Figura 17, mostra o modelo de bancada utilizado, o qual foi desenvolvido pelo Núcleo de Automação e Controle (NauCo), localizado na Universidade Estadual do Maranhão (UEMA).

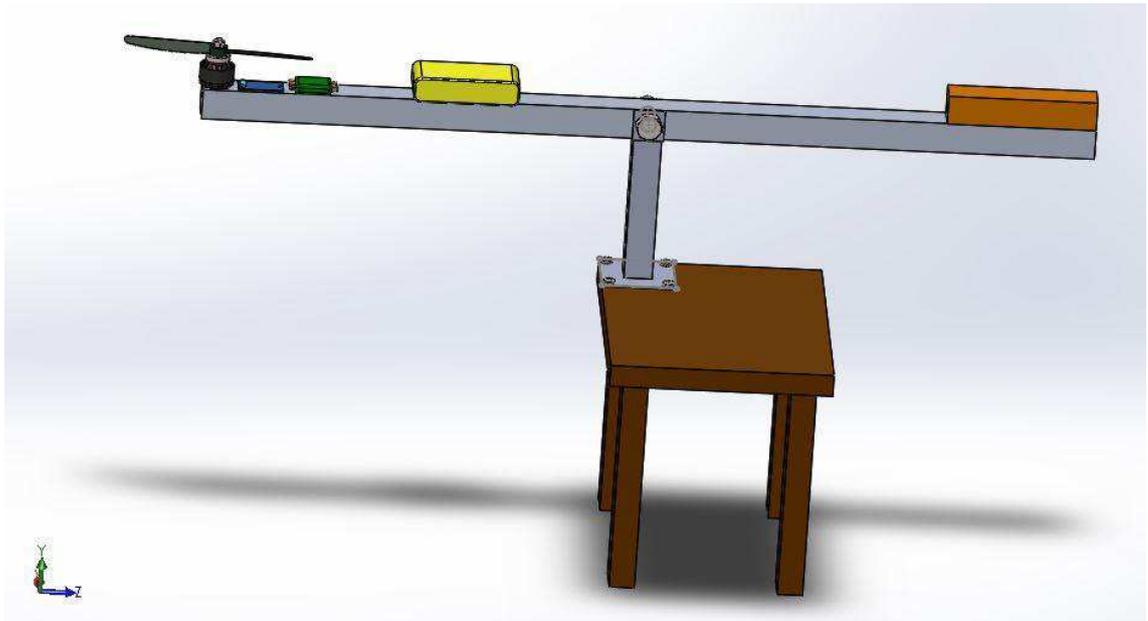


Figura 17-Modelo da bancada de teste

Fonte: Autor

A bancada foi desenvolvida para gerar os seguintes parâmetros: torque, empuxo e amplitude de vibração.

Para o dimensionamento da bancada foi usado as especificações do motor *brushless* como ponto de partida. A partir disso, determinou-se que o braço do frame (barra) que seria de 60 centímetros (cm) de comprimento e que a bancada possuiria um grau de liberdade, ou seja, realizaria o movimento translacional, conforme Figura 18. Isto, é devido a configuração da montagem (utilização de apenas um par motor/hélice), atendendo os objetivos do trabalho.

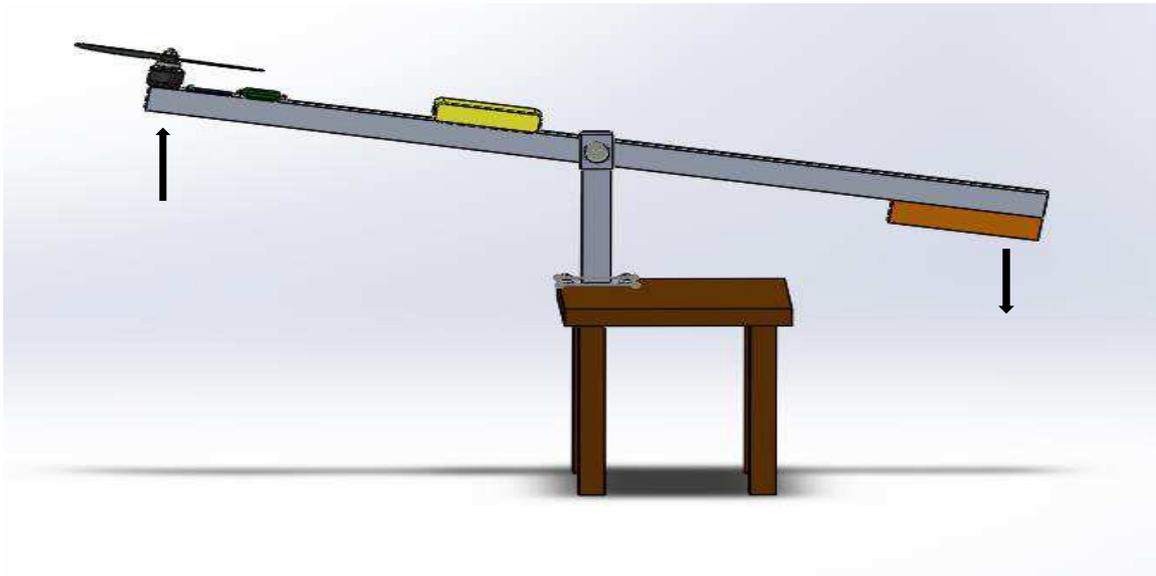


Figura 18-Movimentos da bancada de teste

Fonte: Autor

Para o controle desses movimentos e para a leitura do sensor de vibração, fez-se uma rotina de programação (Anexo A) no microcontrolador Arduino UNO, comentado na Seção 3.7.

A montagem do circuito se encontra na Figura 19.

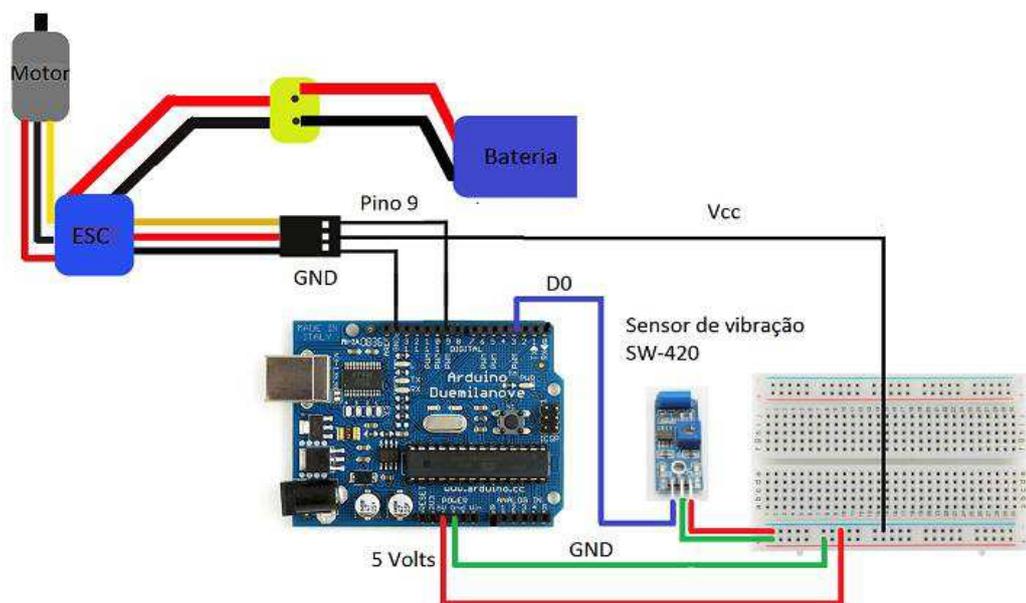


Figura 19-Circuito no Arduino UNO

Fonte: Autor

O motor é conectado ao ESC, de modo a ter sua velocidade controlada. Este deve ser ligado a uma fonte de energia – bateria tipo Lipo, comentado na seção 3.3, assim como nos pinos terra e digital da placa controladora. A velocidade do motor é controlada diretamente na programação a fim de automatizar o processo, sendo esta variando de 2,67 % da potência do motor a cada três segundos. Neste trabalho trabalhou-se com 60% da potência máxima do motor (180 W- faixa de segurança), ou seja, o motor acelera gradativamente até chegar em 60% da potência enviada ao motor e deste ponto em diante, o motor começa o processo de desaceleração chegando a 0%.

## 5 ANÁLISE EXPERIMENTAL

### 5.1 ANÁLISE DA ESTRUTURA DA BANCADA

Verificar a resistência de uma estrutura é primordial para conhecer os limites de força e suas possíveis deformações. Sendo assim, neste trabalho, fez-se a análise de força da bancada de teste utilizando o método de elementos finitos (Critério de von Mises). Este método, responde a aplicação de carga em diferentes pontos da estrutura levando em consideração o tipo de material.

Para o projeto, aplicou-se uma força de 50 N na extremidade da barra, como ilustra a Figura 20, sendo o alumínio ASTM 6063 T5 o material da estrutura da bancada. Este material possui limite de escoamento de 145 MPa e módulo de elasticidade 69 GPa.

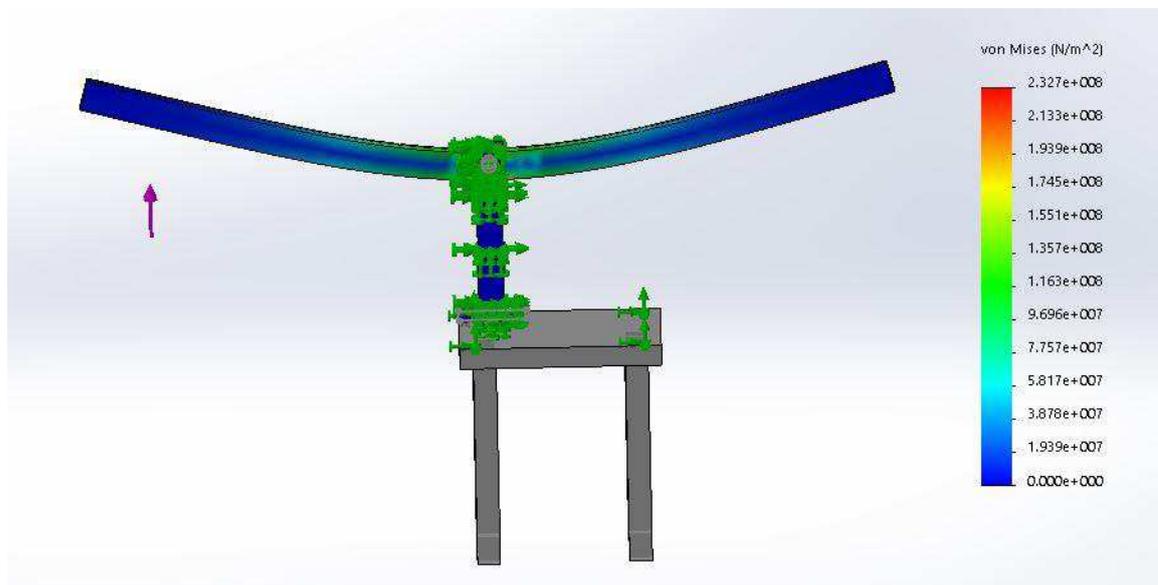


Figura 20-Análise de resistência no SolidWorks.

Fonte: autor

Os pontos que possuem maiores esforços se localizam na parte central da bancada (ponto de fixação entre a barra e a haste fixa), sendo a máxima tensão neste ponto é de aproximadamente 2,33 MPa, o que garante segurança no momento da realização dos testes.

## 5.2 MEDIÇÃO DE TORQUE E EMPUXO

O desempenho do quadricóptero é diretamente proporcional à eficiência do sistema propulsor, ou seja, do conjunto motor/hélice (DA SILVA).

Para a obtenção do empuxo e torque gerados, utilizou-se o princípio da alavanca para a obtenção de um controle adequado do comportamento dinâmico dos quadricópteros.

O empuxo, é uma grandeza física que determina quanta força um sistema de propulsão produz. Sua unidade no SI é Newton (N). Enquanto que, o torque, determina quanta força um motor consegue fazer girando. É expresso em Newtons x metro (Nm) no sistema internacional de unidade (SI).

Sendo assim, encontrou-se o empuxo e torque através das Equações 2 e 3, respectivamente.

$$F_{em} = m * G \quad \text{Equação (2)}$$

$$T = F_{em} * D \quad \text{Equação (3)}$$

Sendo:

Fem: força de empuxo (N)

G: aceleração da gravidade (9,81 m/s<sup>2</sup>)

T: torque (Nm)

D: Distância entre o ponto de fixação (centro da estrutura) e sua extremidade, equivalente a 30 centímetros (cm), conforme Figura 21.

Para a determinação desses parâmetros foi indispensável o uso de uma balança digital para encontrar a massa (kg) e realizar os cálculos corretamente.

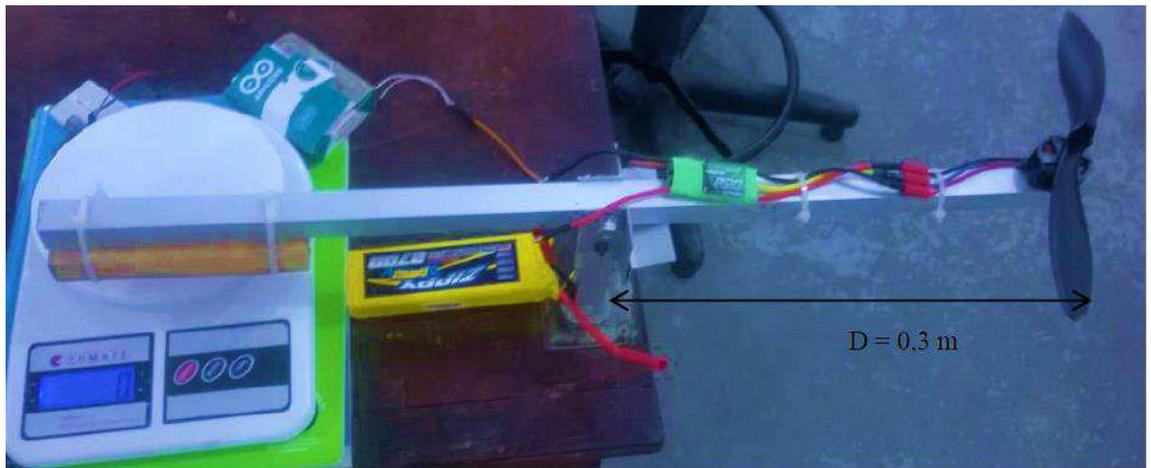


Figura 21-Bancada de testes

Fonte: autor

## 6 RESULTADOS

Como dito na Seção 1.3, buscou encontrar três parâmetros: vibração provocada pela hélice, torque e empuxo. Sendo que a massa (kg) necessária para se calcular o torque e empuxo foi obtida na balança digital de forma manual, enquanto que o tempo de ativação do sensor de vibração, transmitido através do sensor SW-420 foi obtido automaticamente por meio da programação no Arduino UNO.

Outro ponto corresponde à velocidade do motor. Esta, é controlada pelo Arduino utilizando cerca de 66,67% da potência total do motor (270W), garantindo segurança e boa leitura durante a coleta de dados.

A velocidade do motor aumenta gradativamente, variando em 2,67% da potência transmitida pelo motor, gerando cerca de 46 dados (aceleração e desaceleração).

Nos tópicos 6.1, 6.2 e 6.3, mostram graficamente os dados de vibração, empuxo e torque comparando os resultados gerados para cada uma das hélices testadas.

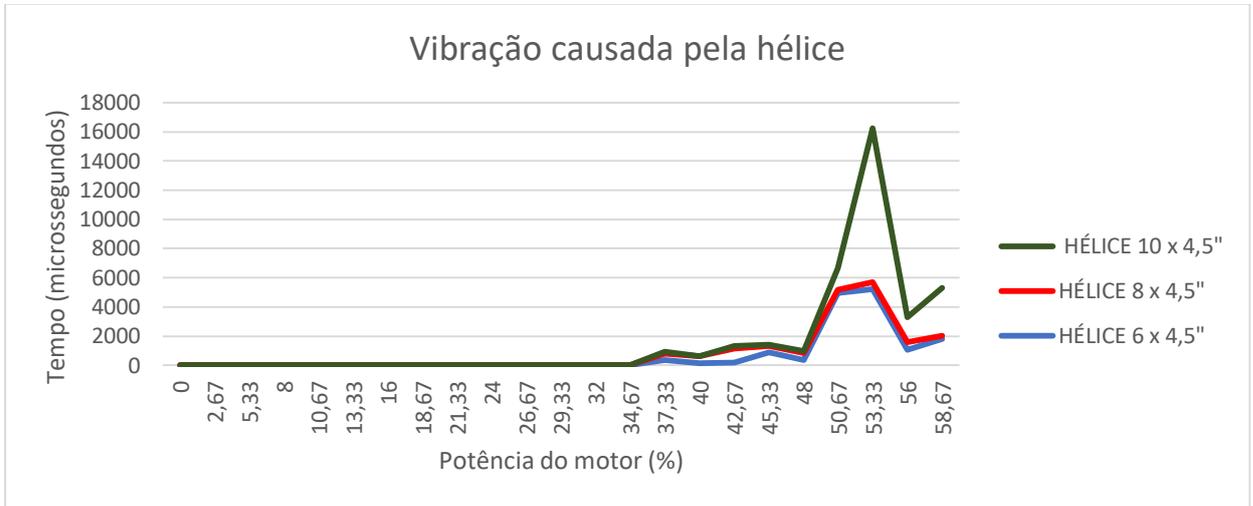
### 6.1 VIBRAÇÃO

O sensor utilizado para identificar o fenômeno vibracional foi o sensor SW-420. Este sensor apenas indica quando há e quando não há vibração. Este sensor foi posto próximo ao motor, na parte superior da barra principal, por este ser o local que apresenta maiores índices deste fenômeno.

O Gráfico 1, mostra a vibração provocada pelas hélices 6x4,5” (cor azul), 8x4,5” (cor vermelho) e 10x4,5” (cor verde), no momento em que há aceleração do motor.

O gráfico mostra que entre 0 e 32% não há vibração. Isto acontece devido ao tempo de leitura do ESC (responsável pelo controle da velocidade), permitindo que haja aumento da velocidade somente a partir de 34,67% da potência do motor. De 34% até cerca de 60% o motor está em estado de aceleração. Quando atinge 60 % da potência do motor inicia o processo de desaceleração (não mostrado no gráfico).

Gráfico 1-Vibração causada pela hélice durante a aceleração do motor



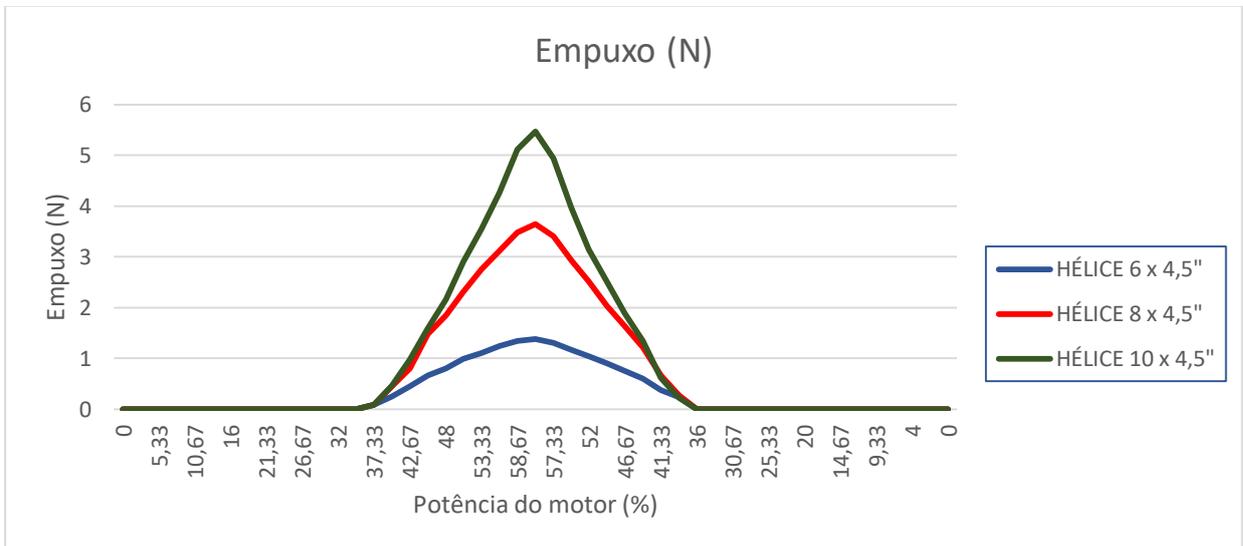
Fonte: autor

De acordo com o Gráfico 1, a vibração é mais evidente na hélice de maior diâmetro (10''). Em 53,33% da potência do motor, a vibração da hélice 10x4,5'' permanece mais tempo com o sensor ativado indicando maiores amplitude de vibração, decrescendo a partir deste ponto até 58,67% (momento que se inicia o processo de desaceleração do motor).

## 6.2 EMPUXO (N)

O empuxo mede a força exercida pela hélice. O Gráfico 2, mostra a força de cada uma das hélices estudada, de modo a estabelecer o diâmetro que exerce maior influência no estudo deste parâmetro. Logo, a hélice 10x4,5'' se destaca positivamente neste quesito, pois para uma mesma velocidade, as hélices 6x4,5'' e 8x4,5'' precisam ter uma força maior para alcançar a mesma propulsão da hélice de maior diâmetro.

Gráfico 2-Média dos dados de Empuxo



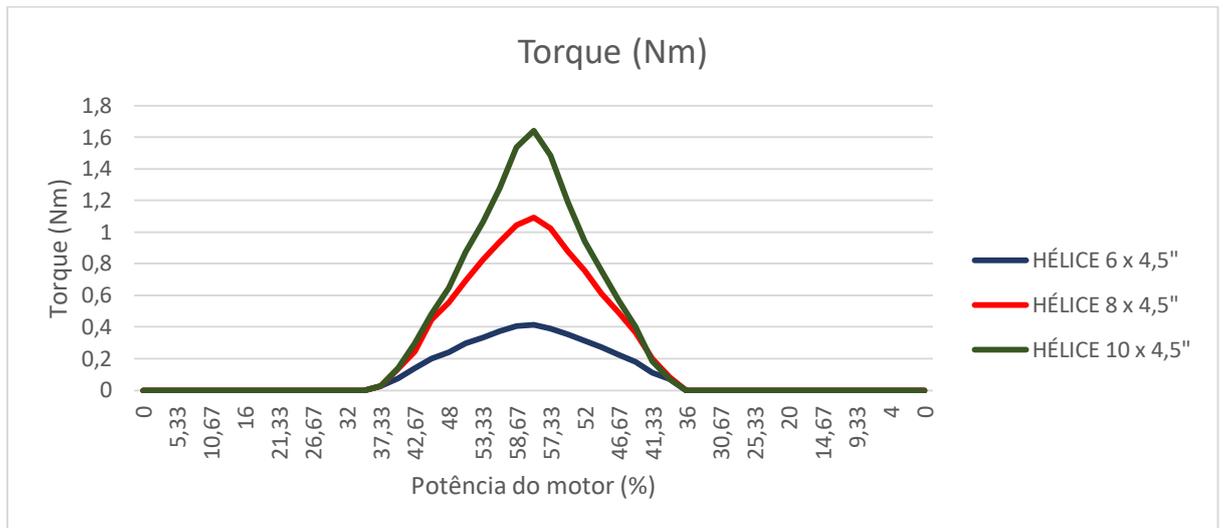
Fonte: autor

### 6.3 TORQUE (Nm)

O resultado de torque apresentado no Gráfico 3, tem comportamento semelhante ao Empuxo (Gráfico 2). Esta semelhança é devido ao fator distância, essencial para o cálculo de torque, ser uma constante.

Assim, a hélice de 10x4,5" apresenta valores mais elevados em relação as de menor diâmetro, indicando que esta precisa ter mais força para girar a barra. No entanto, o torque, neste caso, não precisaria ser calculado pois, a análise mostrada na Figura 20, já garante que a bancada suporta valores elevados desse parâmetro.

Gráfico 3-Média dos dados de Torque



Fonte: autor

Sabe-se que veículos aéreos de asas rotativas voam com a força produzida pelas hélices (GÜÇLÜ, 2012), dessa forma as hélices 10x4.5" são mais indicadas, pois para uma mesma voltagem, esta possui uma força maior, garantindo maior estabilidade ao quadricóptero.

Dessa maneira, os parâmetros empuxo e torque, são diretamente proporcionais ao diâmetro da hélice, ou seja, quanto maior o diâmetro, maior será o torque e empuxo gerados em menores rotações do motor.

## 7 CONCLUSÃO

Este projeto foi dividido em três etapas: estudo dos componentes do quadricóptero, projeto e construção da bancada de teste e escolha adequada do sistema propulsor elétrico. É importante observar que estas três etapas são complementares, ou seja, para se ter sucesso na última etapa, por exemplo, é preciso que as duas primeiras sejam feitas corretamente.

Cada parte do projeto foi devidamente analisada, contribuindo para o bom funcionamento dos componentes.

O método utilizado para a seleção do sistema propulsor consistia em mudar o diâmetro das hélices mantendo seus passos constante (4,5”), assim como o modelo do motor.

Como resultado da comparação entre as hélices estudadas, a que possui 10” de diâmetro é a mais indicada quando se utiliza o motor *brushless* modelo AX-2810Q, garantindo melhor estabilidade no ar. Entretanto, é a que alcança maiores amplitudes de vibração por permanecer mais tempo com o sensor ativado. Logo, verificou-se que quanto maior o diâmetro, maior o empuxo e torque gerados, assim como a amplitude de vibração gerada pela hélice.

## TRABALHOS FUTUROS

Este projeto abre caminhos para o desenvolvimento de projetos futuros, possibilitando a montagem de um quadricóptero por completo, ou seja, com quatro motores. Para realizar esta tarefa é preciso que a bancada de teste seja modificada, a fim de suportar a propulsão gerada pelas quatro hélices.

Na rotina de programação feita no Arduino UNO, deve ser acrescentado comandos para ler e controlar os motores automaticamente no mesmo instante de tempo, possibilitando o controle e estabilidade do quadricóptero.

## REFERÊNCIAS

ALVES, Ana Sophia Cavalcanti. **Estudo e aplicação de técnicas de controle embarcados para estabilização de voo de quadricópteros**. 2012. 121f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2012.

AUSTIN, R. Unmanned aircraft systems: UAVS design, development and deployment. [S.l.]: Wiley, 2011.

ANAC. 2008. **Regulamentos Brasileiros de Aviação Civil**. Disponível em:<[http://www2.anac.gov.br/anacpedia/por\\_esp/tr352.htm](http://www2.anac.gov.br/anacpedia/por_esp/tr352.htm)>. Acesso em: Maio 2017.

BARROS, João Luis de Meneses. **Projeto de um veículo aéreo não tripulado modelo multicóptero**. 2014. Monografia (Graduação) – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual do Maranhão, São Luís, 2016.

CAMACHO, L.; YUHAS, C. Civil UAV. **Capability Assessment**. [S.l.], 2004.

COSTA, S. E. A. P. **Controlo e Simulação de um Quadrirotor convencional**. 2008. Tese de Doutorado. MS thesis, Tech. Univ. of Lisbon. Lisbon.

DA SILVA, Leonam Pecky; CORDEIRO, Cedric Salotto. **Quadricóptero, aspectos gerais e análises da propulsão elétrica**.

DE FOUR, Ronald et al. **Operational Characteristics of Brushless DC Motors**”. The University of the West Indies St. Augustine, Trinidad, 2007.

GOMES, Raif C. **Simulação de Voo Vertical de um Quadricóptero usando Software Livre**. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, Fortaleza/CE, Brasil, 2013.

GÜÇLÜ, Anil. **Attitude and altitude control of an outdoor quadrotor**. 2012. Tese de Doutorado. ATILIM UNIVERSITY.

HUGO ÂNGELO et al. **Introdução ao Solidworks**. 2002. Disponível em: <[http://www.dem.ist.utl.pt/~m\\_desI/download/sebentasw\\_V2.pdf](http://www.dem.ist.utl.pt/~m_desI/download/sebentasw_V2.pdf)>. Acesso em: Abril 2017.

MENDES. **Como funcionam os motores brushless**. Disponível em: <<http://mpmendes-electronica.blogspot.com.br/2010/08/como-funcionam-os-motores-dc-brushless.html>>. Acesso em: Dezembro 2016

NAIDOO, Yogianandh; STOPFORTH, Riaan; BRIGHT, Glen. **Quad-rotor unmanned aerial vehicle helicopter modelling & control**. International Journal of Advanced Robotic Systems, v. 8, n. 4, p. 139-149, 2011

NETO, 2008 NETO, A. A. **Geração de Trajetórias para Veículos Aéreos Autônomos Não-Tripulados**. Dissertação (Mestrado) | Universidade Federal de Minas Gerais, 2008.

VALAVANIS, K. P. **Advances in Unmanned Aerial Vehicles: State of the Art and the Road to Autonomy**. [S.l.]: Springer, 2007.

SANTANA, P. H.; BRAGA, M.A. **Concepção de um veículo aéreo não-tripulado do tipo quadirrotor**. Faculdade de Engenharia Mecatrônica, Universidade de Brasília, Brasília, 2008.

SILVA, Leonam Peçly da et al. **Quadrcóptero, Aspectos Gerais e Análises da Propulsão Elétrica**. In.: VIII SIMPÓSIO DE EXCELÊNCIA EM GESTÃO E TECNOLOGIA, 2001. Resende, Rio de Janeiro.

**ANEXOS**

## ANEXO A – PROGRAMA FEITO NA INTERFACE DO ARDUÍNO UNO AFIM DE LER O SENSOR DE VIBRAÇÃO E CONTROLAR AUTOMATICAMENTE A VELOCIDADE DO MOTOR

**//Declarando as variáveis:**

**int x; // Variável de leitura de Potência do Motor**

**int sensor =3; // Pino conectado ao sensor de vibração SW-420**

**void setup()**

**{**

**pinMode (sensor, INPUT); //Leitura de dados de entrada**

**Serial.begin(9600);**

**}**

**void loop()**

**{**

**Serial.println("Status: acelerando....");**

**for(x=0; x<=180; x=x+8) // 66,67% da potência total do motor (270W) correspondendo a 180 W (valor de x)**

**{**

**analogWrite(9,x); // Ler o pino 9 (onde o ESC está conectado) e ler as velocidades com incrementos de 8 resultando em aumento de velocidade de 2,67%**

**Serial.println("Saida (%): "); //Mostra a porcentagem atual da potência do motor possibilitando o controle da velocidade na aceleração**

**Serial.print(60.0\*x/180); // Corresponde: até quantos % será enviado pro Arduíno para fazer a leitura de velocidade**

**long nivel\_vibracao =TP\_init(); //Ler o sensor de vibração**

**Serial.print(" | nivel\_vibracao: "); //Imprime os valores**

**Serial.println(nivel\_vibracao); //Ler os valores**

**delay(3000); // tempo de espera entre uma velocidade e outra (3 segundos)**

**}**

**Serial.println("Status: desacelerando....");**

**for(x=180; x>=0; x=x-8)**

```
{
  analogWrite(9,x);
  Serial.println("Saida (%): "); //Mostra a porcentagem atual da potência do motor
possibilitando o controle da velocidade na desaceleração
  Serial.println(60.0*x/180);

  delay(3000); // Tempo de espera entre uma velocidade e outra (3 segundos)
}

delay(1000); //Tempo de 1 segundo para reiniciar a leitura
}
long TP_init(){
  //delay(10);
  long nivel_vibracao=pulseIn (sensor, HIGH); //Espera por um pulso alto de vibração
  return nivel_vibracao; //Retorna o valor de vibração
}
```

## ANEXO B – DIAGRAMA DE BLOCOS DO ALGORITMO

