

**UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ
FABERSON CHAPLIN CESTARI
RODRIGO DOS SANTOS SOARES**

**DESENVOLVIMENTO DE BANCADA AUTOMATIZADA
PARA ENSAIOS MECÂNICOS NÃO DESTRUTIVOS DO
GRUPO MOTOPROPULSOR DE AERONAVES RÁDIO
CONTROLADAS**

**Taubaté - SP
2019**

**FABERSON CHAPLIN CESTARI
RODRIGO DOS SANTOS SOARES**

**DESENVOLVIMENTO DE BANCADA AUTOMATIZADA
PARA ENSAIOS MECÂNICOS NÃO DESTRUTÍVEIS DO
GRUPO MOTO PROPULSOR DE AERONAVES RÁDIO
CONTROLADAS**

Trabalho de graduação apresentado para obtenção do Certificado de Graduação do curso de Engenharia Aeronáutica e Engenharia de Controle e Automação do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Taubaté.

Orientador:

Prof. Me. Pedro Marcelo Alves Ferreira Pinto

Co-orientador:

Prof. Me. Antonio Ricardo Mendrot

**Taubaté – SP
2019**

SIBi – Sistema Integrado de Bibliotecas / UNITAU

C422d Cestari, Faberson Chaplin
Desenvolvimento de bancada automatizada de ensaios mecânicos não destrutivos para grupo moto propulsor de aeronaves rádio controladas / Faberson Chaplin Cestari, Rodrigo dos Santos Soares. – 2019.
68 f. : il.

Monografia (graduação) – Universidade de Taubaté, Departamento de Engenharia Mecânica e Elétrica, 2019.
Orientação: Prof. Me. Pedro Marcelo Alves Ferreira Pinto, Departamento de Engenharia Mecânica.
Coorientação: Prof. Me. Antonio Ricardo Medrot, Departamento de Engenharia Mecânica.

1. Bancada de ensaio. 2. Grupo motopropulsor. 3. Aeronave rádio controlada. I. Título. II. Soares, Rodrigo dos Santos. III. Graduação em Engenharia Aeronáutica.

CDD – 629.134

Ficha catalográfica elaborada por Shirlei Righeti – CRB-8/8095

**FABERSON CHAPLIN CESTARI
RODRIGO DOS SANTOS SOARES**

**DESENVOLVIMENTO DE BANCADA AUTOMATIZADA DE ENSAIOS
MECÂNICOS NÃO DESTRUTIVOS PARA GRUPO MOTOPROPULSOR DE
AERONAVES RÁDIO CONTROLADAS**

Trabalho de graduação apresentado para obtenção do Certificado de Graduação do curso de Engenharia Aeronáutica e Engenharia de Controle e Automação do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Taubaté.

DATA: 29/11/2019

RESULTADO: APROVADO

BANCA EXAMINADORA:



Prof. Me. PEDRO MARCELO ALVES FERREIRA PINTO
UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ



Prof. Dr. ALVARO MANOEL DE SOUZA SOARES
UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ

29 de NOVEMBRO de 2019

Dedicamos este trabalho aos nossos pais Delmiro Cestari, Cleci
Cestari e Carlos Soares, Mareli Soares.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradecemos a Deus, fonte da vida e da graça. Agradecemos por nossas vidas e por nossas famílias e amigos.

À Universidade de Taubaté – UNITAU, que ofereceu um excelente ambiente educacional com profissionais qualificados.

Ao orientador, Prof. Me. Pedro Marcelo Alves Ferreira Pinto por toda a orientação dedicada para a elaboração deste trabalho.

Aos nossos pais Delmiro Cestari e Cleci Cestari, Carlos Soares e Mareli Soares, que apesar das dificuldades enfrentadas, sempre incentivaram nossos estudos.

Ao professor Dr. Álvaro Manoel De Souza Soares, por aceitar a compor a banca examinadora.

Às funcionárias da secretaria pela dedicação, presteza e principalmente pela vontade de ajudar.

RESUMO

Dificuldades são encontradas na escolha de um conjunto motor e hélice, denominado grupo motopropulsor, aplicado em aeronaves rádio controladas. Na escolha deve-se levar em consideração informações experimentais do desempenho do mesmo. A construção de uma bancada de ensaio automatizada visa gerar informações substanciais sobre o desempenho de cada grupo, utilizando tecnologia de aquisição dados por sistemas sensoriais que possibilitam maior detalhamento e agilidade na aquisição dos dados. Também abre caminho para a realização de outras linhas de estudos acadêmicos, pois este tipo de tecnologia pode ser manejado e modificado de forma que traga mais riqueza as informações desejadas. Conforme as características inseridas na bancada, a mesma pode possibilitar a leitura de informações, como por exemplo, força propulsiva, rotação, torque. Entretanto, a construção de uma bancada de ensaio deve seguir etapas, etapas estas que neste caso são planejamento, desenvolvimento, montagem e calibração. A metodologia adotada para a construção deste projeto de graduação foi a pesquisa bibliográfica de acervo literário disponibilizados pela biblioteca da universidade de Taubaté, construção de aparato experimental para levantamento de dados científicos. Portanto este trabalho de graduação tem por finalidade apresentar a construção de uma bancada de ensaio automatizada para conjunto motopropulsor de aeronaves rádio controlada.

Palavras-chave: Bancada de ensaio; Grupo motopropulsor; Aeronave rádio controlada; Automação; Aquisição de dados.

ABSTRACT

Problems can be found during an engine and propeller choice, also called powertrain, for radio-controlled aircrafts. It's why must take account experimental information on its performance. The construction of an automated test bench aims to get more information about the performance of each set of pairs service, using sensors and a data acquisition technology that enable greater detail and faster information. It also enables other lines of academic studies, as this type of technology can be updated and modified in a way that develop and improve the information. As data is inputted into the test bench, it's possible read information such as propulsive force, rotation and torque. However, the construction of a test bench must follow steps, which in this case are planning, development, assembly and calibration. The methodology adopted for this under graduation project was bibliography research using the bibliographic collection made available by University of Taubaté and construction of experimental equipment for scientific data collection. Therefore, this undergraduate thesis aims to present the construction of an automated test bench for powertrain of radio-controlled aircrafts.

Keywords: Test bench; powertrain; Radio controlled aircraft; Automation; Data acquisition.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Grupo Motopropulsor do tipo <i>Glow</i>	18
Figura 2 - Motor ASP [®] 61A tipo <i>Glow</i> (Esquerda), <i>Ni-starter</i> (Direita).	21
Figura 3 - Composição geométrica de uma hélice bi-pá de passo fixo.	22
Figura 4 - Hélice com passo ajustável em solo (esquerda) e passo variável (direita).	23
Figura 5 - Hélice quatro-pá (esquerda) e penta-pá (direita).	23
Figura 6 - Sentido das forças em um perfil de hélice.	24
Figura 7 - Ilustração para ensaio experimental de força propulsiva.	25
Figura 8 - Gráfico força propulsiva [eixo y] versus posição radial da hélice [eixo x].	27
Figura 9 - Interface Propeller Selector.	28
Figura 10 - Sentido das forças de ação e reação gerada por um grupo motopropulsor.	29
Figura 11 - Ilustração para ensaio experimental de força de torque.	30
Figura 12 - Gráfico força torque [eixo y] versus posição radial da hélice [eixo x].	31
Figura 13 - Bancada de ensaio educativa eletropneumática.	33
Figura 14 - Túnel de vento (Esquerda), Bancada de ensaio (Direita).	33
Figura 15 - Ensaio de fadiga estrutural.	34
Figura 16 - Exemplo de arquitetura que compreende o sistema de aquisição de dados.	35
Figura 17 - Modelos comerciais de células de cargas e sensores.	36
Figura 18 - Interfaces do Arduino Mega 2560.	38
Figura 19 - Protótipo de bancada de ensaio.	41
Figura 20 - Vista ortogonal e medidas.	42
Figura 21 - Laboratório Aerodesigner.	42
Figura 22 - Detalhes Motor ASP [®] 61A.	43
Figura 23 - Micro Servo (Esquerda), Vareta de Aço (Direita).	44
Figura 24 - Tanque de combustível.	44
Figura 25 - Ponte de Wheatstone.	45
Figura 26 - Célula de Carga “S” (Esquerda) e Módulo HX711 (Direita).	46
Figura 27 - Sensor Óptico.	46
Figura 28 - MASTER 13x6, TOP FLITE 13x6, TP 13x6G.	47
Figura 29 - Rolamentos.	48
Figura 30 - Eixos Aço Inoxidável.	49
Figura 31 - Bancada de ensaios em CAD.	54
Figura 32 - Bancada de ensaio protótipo.	54
Figura 33 - Bancada de ensaio concluída.	55
Figura 34 - Bancada de ensaio com alteração.	57
Figura 35 - Sensor Óptico Reflexivo LM393.	58
Figura 36 - Arduino UNO.	59
Figura 37 - Conexões das células de carga e servo no Arduino Mega 2560.	60
Figura 38 - Conexões sensor RPM no Arduino UNO.	60
Figura 39 - Dados de RPM, Tração e Torque Sincronizados.	61
Figura 40 - Gráfico Tração e Torque para Hélice Master 13x6.	62
Figura 41 - Gráfico Tração e Torque para Top Flite 13x6.	63
Figura 42 - Gráfico Tração e Torque para TP 13x6G.	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Calibração Células de Cargas.....	50
Tabela 2 - Especificações Arduino MEGA 2560.....	52
Tabela 3 - Especificações Células de Carga.....	52
Tabela 4 - Especificações HX711.	53
Tabela 5 - Especificações TCRT5000.....	53
Tabela 6 - Grandezas de medição e incerteza.....	53
Tabela 7 - Especificações LM393.	58
Tabela 8 - Especificações Arduino UNO.	59

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	OBJETIVO	15
1.2	JUSTIFICATIVA	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1	PROPULSÃO AERONÁUTICA	17
2.1.1	Motor a Pistão	18
2.1.2	Hélice	21
2.1.3	Parâmetros de Desempenho.....	24
2.2	ENSAIOS EXPERIMENTAIS	32
2.2.1	Tipos de bancadas de ensaios	32
2.2.2	Principais componentes	34
2.2.3	Dispositivos de Aquisição e Controle de Dados	35
3	METODOLOGIA	40
3.1	DESENVOLVIMENTO DA BANCADA DE ENSAIOS.....	40
3.1.1	Seleção de componentes	42
3.1.2	Sistemas de aquisição de dados.....	49
3.1.3	Calibração de sensores.....	50
3.1.4	Incertezas de medição.....	51
3.1.5	Montagem do aparato experimental.....	54
3.2	PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS	56
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	61
4.1	MEDIDAS DE DESEMPENHO.....	62
4.1.1	Resultado hélice Master 13x6.....	62
4.1.2	Resultado hélice Top Flite 13x6.....	63
4.1.3	Resultado hélice Tp 13x6G	63
5	CONCLUSÃO	64
	REFERÊNCIAS	65
	APÊNDICE A - Linha De Código Para Células De Cargas:.....	70
	APÊNDICE B - Linhas de código para calibração Células De Carga:	75
	APÊNDICE C - Linhas De Código Para Sensor Rpm:	76
	APÊNDICE D - Plantas Baixas Das Peças Usinadas:.....	78
	APÊNDICE E – Resultados Dos Ensaio Tabelados:.....	82
	APÊNDICE F – Gráfico de Tração e Torque Hélice Master 13x6:	92
	APÊNDICE G – Gráfico de Tração e Torque Hélice Top Flite 13x6:	93
	APÊNDICE H – Gráfico de Tração e Torque Hélice TP 13x6G:.....	94

1 INTRODUÇÃO

Na engenharia podemos encontrar diversos seguimentos de estudos conceituais e experimentais, como por exemplo, atividades científicas direcionadas para o desenvolvimento de novas metodologias na abordagem de determinado problema por um ângulo diferente dos usualmente praticados. Com o objetivo de otimizar a performance por meio de diferentes tipos de combinações em grupo motopropulsores (conjunto motor e hélice), podemos utilizar uma abordagem experimental através do desenvolvimento de uma bancada de ensaios para adquirir dados técnicos do conjunto motor e hélice.

A necessidade em gerir com maior precisão informações de qualquer espécie é fundamental para o desenvolvimento de um projeto de aeronave ou solução de um problema, a escolha do conjunto motor e hélice é um requisito indispensável pois os mesmos são responsáveis em disponibilizar força propulsiva. Assim dados como força de tração e força de torque devem ser considerados no momento da escolha do grupo motopropulsor, sendo que a escolha do tipo de hélice e sua respectiva geometria, como passo variável ou fixo, influenciam diretamente nesses dados, bem como a escolha do modelo do motor. A escolha errada de uma hélice pode gerar a necessidade de um motor mais potente o que poderia aumentar os custos do projeto.

Ao desenvolver um projeto de aeronave, uma das principais dificuldades está relacionada na coleta de dados e como retratar os fenômenos físicos que envolvem o sistema como um todo, fazendo-se necessária a utilização de ferramentas que permitam melhor interpretação e comparação dos dados. Esse trabalho mostra o desenvolvimento de uma plataforma automatizada para medição de dados que auxiliam na escolha de grupo motopropulsor.

1.1 OBJETIVO

Esse trabalho tem por objetivo abordar o desenvolvimento e construção de uma bancada de ensaios para medição de parâmetros de desempenho do grupo motopropulsor de tipo *Glow*¹

¹ Glow – Tipo de motor que consome combustível a base de metanol com óleo e nitro metano.

para uma aeronave rádio controlada, assim apresentando os componentes que constituem a mesma.

Onde são abordados conceitos sobre as grandezas físicas, como por exemplo Força Propulsiva (Empuxo), Torque, Rotação (RPM - Rotações por Minutos), para cada configuração de hélice indicada pelo fabricante em função do motor escolhido, também descrevendo a metodologia utilizada para implementação do processo de medição, detalhando as partes estruturais e eletrônicas, caracterizando os sensores e softwares utilizados, bem como os resultados obtidos e conclusão.

A validação da nova plataforma de ensaios se dá através de ensaios estáticos, também são sugeridas ideias para trabalhos futuros. A pergunta que incentiva o presente trabalho é: Ao desenvolver uma bancada de ensaios, será possível evidenciar as diferenças entre cada conjunto de grupo motopropulsor, proporcionando assim um projeto de aeronave mais eficiente devido aos dados coletados?

1.2 JUSTIFICATIVA

Durante o projeto de uma aeronave rádio controlada aspectos estruturais e de desempenho devem ser aferidos por meio de ensaios experimentais, onde seguimentos de estudos com vertentes paralelas são realizados durante o projeto, entre eles estão, estruturas aeronáuticas, cargas e aeroelasticidade, controle e estabilidade, desempenho de aeronaves, projeto elétrico de aeronaves rádio controladas e aerodinâmica.

A justificativa deste trabalho de graduação está na necessidade em desenvolver um meio de aquisição de dados por ensaios experimentais, pertinentes a eficiência e desempenho do grupo motopropulsor, para auxiliar as tomadas de decisões durante o projeto de uma aeronave.

A seleção de um conjunto motor e hélice a ser utilizado em uma aeronave está associada às necessidades de desempenho que a aeronave deve apresentar, definidas através dos requisitos de voo, como por exemplo: alcance de voo, autonomia, velocidade de cruzeiro, distância de decolagem, distância de pouso, aeronaves destinadas para transporte de passageiros ou cargas, destinadas para pouso em pistas asfaltadas, grama, terra, água ou ambos.

Os pré-requisitos, tem por objetivo gerar o desempenho desejado em projeto para diferentes condições de uso, sendo aeronaves militares, civis ou acrobáticos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta as referências e conceitos utilizados como base para o desenvolvimento da bancada de testes proposta neste trabalho, conceituando conjuntos motopropulsores e seus tipos, parâmetros de desempenho abordados no estudo e os tipos de bancadas, embasamento teórico para realização da coleta de dados e instrumentação utilizada para automatização da mesma.

2.1 PROPULSÃO AERONÁUTICA

Algo em comum entre Santos Dumont que voou o 14Bis, e outros pioneiros da aviação como os Irmãos Wright com o *Flyer* – Voador, e seus antecessores William Henson, John Stringfellow e demais, é que todos eles em algum momento se depararam com uma notória dificuldade em encontrar motores adequados para seus projetos, na época, o que tornava ainda mais difícil a construção de uma aeronave eram os motores de baixa cilindrada e pesados, cuja a sua fabricação era destinada a automóveis e embarcações.

Conforme Souza (1991, p. 13), a aviação utiliza os motores da seguinte forma:

Os aviões a hélice utilizam seus motores para acionar uma hélice, que irá produzir a força propulsiva ou tração, a qual irá causar o movimento do avião. A hélice [...], funciona basicamente como uma asa produzindo uma força propulsiva para frente e baseia-se no princípio da reação obtida impulsinando grandes massas de ar a velocidades relativamente pequenas [...].

O grupo motopropulsor é responsável em gerar força propulsiva para uma aeronave sendo ela tripulada ou não, onde a força propulsiva é proveniente da conversão da energia térmica em energia mecânica.

Uma melhor compreensão dos motores a pistão é elucidada por Obert (1971, p. 1):

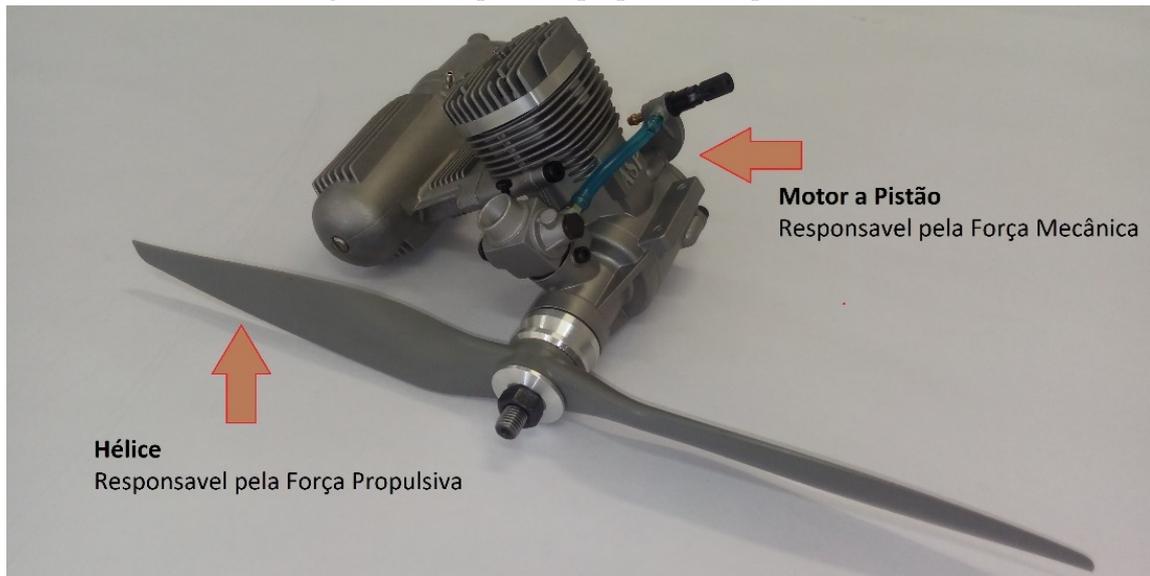
O progresso do mundo tem sido grandemente influenciado por este tipo de máquina, sendo que, na indústria aeronáutica, ainda não foi possível substituí-lo com total vantagens. Hoje em dia, a fabricação de motores de combustão interna para automóveis, navios, aviões, trens e pequenas máquinas auxiliares constitui uma das maiores indústrias do mundo.

No entanto os motores a pistão estão sendo substituídos por motores a reação para propulsar aeronaves de grande porte, ficando viáveis apenas para serem instalados em

aeronaves de pequeno porte e VANTs², cujo sistema de propulsão faz uso de hélice, ligando a esta ideia a delimitação deste trabalho. Neste trabalho são abordados assuntos correlacionados a motores a pistão acoplados em hélices.

Para que haja um melhor entendimento do componente grupo motopropulsor, segue Figura 1 que o apresenta:

Figura 1 - Grupo Motopropulsor do tipo *Glow*.



Fonte - Próprio Autor (2019).

A Figura 1 refere-se ao grupo motopropulsor adotado nos ensaios, no qual o motor escolhido foi o modelo ASP[®] 61A, suas especificações técnicas são apresentadas em detalhes na Seção [\(2.1.1 Motor a Pistão\)](#) e a hélice pertence a um conjunto de corpo de prova pré-selecionado com base nos modelos recomendados pelo fabricante do motor, podendo haver variação de marcas e perfis, no entanto as hélices são do tipo bi-pá com passo fixo, essas especificações são apresentadas na Seção [\(2.1.2 Hélices\)](#) com mais detalhes.

2.1.1 Motor a Pistão

O motor a pistão é um equipamento que tem por finalidade gerar força mecânica rotacional, na forma de torque, para a realização de uma determinada atividade. Dentro da câmara de combustão ocorre a queima da mistura combustível-ar, os gases expandem com

² VANTs – Acrônimo para Veículo Aéreo não Tripulado.

essa queima empurrando o pistão, e assim gerando a força mecânica, esse motor também é conhecido como motor de explosão.

Para detalhamento da composição mecânica do motor a pistão, Obert (1971, p. 1):

A maioria das máquinas de combustão interna é constituída pelos motores e utiliza o princípio do *êmbolo alternativo* [...], em que o *êmbolo* é dotado de movimento de vaivém no interior de um *cilindro*, produzindo trabalho através de uma conetora (*biela*) e um *eixo de manivela*.

A respeito do processo de queima de combustível, devemos discorrer ao assunto referente as características de combustão que cada motor possui, podendo ser classificadas em duas vertentes; motores de combustão interna, onde a queima do combustível ocorre no seu interior, e motores a combustão externa cuja a queima de combustível ocorre no seu exterior.

De acordo com Taylor (1988, p. 13):

Os motores de combustão podem ser classificados como do tipo de combustão *externa*, no qual o fluido de trabalho está completamente separado da mistura combustível-ar, sendo o calor dos produtos da combustão transferido através das paredes de um reservatório ou *caldeira*, e do tipo de combustão interna, no qual o fluido de trabalho consiste nos produtos da *combustão interna*, no qual o fluido de trabalho consiste nos produtos da combustão da mistura de combustível-ar propriamente.

Mesmo com a evolução tecnológica e aperfeiçoamento dos motores que ocorreram ao longo do tempo, as características citadas ainda se fazem presentes nos motores atualmente.

O funcionamento do motor possui ciclos de trabalho que ocorrem em uma sequência específica. De acordo com a quantidade de ciclos pode ser denominado de quatro ou de dois tempos, em que cada ciclo possui seis fases (Homa, 2005).

De acordo com Homa (2005, p. 38), para motores dois tempos:

Primeiro tempo: Admitindo que o motor já esteja em funcionamento, o pistão sobe, comprimindo a mistura no cilindro e produzindo uma rarefação no cárter. Aproximando do ponto morto alto, dá-se a ignição e a combustão da mistura. Ao mesmo tempo, dá-se a admissão da mistura nova no cárter, devido à rarefação que se formou durante a subida do pistão.

Segundo tempo: Nesse tempo, os gases da combustão se expandem, fazendo o pistão descer, comprimindo a mistura no cárter. Aproximando-se o ponto morto baixo, o pistão abre a janela de escapamento, permitindo a saída dos gases queimados. A seguir abre-se a janela de transferência, e a mistura comprimida no cárter invade o cilindro, expulsando os gases queimados.

Para os motores a quatro tempos o funcionamento também possuem seis fases, diferenciando apenas pela quantidade de fases que ocorrem em cada tempo. De acordo com

Homa (2005, p. 32) é possível identificar essa diferença entre o funcionamento dos motores de dois tempos dos motores de quatro tempo:

Primeiro tempo: Admissão – O primeiro tempo chama-se “admissão” e corresponde ao movimento do pistão do PMA (ponto morto alto) para o PMB (ponto morto baixo) [...]. Nesse tempo, ocorre a primeira fase, que chama-se também “admissão”, porque o pistão aspira a mistura de ar e gasolina para dentro do cilindro.

Segundo tempo: Compressão – Nesse tempo, ocorre a segunda fase, que chama-se também “compressão”, porque o pistão comprime a mistura de ar e gasolina que ficou presa dentro do cilindro.

Terceiro tempo: Tempo motor – Antes do 3º tempo, ocorre a 3ª fase, denominada “ignição”, quando a vela produz uma faísca, dando início a 4ª fase, que é a “Combustão”. O terceiro tempo, corresponde à descida do pistão PMA para o PMB, provocada pela forte pressão dos gases queimados que se expandem. Essa é a 5ª fase de funcionamento do motor, e chama-se “Expansão”.

Quarto tempo: Escapamento – O quarto tempo chama-se “escapamento”, “escape” ou “exaustão”, e corresponde à subida do pistão do PMB para o PMA com a válvula de escapamento aberta. Nesse tempo ocorre a 6ª fase, a que chama-se também “escapamento”, porque os gases são expulsos do cilindro pelo pistão, [...] encerrando o primeiro ciclo.

Ambos os tipos de motores possuem características específicas que os diferem entre si. Os motores de quatro tempo são usualmente utilizados na aviação, e os motores de dois tempos são ótimos para aviação não tripulada devido ao seu baixo peso e custo, quando comparado aos motores de quatro tempo. Com base nas informações citadas, este trabalho foi direcionado somente ao tipo de motor com funcionamento a dois tempos.

De acordo com Taylor (1988, p. 213):

A característica que distingue o método de operação do motor de dois tempos é que, a cada curso de expansão corresponde um curso de trabalho. Tal operação é possível porque o bombeamento não é efetuado nos cilindros, mas, em um mecanismo separado, chamado de bomba de ar lavagem.

Existe um modelo de motor a dois tempos que é comumente utilizado em aeronaves rádio controladas, que é o motor tipo *Glow*, tal designação se refere ao combustível utilizado no seu funcionamento, constituído de uma mistura de metanol, nitro metano e óleo, comercialmente encontrado na proporção 10/18 - Nitro/Sintético Rícino, cuja a sua ignição é proveniente de uma vela tipo *Glow Plug*³, esse modelo de vela possui um filamento de Platina, Aço e Tungstênio que na presença do metanol quando aquecido fica incandescente, o aquecimento é necessário para realizar a partida do motor, esse aquecimento é gerado a partir do momento que é acoplado a um equipamento denominado de *Ni-starter*⁴ ou aquecedor de

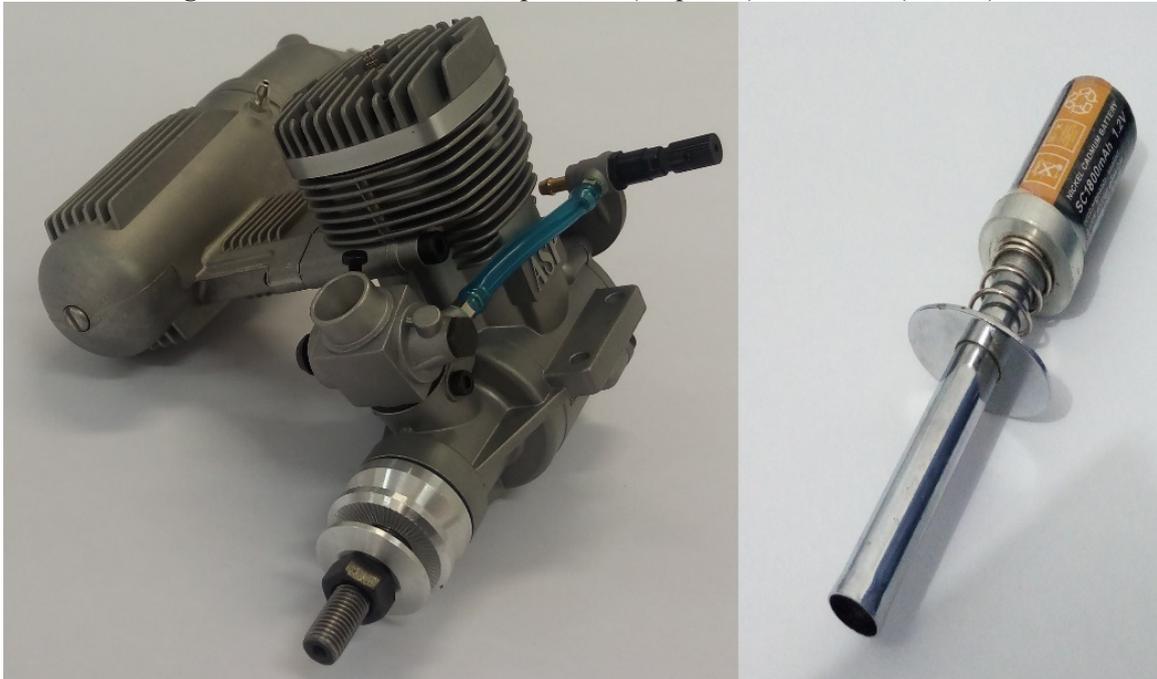
³ *Glow Plug* – Vela de Incandescência desenvolvida por Ray Arden em 1946.

⁴ *Ni-starter* – Termo em inglês para identificar o equipamento que incandesce a vela por corrente elétrica.

vela, os dois itens mencionados neste parágrafo e apresentados na Figura 2, possuem origem comercial e foram usados neste trabalho.

Na Figura 2 estão representados o *Ni-starter* e o motor tipo *Glow*:

Figura 2 - Motor ASP® 61A tipo *Glow* (Esquerda), *Ni-starter* (Direita).



Fonte - Próprio Autor (2018).

As características dos itens da Figura 2 são respectivamente as seguintes, o motor possui cilindrada de 9,95cc; Diâmetro de pistão: 24,00 milímetros; Curso de pistão: 22,00 milímetros; RPM: 2000 ~ 18.000; Peso: 675g e quanto ao *Ni-starter* que utilizado possui bateria de Nickel Cadmum do tipo selada com capacidade de SC1800mAh e 1,2V, seu carregamento total está entre 2,5~3 h de carga a 500 mA, carregado por fonte AC 100~240V.

2.1.2 Hélice

A hélice é o componente responsável em transformar a força mecânica disponibilizada pelo motor em força de empuxo, em aerodinâmica uma hélice possui característica de um aerofólio, que se movimenta em trajetória circular, sendo assim a hélice também está sujeita as mesmas variáveis que uma asa fixa de uma aeronave estaria, esse movimento circular que a hélice se encontra quando está em funcionamento é chamado de rotação, durante a rotação as

pás da hélice provocam o efeito aerodinâmico, esse efeito está relacionado a sustentação, que corresponde a presença de baixa pressão no extradorso e alta pressão no intradorso da pá da hélice.

De acordo com Pinto (2013, p. 51):

No caso de motores a hélice, a força propulsiva gerada pela hélice, denominada tração, é resultado do efeito aerodinâmico de sustentação gerada pelas pás da hélice em movimento rotativo. Para movimentação da hélice se deve fornecer energia mecânica rotacional, na forma de torque, através de um elemento motor.

Na Figura 3 temos a representação física da hélice e suas respectivas partes geométricas.

Figura 3 - Composição geométrica de uma hélice bi-pá de passo fixo.



Fonte - Próprio Autor (2018).

Cada hélice é caracterizada por duas dimensões, o diâmetro que é representado pela distância entre as pontas das pás, e o passo que teoricamente identifica a distância que a hélice avança em cada revolução, normalmente a unidade de medida de ambas estão em polegadas.

Com relação ao passo da hélice, existem três tipos de configurações, a primeira seria o passo fixo, não dando a possibilidade de o mesmo ser configurado, independente a situação que se encontra, esse tipo de hélice pode ser observado na Figura 3. No segundo tipo, representada na Figura 4, o passo é ajustável somente em solo, não dando a possibilidade de realizar o ajuste durante o voo. Por fim, o terceiro modelo, também apresentado na Figura 4, possui passo variável, o que possibilita o ajuste do passo da hélice durante o voo, esse ajuste e

possível devido a um mecanismo hidráulico denominado de atuador de passo, também conhecido como governador.

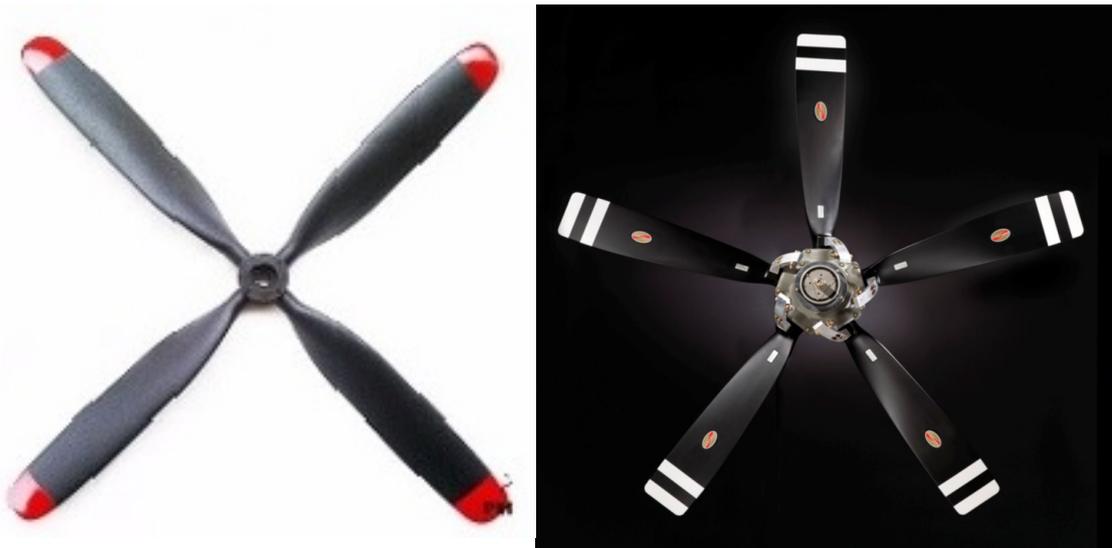
Figura 4 - Hélice com passo ajustável em solo (esquerda) e passo variável (direita).



Fonte - Avio light (2018) e Pinto (2013).

Além das características citadas, existem hélices que são constituídas de duas pás (bi-pá) apresentada na Figura 3, três pás (tri-pá) apresentada na Figura 4, os modelos *Propfan* são hélices com 6 e 12 pás. A Figura 5 mostra os modelos com quatro pás (quatro-pá) e cinco pás (penta-pá).

Figura 5 - Hélice quatro-pá (esquerda) e penta-pá (direita).



Fonte - Mercado livre (2017) e Hartzell (2019).

Neste trabalho adotou-se o uso de hélices bi-pás com passo fixo, onde todos os modelos utilizados são comerciais.

2.1.3 Parâmetros de Desempenho

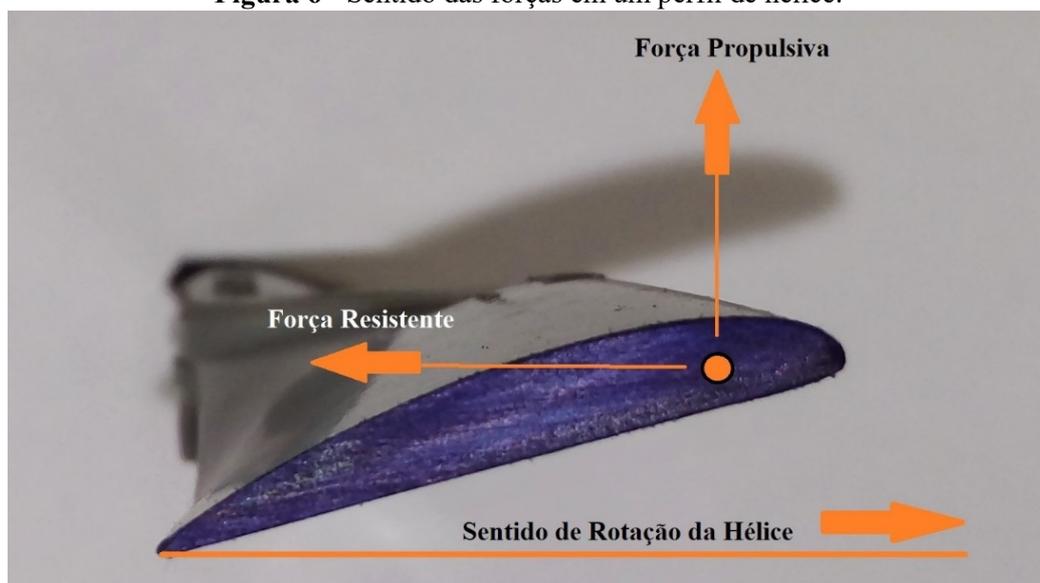
Dados coletados permitem identificar a performance de um conjunto motopropulsor após estudados, como por exemplo, a análise de tração e torque gerada por um hélice durante o funcionamento do motor. De acordo com Agência Nacional De Transporte Terrestre (2016 p. 3): “*Os Parâmetros de Desempenho consistem na definição das características essenciais para avaliação da performance e evolução dos resultados da exploração[...]*”.

A medição de desempenho de Grupo Motopropulsores, pode ser realizada com base em diversos parâmetros, onde os abordados neste trabalho estão apresentados a seguir.

2.1.3.1 Força Propulsiva

Proveniente do resultado de aceleração do fluxo de ar induzida pelo movimento rotacional da hélice, essa força se origina a partir do perfil aerodinâmico da hélice, esse perfil gera um diferencial de pressão entre a parte frontal (extradorso) e traseira (intradorso) da pá da hélice, na Figura 6 é possível verificar o posicionamento destas forças no perfil, a força aqui é identificada como força de propulsão, e não como força de sustentação.

Figura 6 - Sentido das forças em um perfil de hélice.

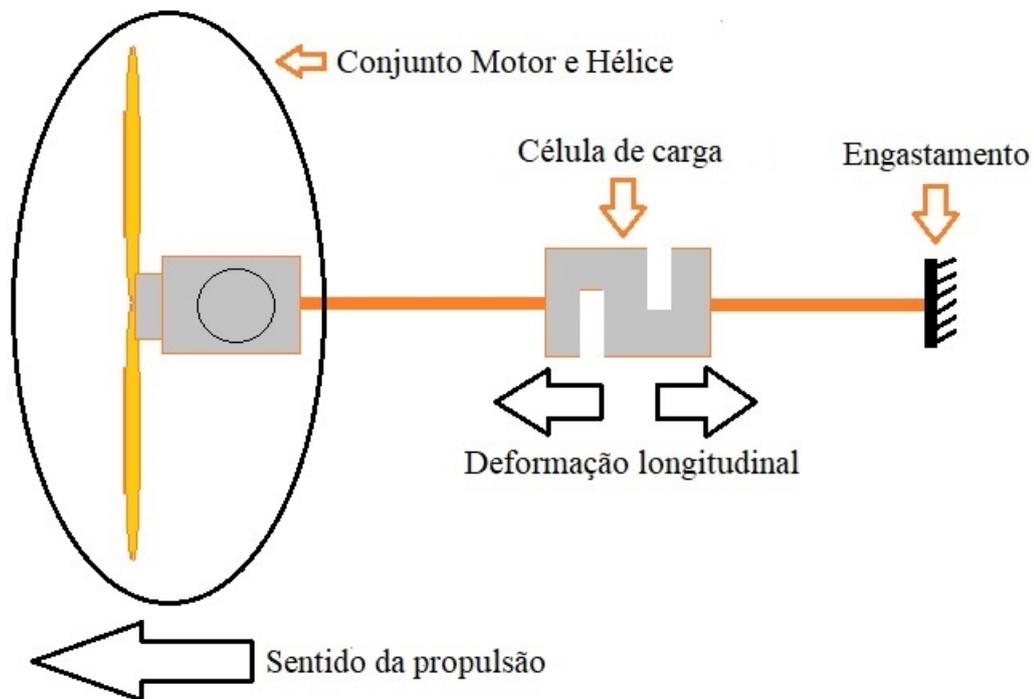


Fonte - Próprio Autor (2018).

A força propulsiva pode ser determinada experimentalmente, por exemplo, quando um dado conjunto motopropulsor é acoplado a uma célula de carga, a mesma sofre uma

deformação devido a força longitudinal exercida pela hélice em funcionamento, para melhor ilustração ver Figura 7:

Figura 7 - Ilustração para ensaio experimental de força propulsiva.



Fonte - Próprio Autor (2019).

A deformação é lida por sensores fixados ao corpo da célula de carga, que transforma em sinais elétricos, onde esses sinais são recebidos, processados e então traduzidos em informações para o usuário por meio de computadores. Mais detalhes sobre ensaios experimentais são abordados na Seção [\(2.2 Ensaios Experimentais\)](#).

Para entendimento das forças apresentadas na Figura 6, Torrinha (2010, p.11):

A força propulsiva é definida como a componente perpendicular ao plano de rotação e resulta da soma da projeção da sustentação e resistência aerodinâmica, no eixo da força propulsiva. Esta varia ainda ao longo de cada pá, reduzindo-se na ponta onde as pressões estáticas, entre o intradorso e o extradorso do perfil se aproximam e junto à raiz, onde a velocidade de rotação é mais baixa.

Entretanto, existem outras formas de se obter os valores correspondentes a essa força, de uma maneira analítica, neste caso se faz necessário o uso de equipamentos simples como uma régua, calculadora, papel e de uma forma mais sofisticada o uso de planilhas em *Excel*[®],

sendo assim é possível encontrar valores com grande proximidade aos obtidos em ensaios experimentais, um desses meios se refere a Teoria de Elementos de Pá ou Teoria de Glauert⁵.

Com o uso desta teoria é possível calcular as forças de propulsão em cada seção da pá da hélice com base em características geométricas e aerodinâmicas, e ao final a somatória da área gerada na Figura 8 por esta teoria, irá representar a força de propulsão da hélice na sua totalidade.

De acordo com Pinto (2013, p. 53), nesta teoria:

A pá da hélice é dividida no sentido do comprimento radial em finitos elementos bidimensionais no formato de aerofólio ao longo do raio de cada pá, os quais são caracterizados individualmente, daí o nome da teoria de elementos de pá. [...] Cada divisão elementar da á é definida a partir de um comprimento em relação a linha de centro da hélice, chamada de estação da pá, expressa radialmente, no sentido da raiz para a ponta da pá.

Conforme Teoria de Elementos de Pá a Equação 1 é utilizada para determinar a força de empuxo localizada em um determinado ponto radial da pá de hélice em unidade de [N/m]:

$$\frac{dT}{dr} = \frac{1}{2} \rho C_L V_0^2 c \frac{\cos(\phi + \gamma)}{\cos(\gamma) \sin^2(\phi)} \quad (1)$$

As variáveis que compõem a Equação 1 são: ρ – Densidade do ar atmosférico [Kg/m³]; C_L – Coeficiente de sustentação do perfil da hélice [adimensional]; V_0 – Rotação da hélice [m/s]; c – Corda geométrica do perfil da hélice [m]; Φ - Ângulo de deslizamento [graus]; γ – Ângulo de força resultante [graus].

A fim de apresentar mais argumentos e opiniões sobre o uso desta teoria, segue citação de Martins (2011, Slide 48):

O modelo elementar se mostra uma ferramenta importante para avaliar o desempenho de uma hélice visto que esse modelo introduz equações específicas para o cálculo da tração total e do torque total gerado por uma hélice com dado número de pás. O modelo, apesar de considerar a hélice com número finito de pás, não considera o efeito de interferência aerodinâmicas entre pás.

Para determinar o valor total de força de propulsiva gerada por uma hélice, fazendo o uso da Teoria de Elementos de Pás, deve-se calcular área total encontrada na parte inferior da linha constituída por todos os valores de força pontual calculados com a Equação 1.

⁵ Hermann Glauert - Engenheiro aerodinamicista nascido em 1892 e falecido em 1934.

Para melhor entendimento deste processo, segue a Figura 8, no qual a somatória da área inferior a linha de força, pode ser efetuada também por integração das mesmas, neste caso uma somatória simples foi realizada, observa-se que a somatória ocorre a partir da posição radial 0,4, pois é possível considerar o ponto de partida como sendo o ponto de maior produção de empuxo:

Figura 8 - Gráfico força propulsiva [eixo y] versus posição radial da hélice [eixo x].

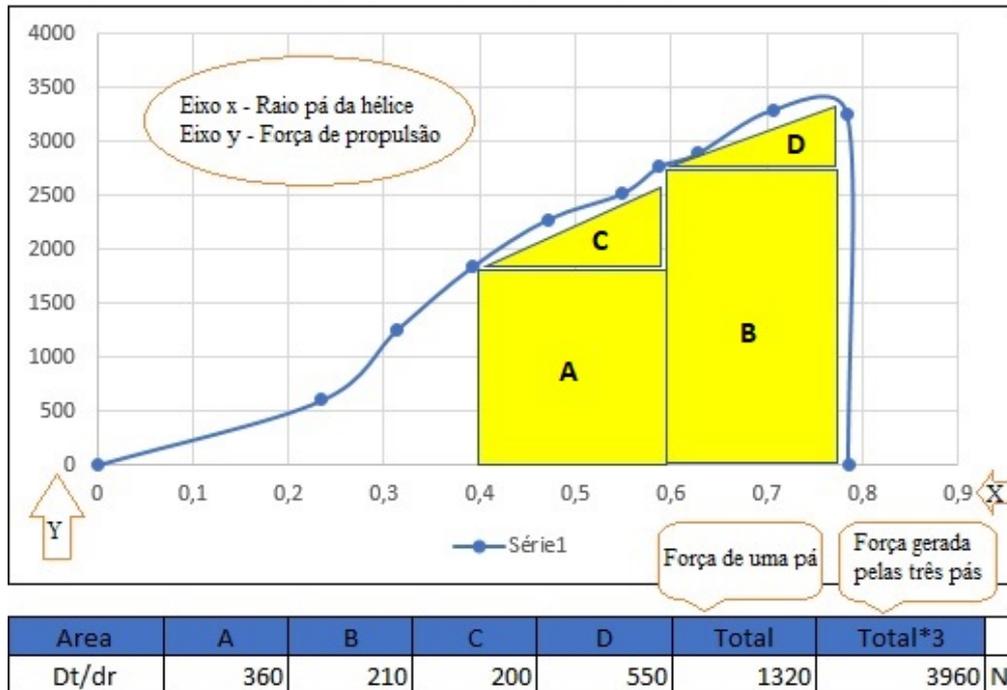


Figura - Próprio Autor (2018).

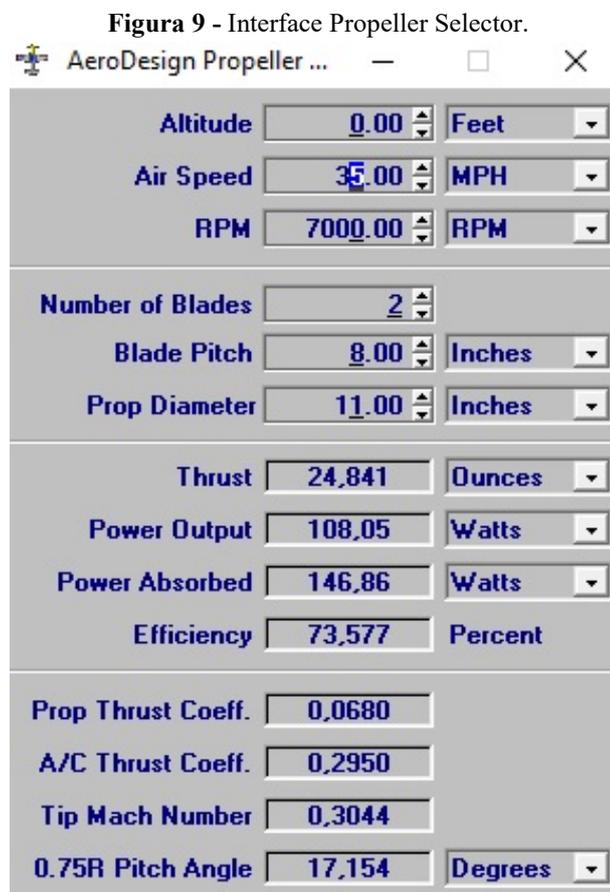
A Teoria de Elementos de Pás também pode ser usada para calcular força de propulsão em aeronaves de asas rotativas (helicópteros), outras informações podem ser extraídas do uso desta teoria, por exemplo, a eficiência aerodinâmica produzida pela hélice em Porcentagem [%], a potência propulsiva em Watt [W] e a potência de eixo do motor em Watt [W].

Essas informações não fazem parte do objetivo deste trabalho e nem o uso desta teoria, contudo é de interesse haver uma explicação das informações que estão apresentadas na Figura 8, o gráfico representa a força propulsiva em cada ponto radial da hélice. Para que seja calculado a força total de propulsão da hélice é preciso somar a área inferior do gráfico representado na Figura 8, como pode ser visto, as áreas das figuras geométricas em amarelos A, B, C e D que estão representadas na parte inferior a linha azul são respectivamente calculadas e somadas. É interessante mencionar que a primeira soma representa a força de uma única pá de hélice em Newton [N], o que justifica a multiplicação deste valor pela

quantidade de pás que a hélice possui, no caso da Figura 8, a hélice calculada e de modelo tri-pá.

Há meios computacionais que podem ser empregados para calcular forças de tração e comportamentos aerodinâmicos, como por exemplo, o uso de *softwares* dedicados a fluidodinâmica ou CFDs⁶, esses programas na sua maioria são comerciais, como por exemplo, Fluent e CFX da ANSYS®. No meio acadêmico existem programas não tão elaborados como os citados, mas seus resultados podem suprir as necessidades dos estudos, como por exemplo o *Propeller Selector*⁷ de uso gratuito, este programa leva em consideração variáveis como: altitude, velocidade do vento, número de pás da hélice, passo de hélice e diâmetro de hélice, RPM e dentre outras informações.

A Figura 9 mostra a interface do programa *Propeller Selector*:



Fonte - Gykes (2002).

O software *Propeller Selector* calcula a força propulsiva gerada pela hélice num todo, não levando em consideração a variação de força em cada ponto radial da pá de hélice quando comparado a Teoria de Elementos de Pás.

⁶ CFDs – Acrônimo para Computational Fluid Dynamics ou em português Dinâmica dos Fluidos Computacional.

⁷ *Propeller Selector* – Programa desenvolvido por Brian Robert Gykes, para calcular desempenho de hélices.

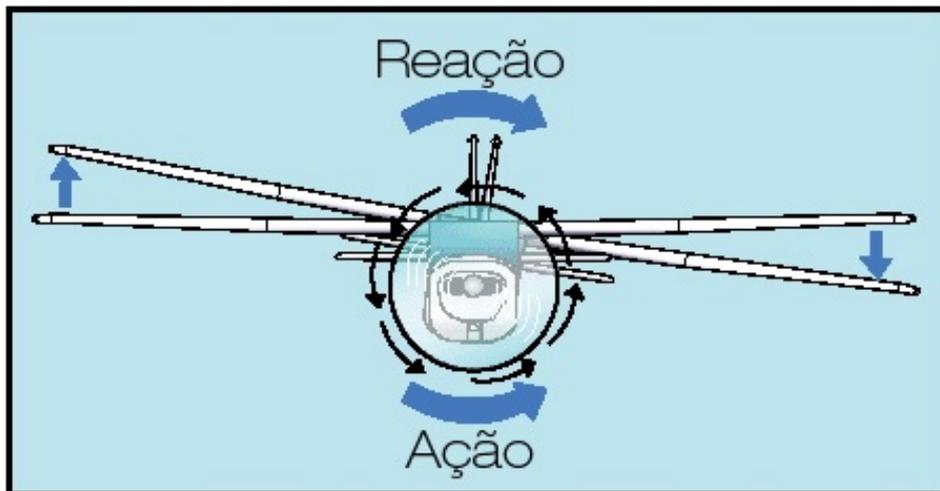
A bancada de ensaios que foi desenvolvida, coleta valores de força propulsiva, podendo haver variação destas mesmas em função da RPM implicada ao motor pela abertura do cilindro do carburador, que por sua vez aumenta o volume de ar ingerido.

2.1.3.2 Torque

O torque se trata de uma força reativa dada a uma determinada distância ao ponto de aplicação, essa distância é considerada um fator multiplicador, onde o produto é conhecido como força de momento. De acordo com Silva & Filho (2010, p. 339): “*O momento de uma força (MF) é uma grandeza vetorial, e sua intensidade é determinada pelo produto da intensidade da força F pela distância perpendicular (d) entre o polo e a linha de ação da força aplicada (MF=±F*d)*”.

No grupo motopropulsor o torque é originado durante o funcionamento, está associado a terceira lei de Newton, onde a ação gerada pela rotação da hélice no sentido anti-horário é refletida de forma contrária pelo motor no sentido horário, Na Figura 10 é ilustrada o comportamento desta força:

Figura 10 - Sentido das forças de ação e reação gerada por um grupo motopropulsor.



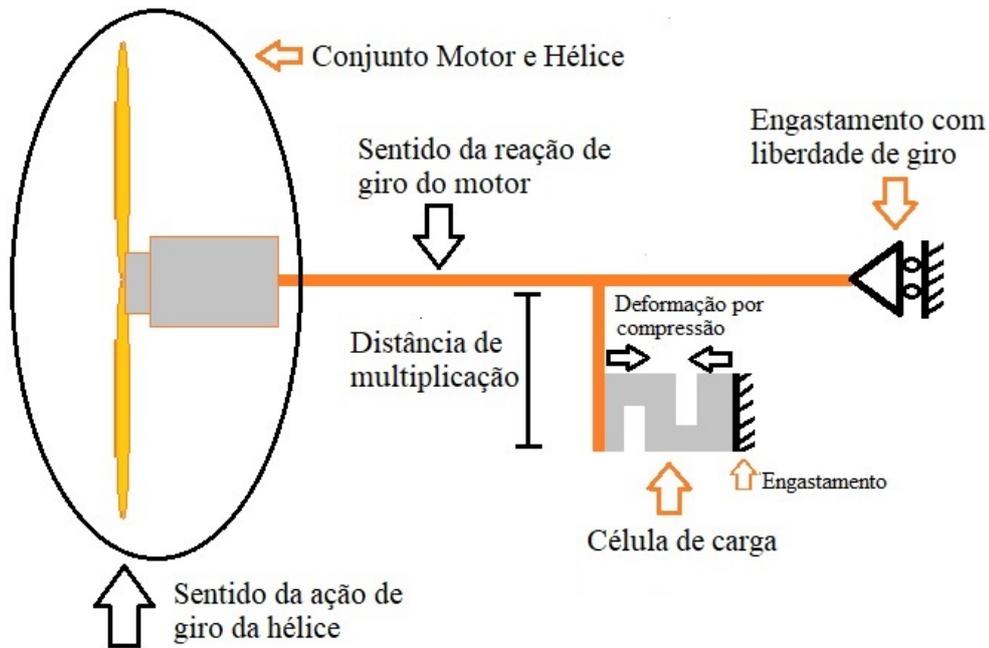
Fonte - Gustavo Rodrigues (2016).

Para que seja melhor elucidado o assunto correspondente a terceira lei de Newton, Silva & Filho (2010, p. 179): “*Quando um corpo A imprime determinada força num corpo B (FA,B), então o corpo B imprimirá no corpo A outra força (FB,A). Essas forças agem com a mesma intensidade, na mesma direção e em sentidos opostos*”.

A força de torque pode ser determinada de forma experimental, por exemplo, quando um dado conjunto motopropulsor é acoplado a uma célula de carga de uma maneira

transversal ao eixo longitudinal do motor, a mesma sofrera uma deformação elástica por compressão devido a reação do motor em função da ação gerada pela hélice.

Figura 11 - Ilustração para ensaio experimental de força de torque.



Fonte - Próprio Autor (2019).

Quando em funcionamento, esta deformação da célula de carga é lida por sensores, que transformam essa deformação em sinais elétricos, que por sua vez são processados e traduzidos por meio de computadores, mais detalhes sobre ensaio experimentais seguir à Seção [\(2.2 Ensaio Experimentais\)](#).

Há outras formas de se obter os valores de forma analítica correspondentes a força de torque, que seria a aplicação da Teoria de Elementos de Pás, já mencionado na Seção [\(2.1.3.1 Força Propulsiva\)](#). A Equação 2 é utilizada por esta teoria e a apresentação do gráfico correspondente.

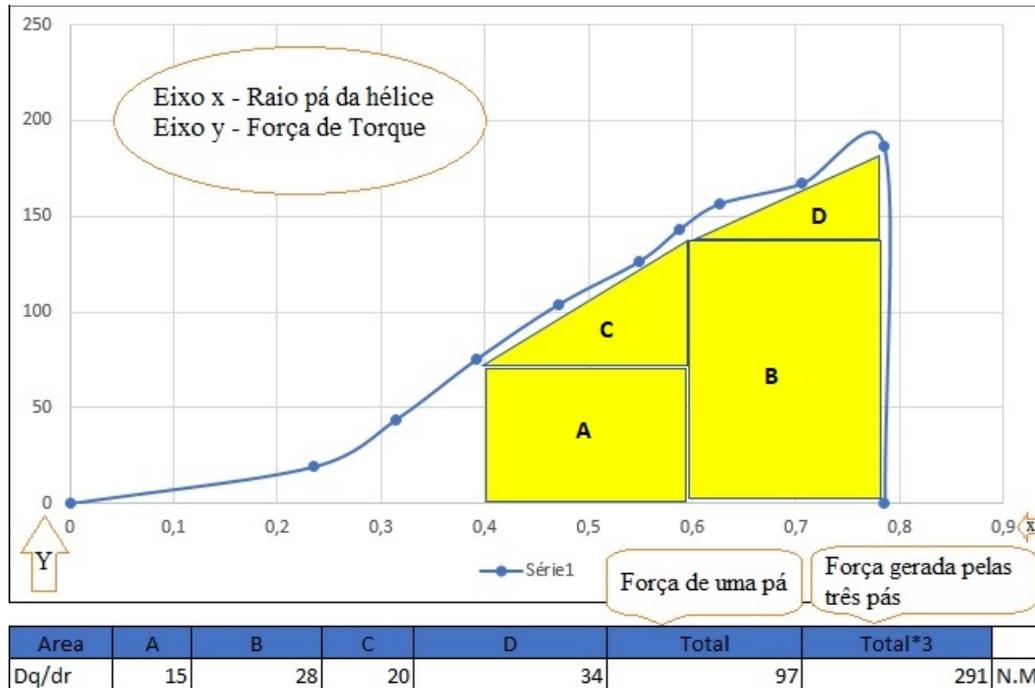
Conforme Teoria de Elementos de Pás a Equação 2 determina a força de torque localizada em um determinado ponto radial da pá de hélice em unidade de [N.m/m]:

$$\frac{dQ}{dr} = \frac{1}{2} \rho C_L V_0^2 c r \frac{\sin(\phi + \gamma)}{\cos(\gamma) \sin^2(\phi)} \quad (2)$$

As respectivas variáveis que compõem a Equação 2 são iguais às mesmas utilizadas para calcular a força de propulsão, com exceção de: r – Posição radial de cada seção da hélice [m].

Para se determinar o valor total da força de torque gerada pelo conjunto motor e hélice, fazendo o uso da Teoria de Elementos de Pás, da mesma maneira aplicada para a força propulsiva, deve-se calcular a soma da área encontrada na parte inferior a linha constituída por todas os valores de força pontual encontrada com o uso da Equação 2.

Figura 12 - Gráfico força torque [eixo y] versus posição radial da hélice [eixo x].



Fonte - Próprio autor (2018).

O gráfico ilustrado na Figura 12 representa a força de torque em cada ponto radial da hélice, para que seja calculado a força total de torque e preciso somar a área na parte inferior do gráfico da Figura 12, como pode ser visto, as áreas das figuras geométricas em amarelos A, B, C e D que estão representadas na parte inferior a linha azul são respectivamente calculadas e somadas, é interessante mencionar que a primeira soma representa o torque de uma única pá de hélice em Newton \times Metro [N.m], o que justifica a multiplicação deste valor pela quantidade de pás que a hélice possui, no caso da Figura 12, a hélice calculada é de modelo tri-pá.

Existem meios computacionais que podem ser empregados para calcular forças de torque, como por exemplo, o uso de *softwares*, esses programas na sua maioria são comerciais, como por exemplo, ANSYS®, NASTRAN NX FEMAP®, CATIA®, como se trata de uma força de reação, é possível fazer uso de *softwares* com módulos estruturais como os nomeados neste parágrafo.

A bancada de ensaios desenvolvida neste trabalho, coleta o valor de força torque, podendo haver variação desta força em função da variação da RPM do motor, mais informações estão na Seção (2.2.3 Dispositivos de Aquisição e Controle de Dados).

2.2 ENSAIOS EXPERIMENTAIS

Quando se faz necessário simular condições ambientais que um dado equipamento se encontra em seu cotidiano de funcionamento, é necessário desenvolver meios que validem este comportamento, a fim de constituir a melhor forma de coleta de resultados analíticos e numéricos, levando em consideração a segurança e a viabilidade econômica.

As características de um ensaio experimental estão atreladas ao seu objetivo, já que é possível desenvolver metodologias diferentes para validar um determinado comportamento mecânico ou numérico, no tocante ao objetivo deste trabalho o uso de bancadas de teste permite simular o conjunto motopropulsor em condições semelhantes ao seu ambiente normal de funcionamento, permitindo visualizar, controlar, calibrar, e avaliar os dados coletados durante o funcionamento (Padilha, 2007).

2.2.1 Tipos de bancadas de ensaios

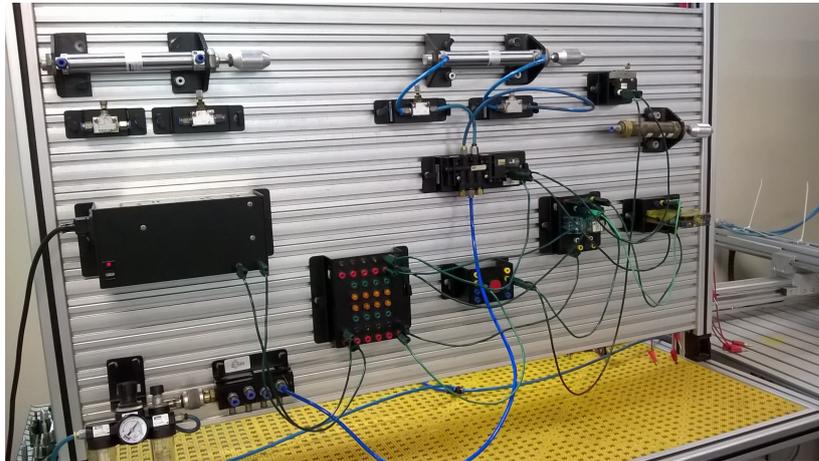
Com o advento da evolução tecnológica, a possibilidade em projetar e construir modelos de bancadas de ensaios para simular ambientes de trabalhos aumentou consideravelmente, podendo também somar a está evolução a competitividade do mercado.

Tal competitividade traz à tona a necessidade em comprovar a qualidade do produto ao cliente, e não menos importante a evolução e melhoria contínua do mesmo, onde no estudo preliminar em qualquer projeto deve ser levado em consideração a compatibilidade entre o objetivo almejado e os modelos pré-existentes de bancadas de ensaios, sejam esses ensaios físicos ou virtuais. De acordo com Leichtweis (2016, p. 16): *“As bancadas podem ser classificadas segundo suas características construtivas e suas capacidades, sendo que a escolha de cada tipo de bancada depende da aplicação para a qual se considerou o uso da bancada”*.

Concluindo a citação de Leichtweis, ensaios experimentais vem da necessidade em se comprovar um comportamento físico e virtual em um ambiente controlado artificialmente, assim reduzindo futuros prejuízos ou danos a vida humana em virtude de uma falha de projeto, modelos diversos de bancada que podem ser construídos variam desde a análise de

fadiga estrutural de uma aeronave em tamanho real, a bancadas que são utilizada para identificação da viscosidade de um fluido, bancada para simulação de instalações pneumática e hidráulicas e muitas outras em diversas áreas de trabalho, com finalidades profissionais ou educativas.

Figura 13 - Bancada de ensaio educativa eletropneumática.



Fonte - Próprio Autor (2017).

A bancada ilustrada na Figura 13 tem por finalidade auxiliar o profissional docente a ensinar ao aluno como construir e utilizar um circuito eletropneumático, assim como também desenvolver a aptidão prática, este equipamento foi desenvolvido pela empresa *Festo Didactic*⁸ e utilizado pelo SENAI Taubaté – SP.

A bancada de ensaios a direita da Figura 14, tem como objetivo caracterizar de forma experimental o desempenho propulsivo de pequenas hélices de passo fixo e o túnel de vento a esquerda que tem por objetivo simular o escoamento do ar, proporcionando ao profissional uma maneira economicamente viável para o desenvolvimento de novos aerofólios.

Figura 14 - Túnel de vento (Esquerda), Bancada de ensaio (Direita).



Fonte – Pinto (2013).

⁸ Empresa divisão da alemã FESTO, fundada em 1954 com o objetivo em transmissão de conhecimento e tecnologia de pneumática para a indústria.

Bancadas de ensaio podem possuir variadas dimensões, podendo elas serem de grande porte e pequeno porte, a Figura 15 apresenta a imagem de uma bancada de ensaios de grande porte:

Figura 15 - Ensaio de fadiga estrutural.



Fonte - N'Guessan (2014).

A bancada de ensaio ilustrada na Figura 15 é um indicativo que o tamanho necessário de um equipamento para simular um dado fenômeno está relativamente atrelado a necessidade em se obter informações que sejam fidedignas, ou seja, o tamanho do corpo de prova necessário para se ensaiar pode variar em função do problema que fora encontrado, no caso em questão o ensaio exposto na Figura 15 se refere aos acidentes ocorridos por falhas estruturais oriunda de fadiga nas aeronaves modelo COMET (1952 a 1954), o corpo de prova neste ensaio foi a própria aeronave em seu tamanho real.

É possível identificar que a necessidade de uso de uma bancada de ensaio possa se originar posteriormente ao lançamento do produto ou durante a fase de projeto do produto.

2.2.2 Principais componentes

Para o desenvolvimento e posterior montagem de uma bancada de ensaios, se faz necessário apresentar os componentes que foram pré-selecionados para compor fisicamente a montagem final, devendo levar em consideração fatores como por exemplos, quais os dados coletados, os tipos de forças que estarão atuando sobre esses componentes, a sensibilidade dos

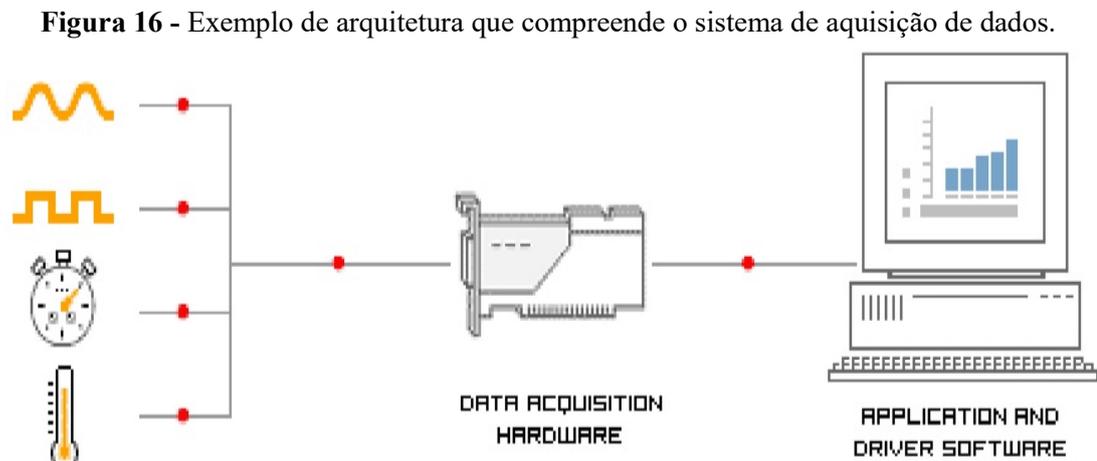
mesmos, e não menos importante a compatibilidade entre *Hardware/Software*⁹, a geometria e respectivamente sua massa. De acordo com Conceitos .de (2013, p. 1): “*Componente é aquilo que faz parte da composição de um todo. Trata-se de elementos que, através de algum tipo de associação ou contiguidade, dão lugar a um conjunto uniforme*”.

Os componentes selecionados para o desenvolvimento do objetivo que tange este trabalho, são de natureza eletrônica e virtual, os mesmos serão detalhados e apresentados nas próximas seções, contudo a configuração que terão quando instaladas será apresentada na Seção (3 METODOLOGIA).

2.2.3 Dispositivos de Aquisição e Controle de Dados

Para que um determinado fenômeno físico originado durante o funcionamento de um motor, por exemplo, o torque, a tração, a RPM, sejam esses coletados e organizados, se faz necessário o uso de dispositivos de aquisição de dados que são aqueles que constroem a ligação física entre o computador e o ambiente onde ocorre a leitura das correspondentes variáveis.

A Figura 16 contém uma ilustração genérica de um sistema de aquisição de dados.



Fonte - Torrinha (2010).

Na Figura 16, seguindo da esquerda para direita, é possível observar que as quatro imagens dispostas na vertical são simbologias de grandezas físicas que são convertidas por

⁹ *Hardware/Software* – Termo em inglês que se refere aos componentes físicos e virtuais que constitui um sistema de processamento de dados.

sensores em sinais elétricos, com a diversidade de sensores disponibilizados comercialmente é possível medir uma grande gama de grandezas físicas.

A Figura 17 contém exemplos de sensores e células de cargas:

Figura 17 - Modelos comerciais de células de cargas e sensores.



Fonte - Camargo (2009).

Este trabalho faz uso de células de carga do tipo “S” ou dependendo do fabricante tipo “Z” para coletar as forças de tração e torque e sensor infravermelho para coletar RPM. De acordo com Camargo (2009, p. 53), células de carga podem ser descritas da seguinte forma:

O objetivo elementar de uma célula de carga é fornecer um sinal elétrico sempre que um esforço for aplicado sobre ela, sendo por este motivo classificada com um transdutor eletro-mecânico.

A célula de carga é um transdutor com aplicações desde balanças digitais até processos de automatização e controle industriais. O princípio de funcionamento das células de carga baseia-se na variação da resistência elétrica de um sensor denominado extensômetro ou *strain gauge* quando submetido a uma deformação.

O modelo de células de carga mencionado na citação de Camargo, são comumente encontradas em balanças de supermercados, que tem por objetivo efetuar a leitura de massa de um objeto. As células de cargas destinadas a coletar forças de tração e torque são necessariamente projetadas para suportar deformações que tende a vetorizar no sentido periférico, ou seja, de dentro para fora ou de fora para dentro.

A designação “S” está se referenciando ao modelo geométrico que esta célula possui, esse modelo de célula de carga foi o utilizado neste trabalho, a mesma possui as seguintes características, capacidade máxima de leitura 20 kg, tensão recomendada de 5 a 10 V, fabricada com alumínio anodizado, com as seguintes dimensões 60x50x13mm.

Para a utilização de células de carga se faz necessário a utilização de um módulo conversor, o modelo escolhido é o HX711 que tem como finalidade converter as alterações de valor da resistência das células de carga em dados digitais, por meio do circuito ADC de 24-bits. Além de conversor este módulo também amplifica o sinal aumentando a exatidão dos dados oferecidos.

Prosseguindo com esta seção, utilizamos um sensor óptico infravermelho para leitura de RPM. O modelo de componente é do tipo reflexivo infravermelho fotoelétrico modulável com placa Arduino, com raio de detecção de 1 mm a 25 mm, e componente possui tamanho de 3,1x1,3 cm.

Ao centro da Figura 16, apresentada no início desta seção, é possível fazer a seguinte leitura *DATA ACQUISITION HARDWARE*¹⁰, este componente em questão tem por finalidade digitalizar os sinais elétricos coletados, para que os dados possam ser armazenados em computadores ou cartão de memória.

De acordo com Tocci (2011, p. 649):

Existem diversas aplicações nas quais dados analógicos precisam ser digitalizados (convertidos em digitais) e transferidos para a memória de um computador. O processo pelo qual o computador adquire esses dados analógicos digitalizados é conhecido como aquisição de dados. A aquisição do valor de um único ponto é a amostragem do sinal analógico, e o ponto de dado é quase sempre denominado amostra. O computador pode aplicar os dados de diferentes maneiras. Em uma aplicação de armazenamento, tal como uma gravação digital de áudio ou de vídeo, o microcomputador interno armazena os dados e os transfere para o DAC para reproduzir o sinal analógico original. Em uma aplicação de controle de processo, o computador analisa os dados ou realiza cálculos para determinar as saídas de controle a gerar

O componente Arduino é considerado uma plataforma de prototipagem de baixo custo e de fácil instalação, esta placa é constituída de entradas e saídas analógicas e digitais, além de interface serial via USB¹¹ para possíveis conexões com computadores, modelos diversos podem ser encontrados no meio comercial, como por exemplo: Arduino UNO, Arduino MEGA, Arduino LILYPAD, Arduino MINI e dentre outros modelos que podem ser escolhidos a critério do desenvolvedor, aderindo ao modelo que melhor se adequa ao projeto.

¹⁰ *DATA ACQUISITION HARDWARE* – Tradução: HARDWARE DE AQUISIÇÃO DE DADOS.

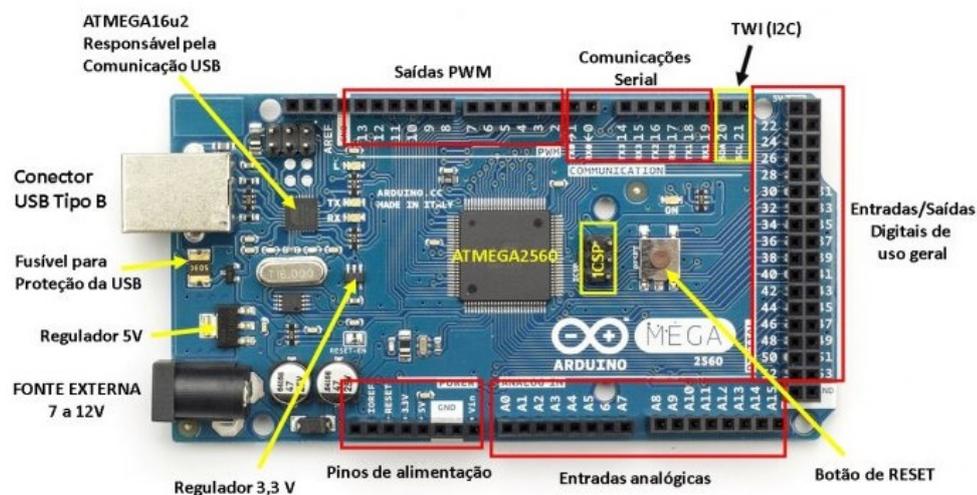
¹¹ USB – Acrônimo para Universal Serial Bus ou Porta Universal.

Para um melhor entendimento sobre o componente, Junior & Silva (2015, p. 124):

Arduino é uma plataforma open-source, ou software livre, Software livre é o software que é distribuído juntamente com o seu código-fonte, e é liberado sob os termos que garantem aos usuários a liberdade de estudar, adaptar/modificar e distribuir o software.

A Figura 18 mostra uma ilustração de uma placa Arduino MEGA, com a respectiva apresentação de sua interface:

Figura 18 - Interfaces do Arduino Mega 2560.



Fonte - Embarcados (2018).

A placa Arduino em questão possui microcontrolador ATmega2560, 54 pinos de entradas e saídas digitais sendo que 15 destes podem ser utilizados como saídas PWM¹², possui também 16 entradas analógicas, 4 portas de comunicação serial. Sua alimentação pode ser feita tanto pela USB, ou por uma alimentação externa, este modelo de Arduino foi adotado para a construção da bancada proposta neste trabalho, A escolha desta placa ocorreu principalmente devido à memória de 256K disponível nessa placa em detrimento as 32K disponíveis no Arduino UNO e devido também a grande quantidade de pinos analógicos e digitais, mesmo não sendo necessários para este trabalho, possibilitam que sejam acrescentados mais sensores futuramente.

Finalizando o assunto em questão, o último item apresentado na Figura 16, que está nomeado como *APPLICATION AND DRIVER SOFTWARE*¹³, esse item se refere ao *software*

¹² PWM – Acrônimo para *Pulse Width Modulation* ou Modulação de Largura de Pulso, tecnologia que permite variar o valor médio de uma forma de onda periódica.

¹³ *APPLICATION AND DRIVER SOFTWARE* – Tradução: APLICATIVO E SOFTWARE DE DRIVER.

de controle que tem a finalidade em realizar a interface usuário/máquina, este mesmo podendo ser interativo ou não.

Neste trabalho utilizamos o *Software Microsoft Excel*[®] que é um editor de planilhas desenvolvido pela *Microsoft*, muito utilizado tanto em empresas quanto na área acadêmica é de fácil acesso e atende as necessidades, para utilização como de base de dados e como ferramenta gráfica.

De acordo com Júnior (2014, p. 6):

A palavra software (pronúncia: sof-tuer) é de origem inglesa e corresponde aos diversos programas que controlam e usam o Hardware do computador. Um programa consiste em uma série de informações que podem ser lidas pelo computador (linguagem de máquina).

O *Excel* possui uma interface amigável e uma vasta gama de ferramentas para serem aplicadas em diversos tipos de projetos acadêmicos e profissionais. As suas características consistem em um *software* de planilhas eletrônicas também conhecido como *software* de folha de cálculo que foi criada pela empresa *Microsoft* em 1987, este *software* faz parte do pacote *Office*.

De acordo com Meyer (2013, p. 1):

O Excel é a melhor plataforma eletrônica para criação de planilhas. Muitas empresas hoje sobrevivem com base em uso destas planilhas. Seus recursos incluem uma interface intuitiva e capacitadas ferramentas de cálculo e de construção de gráficos que, juntamente com marketing agressivo, tornaram o Excel um dos mais populares aplicativos de computador até hoje.

Os dados obtidos pelos ensaios foram apresentados em tempo real no serial monitor da IDE¹⁴ do Arduino, após término do ensaio de cada conjunto motopropulsor os resultados foram copiados e colados em uma Planilha *Excel*, para que os dados pudessem ser tratados de forma a ficarem dispostos em colunas e linhas, assim contendo os valores de período, tração, torque, RPM e sirvam de base de dados para plotar um gráfico, onde os valores de tração e torque ficaram dispostos nas ordenadas (y) e RPM nas abscissas (x).

¹⁴ IDE – Acrônimo para *Integrated Development Environment* ou Ambiente de desenvolvimento integrado.

3 METODOLOGIA

Metodologia é um termo designado para o ato de desenvolver um caminho lógico no ambiente da pesquisa científica, onde esse caminho se dá por meios intencionalmente arranjados, proporcionando de forma aceitável e organizada as respostas da problematização levantado neste trabalho.

A construção da bancada de ensaios caracteriza-se como uma pesquisa experimental, que segundo Moresi (2003) pode ser definida como uma análise empírica onde são observadas variações nos dados em um ambiente sob condições conhecidas, onde tais condições podem ser manipuladas ou controladas.

Para Nascimento (2010, p. 10), a metodologia científica pode ser descrita como:

A Metodologia Científica tem como finalidade a formação do espírito científico. Isto quer dizer, a leitura crítica do cotidiano, o uso sistemático de técnicas de pesquisa, a documentação e, fundamentalmente, a tentativa constante de relação entre a teoria metodológica e a prática da pesquisa.

A metodologia utilizada no desenvolvimento deste trabalho provém de estudos bibliográficos e modelos de bancadas de ensaios já existentes. A fase de construção e testes de validação ocorreram nas dependências da Universidade de Taubaté.

3.1 DESENVOLVIMENTO DA BANCADA DE ENSAIOS

No que se diz respeito ao processo de desenvolvimento, é interessante mencionar que este ato se correlaciona com a ação, neste caso em específico a ação de construção da bancada de ensaios, apresentando a cada passo a evolução da mesma.

Para o desenvolvimento da bancada de ensaios objetivada neste trabalho, foram estipuladas fases, fases estas que constituem desde as pesquisas bibliográficas, a construção de um modelo tridimensional em CAD¹⁵, o respectivo ensaio do sistema de aquisição de dados afim de validá-los, e finalmente a montagem do aparato experimental.

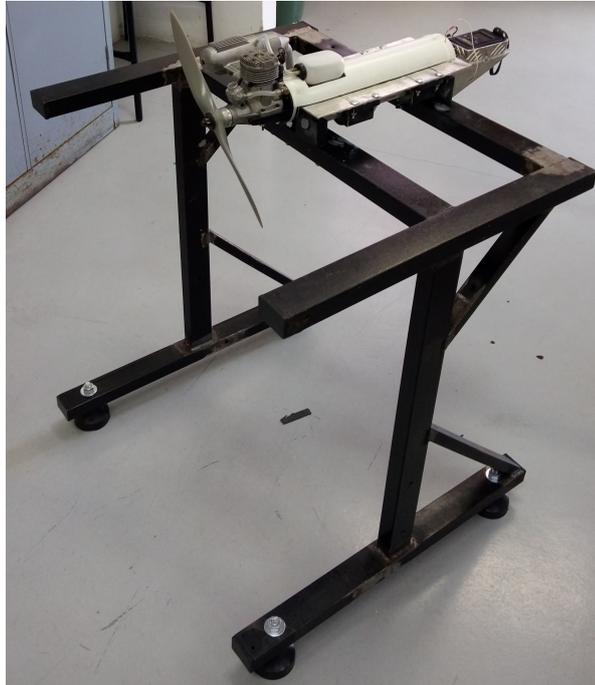
A fase referente a pesquisas bibliográficas já foi mencionada nas seções anteriores, o que se pode somar a essa fase, está correlacionada ao fato de que já existe um protótipo de bancada de ensaios construído por um dos membros deste trabalho, sendo assim se torna válido mencionar que a fase de testes do sistema de aquisição de dados foi realizada neste

¹⁵ CAD – Acrônimo para *Computer Aided Design* ou Desenho assistido por computador.

protótipo, possibilitando a alteração dos componentes antes mesmo se serem instalados na bancada oficial.

Na Figura 19 é apresentado o protótipo de bancada de ensaios disponível:

Figura 19 - Protótipo de bancada de ensaio.



Fonte - Próprio autor (2017).

A fase de modelagem tridimensional em CAD foi realizada com o uso do *software* CATIA V5R21[®], este mesmo *software* se encontra a disposição dos alunos no laboratório computacional da UNITAU, após a finalização do desenho gráfico, foi necessário a impressão das vistas ortogonais do projeto e suas respectivas medidas, este procedimento é considerado essencial para a fase final de usinagem e montagem.

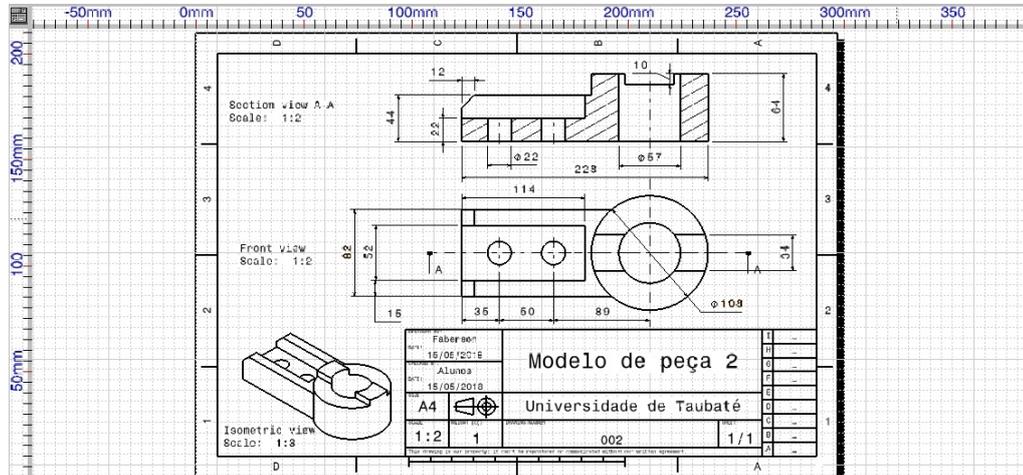
De acordo com Bornancini *et al* (2010, p. 5):

Em Desenho Técnico, denomina-se vista ortográfica a figura resultante da projeção cilíndrica ortogonal do objeto sobre um plano de referência. Uma vista ortográfica representa, pois, um aspecto particular do objeto, segundo uma direção de observação determinada.

Uma das vantagens em construir um determinado equipamento em ambiente virtual e impressão das vistas ortogonais, está associado a possibilidade de haver uma discussão entre as partes envolvidas no que tange a geometria dos componentes e sua organização, direcionando a construção do equipamento e antecipando possíveis falhas no projeto e assim possibilitando a redução dos custos.

Para que haja um melhor entendimento visual do assunto anteriormente discutido, segue na Figura 20 o desenho tridimensional de uma peça qualquer e suas respectivas vistas ortogonais, acompanhado de suas medidas.

Figura 20 - Vista ortogonal e medidas.



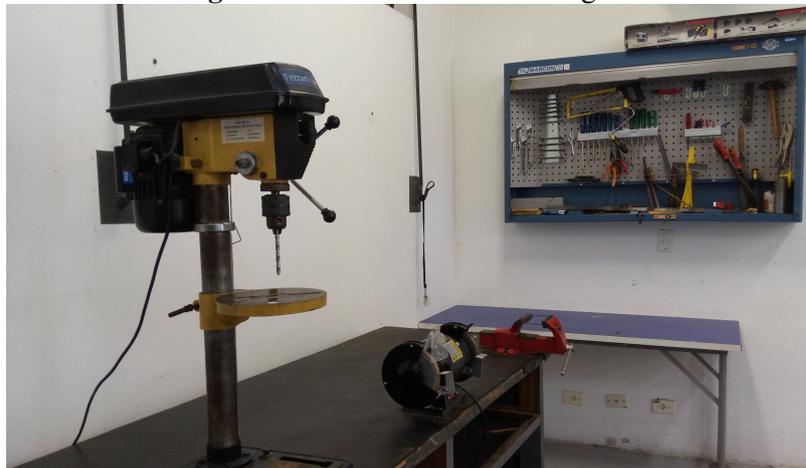
Fonte - Próprio autor (2018).

Ainda referente a esta fase de modelagem tridimensional, outra vantagem é a possibilidade de terceirizar serviços. Para este trabalho toda usinagem das peças metálicas foi terceirizada. Quanto a fase de montagem inclusive furação e passagem de roscas realizadas nas peças metálicas e finalmente a montagem da bancada em si, a mesma foi realizada pelos alunos deste trabalho.

3.1.1 Seleção de componentes

A montagem ocorreu nas dependências da Universidade, devido a necessidade de se usar ferramentas que se encontram disponíveis no laboratório *Aerodesigner*.

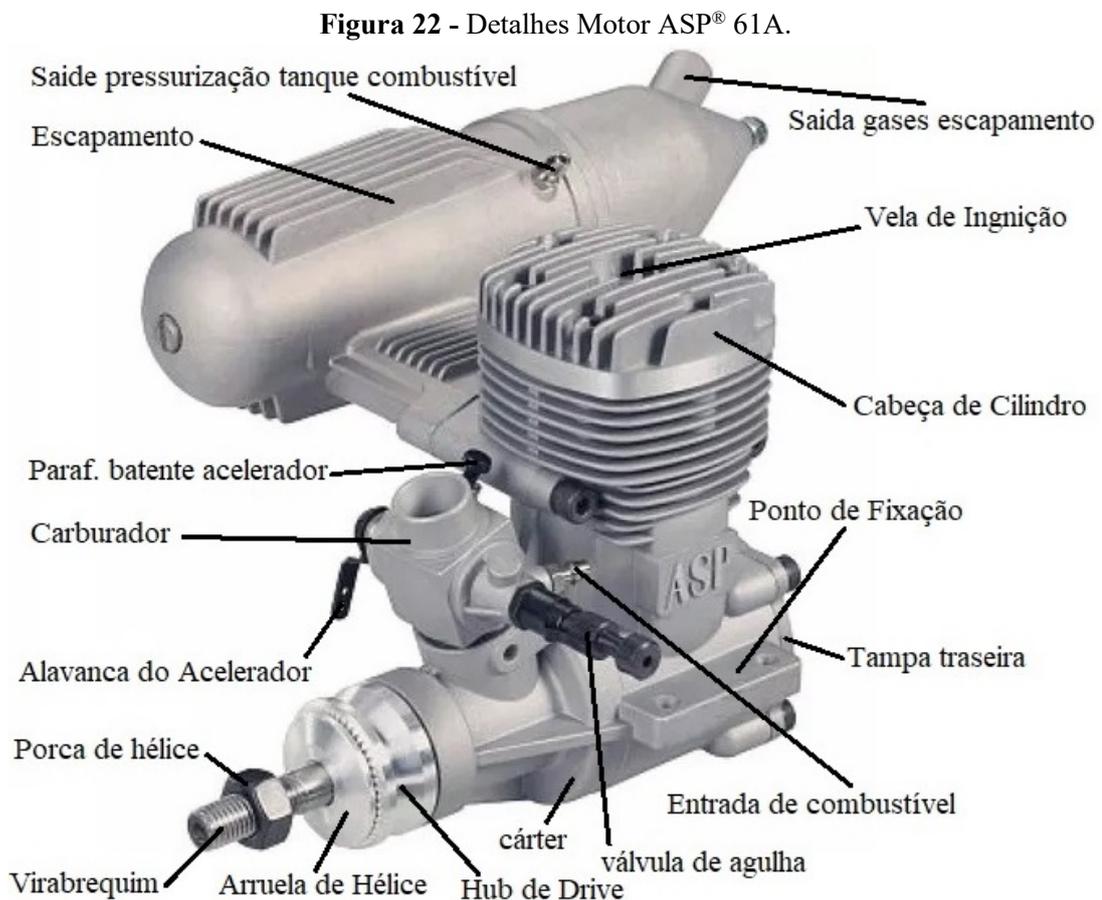
Figura 21 - Laboratório Aerodesigner.



Fonte - Próprio Autor (2019).

Na seleção do componente motor optou-se pela escolha de um motor a combustão interna de dois tempos como já mencionado na Seção (2.1.1 Motor a Pistão), mesmo que levemos em consideração a vantagens fornecidas por motores de tipo elétrico, essa escolha está ligada ao fato de que os dados a serem obtidos conterão as variáveis físicas proporcionadas por um motor deste tipo, ou seja, os valores se tornam realistas, já que variáveis como vibração, temperatura, peso, atrito, etc., estão presentes.

O modelo de motor escolhido é o ASP® 61A cuja suas características são: 9.95 c.c. (0.607 cu.in. - Polegadas cúbicas); potência nominal 1.9 BHP a 16000 RPM.; RPM: 2000 ~ 18.000; diâmetro de pistão: 24,00 milímetros (0.945 in.); curso de pistão: 22,00 milímetros (0.866 in.); Massa: 675 g (23,8099 oz.), tal motor já foi apresentado na Figura 2 e com mais detalhes na Figura 22:



Fonte – Mercado livre (2019) e Próprio Autor (2019).

Para que a alavanca do acelerador seja acionada, é necessário o uso de um micro servo, o modelo selecionado é o Tower pro 9g sg90, apresentada na Figura 23, cuja suas características são: velocidade de operação: 0.12seg/60 graus (4.8v); torque: 1,2 kg/cm (4,8v); tensão de operação: 3,0V a 7,2V.

O componente da Figura 23 será alimentado pela placa Arduino, o giro do servo é transmitido para a alavanca do acelerado através de uma vareta de Aço com 1 mm de espessura e 100 mm de comprimento.

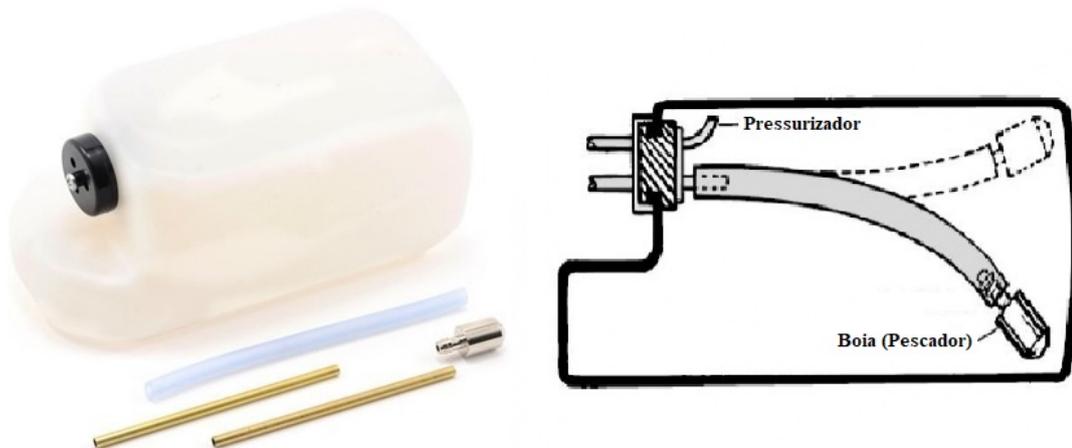
Figura 23 - Micro Servo (Esquerda), Vareta de Aço (Direita).



Fonte - Mercado Livre (2018).

O armazenamento do combustível é feito em um recipiente comercial, com as seguintes características: Material de tipo polímero translúcido; com volume de 6½ oz (192.23 ml); 106,1 mm de comprimento; 49,65 mm de largura; 54,15 mm de altura, a condução do combustível até ao carburador acontece por meio de mangueira de silicone por efeito de pressurização, na Figura 24 e possível identificar os componentes desse recipiente:

Figura 24 - Tanque de combustível.

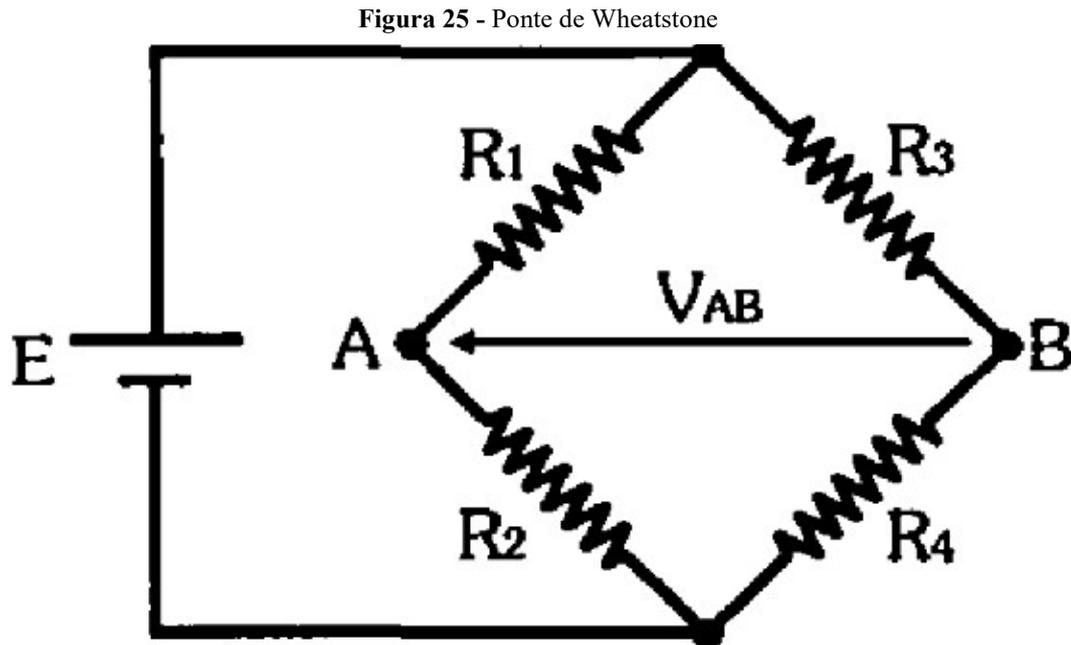


Fonte - Mercado Livre (2018).

As medições de força empuxo e torque gerados pelo grupo motopropulsor foram realizadas utilizando células de carga tipo “S”. O funcionamento das células de carga é baseado nas variações na resiliência do material quando submetido a um esforço, ou seja, a

variação da deformação elástica (Lei de Hook) que é convertida em sinais elétricos de tensão, por meio extensômetros também chamados de *Strain Gauges* (medidores de tensão) conectados a estrutura do material e de um circuito, a ponte de *Wheatstone*, que junto com o *Strain Gauge*, proporciona um sinal em micro volts que é alterada proporcionalmente à medida que se aplica maior peso ou força na estrutura (Carer & Carraro, 2010).

A Figura 25 apresenta o circuito Ponte de *Wheatstone*:



Fonte - Circuitos Elétricos Corrente Contínua e Corrente Alternada Otavio Markus (2019).

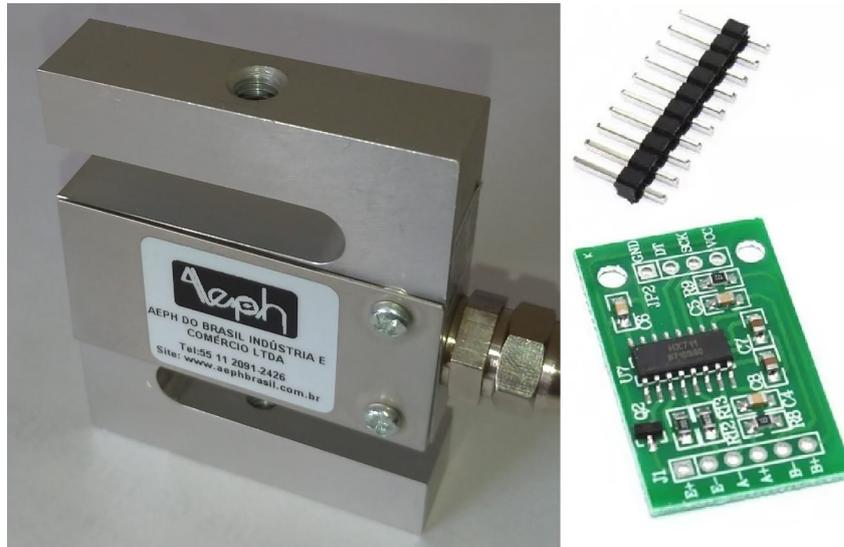
Segundo Markus (2009) para medir grandezas físicas como a força por exemplo, utiliza-se a Ponte de *Wheatstone*. Circuito composto por resistores arranjados de tal forma a obter-se em determinado ramo a tensão entre os pontos A e B igual a zero e assim que se alcança tal situação, significa que a ponte está em equilíbrio.

Os extensômetros são transdutores capazes de medir deformações nos corpos, devido as mesmas serem proporcionais ao comprimento. Ou seja, a deformação é proporcional a variação na resistência que por sua vez é proporcional à força aplicada,

Conforme já mencionado, para utilização das células de cargas se faz necessário a utilização de um modulo que converta as variações de deformação em alteração do valor de resistência, através do circuito da Ponte de *Wheatstone*, para isso foi escolhido o módulo HX711 que além de converter também tem a função de amplificador devido o mesmo possuir 24 bits o que permite aumentar a precisão na leitura das células de carga.

Na Figura 26 é possível visualizar com maiores detalhes tanto a célula de carga quanto o módulo HX711:

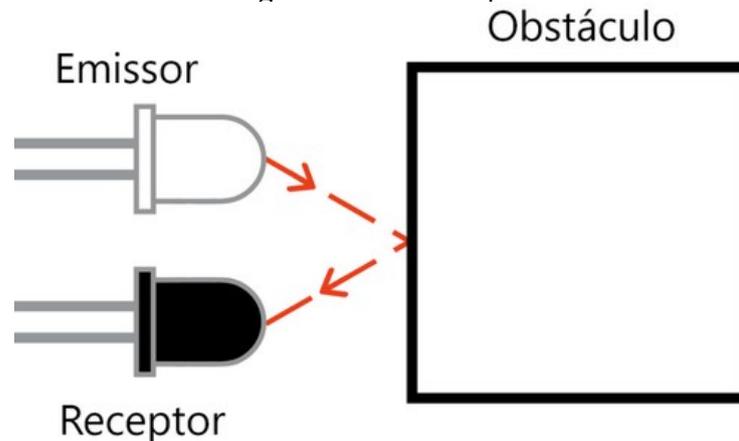
Figura 26 - Célula de Carga “S” (Esquerda) e Módulo HX711 (Direita).



Fonte – Próprio Autor (2019) e Avia Semiconductor (2019).

Para medir a rotação foi utilizado um sensor óptico, reflexivo, que emite uma luz infravermelho, essa luz reflete em uma faixa adesiva colada no *Hub de Drive* ou batente de hélice, para assim realizar uma intercalação de cor, clara e escura, o reflexo nessa faixa é captada por um fototransistor, segue na Figura 27 o sensor óptico:

Figura 27 - Sensor Óptico.



Fonte – Mundoprojetado (2019).

A rotação do motor gera um sinal analógico de onda quadrada devido a uma fita reflexiva colada no eixo de rotação, quando o sinal é refletido envia o sinal equivale a 0 e quando não reflete envia o sinal 1, ou seja, varia linearmente a velocidade do motor, assim disparando para o Arduino valores de sinais diferentes. A leitura é feita de forma a contar esses pulsos gerados, através do comando *FALLING*, que aciona o contado a cada vez que o sinal varia de 1 para 0. Utilizando uma função interna do Arduino, a função *millis()* que trata-

se de um temporizador interno, que conta cada milissegundo a partir do momento em que o Arduino é conectado a uma fonte de alimentação, é possível realizar a conta de quantas rotações são realizadas por minuto.

A leitura das variáveis é realizada pelos sensores, porém para processá-los é necessário utilizar uma plataforma de prototipagem, que também é responsável por realiza a alimentação dos sensores. Neste trabalho utilizaremos a plataforma *open-source* (Arduino MEGA) conectada a um computador via USB, que pode ser visualizada na Figura 18:

Para avaliar o funcionamento da bancada de ensaios foram escolhidas três modelos de hélices com dimensões iguais e fabricantes diferentes. As hélices utilizadas são; MASTER 13x6, TOP FLITE 13x6, TP 13x6G, mostradas na Figura 28, onde as siglas correspondem as marcas de cada fabricante das hélices e os números as suas respectivas dimensões.

Figura 28 - MASTER 13x6, TOP FLITE 13x6, TP 13x6G.



Fonte – Próprio Autor (2019).

A escolha destas hélices leva em consideração a possibilidade em obter diferentes resultados com as mesmas dimensões apenas variando o fabricante. Seguindo adiante com esta seção, no que diz respeito a estrutura da bancada de ensaio, escolheu-se fazer o uso de blocos de Alumínio.

O Alumínio é um excelente material para compor projetos, pois dependendo da liga adotada, a mesma disponibiliza boa resistência a corrosão o que faz não ser necessário a aplicação revestimentos, pintura ou adesivos, além de ser um material de fácil usinagem.

A liga de Alumínio utilizada neste trabalho é a 7475, esta liga é composta de zinco, cobre, magnésio, manganês e silício, na sua escolha não se levou somente em consideração

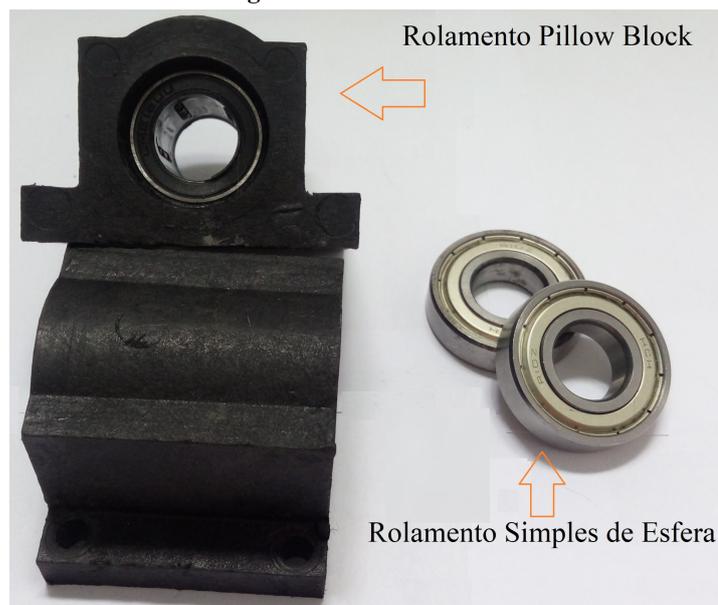
suas qualidades técnicas e sim a disponibilidade de acesso a este material, pois a mesma se tratar de peças que foram encaminhadas a sucata, ou seja, material de refugo, o que torna o seu valor de compra relativamente baixo.

Outros tipos de materiais, ferrosos ou não, poderiam ser usados, mas com as qualidades que essa liga de Alumínio possui e mais o baixo valor de aquisição, optou-se pelo o uso do metal em questão, mesmo levando em consideração que está liga não é receptiva a soldas, o que tornou necessário adotar a fixação por meio de parafusos.

Para que houvesse liberdade de giro e de deslocamento dos eixos que receberiam as forças de tração e torção, dois tipos de rolamentos foram utilizados, esses rolamentos são modelos usualmente utilizados em projetos de CNC¹⁶ e equipamentos de uso geral, onde o deslocamento em três eixos (x; y; z), é necessário.

Segue na Figura 29 uma imagem onde é possível identificar os rolamentos:

Figura 29 - Rolamentos.



Fonte - Próprio Autor (2019).

Os modelos apresentados na Figura 29 foram os adotados neste trabalho: Rolamento *Pillow-Block*, escolhido em função da força de tração, o mesmo da liberdade de movimento rotacional e longitudinal, assim evitando resistência a força de tração e torção; Rolamento simples esférico, a sua escolha é atribuída a força torque, esse rolamento gera resistência a força de tração, mas não se opõe a força de torção.

¹⁶ CNC – Acrônimo para Controlo Numérico Computorizado.

Os eixos adotados para o projeto possuem diâmetro de 16 mm, feito em aço inoxidável, são apresentados na Figura 30, os mesmos foram cortados e torneados nas medidas solicitadas de acordo com projeto conceitual elaborado em CAD.

Figura 30 - Eixos Aço Inoxidável.



Fonte - Próprio Autor (2019).

Como pode ser observado na Figura 30 parafusos também foram utilizados, estes parafusos são de medidas em milímetro modelo M5 e M6 com comprimentos diversos e cabeça cilíndrica para chave Allen.

3.1.2 Sistemas de aquisição de dados

Com o auxílio da IDE do Arduino, desenvolveu-se um programa para coletar dados característico do grupo motopropulsor. Com o intuito de obter-se valores precisos foi necessário fixar alguns parâmetros iniciais, tais como: motor atuando a plena carga, tempo de cada ciclo de coleta de dados, quantidade de amostragem. Com estes parâmetros definidos foi possível ter amostragens suficiente para fazer uma média dos valores, desta forma, obter resultados apropriados.

As linhas de códigos utilizadas para a realizar a interface entre *Hardware e Software* estão apresentados nos APÊNDICES A e B.

Nas linhas de código é possível observar que foram definidas as portas de que cada célula faz uso, tanto para a leitura de torque e de tração, incluído linha de comando que faram a demonstração dos valores de RPM e avanço do servo do acelerador.

3.1.3 Calibração de sensores

A calibração das células de cargas se faz necessária, já que ambas estão sujeitas a estarem fora das medidas aceitáveis para os dados que serão coletados. A calibração e os testes ocorreram nas dependências da universidade

De acordo com Pereira (2018, p.1):

De uma maneira geral, o processo de calibração consiste em submeter o sensor a entradas conhecidas para que sejam comparadas ao seu valor de saída. Estas entradas podem ser a própria gravidade, pressão em coluna de líquido, temperatura, etc.... Podemos utilizar tanto grandezas estáticas, conhecidas através de algum outro instrumento ou experimento; bem como cruzar informações de dados coletados de um sensor confiável e o sensor a ser calibrado.

Os sensores podem apresentar incertezas nas suas medições por motivos diversos, no caso deste trabalho, o motivo está atrelado ao fato de que tais sensores estão sendo ligados pela primeira vez e que a linhas de códigos ainda não estão ajustadas para compensar tais erros, a calibração dos mesmos foi realiza com peso padrão de 0,5 kg, 1 kg, 2 kg até 5 kg.

Após montagem da bancada foi realizada calibração das células de carga, para as mesmas foi utilizado um programa de calibração que se encontra no APÊNDICE B rodando no próprio Arduino onde se fez necessário a utilização de pesos padrões. Os pesos conhecidos foram aplicados diretamente no sentido em que seriam medidos os esforços de cada célula.

As células de carga trabalham com um valor em “*count*” sendo necessário converter essa unidade de medida na unidade desejada. Isso é feito através de uma regra de três simples, após obter o valor em “*count*” referente a um peso conhecido foi aplicado o comando “*set_scale*” a programação do Arduino onde o mesmo irá realizar a regra de três.

Para a célula de tração foi aplicado inicialmente um peso de 5 Kg no sentido de tração da carga, rodando o programa da calibração o mesmo apresentou o valor de 839504 count. Já para a célula de torque foi aplicado inicialmente um peso de 1,5 Kg no sentido de compressão da carga, rodando o programa da calibração o mesmo apresentou o valor de 194578 count

Dessa forma as células foram calibradas da seguinte maneira:

Tabela 1 - Calibração Células de Cargas.

Força	Coefficiente
Tração	$839504 / 5 = 167.900,800 \text{ count/Kg}$
Torque	$194578 / 1.5 = 129.718,667 \text{ count/Kg}$

Fonte - Próprio Autor (2019).

Utilizando os valores da Tabela 1, para tração no programa final com a função “tração.set_scale(839504 / 5)” temos:

$$\text{Tração em Kg} = [(5 \text{ Kg} * \text{Leitura atual da célula em count}) / 839504 \text{ count}]$$

E para torque a função “torque.set_scale(194578 / 1.5)” temos:

$$\text{Torque em Kg} = [(1,5 \text{ Kg} * \text{Leitura atual da célula em count}) / 194578 \text{ count}]$$

Várias verificações foram realizadas variando o peso de 0,5 Kg até 9,5 Kg, e todos se mostraram consistentes com os pesos aplicados.

Vale ressaltar que para o torque no programa principal o mesmo terá de ser dividido pela distância entre a o eixo do motor e o ponto de aplicação da força (0,71 m), isso foi levado em consideração na programação.

3.1.4 Incertezas de medição

Os valores de incerteza a serem utilizados são provenientes de especificações técnicas, neste caso disponibilizadas pelo fabricante, essas obtidas por medições, calibrações, procedimentos operacionais, que quando feitas são apresentadas por intermédio de documentos e gravuras no próprio componente.

Para melhor elucidar o assunto, Tanaka (2018, p.1):

Incertezas são todas as fontes de incerteza que **não são obtidas por meio da análise estatística de séries de observações**. Alguns exemplos são: especificações do fabricante, dados provenientes de outras calibrações, dados dos padrões utilizados, entre outros. A fonte de incerteza do tipo B mais comum em calibrações de instrumentos é a incerteza da resolução do equipamento, também conhecida como menor divisão dele.

Em geral valores de incerteza e dados técnicos variam de um componente para o outro, ou seja, cada modelo de sensor possui características próprias, onde modelos idênticos podem apresentar incertezas diferentes simplesmente por serem de fabricantes distintos, portanto o mesmo pode adota uma modelagem deferente de construção, assim se deve identificar a incerteza de cada componente pelo seu respectivo fabricante.

Primeiramente será apresentado as especificações do microcontrolador Arduino MEGA:

Tabela 2 - Especificações Arduino MEGA 2560.

Descrição	Dados
Microcontrolador	ATmega2560
Tensão de Operação	5v
Tensão de Entrada	7-12v
Portas Digitais	54 (15 para PWM)
Partas Analógicas	15
Corrente Pinos I/O	40 mA
Corrente Pinos 3,3V	50 mA
Memória Flash	2565 KB (8Km para Bootloader)
SRAM	8 KB
EEPROM	4 KB
Velocidade e Clock	16 MHz

Fonte – Embarcados (2018).

As células utilizadas neste trabalho são da família “*Type S*” Universal da fabricante AEPH DO BRASIL INDÚSTRIA E COMÉRCIO LTDA, modelo TS é utilizada em medição de forças à tração e compressão, insensível a esforços laterais e torções, circuito interno vedado com resina a base de silicone, com proteção IP-67 conforme Norma internacional para invólucros de eletrônicos sob N° NBR IEC 60529, segue Tabela 3 com especificações:

Tabela 3 - Especificações Células de Carga.

Capacidades	5 Kg	10 Kg	20 Kg	50 Kg	100 Kg	200 Kg
Sensibilidade	2,00 mV/V +/- 10%					
Não linearidade	< 0,02% FSO					
Histerese	< 0,02% FSO					
Creep ou Fluência	30 Min: <0,03% FSO / 8 H: <0,05% FSO					
Equilíbrio do Zero	+/- 1%					
Faixa de Temperatura Operacional	-10°C a +60°C					
Faixa de Temperatura Nominal	-5°C a +50°C					
Efeito de temperatura na Calibração	0,025 FSO					
Efeito de temperatura no Zero	0,025% FCO					
Sobrecarga Segura (Sem Ruptura)	150% FSO					
Sobrecarga de Ruptura	300% FCO					
Tensão Máxima Excitação VDC / VCA	15V					
Resistência Elétrica Entrada	434Ω +/- 30Ω					
Resistência Elétrica Saída	351Ω +/- 3Ω					
Resistencia de Isolação (50V)	> 2 GΩ					
Cabo Blindado	4 x 24 AWG					

Fonte -Alfas Instrumentos (2019).

Na interface de coleta de dados foi utilizado o componente HX711, esse módulo irá amplificar o sinal entre as células de cargas de 20 kg e o microcontrolador Arduino MEGA, a Tabela 4 contém as especificações:

Tabela 4 - Especificações HX711.

Descrição	Dados
Tensão de funcionamento	5 VDV (Recomendado)
Corrente de funcionamento	< 10 mA
Diferencial de tensão de entradas	± 40 mV
Precisão de dados	24 bits
Frequência de atualização	80 HZ
Peso	1,1g

Fonte - Avia Semiconductor (2019).

Para a leitura da RPM, usaremos o Sensor Óptico Reflexivo TCRT5000:

Tabela 5 - Especificações TCRT5000.

Descrição	Dados
Tensão de operação	5 VDC
Corrente máxima	60 mA
Comprimento de onda	950 nm
Distância de detecção(máxima):	25 mm

Fonte - Euler Oliveira (2018).

As incertezas que encontramos nos componentes utilizados neste trabalho estão apresentadas na Tabela 6, lembrando que para a calibração das células de carga, foram utilizadas massas patronizadas, segue Tabela 6 com valores correspondentes a grandezas de medições e incerteza.

Tabela 6 - Grandezas de medição e incerteza.

Grandeza	Faixa	Incerteza	Porcentagem
Revolução	1000 a 11000 rpm	6	0,6 a 0,05 %
Célula de carga Tração e Torque	0 a 20 kg	0,6 kg	0,03%

Fonte – Próprio Autor (2018).

Para considerar os valores coletados durante o experimento, os mesmo devem estar acompanhados de seu delta, ou seja, a margem de erro para mais ou para menos em relação a um valor coletado, o que nos remete a dizer que todo valor apresentado em uma dada medição não pode ser considerado valor absoluto, e sim valor aproximado, quanto maior aproximação o valor medido tiver em relação ao valor real, maior será a veracidade do mesmo, devido a possibilidade dessa exatidão tende a ser remota em função das variáveis, como por exemplo, oscilação de temperatura, vibração mecânica, intervenção externa magnética.

3.1.5 Montagem do aparato experimental

Como já mencionado na Seção (3.1 DESENVOLVIMENTO DA BANCADA DE ENSAIOS), vantagens em construir um determinado equipamento em ambiente virtual e consecutivamente as impressões das vistas ortogonais (planta baixa) trazem ao projeto a redução de custos e correções antecipada de erros antes da fase de manufatura.

Segue Figura 31 isométrica em CAD, com apresentação dos componentes:

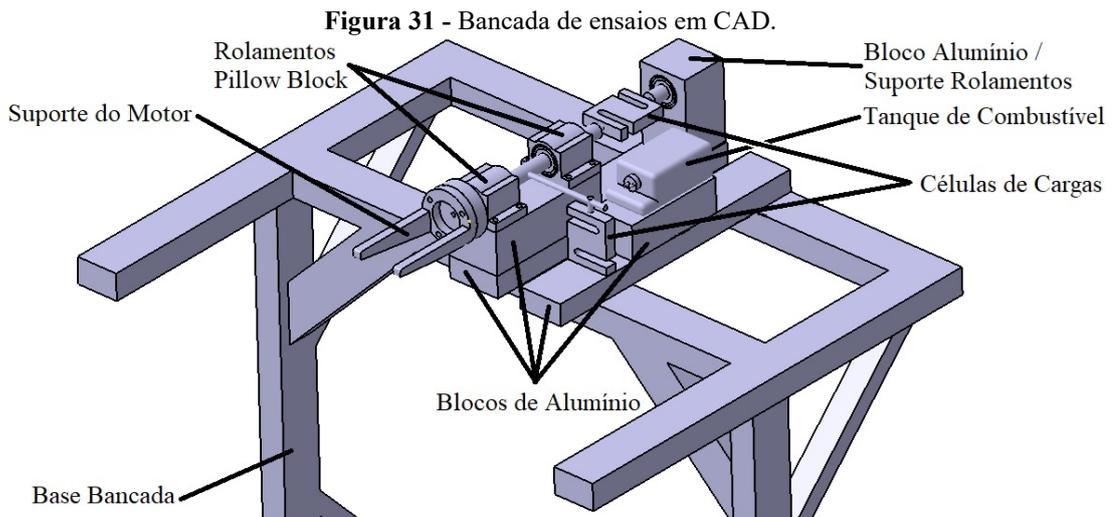
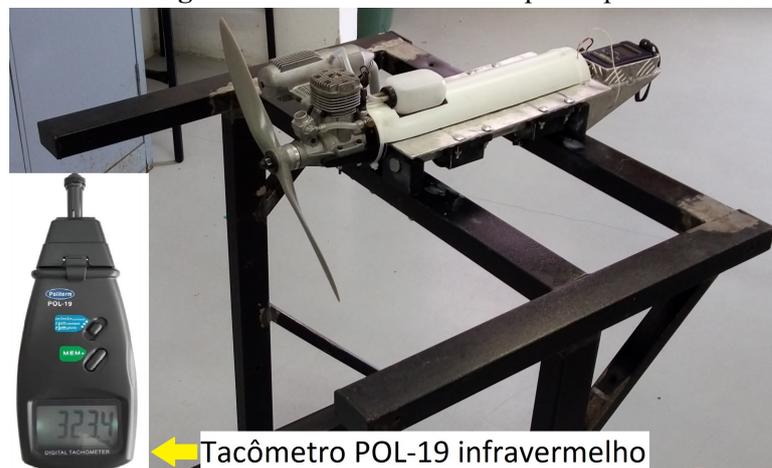


Figura - Próprio Autor (2019).

Com o desenho tridimensional da bancada em CAD apresentado na Figura 31, segue em APÊNDICE C as plantas baixas das peças que devem ser usinadas.

Para desenvolver a bancada de ensaio projetada, foi utilizada a bancada protótipo de ensaios mencionada na Seção (3.1 DESENVOLVIMENTO DA BANCADA DE ENSAIOS), segue Figura 32 desta bancada, observe que não se faz uso de componentes como células de cargas ou Arduino, está bancada coletar apenas força de tração e RPM:

Figura 32 - Bancada de ensaio protótipo.



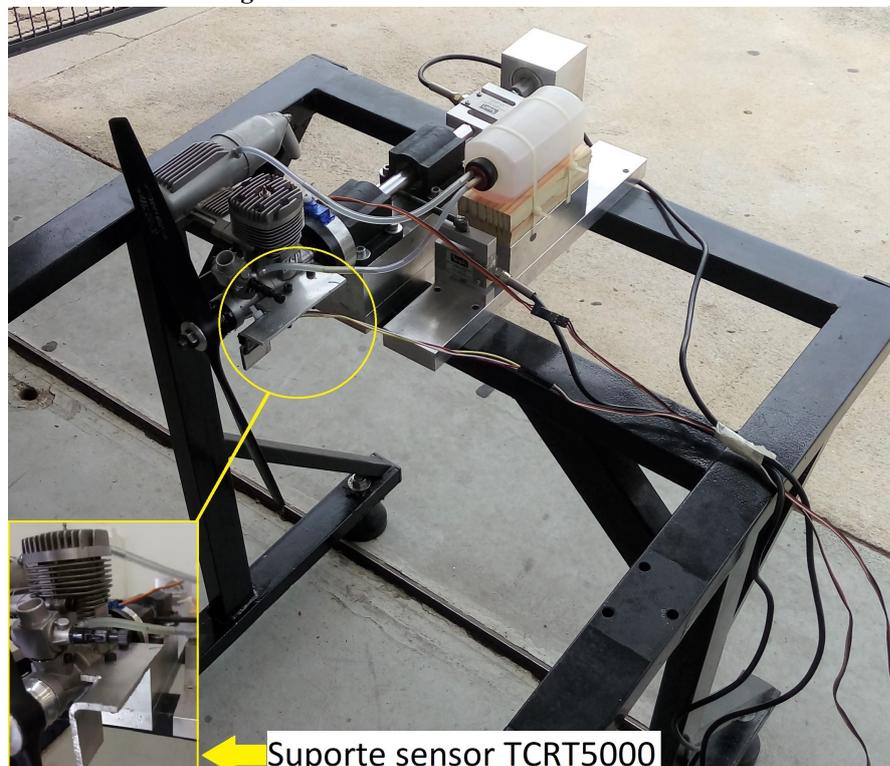
Fonte - Próprio Autor (2018).

Segue lista dos componentes instalados na bancada da Figura 32:

- Composição da Base: Barras de aço retangular com as seguintes dimensões, 50x31mm e 30x20mm ambas com 1mm de espessura;
- Parafusos tipo M5 e M6 cabeça para chave allen e parafusos $\frac{3}{4}$ cabeça redonda, porcas auto-travante e simples, arruelas de pressão;
- Dois eixos de aço 16 mm de diâmetro;
- Quatro rolamentos tipo *Pillow-Block* com 16 mm de diâmetro;
- Chapas de alumínio xadrez com 2,5 mm de espessura;
- Quatro mancais para eixo 16 mm de diâmetro;
- Quatro niveladores da bancada;
- Berço para motor 61 em polímero;
- Tanque de combustível 4 OZ;
- Um receptor e transmissor de 2,4 GHz;
- Bateria de Células com 4,8 V para o receptor;
- Um micro servo com 9 g de massa e torque de 1,2 kg/cm;
- Uma balança de mão, modelo digital, com capacidade máxima de leitura de 25 kg;
- Uma Chave ON/OFF com entrada fêmea e macho para carregamento de bateria;
- Um tacômetro modelo POL-19 infravermelho.

Partindo do protótipo da Figura 32 para a bancada automatizada da Figura 33, se fez necessário a remoção e inclusão de componentes eletrônicos na estrutura:

Figura 33 - Bancada de ensaio concluída.



Fonte - Próprio Autor (2019).

Segue lista dos componentes instalados na bancada da Figura 33:

- Duas células de carga tipo “S” com capacidade de pesagem máxima de 20 kg;
- Módulo HX711 para conexão entre célula de carga e Arduino;
- Sensor Óptico modelo TCRT5000, substituindo o tacômetro POL-19;
- Uma placa Arduino modelo Mega 2560;
- Tanque de combustível 6½ OZ, substituindo o tanque de 4 OZ;
- Blocos de alumínio liga 7475;
- Dois rolamentos R10ZZ;
- Um braço de aço com 71 mm de comprimento para leitura da força de torque;
- Cinco metros de fios 2 mm de espessura cores diversas;
- Um cabo USB de 20 cm de comprimento;
- Um micro servo 9g com torque de 1,2 kg/cm;
- Dois Rolamentos *Pillow-Block* com 16 mm de diâmetro;
- Berço para motor 61;
- Parafusos M5 e M6, cabeça cilíndrica para chave *allen*.

O projeto tridimensional possibilita descrever o funcionamento da bancada de uma forma abrangente, quando o motor é acionado a rotação da hélice faz com que o ar deslocado reaja empurrando o conjunto para frente gerando assim uma força de tração no eixo longitudinal que estará apoiado por dois rolamentos tipo *Pillow-Block*, possibilitado apenas o movimento longitudinal e rotacional e não lateral, esse eixo estará conectado a uma célula de carga tipo “S”, que por sua vez estará engastado a dois rolamentos axiais, que apenas possibilita o movimento rotacional, não lateral e longitudinal.

Para a leitura de torque, o eixo longitudinal tende a girar sentido horário em reação ao giro da hélice no sentido anti-horário, essa força será transferida através de um braço acoplada ao eixo longitudinal que irá comprimir uma célula de carga tipo “S”.

Para a leitura da RPM, o sensor óptico está apoiado a um braço que por sua vez está engastado na base do motor, o senso óptico estar localizado próximo ao batente da hélice, em uma posição vertical em relação ao eixo do motor.

3.2 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Uma sequência de procedimentos foi adotada durante os ensaios, haja visto que os mesmos procedimentos devem ser iguais para cada hélice, assim tornando necessário listar as etapas que foram adotadas em cada fase do experimento, é interessante mencionar que durante o ensaio o tempo adotado entre cada abertura do carburador ou aceleração do motor,

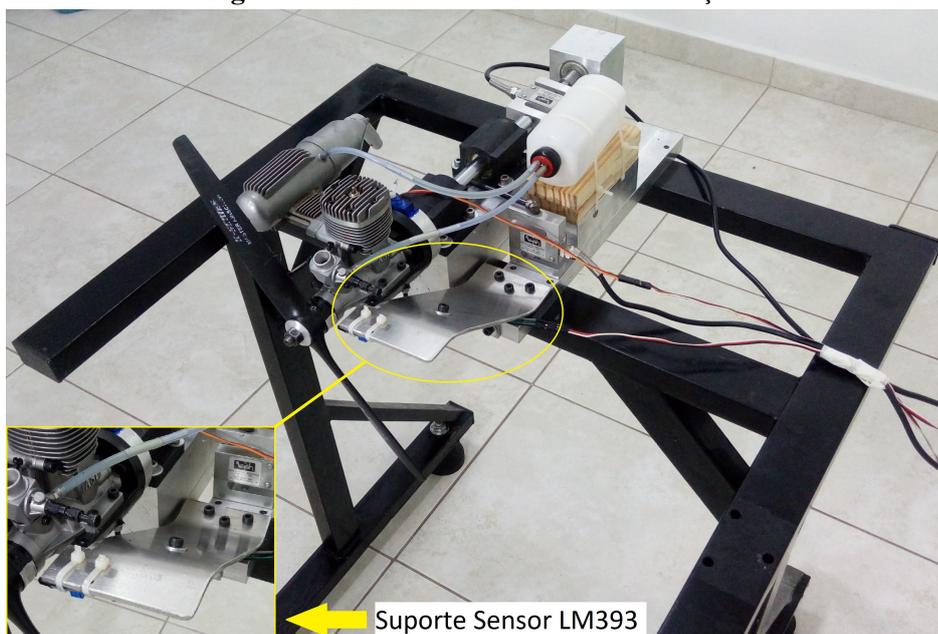
foi entre um e dois minutos, já que motores a combustão podem ter oscilações durante a aceleração, para os casos onde ocorreram imprecisão na leitura dos valores foi adotado dois minutos, para os demais um minuto:

- Fixação do moto ASP no berço da bancada, lembrando que o mesmo motor será utilizado em todos os ensaios, fixado uma única vez;
- Fixação da hélice no motor;
- Aferição e ajuste dos sensores de forma física e eletrônica;
- Abastecimento quando necessário;
- Ignição do motor com aceleração em posição de lenta;
- Aceleração do motor em intervalos pré-estabelecidos seguido de aquisição dos parâmetros de desempenho pelo programa;
- Fechamento do carburador após consumo total do combustível;
- Substituição da hélice para o próximo ensaio.

O procedimento foi repetido a cada bateria de ensaio. Após montagem da bancada, durante início dos testes deparou-se com alguns problemas decorrentes de interferência e instabilidade nas leituras da RPM, após testes da bancada ficou evidente que o sensor óptico estava sofrendo interferência no seu funcionamento devido a dois motivos.

O primeiro deles decorrente da vibração gerada pelo motor, já que o sensor ficava acoplado diretamente no suporte do motor como pode ser visto na Figura 33, a solução encontrada foi a fabricação de um novo suporte, para que o mesmo não tivesse contato direto com a vibração do motor, assim alterado o projeto inicial, como pode ser visto na Figura 34:

Figura 34 - Bancada de ensaio com alteração.



Fonte - Próprio Autor (2019).

Outra alteração foi a substituição do sensor Óptico TCRT5000 para um LM393, ambos possuem as mesmas especificações e o mesmo funcionamento não sendo necessários alterações na linha de programação, porem devido ao seu formato o mesmo se enquadrou melhor no novo suporte.

Figura 35 - Sensor Óptico Reflexivo LM393.



Fonte: Mercado Livre (2019).

Segue Tabela 7 com especificações do sensor óptico apresentado na Figura 35:

Tabela 7 - Especificações LM393.

Descrição	Dados
Alcance	2cm até 60cm
Sensor de obstáculo	IR
Tensão de operação	3.3 à 5V DC
Emissor e receptor	IR
Distância de detecção	2 a 80 cm
Dimensões	31 x 15 x 6 mm
Ângulo de leitura	35°

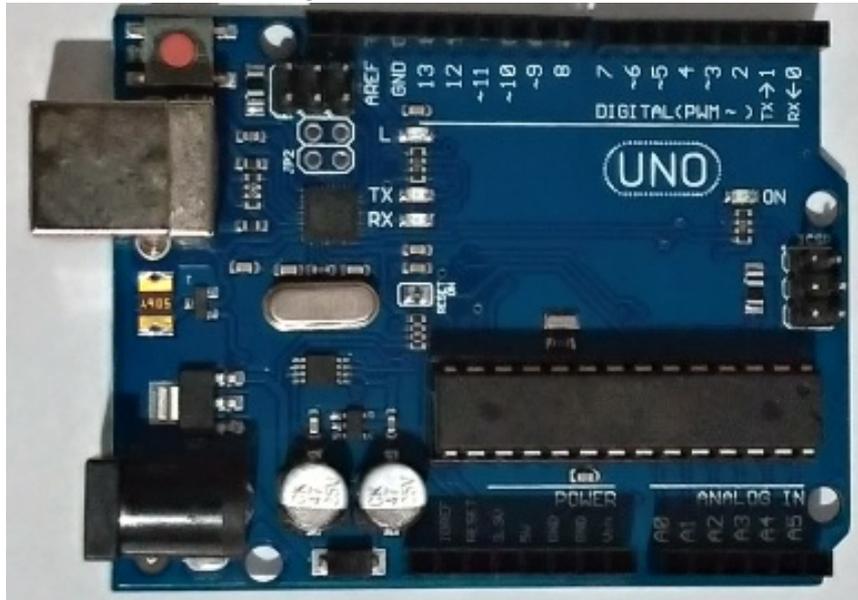
Potenciômetro para ajuste da distância

Fonte - Multilógica-shop (2019).

Já o segundo problema foi uma interferência na leitura dos dados quando lidos simultaneamente com as informações de tração e torque, após os testes não identificou-se a causa raiz do problema e a solução encontrada foi separar a leitura do RPM da leitura das informações de tração e torque, para isso acrescentamos mais uma placa Arduino UNO, e

para leitura se fez necessário um segundo computador para que os dados fossem obtidos simultaneamente e quanto a programação foram utilizadas as mesmas linhas de código, apenas divididas entre as duas placas Arduino.

Figura 36 - Arduino UNO.



Fonte - Próprio Autor (2019).

Segue Tabela 8 com especificações do Arduino UNO apresentado na Figura 36:

Tabela 8 - Especificações Arduino UNO.

Descrição	Dados
Microcontrolador	ATmega328
Tensão de Operação	5V
Tensão de Entrada	7-12V
Portas Digitais	14 (6 para PWM)
Partas Analógicas	6
Corrente Pinos I/O	40 mA
Corrente Pinos 3,3V	50 mA
Memória Flash	32 KB (0,5Kb para Bootloader)
SRAM	2KB
EEPROM	1KB
Velocidade e Clock	16 MHz
Resolução portas Analógicas	10 bits

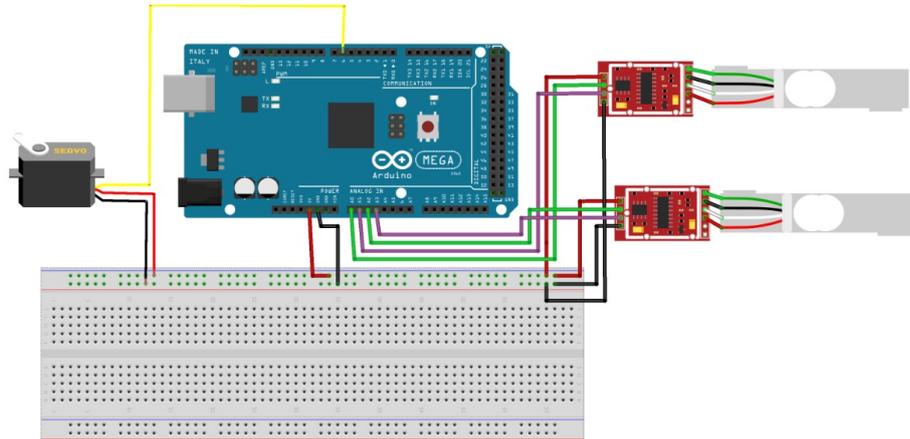
Alimentação via conector Jack

Fonte - Bau da Eletrônica (2019).

O microcontrolador de modelo Arduino UNO se trata de uma versão básica *open-source*, o mesmo possui capacidade suficiente para o funcionamento do sensor LM393 podendo ser considerado o ideal já que o esquema elétrico não apresentam complexidade na

sua construção, conforme pode ser visto na Figura 37 para o *Layout* do Arduino Mega 2560 e Figura 38 para o *Layout* do Arduino UNO, segue esquemático das ligações elétricas das células de cargas, micro servo motor e do sensor RPM já mencionado:

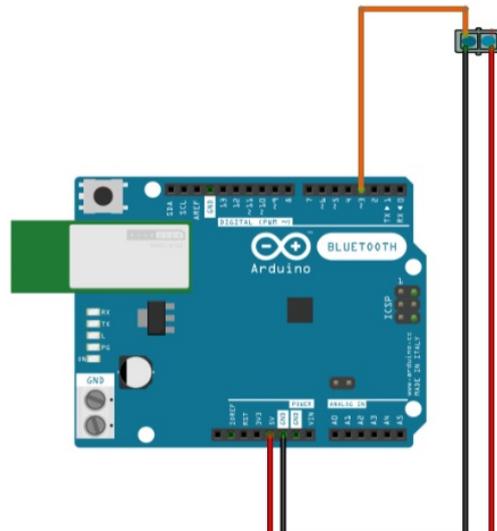
Figura 37 - Conexões das células de carga e servo no Arduino Mega 2560.



Fonte - Próprio Autor (2019).

Para evitarmos interferência o sensor RPM foi ligado conforme Figura 38:

Figura 38 - Conexões sensor RPM no Arduino UNO.



Fonte -- Próprio Autor (2019).

Após as alterações realizadas se fez necessário nova verificação do sensor cujo os novos resultados foram bem consistentes, sem variações bruscas e quando comparados com os resultados obtidos anteriormente se mostraram mais coerentes e precisos. Portanto podemos concluir que os problemas de interferência foram reduzidos a níveis aceitáveis, as células de cargas se mostraram bem precisas em relação a calibração e a bancada preparada para realização dos testes práticos para comparação da eficiência de cada conjunto.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Conforme mencionado anteriormente o objetivo deste trabalho é validar a automatização da bancada construída, para isso foram utilizados três modelos de hélices, os três ensaios utilizaram o mesmo motor de modelo ASP[®] 61A. Os resultados obtidos em tempo real no IDE do Arduino apresentam o formato que pode ser visto no APÊNDICE E.

Como primeira impressão a leitura dos dados se mostrou consistentes, sem que ocorressem variações bruscas, é possível constatar uma coerência em relação aos resultados apresentados no serial monitor, quanto aos dados obtidos referentes ao torque, os mesmos se demonstraram consistentes da mesma forma que os valores de tração.

Vale salientar que o tempo de cada teste foi o tempo que cada conjunto levou para consumir todo combustível de seu tanque. É importante considerar que foram programadas nove posições de abertura do motor onde em média cada posição foi mantida durante um ou dois minutos, dependendo do tempo de estabilização do giro.

Após compilação dos dados no *Excel* os mesmos foram formatados de formar a ficar fácil o entendimento e facilitar a geração da informação gráfica:

Figura 39 - Dados de RPM, Tração e Torque Sincronizados.

TESTE 1 - MOTOR ASP[®] 61A / HÉLICE MASTER 13x6			
HORA ▼	RPM ▼	TRAÇÃO ▼	TORQUE ▼
17:52:01	4740	1,650	0,492
17:52:04	4620	1,760	0,491
17:52:08	4860	1,553	0,493
17:52:11	4740	1,519	0,492
17:52:14	4860	1,536	0,492
17:52:17	4620	1,489	0,475
17:52:21	4560	1,612	0,502
17:52:24	4680	1,586	0,474

Fonte - Próprio autor (2019).

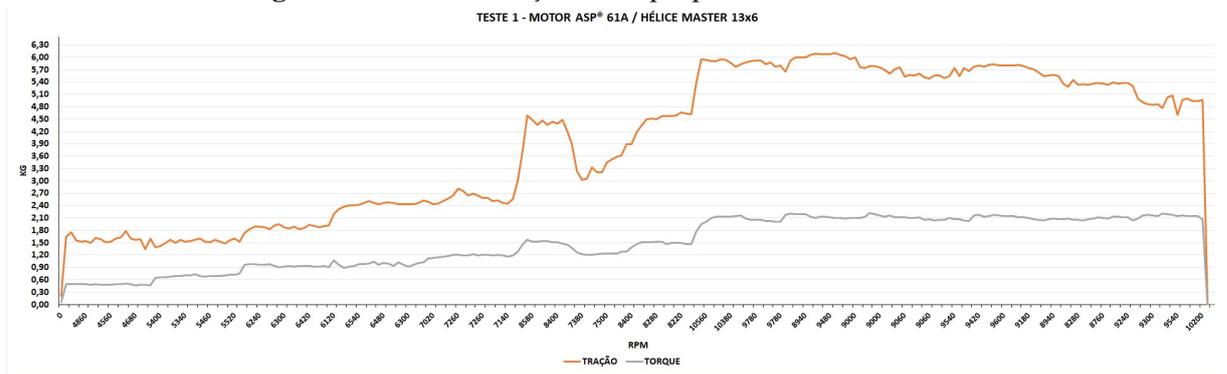
4.1 MEDIDAS DE DESEMPENHO

Os resultados obtidos foram bastante satisfatórios e a quantidade de dados bem alta se fazendo necessário a ferramenta gráfica para melhor análise dos resultados, para isso, os dados de tração, torque e RPM são apresentados em um único gráfico e no APÊNDICE E estarão disponibilizadas todos os valores em tabelas, dessa forma podemos notar o comportamento das três grandezas apresentadas bem como a relação entre elas, a seguir apresentam-se os resultados para discussão.

4.1.1 Resultado hélice Master 13x6

No primeiro gráfico podemos notar uma relação direta entre a tração e o torque em suas devidas proporções, está hélice é construída em polímero, durante o teste foi possível identificar que devido a área do contato da hélice ser maior, a mesma atinge uma tração alta com uma rotação mais baixa por encontrar mais resistência do ar, importante ressaltar que durante a subida houve uma oscilação considerável vindo a estabilizar após a metade do teste.

Figura 40 - Gráfico Tração e Torque para Hélice Master 13x6.



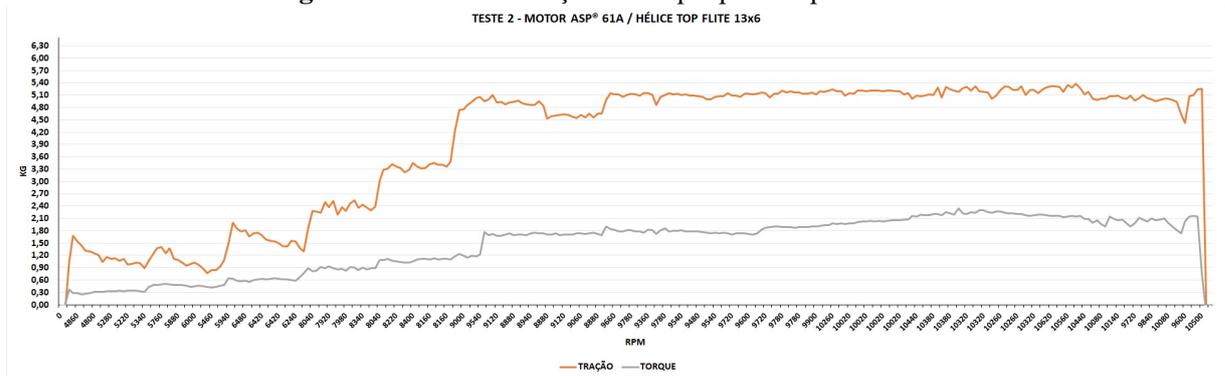
Fonte - Próprio Autor (2019).

Para este ensaio os valores máximos de tração são 6,103 kg ou 59,91 N e para torque 2,208 kg.m ou 21,675 N.m, como é evidente, as escalas apresentadas no gráfico são difíceis de serem visualizados, o mesmo gráfico está apresentado em modo paisagem no APÊNDICE F.

4.1.2 Resultado hélice Top Flite 13x6

Em comparação com a primeira hélice, esta possui uma área menor, podemos notar logo no início do gráfico que a mesma atinge rotações elevadas com valores de tração e torque ainda baixos, isso se deve ao material da hélice ser de madeira o que gera maior rigidez.

Figura 41 - Gráfico Tração e Torque para Top Flite 13x6.



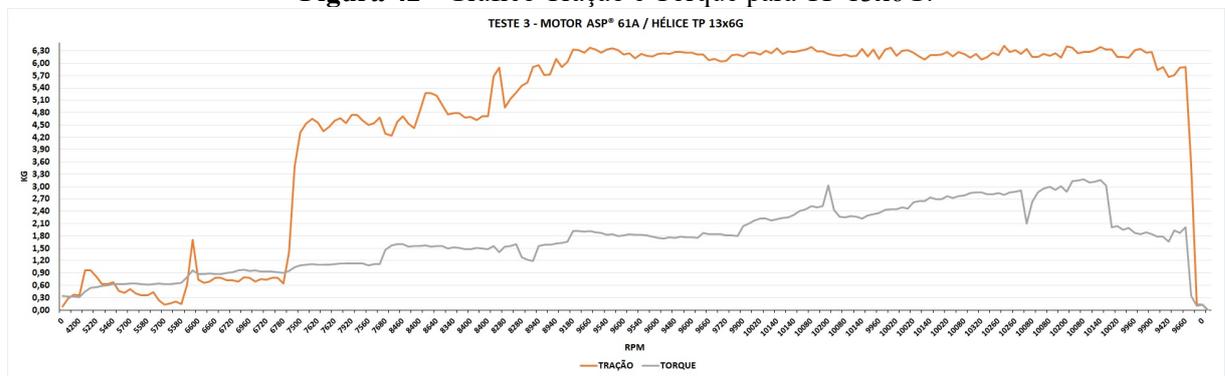
Fonte - Próprio Autor (2019).

Para este ensaio os valores máximos de tração são 5,383 kg ou 52,85 N e para torque 2,342 kg.m ou 22,99 N.m, as escalas apresentadas no gráfico são difíceis de serem visualizados, o mesmo gráfico está apresentado em modo paisagem no APÊNDICE G.

4.1.3 Resultado hélice Tp 13x6G

A última hélice de material polímero flexível, a mesma apresentou os maiores valores de tração e torque, apesar de no início ser bem instável, também devido a flexibilidade do material, após um tempo a mesma se estabilizou e subiu rapidamente se mostrando bem consistente durante o restante do teste.

Figura 42 - Gráfico Tração e Torque para TP 13x6G.



Fonte - Próprio Autor (2019).

Para este ensaio os valores máximos de tração são 6,417 kg ou 62,99 N e para torque 3,182 kg.m ou 31,24 N.m, as escalas apresentadas no gráfico são difíceis de serem visualizados, o mesmo gráfico está apresentado em modo paisagem no APÊNDICE H.

5 CONCLUSÃO

O presente projeto foi embasado e estruturado com foco no desenvolvimento de uma bancada de ensaios não destrutivos automatizada, de forma a responder a questão: Ao desenvolver uma bancada de ensaios, será possível evidenciar as diferenças entre cada conjunto de grupo motopropulsor assim proporcionando um projeto de aeronave mais eficiente devido aos dados coletados?

Tal questionamento possibilitou a conclusão de que o desenvolvimento da bancada de ensaios é de suma importância para amenizar possíveis erros que podem ser cometidos na escolha do grupo motopropulsor junto ao projeto de uma aeronave radio controlada, já que força de tração e torque são devidamente mensuráveis em forma de dados numéricos.

O primeiro objetivo: O desenvolvimento e construção da bancada de ensaios foi devidamente cumprido, salientado que um modelo de motor dois tempos tipo Glow foi utilizado, e em detalhe gráfico a apresentação dos componentes, incluindo imagem em CAD e figuras.

Quanto ao segundo objetivo: Foram devidamente abordados conceitos sobre as grandezas físicas; Força Propulsiva, Torque, Rotação, de forma teórica, e concretizadas com os dados numéricos coletados nos ensaios, também foi apresentado a metodologia utilizada no processo de medição. As linhas de códigos utilizados acompanham em APÊNDICE.

Assim é possível concluir que a bancada de ensaios foi validada para ensaios estáticos, onde os sistemas elétrico e eletrônico apresentaram o funcionamento esperado mediante alterações necessárias devido a interferência no sensor de RPM, e os resultados obtidos podem ser considerados consistentes. Os quais evidenciaram a importância do processo de automação, justificando que componentes de fácil aquisição podem ser usados para tais fins.

No tocante ao projeto conceitual em CAD, foi possível identificar a importância do mesmo, em aplicações de projetos, já que auxilia na construção física do equipamento, e assim antecipando possíveis perdas financeiras, se justifica mencionar que durante o desenvolvimento desta bancada, alterações se mostraram necessárias.

Por fim esta pesquisa também apresenta a possibilidade de continuidade através do desenvolvimento de um linearizador de corrente ar para ser acoplado ao túnel de vento da Universidade de Taubaté, já que o mesmo complementaria a bancada de ensaios e, portanto, fica como sugestão de tema para futuros projetos acadêmicos.

REFERÊNCIAS

ANTT - Agência Nacional De Transporte Terrestre. **Caderno de obrigações**. 47 f. Disponível em:

http://www.antt.gov.br/backend/galeria/arquivos/anexo_1_caderno_de_obrigacoes.pdf.8.

Acessado em: 06/10/2019 as 19h48min.

AVIO LIGHT. **Hélice Peszke**. Disponível em: <http://www.flyerolight.com/peszke.html>.

Acessado em: 18/04/2018 as 10h44min.

BORNANCINI, José Carlos M.. PETZOLD, Nelson Ivan. JÚNIOR, Henrique Orlandi.

Desenho Técnico Básico, *Fundamentos Teóricos e Exercícios à mão livre*. V. 1, 3º Ed., 71 f., 2018. Universidade Federal do Rio grande do Sul, RS. Disponível em:

<https://www.ufrgs.br/destec/wp-content/uploads/2018/08/DESENHO-T%C3%89CNICO-B%C3%81SICO-VOL1-ED3.pdf>. Acessado em: 06/10/2019 as 17h45min.

CAMARGO, Antonio Pires de. **Desenvolvimento de um Medidor de Vazão Utilizando Célula de Carga**. 2009. 126 f., Dissertação (Mestrado em Ciências) - Universidade de São Paulo. Piracicaba - SP, 2009. Disponível em:

[www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11143/tde-19022010-](http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11143/tde-19022010-080513/publico/Antonio_Camargo.pdf)

[080513/publico/Antonio_Camargo.pdf](http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11143/tde-19022010-080513/publico/Antonio_Camargo.pdf). Acessado em: 06/10/2019 as 13h48min.

CARER, M; CARRARO, E. **Célula de Carga**. Artigo. Caxias do Sul, RS. 2010. Disponível em:

<<http://pt.scribd.com/doc/46478581/Celulas-de-carga-Experimento>>. Acesso em: 06/10/2019 as 15h08min.

CONCEITOS.de. **Conceitos de Componentes**. 1 f., 2013. Disponível em:

<https://conceito.de/componentes>. Acessado em: 04/05/2018 as 14h27min.

EMBARCADOS. **Introdução à Arduino MEGA 2560**, *figura 12 – Resumo de recursos de Arduino MEGA 2560*. Disponível em: <https://www.embarcados.com.br/arduino-mega-2560/>.

Acessado em 06/10/2019 as 19h52min.

GYLES, Brian Robert. **Propeller Selector**, *Software freeware*. 2002. Disponível em:

<http://www.hoppenbrouwer-home.nl/ikarus/software/propselector.htm>. Baixado em

01/05/2017 as 10h20min.

HARTZELL, **Aluminum Propellers**: *Turboprop engine aircraft*. Figura disponível em:

<http://hartzellprop.com/wp-content/uploads/Hartzell-Propeller-5-blade-aluminum-turbine.jpg>.

Baixada em 13/11/2019 as 02h21min.

HERRERA MODELS. **Shopping Aeromodelismo**, *Departamento Hélice*. Disponível em:

http://www.herreramodels.com.br/shopping/nc_index.php?bsq=1&secao_id=15. Acessado

em: 19/04/2018 as 09h08min.

HOMA. Jorge M.: Aeronaves e motores, **Conhecimentos técnicos**, 25º Ed., São Paulo – SP: ASA, 2005.

INSTRUMENTOS. Alfa. **Células de cargas industriais**. *Dados técnicos*. Disponível em: <http://www.alfainstrumentos.com.br/produto/sv/>. Acessado em 29/10/2019 as 09h52min.

JÚNIOR, Marcelo. **Introdução à Informática: Hardware & Software**. Instituto federal de educação, ciência e tecnologia do rio grande do norte campus macau, Macau – RN: 2014. Disponível em: <https://docente.ifrn.edu.br/marcelojunior/disciplinas/apostilas/introducao-a-informatica-hardware-software>. Acessado no dia 03/05/2018 as 16h56min.

JUNIOR, Sergio Luiz Stevan. SILVA, Rodrigo Adamshuk. **Arduino, Automação e Instrumentação Industrial Com Arduino: teoria e projetos**: 1º Ed., São Paulo – SP: ÉRICA, 2015.

LEICHTWEIS. Augusto Cesar Dahmer. **Desenvolvimento de uma bancada para testes de um motor de pistão tipo glow**. 2016. 48 f., Trabalho de Graduação - Faculdade Horizontina. Horizontina – RS, 2016. Disponível em: http://www.fahor.com.br/images/Documentos/Biblioteca/TFCs/Eng_Mecanica/2016/Augusto_Cesar_Dahmer_Leichtweis.pdf. Acessado em 06/10/2019 as 15h10min.

MARKUS, O. **Circuitos Elétricos -Corrente Contínua e Corrente Alternada**. 8 Ed. São Paulo Érica, 2009.

MARTINS, Cristiane. **Desempenho de Hélices, Prp30: Teoria da Hélice e Aplicações**. 2011. Departamento de Engenharia Aeronáutica - Instituto Tecnológico de Aeronáutica. Disponível em: <https://slideplayer.com.br/slide/3660195/>. Acessado dia 06/10/2019 as 20h26min.

MERCADO LIVRE. **Hélice Quadripá, Modelismo profissional**. Disponível em: https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-859909533-helice-quadripa-10x8-4-blade-cw-furia-hobby-_JM. Figuras baixadas em: 19/04/2018 as 09h13min.

MERCADO LIVRE. **Tanque Combustível, Modelismo profissional**. Disponível em: https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-1028353040-tanque-de-combustivel-dubro-aeromodelo-4oz-120ml-dub404-_JM#position=6&type=item&tracking_id=31041025-3657-430e-ac9c-fafb7fc6cc51 Figuras baixadas em: 19/04/2018 as 10h21min.

MERCADO LIVRE. **Motor ASP61, Modelismo profissional**. Disponível em: https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-728431698-motor-glow-asp-61-2t-para-aeromodelo-_JM: Figuras baixadas em: 21/04/2018 as 17h09min.

MERCADO LIVRE. **Sensor LM393**. Disponível em: https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-1271007405-sensor-de-obstaculo-reflexivo-infravermelho-ir-lm393-arduino-JM?matttool=79246729&mattword&gclid=Cj0KCQiAn8nuBRCzARIsAJcdIfPa2Q6R1DIWQtG-75wpOcs_ODIYtGJ65vCk-hzy0cdij-wikBWab9EaAmk fEALw_wcB&quantity=1: Figura baixada em: 16/11/2019 as 19h06min.

MERCADO LIVRE. **Sensor TCRT5000**. Disponível em: https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-844297582-sensor-de-linha-segue-faixa-infravermelho-tcrt5000-arduino-JM?matttool=79246729&mattword&gclid=EAJalQobChMIw7Gam-KU5gIVwgqRCh3svQdDEAQYASABEgKh7D_BwE&quantity=1: Figura baixada em: 01/12/2019 as 14h06min.

MEYER, Maximiliano. **O que é Excel?**, 2013. Disponível em: <https://www.aprenderexcel.com.br/2013/tutoriais/o-que-e-excel/>. Acessado em: 28/05/2019 as 23h25min.

MUNDO PROJETADO. **Sensor Óptico**. Disponível em: <http://mundoprojetado.com.br/sensor-de-obstaculo-infravermelho/>: Figura baixada em: 01/12/2019 as 17h30min.

MULTILOGICA. **Shopping de eletrônicos**. 2019. Disponível em: <https://multilogica-shop.com/modulo-sensor-de-obstaculo-infravermelho/>, Figura baixa em 17/11/2019 as 10h21min.

NASCIMENTO, Victor Wladimir Cerqueira. **Introdução a Metodologia Científica**. 2010, 13 f.. Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão – SE. Disponível em: http://www.cesadufs.com.br/ORBI/public/uploadCatalogo/14131809042014Introducao_a_Metodologia_Cientifica_Aula_1.pdf. Acessado em 20/05/2018 as 10h37min.

N'GUESSAN. Antônio Julien B. R. Koffi. **Avaliação da taxa de propagação de trincas em corpos de prova utilizando a técnica de medições da deformação da face traseira**, 2014. 113 f., Projeto de graduação - Universidade de Brasília. Brasília – DF, 2014. Disponível em: http://bdm.unb.br/bitstream/10483/10178/1/2014_AntonioJulienBertinRobertKoffiN%E2%80%99Guessan.pdf. Acessado em: 06/10/2019 as 15h21min.

OBERT, Edward f.. **Motores de combustão interna**, 1º Ed., Porto Alegre – MG: GLOBO, 1971.

PADILHA, Rafael Sangoi. **Desenvolvimento de um Sistema de Gerenciamento Eletrônico e de um Ambiente de Aferição para Motores Mono Cilíndricos de Pequeno Porte**, 2007. 126 f., Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis - SC, 2007. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/xmlui/bitstream/handle/123456789/89756/239916.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acessado em: 06/10/2019 as 15h45min.

PEREIRA, Mateus. **Introdução à Calibração de Sensores**, 21/03/2018. Disponível em: <https://www.embarcados.com.br/introducao-a-calibracao-de-sensores/>. Acessado em: 29/05/2019 as 21h50min.

PINTO, Pedro Marcelo Alves Ferreira. **Caracterização Experimental de Pequenas Hélices de Passo Fixo**. 2013. 121 f., Tese de Mestrado em Aerodinâmica Propulsão e Energia – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos – SP, 2013.

RODRIGUES, Gustavo. **Hélice ou jato: os efeitos da hélice no voo**. Edição: Higor P, 1 f. 27/02/2016. Disponível em: <http://pilottoaviador.blogspot.com/>. Acessado em: 30/04/2018 as 16h28min.

SEMICONDUCTOR, Avia. **Módulo HX711: Dados técnicos**, Disponível em: <https://storage.googleapis.com/baudaeletronicadatasheet/HX711.pdf>. Arquivo pdf baixado em: 29/10/2019 as 9h38min.

SILVA, Claudio Xavier da. FILHO, Benigno Barreto. **Física: Mecânica**, 1º Ed., v.1, São Paulo – SP: FTD, 2010.

SOUZA, Homero Anchieta Furquim de. **Fundamentos da Aeronáutica: Manual de introdução - biblioteca do laboratório de aeronaves**, 1º Ed., 122 f. São José dos Campos – SP: EMBRAER, 06/06/1991. Disponível em: <https://www.docsity.com/pt/fundamentos-de-aeronautica-apostila-embraer/4813391/>. Baixado em 06/10/2018 as 16h27min.

TAYLOR, Charles F.. **Análise dos motores de combustão interna**: 1º Ed. v. 2, São Paulo - SP: EDGARD BLÜCHER, 1988.

TANAKA, William. **Cálculo De Incerteza De Medição, Parte 2**, 23/03/2018. Disponível em: <https://softwaredecalibracao.com.br/blog/calculo-de-incerteza-de-medicao-parte-2/>. Acessado em: 06/10/2019 as 20h17min.

TORRINHA, Iolanda Maria Dinis. **Desenvolvimento de Software em LabVIEW para Banco de Ensaio de motores de UAV'S SBE-VIEW**. 2010, v.1, 54 f.. Universidade Da Beira Interior - Engenharia Aeronáutica, Covilhã – Portugal. Disponível em: <https://ubibliorum.ubi.pt/bitstream/10400.6/3653/1/Disserta%C3%A7%C3%A3o%20M2650.pdf>. Acessado em 06/10/2019 as 16h31min.

TOCCI, Ronald J. **Sistemas digitais : princípios e aplicações** / Ronald J. Tocci, Neal S. Widmer, Gregory L. Moss ; revisão técnica Renato Giacomini ; tradução Jorge Ritter. – 11. ed. – São Paulo - SP: Pearson Prentice Hall, 2011

APÊNDICES

APÊNDICE A - Linha De Código Para Células De Cargas:

```

#include <HX711.h>
#include <Servo.h>

// SERVO
Servo myservo; //Inclusao do servo
int pos = 35; //Posição zero para o servo
int n = (pos); //Entradas seriais

// CELULA DE CARGA
//Define portas A0 e A1 para leitura da célula que irá medir tração
const byte hx711_data_pin1 = A1;
const byte hx711_clock_pin1 = A0;
HX711 tracao(hx711_data_pin1, hx711_clock_pin1);

//Define portas A2 e A3 para leitura da celula que irá medir torque
const byte hx711_data_pin2 = A2;
const byte hx711_clock_pin2 = A3;
HX711 torque(hx711_data_pin2, hx711_clock_pin2);

void setup() {
  Serial.begin(9600);

  myservo.attach(6); //Pino do servo+arduino
  myservo.write(35); //Servo setado com valor zero
  Serial.flush(); //Limpando a memória do serial

  pinMode(1, INPUT);
  pinMode(2, INPUT);

  // Definindo tara e escala de trabalho das células de carga
  tracao.read();
  tracao.set_scale(839504/5); // set scale , (peso da calibração / peso real)
  tracao.tare(20);
  torque.read();
  torque.set_scale(194578/1.5); // set scale , (peso da calibração / peso real)
  torque.tare(20);
}
void loop() {

  Serial.print("TRAÇÃO = "); // Descrição
  Serial.print(tracao.get_units(20),3); // Mostra valor referente a tração.
  delayMicroseconds(20);
  Serial.print(" "); // Espaçamento
  Serial.print("TORQUE = "); // Descrição
  //(toque será dividido por 71 mm que é a distância entre o eixo de rotação e ponto de
  aplicação de força na célula.
  Serial.println(torque.get_units(20)/0.71,3); // Mostra valor referente a torque

```

```

delayMicroseconds(20);

if(Serial.available()){ //Teste se porta serial está recebendo dados
n = Serial.read(); //leitura de dados
switch (n)
{

/*****POSIÇÃO1*****/
//Caso '1', aumenta giro do motor
case '1':

for(n='1'; pos < 60; pos++)
{
myservo.write(pos);
delay(5);
n = "";
}
for(n='1'; pos > 60; pos--)
{
myservo.write(pos);
delay(5);
n = "";
}
break;

/*****POSIÇÃO2*****/
//Caso '2', aumenta giro do motor
case '2':

for(n='2'; pos < 67; pos++)
{
myservo.write(pos);
delay(5);
n = "";
}
for(n='2'; pos > 67; pos--)
{
myservo.write(pos);
delay(5);
n = "";
}
break;

/*****POSIÇÃO3*****/
//Caso '3', aumenta giro do motor
case '3':

for(n='3'; pos < 74; pos++)
{
myservo.write(pos);
delay(5);

```

```

    n = "";
}

for(n='3'; pos > 74; pos--)
{
    myservo.write(pos);
    delay(5);
    n = "";
}
break;

/*****POSIÇÃO4*****/
//Caso '4', aumenta giro do motor
case '4':

    for(n='4'; pos < 81; pos++)
    {
        myservo.write(pos);
        delay(5);
        n = "";
    }
    for(n='4'; pos > 81; pos--)
    {
        myservo.write(pos);
        delay(5);
        n = "";
    }
    break;

/*****POSIÇÃO5*****/
//Caso '5', aumenta giro do motor
case '5':

    for(n='5'; pos < 90; pos++)
    {
        myservo.write(pos);
        delay(5);
        n = "";
    }
    for(n='5'; pos > 90; pos--)
    {
        myservo.write(pos);
        delay(5);
        n = "";
    }
    break;

/*****POSIÇÃO6*****/
//Caso '6', aumenta giro do motor
case '6':

```

```

for(n='6'; pos < 98; pos++)
{
myservo.write(pos);
delay(5);
n = "";
}
for(n='6'; pos > 98; pos--)
{
myservo.write(pos);
delay(5);
n = "";
}
break;

```

```

/*****POSIÇÃO7*****/

```

```

//Caso '7', aumenta giro do motor
case '7':

```

```

for(n='7'; pos < 110; pos++)
{
myservo.write(pos);
delay(5);
n = "";
}
for(n='7'; pos > 110; pos--)
{
myservo.write(pos);
delay(5);
n = "";
}
break;

```

```

/*****POSIÇÃO8*****/

```

```

//Caso '8', aumenta giro do motor
case '8':

```

```

for(n='8'; pos < 120; pos++)
{
myservo.write(pos);
delay(5);
n = "";
}
for(n='8'; pos > 120; pos--)
{
myservo.write(pos);
delay(5);
n = "";
}

```

```

    break;

    /*******POSIÇÃO9******/
    //Caso '9', aumenta giro do motor
    case '9':

        for(n='9'; pos < 135; pos++)
        {
            myservo.write(pos);
            delay(5);
            n = "";
        }
        for(n='9'; pos > 135; pos--)
        {
            myservo.write(pos);
            delay(5);
            n = "";
        }
        break;

    /*******DESLIGA******/
    //Caso '0', corta giro do motor
    case '0':
        for(n='0'; pos > 30; pos--)
        {
            myservo.write(pos);
            delay(5);
            n = "";
        }
        break;
    }
}
Serial.flush();
}

```

APÊNDICE B - Linhas de código para calibração Células De Carga:

```
#include <HX711.h>
const byte hx711_data_pin1 = A1;
const byte hx711_clock_pin1 = A0;

HX711 tracao(hx711_data_pin1, hx711_clock_pin1);

const byte hx711_data_pin2 = A2;
const byte hx711_clock_pin2 = A3;

HX711 torque(hx711_data_pin2, hx711_clock_pin2);

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  Serial.print("Leitura do valor da celula de tração: ");
  Serial.println(tracao.read());
  Serial.print("Leitura do valor da celula de torque: ");
  Serial.println(torque.read());
  Serial.println("Destarando...");
  tracao.set_scale();
  tracao.tare(20);
  torque.set_scale();
  torque.tare(20);
  Serial.println("Coloque um peso conhecido:");
}
void loop() {
  Serial.print("Valor lido referente a tração: ");
  Serial.println(tracao.get_value(10),0);
  Serial.print("Valor lido referente ao torque: ");
  Serial.println(torque.get_value(10),0);
  delay(200);
}
```

APÊNDICE C - Linhas De Código Para Sensor Rpm:

```

// LM393
// --- Variáveis Globais ---
//Pino ligado ao pino D0 do sensor
int pino_D0 = 3;
int      rpm;
volatile byte pulsos;
unsigned long timeold;

//Altere o numero de acordo com a quantidade de reflexivo
unsigned int pulsos_por_volta = 1;

void contador()
{
  //Incrementa contador
  pulsos++;
}

void setup() {
  Serial.begin(9600);

  //Pino do sensor como entrada
  pinMode(pino_D0, INPUT);
  //Interrupcao 0 - pino digital 2
  //Aciona o contador a cada pulso
  attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(3), contador, FALLING);
  pulsos = 0;
  rpm = 0;
  timeold = 0;
}

void loop() {

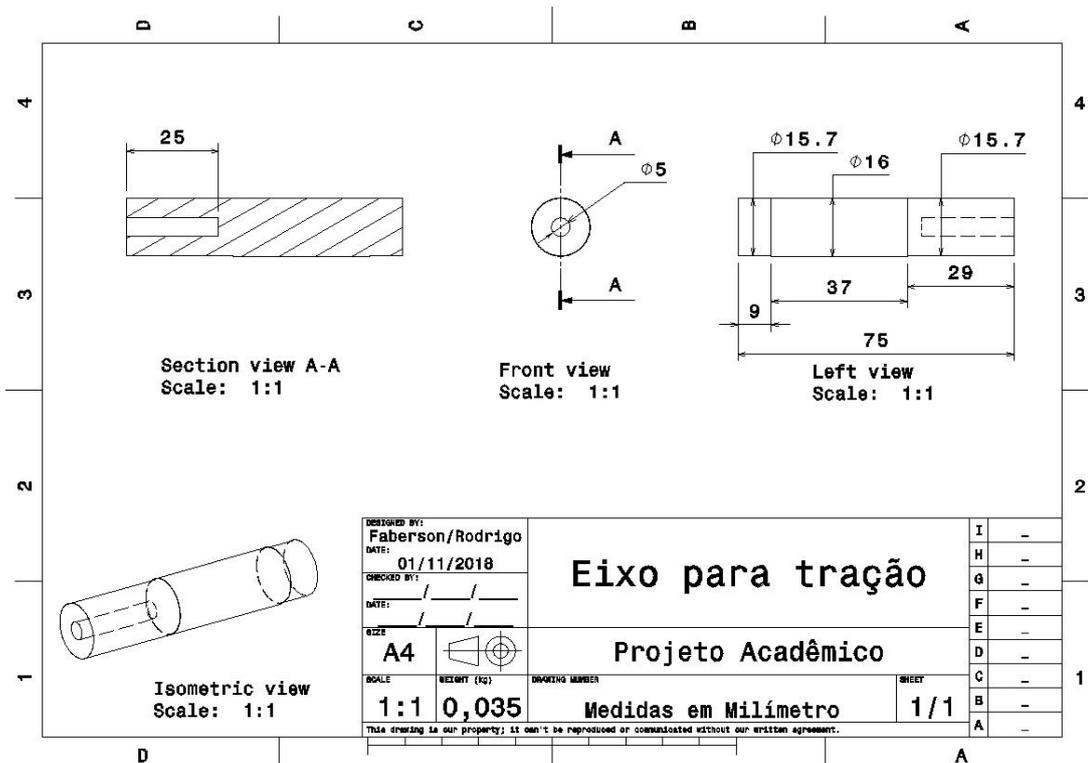
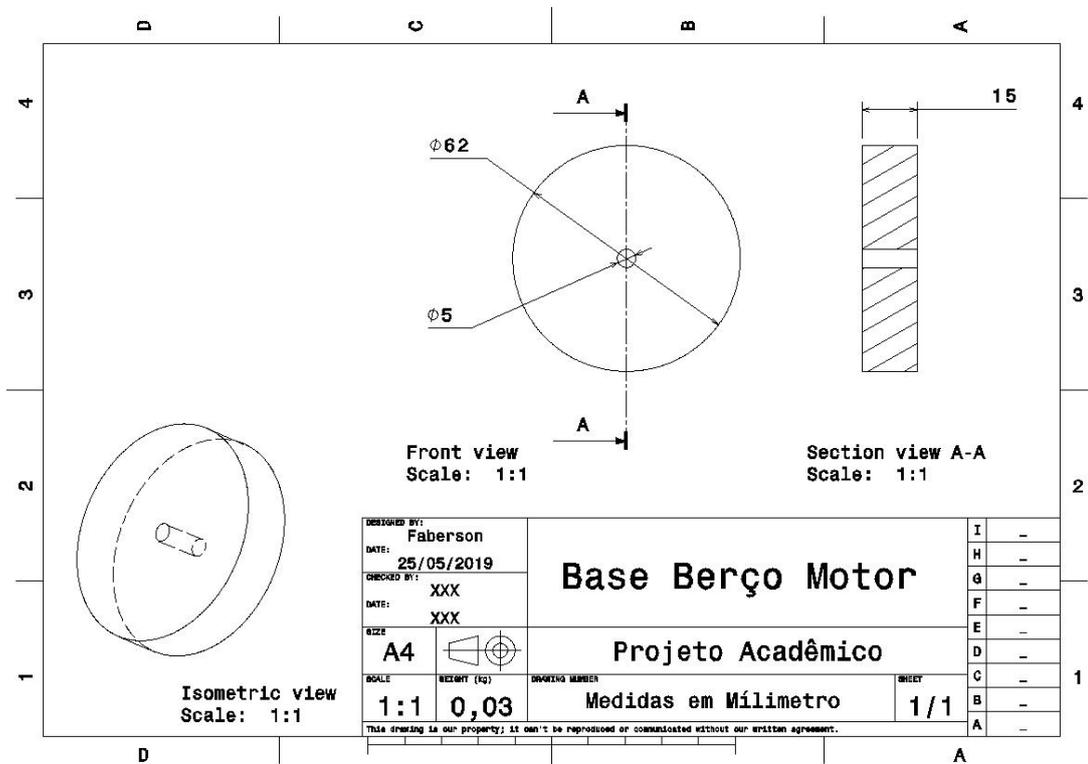
  //Atualiza contador a cada segundo
  if (millis() - timeold >= 1000)
  {
    //Desabilita interrupcao durante o calculo
    detachInterrupt(digitalPinToInterrupt(3));
    rpm = (60 * 1000 / pulsos_por_volta) / (millis() - timeold) * pulsos;
    timeold = millis();
    pulsos = 0;
    delayMicroseconds(50);

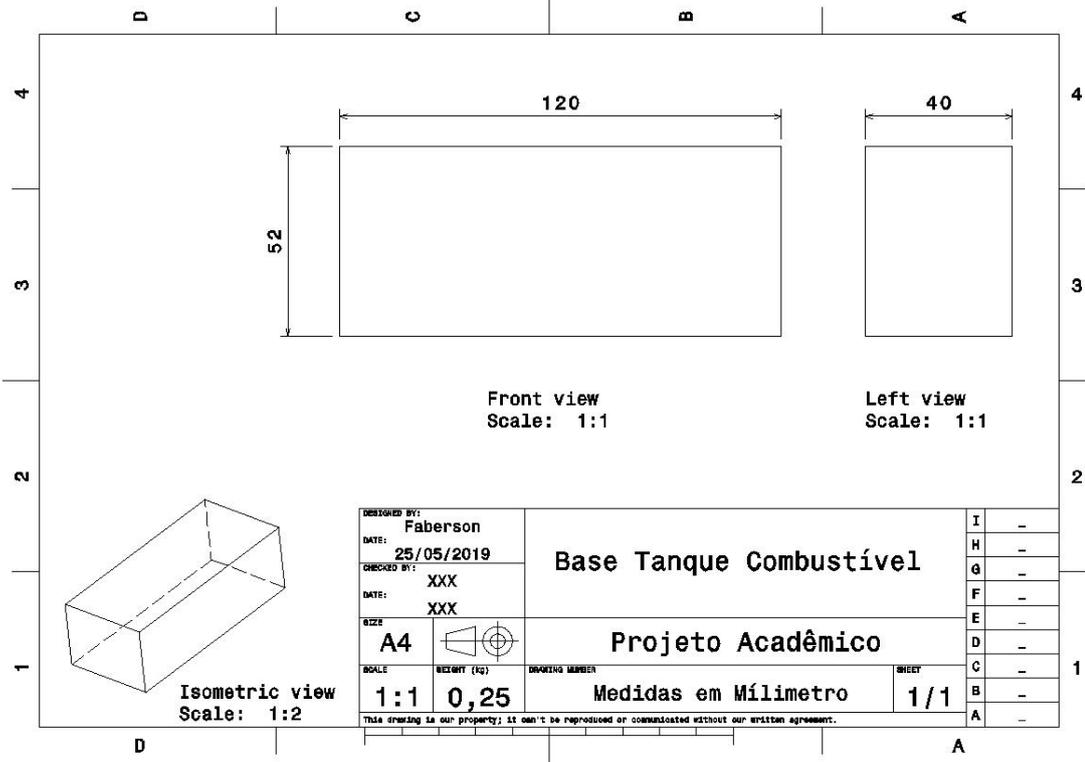
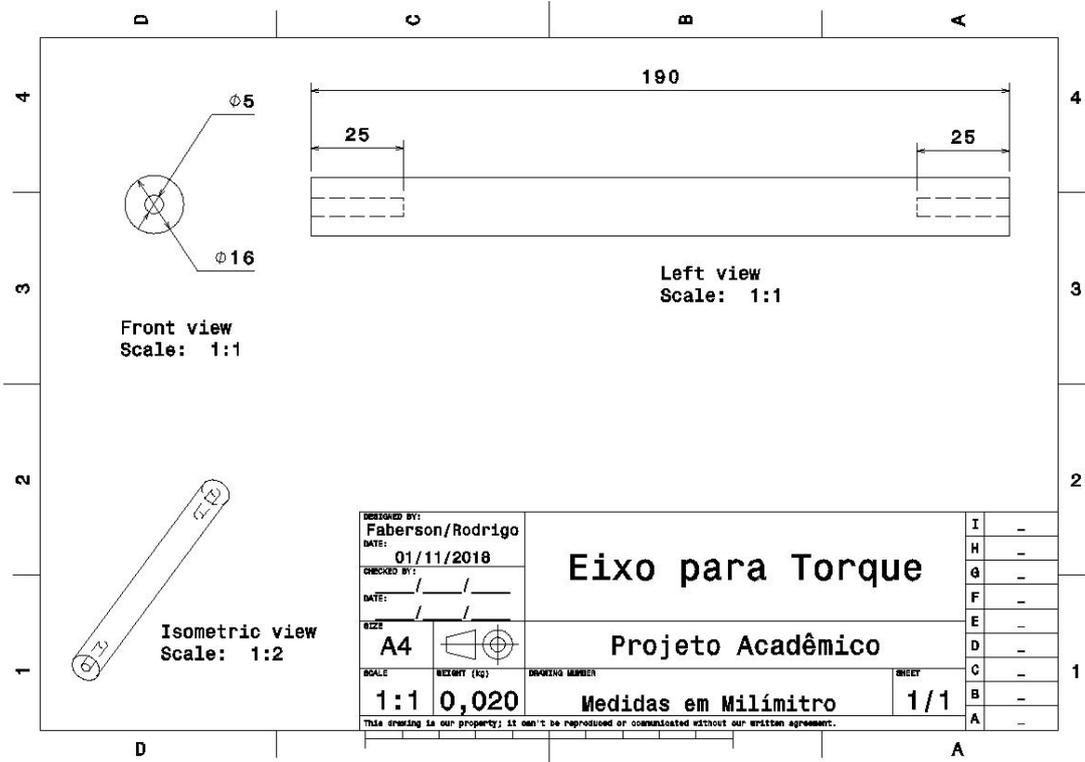
    Serial.print(" "); // Espaçamento
    Serial.print("RPM = "); // Descrição
    Serial.println(rpm); //Mostra o valor de RPM no serial monitor
  }
}

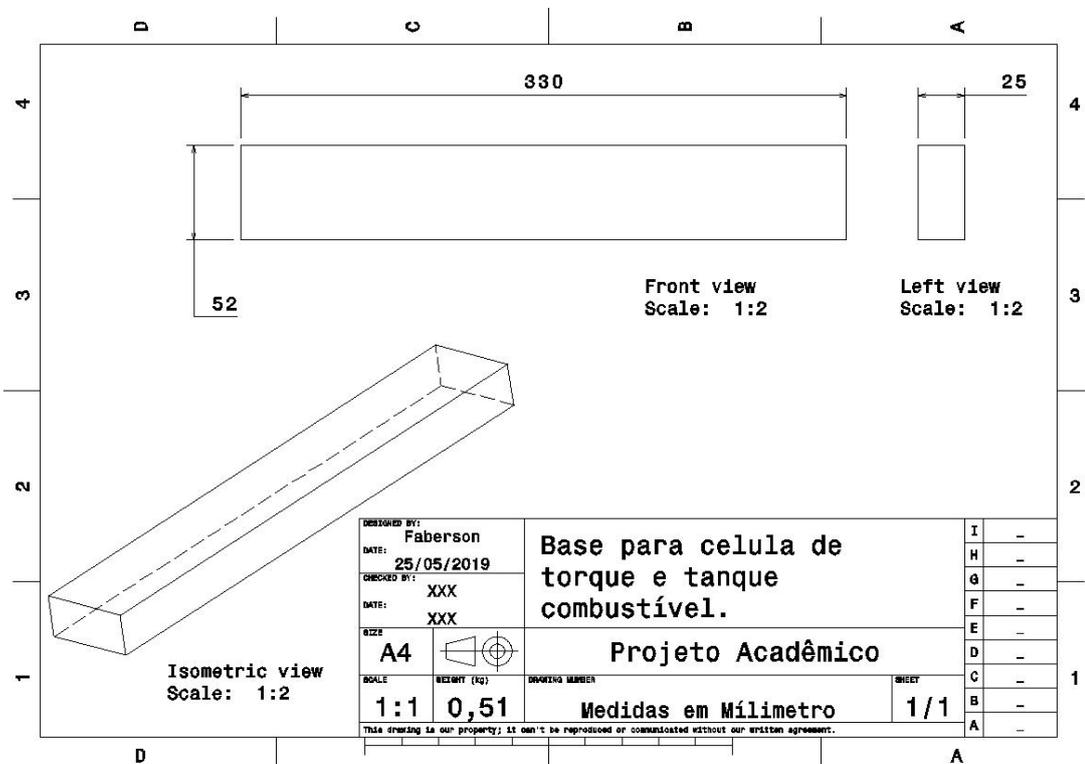
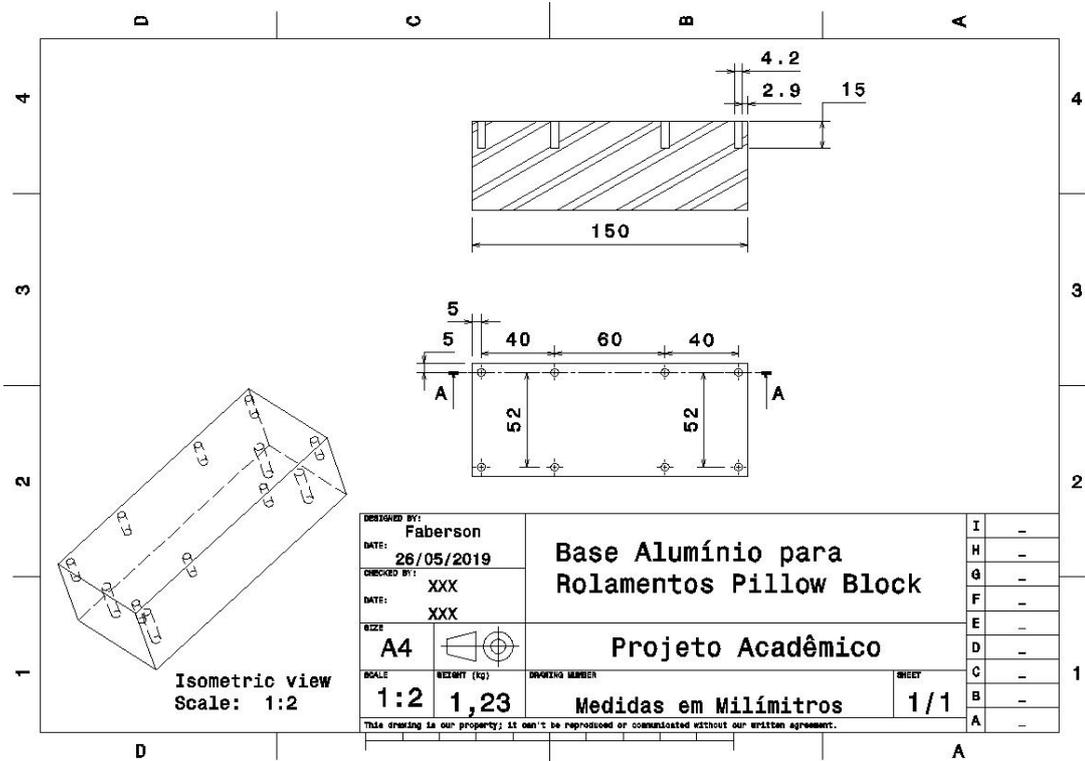
```

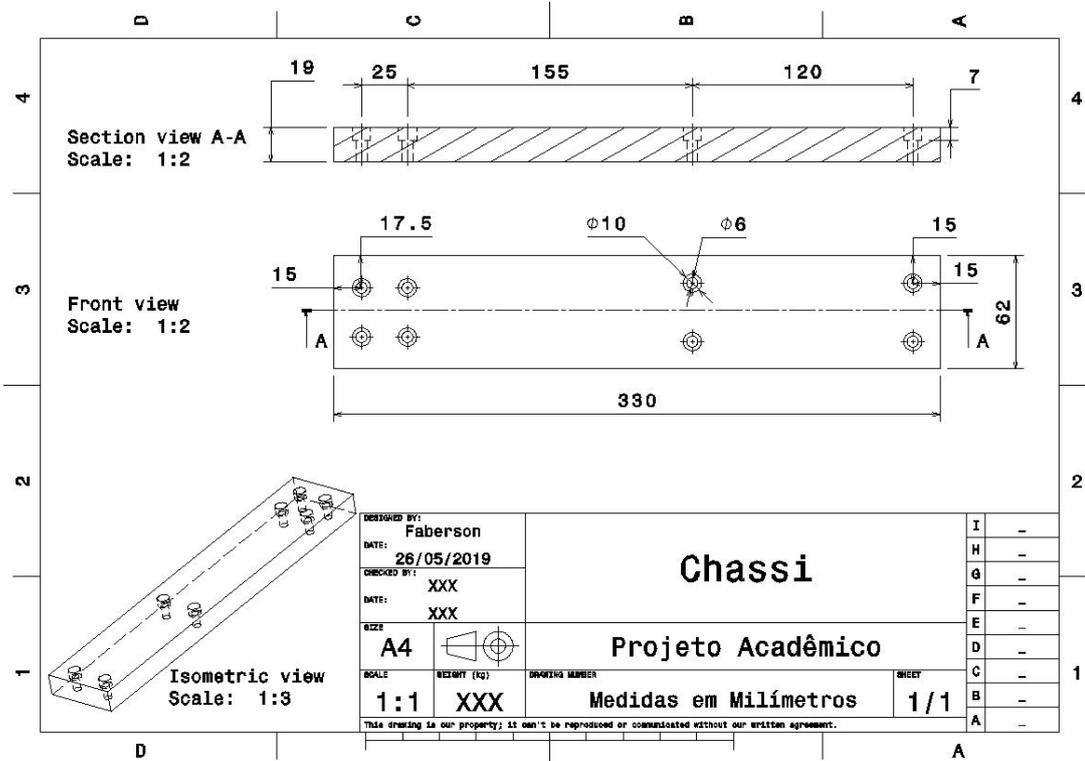
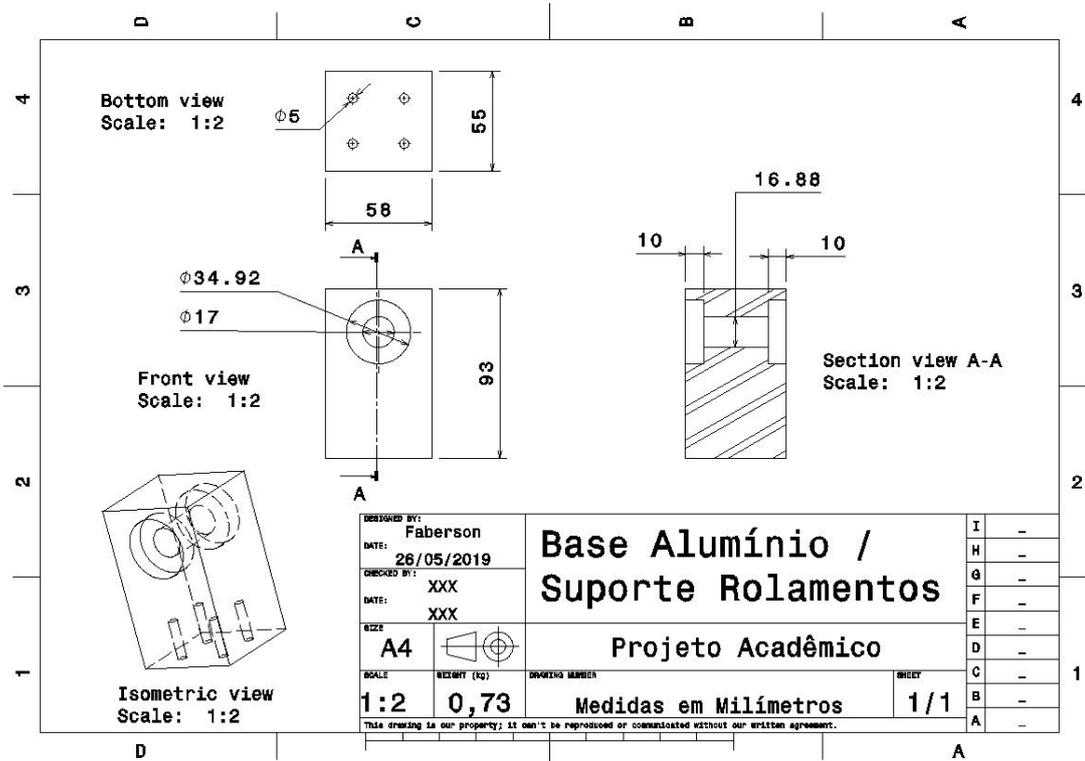
```
//Habilita interrupcao
attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(3), contador, FALLING);
}
delayMicroseconds(20);
}
```

APÊNDICE D - Plantas Baixas Das Peças Usinadas:









APÊNDICE E – Resultados Dos Ensaio Tabelados:

TESTE 1 - HÉLICE MASTER 13x6				TESTE 2 - HÉLICE TOP FLITE 13x6				TESTE 3 - HÉLICE TP 13x6G			
HORA	RPM	TRAÇÃO	TORQUE	HORA	RPM	TRAÇÃO	TORQUE	HORA	RPM	TRAÇÃO	TORQUE
17:51:57	0	0,201	0,052	18:25:22	0	-0,201	-0,020	19:13:33	0	0,086	0,342
17:52:01	4740	1,650	0,492	18:25:25	0	-0,205	-0,018	19:13:37	4380	0,276	0,323
17:52:04	4620	1,760	0,491	18:25:29	1140	1,038	0,368	19:13:40	4680	0,379	0,321
17:52:08	4860	1,553	0,493	18:25:32	5340	1,672	0,289	19:13:43	4200	0,359	0,316
17:52:11	4740	1,519	0,492	18:25:35	4860	1,534	0,276	19:13:46	4380	0,961	0,451
17:52:14	4860	1,536	0,492	18:25:38	4860	1,441	0,255	19:13:50	5220	0,966	0,534
17:52:17	4620	1,489	0,475	18:25:42	4800	1,307	0,263	19:13:53	5220	0,813	0,561
17:52:21	4560	1,612	0,502	18:25:45	4740	1,300	0,286	19:13:56	5400	0,629	0,583
17:52:24	4680	1,586	0,474	18:25:48	4800	1,258	0,308	19:14:00	5520	0,634	0,598
17:52:27	4440	1,516	0,480	18:25:52	5280	1,212	0,317	19:14:03	5460	0,684	0,633
17:52:31	4560	1,529	0,483	18:25:55	4980	1,038	0,319	19:14:06	5580	0,466	0,631
17:52:34	4980	1,606	0,501	18:25:58	5160	1,156	0,328	19:14:09	5880	0,425	0,637
17:52:37	4500	1,631	0,489	18:26:02	5280	1,110	0,334	19:14:13	5700	0,503	0,647
17:52:40	4560	1,780	0,503	18:26:05	5040	1,139	0,332	19:14:16	5580	0,407	0,640
17:52:44	4680	1,598	0,496	18:26:08	5160	1,077	0,337	19:14:19	5700	0,362	0,625
17:52:47	4680	1,567	0,470	18:26:11	5280	1,114	0,332	19:14:23	5580	0,362	0,618
17:52:50	4560	1,588	0,474	18:26:15	5220	0,973	0,338	19:14:26	5460	0,432	0,625
17:52:54	4620	1,348	0,485	18:26:18	5220	0,998	0,336	19:14:29	5580	0,243	0,639
17:52:57	4620	1,605	0,470	18:26:21	5400	1,030	0,341	19:14:33	5700	0,124	0,624
17:53:00	4680	1,386	0,643	18:26:25	5340	1,016	0,333	19:14:36	5640	0,162	0,631
17:53:04	5400	1,415	0,669	18:26:28	5340	0,893	0,306	19:14:39	5580	0,213	0,652
17:53:07	5340	1,491	0,668	18:26:31	5160	1,074	0,427	19:14:42	5580	0,144	0,660
17:53:10	5460	1,573	0,679	18:26:35	5760	1,245	0,487	19:14:46	5760	0,609	0,801
17:53:14	5280	1,500	0,693	18:26:38	5940	1,380	0,487	19:14:49	6180	1,706	0,958
17:53:17	5340	1,564	0,690	18:26:41	5760	1,404	0,492	19:14:52	6600	0,741	0,877
17:53:20	5340	1,520	0,709	18:26:45	5760	1,255	0,504	19:14:56	6600	0,667	0,876

17:53:23	5400	1,547	0,706	18:26:48	5880	1,369	0,490	19:14:59	6720	0,692	0,890
17:53:27	5460	1,565	0,741	18:26:51	5820	1,123	0,483	19:15:02	6660	0,788	0,880
17:53:30	5520	1,595	0,699	18:26:54	5880	1,080	0,473	19:15:05	6660	0,776	0,875
17:53:33	5520	1,524	0,678	18:26:58	5760	1,027	0,473	19:15:09	6720	0,724	0,903
17:53:37	5460	1,510	0,685	18:27:01	5880	0,949	0,457	19:15:12	6720	0,723	0,924
17:53:40	5520	1,570	0,691	18:27:04	5820	0,999	0,440	19:15:15	6720	0,695	0,965
17:53:43	5340	1,520	0,695	18:27:08	6000	1,021	0,448	19:15:22	6720	0,793	0,975
17:53:47	5520	1,482	0,713	18:27:11	5760	0,967	0,458	19:15:25	6960	0,782	0,956
17:53:50	5520	1,559	0,727	18:27:14	5760	0,878	0,452	19:15:28	6780	0,689	0,963
17:53:53	5520	1,607	0,725	18:27:18	5760	0,766	0,435	19:15:32	6900	0,746	0,942
17:53:56	5580	1,532	0,758	18:27:21	5460	0,851	0,426	19:15:35	6720	0,732	0,937
17:54:00	5640	1,736	0,971	18:27:24	5460	0,837	0,439	19:15:38	6780	0,778	0,935
17:54:03	6300	1,823	0,978	18:27:27	5880	0,942	0,469	19:15:42	6900	0,778	0,926
17:54:06	6180	1,892	0,979	18:27:31	5940	1,082	0,482	19:15:45	6780	0,651	0,911
17:54:10	6240	1,896	0,970	18:27:34	5940	1,503	0,648	19:15:48	6780	1,410	0,948
17:54:13	6300	1,869	0,970	18:27:37	6300	1,991	0,638	19:15:52	7500	3,503	1,042
17:54:16	6060	1,822	0,974	18:27:41	6840	1,858	0,581	19:15:55	7500	4,313	1,089
17:54:20	6240	1,916	0,942	18:27:44	6600	1,777	0,568	19:15:58	7680	4,527	1,096
17:54:23	6180	1,948	0,911	18:27:47	6480	1,816	0,585	19:16:01	7560	4,643	1,115
17:54:26	6300	1,876	0,926	18:27:50	6660	1,665	0,555	19:16:05	7620	4,561	1,102
17:54:29	6120	1,838	0,935	18:27:54	6360	1,743	0,598	19:16:08	7560	4,344	1,107
17:54:33	6180	1,889	0,923	18:27:57	6480	1,746	0,618	19:16:11	7560	4,453	1,098
17:54:36	6120	1,835	0,931	18:28:00	6420	1,686	0,629	19:16:15	7620	4,610	1,116
17:54:39	6120	1,856	0,933	18:28:04	6480	1,594	0,622	19:16:18	7680	4,672	1,126
17:54:43	6420	1,931	0,932	18:28:07	6240	1,551	0,629	19:16:21	7680	4,542	1,135
17:54:46	6360	1,909	0,915	18:28:10	6240	1,546	0,641	19:16:25	7920	4,742	1,132
17:54:49	6180	1,878	0,922	18:28:14	6420	1,490	0,625	19:16:28	7620	4,746	1,128
17:54:53	6240	1,908	0,940	18:28:17	6420	1,419	0,611	19:16:31	7620	4,610	1,136
17:54:56	6060	1,923	0,905	18:28:20	6180	1,413	0,612	19:16:34	7560	4,495	1,089
17:54:59	6120	2,193	1,068	18:28:23	6360	1,558	0,594	19:16:38	7680	4,537	1,109
17:55:03	6780	2,319	0,965	18:28:27	6240	1,538	0,584	19:16:41	7560	4,679	1,116

17:55:06	6540	2,382	0,896	18:28:30	6360	1,372	0,679	19:16:44	7680	4,292	1,464
17:55:09	6480	2,411	0,918	18:28:34	6780	1,300	0,769	19:16:48	8340	4,244	1,565
17:55:12	6360	2,410	0,930	18:28:37	7800	1,858	0,884	19:16:51	8520	4,573	1,596
17:55:16	6540	2,423	0,981	18:28:40	8040	2,283	0,818	19:16:54	8460	4,710	1,598
17:55:19	6720	2,467	0,976	18:28:43	7980	2,269	0,836	19:16:57	8460	4,535	1,535
17:55:22	6480	2,508	0,998	18:28:47	8460	2,238	0,914	19:17:01	8460	4,429	1,555
17:55:26	6660	2,461	1,034	18:28:50	8160	2,500	0,885	19:17:04	8400	4,827	1,555
17:55:29	6540	2,437	0,972	18:28:53	7920	2,372	0,936	19:17:07	8520	5,274	1,573
17:55:32	6480	2,469	1,013	18:28:57	8340	2,532	0,894	19:17:11	8580	5,264	1,535
17:55:36	6600	2,485	1,001	18:29:00	8220	2,195	0,860	19:17:14	8640	5,212	1,562
17:55:39	6600	2,465	0,931	18:29:03	8400	2,380	0,872	19:17:17	8460	4,980	1,551
17:55:42	6420	2,442	1,019	18:29:07	7980	2,289	0,833	19:17:24	8460	4,759	1,501
17:55:45	6300	2,432	0,966	18:29:10	8880	2,464	0,920	19:17:27	8340	4,786	1,528
17:55:49	6300	2,431	0,922	18:29:13	8580	2,546	0,898	19:17:30	8400	4,786	1,510
17:55:52	6840	2,431	0,965	18:29:16	8520	2,357	0,840	19:17:34	8460	4,677	1,484
17:55:55	6420	2,461	1,010	18:29:20	8340	2,442	0,909	19:17:37	8400	4,694	1,480
17:55:59	6420	2,523	1,020	18:29:23	8520	2,364	0,853	19:17:40	8460	4,625	1,509
17:56:02	6660	2,491	1,109	18:29:26	8340	2,302	0,883	19:17:44	8340	4,713	1,489
17:56:05	7020	2,435	1,138	18:29:30	8220	2,394	0,883	19:17:47	8400	4,705	1,477
17:56:09	7020	2,454	1,149	18:29:33	8040	3,015	1,082	19:17:50	8400	5,680	1,562
17:56:12	7080	2,505	1,168	18:29:36	7920	3,290	1,080	19:17:54	9120	5,894	1,412
17:56:15	7260	2,566	1,179	18:29:40	8220	3,311	1,109	19:17:57	8280	4,919	1,548
17:56:18	7200	2,649	1,200	18:29:43	8340	3,426	1,077	19:18:00	8520	5,128	1,556
17:56:22	7260	2,822	1,206	18:29:46	8220	3,365	1,050	19:18:03	8760	5,284	1,608
17:56:25	7260	2,758	1,192	18:29:49	8160	3,328	1,042	19:18:07	8280	5,455	1,286
17:56:28	7140	2,652	1,190	18:29:53	8280	3,223	1,026	19:18:10	8280	5,531	1,229
17:56:32	7200	2,691	1,224	18:29:56	8040	3,289	1,029	19:18:20	9060	5,914	1,191
17:56:35	7320	2,643	1,199	18:29:59	8400	3,458	1,058	19:18:23	8940	5,951	1,551
17:56:38	7260	2,591	1,200	18:30:03	8280	3,367	1,103	19:18:27	9000	5,707	1,593
17:56:42	7320	2,580	1,209	18:30:06	8280	3,308	1,117	19:18:30	8880	5,725	1,594

17:56:45	7140	2,519	1,197	18:30:09	8280	3,332	1,119	19:18:33	8940	6,105	1,613
17:56:48	7080	2,524	1,210	18:30:13	8160	3,414	1,106	19:18:43	8940	5,904	1,626
17:56:51	7140	2,473	1,190	18:30:16	8340	3,448	1,127	19:18:46	8940	6,035	1,660
17:56:55	7140	2,444	1,166	18:30:19	8220	3,406	1,098	19:18:53	9180	6,330	1,919
17:56:58	7140	2,558	1,189	18:30:22	8220	3,404	1,115	19:18:56	9780	6,317	1,926
17:57:01	7200	3,006	1,281	18:30:26	8160	3,361	1,117	19:19:00	9660	6,264	1,909
17:57:05	8520	3,768	1,461	18:30:29	8280	3,489	1,102	19:19:03	9660	6,377	1,917
17:57:08	8280	4,588	1,570	18:30:32	8520	4,223	1,174	19:19:06	9720	6,328	1,889
17:57:11	8580	4,477	1,522	18:30:36	8700	4,745	1,233	19:19:09	9600	6,264	1,876
17:57:15	8280	4,364	1,529	18:30:39	9000	4,752	1,191	19:19:13	9540	6,335	1,829
17:57:18	8520	4,464	1,535	18:30:42	9060	4,856	1,153	19:19:16	9480	6,370	1,844
17:57:21	8700	4,369	1,547	18:30:46	8580	4,932	1,198	19:19:19	9540	6,323	1,801
17:57:24	8520	4,434	1,510	18:30:49	9060	5,030	1,171	19:19:26	9600	6,204	1,816
17:57:28	8400	4,385	1,507	18:30:52	9540	5,057	1,216	19:19:29	9420	6,246	1,845
17:57:31	8520	4,484	1,480	18:30:55	9000	4,948	1,763	19:19:33	9660	6,118	1,834
17:57:34	8100	4,199	1,454	18:30:59	10080	4,995	1,690	19:19:36	9540	6,224	1,825
17:57:38	7980	3,889	1,379	18:31:02	9180	5,100	1,728	19:19:42	9540	6,177	1,810
17:57:41	8520	3,246	1,261	18:31:05	9120	4,923	1,683	19:19:46	9600	6,170	1,786
17:57:44	7380	3,020	1,225	18:31:09	9000	4,943	1,679	19:19:49	9600	6,224	1,758
17:57:47	7380	3,065	1,208	18:31:12	8820	4,883	1,710	19:19:52	9360	6,243	1,745
17:57:51	7440	3,325	1,212	18:31:15	8940	4,919	1,731	19:19:56	9600	6,229	1,773
17:57:54	7440	3,211	1,223	18:31:19	8880	4,943	1,695	19:19:59	9480	6,272	1,755
17:57:57	7380	3,207	1,234	18:31:22	8880	4,968	1,706	19:20:02	9600	6,265	1,778
17:58:01	7500	3,458	1,232	18:31:25	8940	4,908	1,705	19:20:09	9480	6,262	1,773
17:58:04	7440	3,531	1,240	18:31:28	9060	4,878	1,694	19:20:12	9600	6,254	1,774
17:58:07	7560	3,588	1,236	18:31:32	8940	4,864	1,731	19:20:15	9480	6,214	1,757
17:58:11	8160	3,623	1,276	18:31:35	8820	4,856	1,756	19:20:19	9780	6,208	1,878
17:58:14	8160	3,892	1,284	18:31:38	8880	4,958	1,745	19:20:22	9660	6,077	1,840
17:58:17	8400	3,893	1,396	18:31:42	9300	4,843	1,739	19:20:25	9720	6,111	1,839
17:58:20	7920	4,186	1,469	18:31:45	8880	4,532	1,711	19:20:29	9660	6,044	1,840

17:58:24	7980	4,348	1,517	18:31:48	8820	4,589	1,703	19:20:32	9720	6,054	1,809
17:58:27	8400	4,501	1,508	18:31:51	8940	4,606	1,731	19:20:35	9780	6,199	1,815
17:58:30	8040	4,516	1,507	18:31:55	8820	4,620	1,699	19:20:38	9840	6,216	1,806
17:58:34	8280	4,499	1,524	18:31:58	9120	4,642	1,715	19:20:52	9900	6,167	2,044
17:58:37	8280	4,574	1,525	18:32:01	9120	4,622	1,702	19:20:55	10080	6,258	2,097
17:58:40	8160	4,572	1,472	18:32:05	9060	4,576	1,708	19:20:58	10080	6,263	2,172
17:58:43	8340	4,578	1,503	18:32:08	9000	4,549	1,733	19:21:05	10020	6,211	2,222
17:58:47	8340	4,583	1,497	18:32:11	9060	4,613	1,735	19:21:08	10140	6,307	2,231
17:58:50	8220	4,660	1,493	18:32:15	9060	4,558	1,724	19:21:12	10080	6,237	2,177
17:58:53	8280	4,639	1,464	18:32:18	8880	4,656	1,733	19:21:15	10140	6,363	2,213
17:58:57	8280	4,626	1,471	18:32:21	8820	4,565	1,753	19:21:21	10140	6,230	2,243
17:59:00	8220	5,373	1,771	18:32:24	8880	4,652	1,719	19:21:25	10080	6,290	2,254
17:59:03	9660	5,960	1,947	18:32:28	8880	4,653	1,696	19:21:28	10140	6,268	2,316
17:59:07	10560	5,944	2,014	18:32:31	9000	4,982	1,898	19:21:35	10200	6,298	2,407
17:59:10	10440	5,910	2,107	18:32:34	9780	5,151	1,842	19:21:38	10140	6,331	2,452
17:59:13	10260	5,901	2,130	18:32:38	9660	5,127	1,834	19:21:41	10080	6,400	2,523
17:59:16	9600	5,949	2,135	18:32:41	9660	5,113	1,785	19:21:48	10020	6,283	2,503
17:59:20	10140	5,935	2,137	18:32:44	9420	5,053	1,785	19:21:51	10080	6,287	2,521
17:59:23	10380	5,857	2,135	18:32:47	9480	5,103	1,819	19:21:54	10200	6,228	3,020
17:59:26	9960	5,776	2,142	18:32:51	9780	5,136	1,820	19:21:58	10140	6,200	2,441
17:59:30	10200	5,839	2,162	18:32:54	9540	5,113	1,785	19:22:01	10140	6,184	2,271
17:59:33	9360	5,871	2,086	18:32:57	9420	5,090	1,787	19:22:04	10080	6,209	2,256
17:59:36	10260	5,906	2,058	18:33:01	9600	5,145	1,758	19:22:08	10020	6,165	2,280
17:59:39	9780	5,927	2,064	18:33:04	9360	5,153	1,828	19:22:11	10260	6,175	2,269
17:59:43	9660	5,925	2,062	18:33:07	9540	5,102	1,807	19:22:14	10140	6,345	2,230
17:59:46	9540	5,837	2,025	18:33:11	9540	4,862	1,729	19:22:18	10080	6,159	2,298
17:59:49	9780	5,872	2,031	18:33:14	9540	5,058	1,812	19:22:21	10080	6,332	2,336
17:59:53	9420	5,778	2,012	18:33:17	9780	5,105	1,866	19:22:24	9960	6,101	2,360
17:59:56	9780	5,808	2,008	18:33:20	9600	5,148	1,778	19:22:27	10140	6,340	2,439
17:59:59	9180	5,644	2,174	18:33:24	9420	5,120	1,806	19:22:31	10080	6,374	2,444

18:00:03	9300	5,919	2,202	18:33:27	9600	5,141	1,799	19:22:34	10020	6,179	2,451
18:00:06	9060	6,002	2,192	18:33:30	9540	5,099	1,812	19:22:37	9960	6,303	2,494
18:00:09	8940	5,997	2,190	18:33:34	9480	5,120	1,784	19:22:44	10080	6,314	2,461
18:00:12	8940	5,994	2,193	18:33:37	9660	5,096	1,780	19:22:51	10020	6,262	2,611
18:00:16	8940	6,061	2,132	18:33:40	9480	5,088	1,778	19:22:54	9960	6,168	2,643
18:00:19	8940	6,087	2,101	18:33:43	9480	5,071	1,781	19:23:00	9960	6,096	2,645
18:00:22	9420	6,068	2,130	18:33:47	9540	5,052	1,776	19:23:04	10140	6,202	2,734
18:00:26	9300	6,072	2,131	18:33:50	9480	4,994	1,746	19:23:07	10080	6,195	2,688
18:00:29	9480	6,077	2,113	18:33:53	9480	5,002	1,741	19:23:10	10020	6,213	2,701
18:00:32	9060	6,103	2,099	18:33:57	9540	5,060	1,752	19:23:14	10020	6,275	2,776
18:00:36	9420	6,053	2,095	18:34:00	9540	5,067	1,745	19:23:17	10080	6,161	2,727
18:00:39	9240	6,027	2,094	18:34:03	9600	5,080	1,751	19:23:20	10080	6,268	2,765
18:00:42	9120	5,951	2,095	18:34:07	9600	5,144	1,745	19:23:23	10080	6,221	2,792
18:00:45	9000	6,003	2,098	18:34:10	9720	5,094	1,715	19:23:27	10260	6,132	2,845
18:00:49	9060	5,751	2,099	18:34:13	9600	5,087	1,740	19:23:30	10080	6,229	2,855
18:00:52	8940	5,738	2,132	18:34:16	9660	5,056	1,739	19:23:33	10320	6,090	2,867
18:00:55	8820	5,787	2,216	18:34:20	9600	5,131	1,732	19:23:37	10200	6,148	2,820
18:00:59	8940	5,792	2,195	18:34:23	9600	5,132	1,723	19:23:40	10200	6,253	2,820
18:01:02	9000	5,763	2,169	18:34:26	9720	5,119	1,709	19:23:43	10260	6,198	2,849
18:01:05	8880	5,703	2,140	18:34:30	9540	5,141	1,732	19:23:47	10140	6,417	2,793
18:01:09	8940	5,607	2,156	18:34:33	9480	5,161	1,835	19:23:50	10200	6,274	2,865
18:01:12	9120	5,715	2,114	18:34:36	9720	5,144	1,873	19:23:53	10260	6,320	2,877
18:01:15	9000	5,759	2,118	18:34:39	9720	5,048	1,887	19:23:56	10200	6,227	2,903
18:01:18	9060	5,523	2,119	18:34:43	9840	5,140	1,912	19:24:03	10200	6,343	2,103
18:01:22	8940	5,568	2,106	18:34:46	9900	5,130	1,901	19:24:06	10080	6,154	2,634
18:01:25	9000	5,552	2,103	18:34:49	9780	5,209	1,891	19:24:10	10140	6,154	2,861
18:01:28	8820	5,599	2,112	18:34:53	9900	5,158	1,886	19:24:13	10140	6,221	2,954
18:01:32	8700	5,520	2,063	18:34:56	9960	5,192	1,893	19:24:19	10080	6,179	3,001
18:01:35	9060	5,486	2,072	18:34:59	9960	5,161	1,870	19:24:23	10080	6,244	2,924
18:01:38	9060	5,555	2,043	18:35:03	9780	5,162	1,891	19:24:26	10080	6,139	3,008

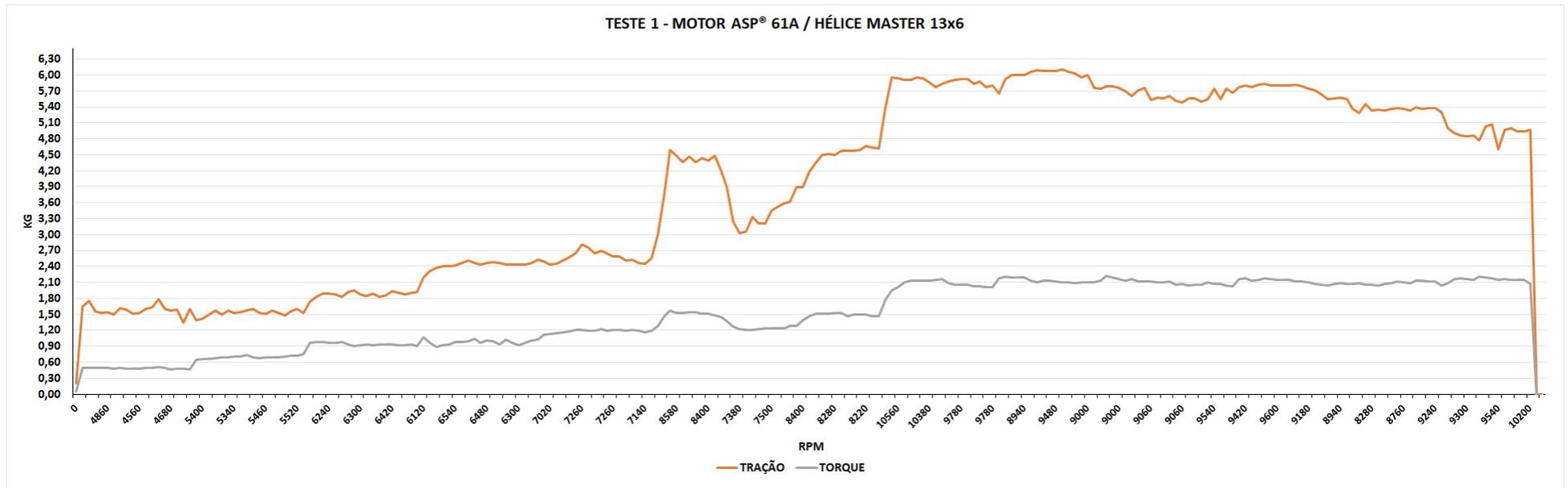
18:01:41	8880	5,556	2,052	18:35:06	9960	5,132	1,887	19:24:29	10200	6,402	2,871
18:01:45	9060	5,494	2,061	18:35:09	10020	5,131	1,886	19:24:36	10320	6,382	3,134
18:01:48	9120	5,540	2,100	18:35:12	9960	5,165	1,904	19:24:39	10140	6,248	3,148
18:01:51	9540	5,738	2,077	18:35:16	9900	5,126	1,907	19:24:43	10080	6,277	3,182
18:01:55	8820	5,541	2,077	18:35:19	10140	5,195	1,916	19:24:46	10140	6,269	3,103
18:01:58	9360	5,744	2,037	18:35:22	10020	5,178	1,928	19:24:49	10140	6,311	3,114
18:02:01	9000	5,673	2,025	18:35:26	10200	5,207	1,939	19:24:52	10140	6,397	3,166
18:02:05	9480	5,772	2,163	18:35:29	10260	5,234	1,977	19:24:59	10200	6,330	3,029
18:02:08	9420	5,795	2,178	18:35:32	10020	5,202	1,960	19:25:02	10020	6,327	2,014
18:02:11	10380	5,778	2,132	18:35:35	9960	5,189	1,981	19:25:06	10020	6,155	2,038
18:02:14	10440	5,811	2,147	18:35:39	9960	5,087	1,970	19:25:09	10080	6,154	1,944
18:02:18	10260	5,827	2,172	18:35:42	10020	5,151	1,975	19:25:15	10140	6,139	1,999
18:02:21	9900	5,798	2,159	18:35:45	10140	5,138	1,988	19:25:19	9960	6,311	1,881
18:02:24	9600	5,807	2,155	18:35:49	10200	5,205	2,011	19:25:22	9780	6,348	1,850
18:02:28	9600	5,804	2,154	18:35:52	10260	5,212	2,026	19:25:25	9660	6,264	1,891
18:02:31	9900	5,798	2,146	18:35:55	10020	5,193	2,025	19:25:29	9900	6,276	1,839
18:02:34	9720	5,811	2,124	18:35:59	10080	5,214	2,035	19:25:32	9600	5,832	1,778
18:02:37	10020	5,785	2,120	18:36:02	10020	5,217	2,029	19:25:35	9420	5,914	1,789
18:02:41	9180	5,736	2,106	18:36:05	9960	5,209	2,041	19:25:38	9420	5,664	1,667
18:02:44	9960	5,716	2,068	18:36:08	10020	5,193	2,028	19:25:42	9120	5,710	1,937
18:02:47	9420	5,631	2,063	18:36:12	10020	5,218	2,049	19:25:45	9840	5,893	1,876
18:02:51	9480	5,547	2,044	18:36:15	9960	5,215	2,050	19:25:48	9660	5,906	2,009
18:02:54	9000	5,558	2,076	18:36:18	9960	5,191	2,051	19:25:52	9780	3,514	-0,339
18:02:57	8940	5,580	2,083	18:36:22	10020	5,195	2,060	19:25:55	960	0,132	-0,101
18:03:01	9240	5,543	2,071	18:36:25	10020	5,117	2,068	19:25:59	0	0,127	-0,127
18:03:04	9060	5,369	2,067	18:36:28	10020	5,143	2,066	19:26:02	0	0,148	-0,129
18:03:07	9060	5,280	2,082	18:36:32	10140	5,009	2,168				
18:03:10	8520	5,448	2,060	18:36:35	10440	5,092	2,151				
18:03:14	8280	5,335	2,050	18:36:38	10380	5,067	2,192				
18:03:17	7320	5,344	2,036	18:36:41	10320	5,082	2,174				

18:03:20	7740	5,325	2,066	18:36:45	10320	5,127	2,181				
18:03:24	9420	5,365	2,093	18:36:48	10380	5,109	2,209				
18:03:27	9060	5,383	2,121	18:36:51	10380	5,287	2,205				
18:03:30	8760	5,369	2,102	18:36:55	10320	5,047	2,171				
18:03:33	9120	5,339	2,090	18:36:58	10740	5,305	2,247				
18:03:37	8700	5,398	2,125	18:37:01	10380	5,239	2,216				
18:03:40	9360	5,359	2,135	18:37:05	10380	5,214	2,193				
18:03:43	9240	5,385	2,124	18:37:08	10500	5,179	2,342				
18:03:47	9240	5,380	2,124	18:37:11	10380	5,273	2,225				
18:03:50	9060	5,300	2,046	18:37:14	10320	5,306	2,213				
18:03:53	9300	4,999	2,088	18:37:18	10380	5,212	2,251				
18:03:57	9480	4,908	2,164	18:37:21	10440	5,319	2,236				
18:04:00	9360	4,869	2,184	18:37:24	10260	5,191	2,303				
18:04:03	9300	4,851	2,163	18:37:28	10320	5,184	2,296				
18:04:06	9240	4,857	2,149	18:37:31	10380	5,160	2,253				
18:04:10	9840	4,766	2,208	18:37:34	10200	5,021	2,232				
18:04:13	10020	5,027	2,189	18:37:37	10320	5,092	2,265				
18:04:16	9180	5,071	2,171	18:37:41	10260	5,228	2,264				
18:04:20	9540	4,610	2,152	18:37:44	10380	5,318	2,241				
18:04:23	10620	4,970	2,156	18:37:47	10380	5,296	2,220				
18:04:26	10260	4,998	2,141	18:37:51	10440	5,233	2,219				
18:04:29	9300	4,945	2,153	18:37:54	10260	5,229	2,215				
18:04:33	10560	4,931	2,143	18:37:57	10380	5,319	2,214				
18:04:36	10200	4,961	2,075	18:38:01	10440	5,107	2,181				
18:04:39	9240	0,000	-0,064	18:38:04	10500	5,230	2,164				
18:04:43	180	-1,473	0,198	18:38:07	10320	5,225	2,172				
				18:38:10	10260	5,145	2,192				
				18:38:14	10440	5,246	2,189				
				18:38:17	10320	5,284	2,176				
				18:38:20	10620	5,318	2,165				

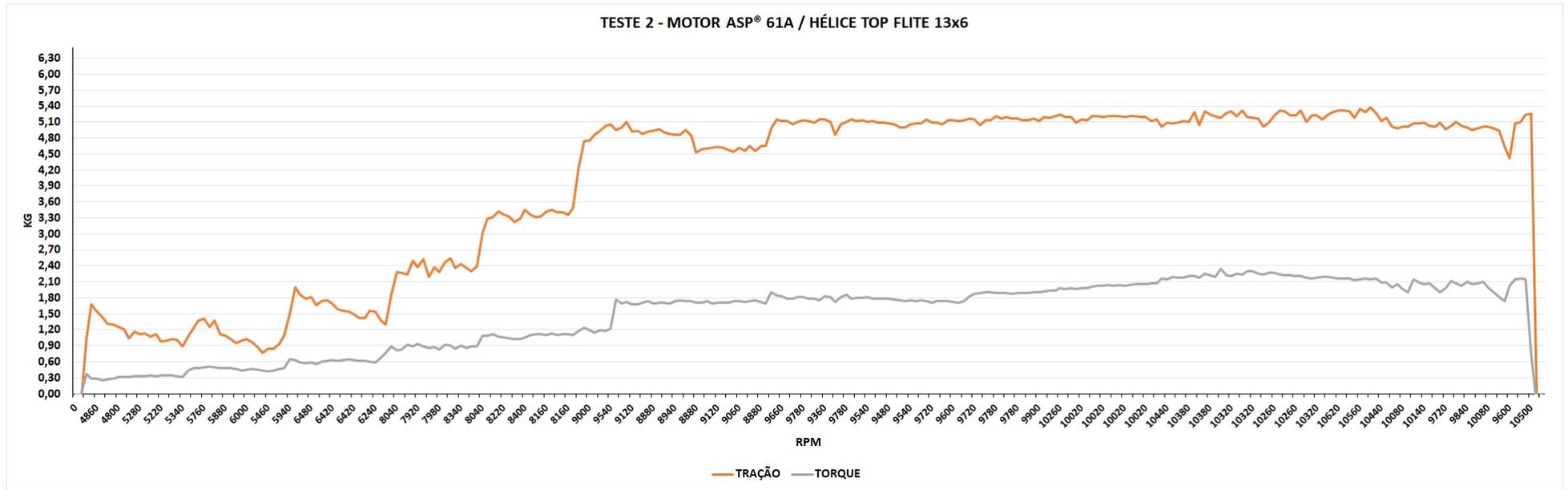
				18:38:24	10500	5,314	2,168		
				18:38:27	10800	5,297	2,157		
				18:38:30	10260	5,185	2,134		
				18:38:33	10560	5,352	2,149		
				18:38:37	10320	5,282	2,166		
				18:38:40	10740	5,383	2,147		
				18:38:43	10380	5,269	2,164		
				18:38:47	10440	5,123	2,088		
				18:38:50	10260	5,173	2,084		
				18:38:53	10320	5,021	1,999		
				18:38:56	10140	4,977	2,062		
				18:39:00	10080	5,009	1,971		
				18:39:03	9780	5,009	1,902		
				18:39:06	9900	5,070	2,150		
				18:39:10	10080	5,068	2,080		
				18:39:13	10140	5,091	2,056		
				18:39:16	9960	5,029	2,069		
				18:39:19	10140	5,020	1,982		
				18:39:23	9720	5,094	1,911		
				18:39:26	9720	4,969	1,982		
				18:39:29	9900	5,036	2,113		
				18:39:33	10140	5,102	2,079		
				18:39:36	10020	5,033	2,030		
				18:39:39	9840	4,993	2,101		
				18:39:43	10020	4,952	2,063		
				18:39:46	10080	4,977	2,073		
				18:39:49	10140	5,018	2,095		
				18:39:52	10080	5,019	1,989		
				18:39:56	9960	4,980	1,910		
				18:39:59	10020	4,931	1,821		

				18:40:02	9720	4,631	1,736		
				18:40:06	9600	4,417	2,031		
				18:40:09	10140	5,076	2,147		
				18:40:12	10440	5,099	2,162		
				18:40:16	10560	5,237	2,153		
				18:40:19	10500	5,259	0,739		
				18:40:22	3600	-0,073	-0,212		
				18:40:26	0	-0,779	-0,256		
				18:40:29	0	-0,765	-0,273		
				18:40:33	180	-0,774	-0,258		

APÊNDICE F – Gráfico de Tração e Torque Hélice Master 13x6:



APÊNDICE G – Gráfico de Tração e Torque Hélice Top Flite 13x6:



APÊNDICE H – Gráfico de Tração e Torque Hélice TP 13x6G:

