



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
CENTRO DE ENGENHARIAS
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

PRINCE AZSEMBERGH NOGUEIRA DE CARVALHO

**OBTENÇÃO DAS CURVAS DE TORQUE E POTÊNCIA DE UM MOTOR 2
TEMPOS DE 10CC POR MEIO DE UMA BANCADA HÍBRIDA**

MOSSORÓ

2018

PRINCE AZSEMBERGH NOGUEIRA DE CARVALHO

**OBTENÇÃO DAS CURVAS DE TORQUE E POTÊNCIA DE UM MOTOR 2
TEMPOS DE 10CC POR MEIO DE UMA BANCADA HÍBRIDA**

Monografia apresentada a Universidade
Federal Rural do Semi-Árido como requisito
para obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Mecânica.

Orientador: Zoroastro Torres Villar, Prof. Dr.

MOSSORÓ

2018

©Todos os direitos estão reservados à Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996, e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tornar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata, exceto as pesquisas que estejam vinculadas ao processo de patenteamento. Esta investigação será base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) seja devidamente citado e mencionado os seus créditos bibliográficos.

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Bibliotecas
da Universidade Federal Rural do Semi-Árido, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

d331o de Carvalho, Prince Azsemergh Nogueira.
OBTENÇÃO DAS CURVAS DE TORQUE E POTÊNCIA DE UM
MOTOR 2 TEMPOS DE 10CC POR MEIO DE UMA BANCADA
HÍBRIDA / Prince Azsemergh Nogueira de Carvalho.
- 2018.
42 f. : il.

Orientador: Zoroastro Torres Vilar.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Engenharia
Mecânica, 2018.

1. Motor. 2. Bancada Híbrida. 3. Potência. 4.
Torque. 5. Rotação. I. Vilar, Zoroastro Torres,
orient. II. Título.

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

PRINCE AZSEMBERGH NOGUEIRA DE CARVALHO

**OBTENÇÃO DAS CURVAS DE TORQUE E POTÊNCIA DE UM MOTOR 2
TEMPOS DE 10CC POR MEIO DE UMA BANCADA HÍBRIDA**

Monografia apresentada a Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

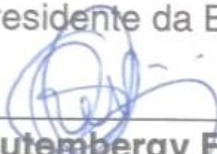
Defendida em: 19/04/2018

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Zoroastro Torres Vilar

Orientador/Presidente da Banca Examinadora



Prof. Gutemberg Ferreira Diniz

Membro da Banca Examinadora



Prof. Ingrid Heloisa da Silva Alves

Membro da Banca Examinadora

Primeiramente à Deus, por sua providência divina e proteção. À minha família, principalmente minha mãe, pelo exemplo vivo de superação e incentivo. À minha namorada, Giovanna Fin, pela motivação e amor incondicional.

AGRADECIMENTOS

Aos amigos Anderson Wagner, Italo Oliveira, Maxwell Cavalcante, Jackson Sousa, Italo Oliveira, Gabriel Louiz, Samuel Marques e Gutemberg Ferreira, pelo apoio prestado durante a graduação.

A esta universidade, pelos laboratórios e seus servidores que me auxiliaram na elaboração deste trabalho.

Ao professor, orientador Zoroastro Torres Villar pelos seus valiosos ensinamentos e orientações prestados.

A todos que contribuíram ao longo da minha graduação. MUITÍSSIMO OBRIGADO.

“É mais fácil voar, que fazer voar.”

Alberto Santos Dumont

RESUMO

A performance é a principal área comercial para uma aeronave, onde se destaca o desempenho da aeronave pelos motores e estes, geralmente pelo torque e potência disponível. Este trabalho objetiva construir uma bancada para caracterização de motores 2 tempos de 10cc, medindo as suas curvas de torque e potência em função da rotação das hélices ensaiadas. Foi desenhada e construída uma bancada híbrida, fabricada em aço, para acoplar o motor e o sistema de aquisição de dados via plataforma Arduino® com uma célula de carga e um módulo amplificador. Foi utilizado duas hélices de passos diferentes e diâmetros iguais, que são geralmente utilizadas no motor ensaiado. O momento de inércia das hélices (corpos complexos) foi medido utilizando o método experimental do pêndulo de torção. Foi utilizado uma picape para promover ao aparato um fluxo de ar simulando assim um túnel de vento. Foi captada a rotação para uma faixa de velocidade de fluxo de ar onde o motor geralmente opera, e os dados coletados via Arduino®. Levantou-se as curvas de torque e potência, onde a hélice APC 12x4 se mostrou a mais promissora, entregando maior torque e potência, em uma maior velocidade angular de operação. A bancada construída mostrou-se versátil na caracterização dos motores de 10cc, e a metodologia empregada foi considerada satisfatória, com base no seu custo de aplicação e simplicidade de realizar os ensaios.

Palavras-chave: Motor. Bancada Híbrida. Potência. Torque. Rotação.

ABSTRACT

Performance is the main commercial area for an aircraft, which highlights the performance of the aircraft by engines and these, with the available torque and availability. This work was to be used in the score of torque and character performance in the loop of propellers tested. It was built and built on a hybrid steel bench, to couple the engine and the data acquisition system through the Arduino® platform with a load cell and an amplifier module. There have been two variations of steps and equal diameters, which are generally used in the engine tested. The moment of inertia of the propellers (complex bodies) was mediated by the use of the experimental torsion pendulum method. A pickup was used to promote the airflow by simulating a wind tunnel. A rotation has been captured for the air flow range from where the motor generally operates, and data is sent via Arduino®. Torque and power curves were raised, where the APC 12x4 propeller proved to be more promising, providing greater torque and power at a higher angular velocity of operation. A built-in bench proved to be versatile in the characterization of 10cc engines, and an applied methodology was constructed satisfactorily, based on its own application model and simplicity of performing the tests.

Keywords: Engine. Hybrid Workbench. Power. Torque. Rotation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Detalhes do Motor de Combustão Interna	17
Figura 2 – Funcionamento do motor 2 tempos.....	18
Figura 3 – Detalhe da hélice e do passo (P_0)	20
Figura 4 – Idealização da hélice como barras finas de diâmetro constante.....	21
Figura 5 – Esquema do pêndulo de torção	23
Figura 6 – Esquema de torção do pêndulo	24
Figura 7 – a) Triângulos geométrico. b) Triângulo Físico de forças.....	25
Figura 8 – Combustíveis Glow em galão americano.....	28
Figura 9 – Placa Arduino® UNO e Componentes	29
Figura 10 – Bancada desenhada em 3D	31
Figura 11 – Bancada construída em solo na picape.....	31
Figura 12 – Motor tipo glow 2 tempos de 10cc.....	32
Figura 13 – Hélices APC 12x6 (cima) e APC 12x4 (baixo)	32
Figura 14 – Sistema de aquisição de dados montado	33
Figura 15 – Tacômetro digital Minipa®.....	33
Figura 16 – Gráfico da tração em função do tempo	34
Figura 17 – Balança de precisão utilizada	35
Figura 18 – Ensaio de um pêndulo de torção	35
Figura 19 – Curva de Torque x RPM	38
Figura 20 – Curva de Potência x RPM.....	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Prova numérica da igualdade trigonométrica

Tabela 2 – Momento de Inércia experimental e teórico

Tabela 3 – Dados dinâmicos do motor

ANEXOS

ANEXO A – CÓDIGO DE AQUISIÇÃO DE DADOS DA CÉLULA DE CARGA E MÓDULO HX711

LISTA DE SÍMBOLOS

α – Aceleração angular (rad/s²)

τ – Torque (N.m)

D – Distância entre os barbantes (m)

g – Aceleração gravitacional (m/s²)

I – Momento de Inércia de massa (kg.m²)

m – Massa (kg)

P – Potência (W)

T – Período de oscilação (s)

t – Tempo (s)

v – Velocidade linear (m/s)

θ – Posição angular (rad)

ω – Velocidade angular (rad/s)

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	15
2.	OBJETIVOS	16
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
3.1	MOTOR	17
3.2	PARÂMETROS DOS MOTORES	19
3.3	HÉLICE	20
3.4	MOMENTO DE INÉRCIA DA HÉLICE	20
3.5	COMBUSTÍVEL.....	28
3.6	SISTEMA DE AQUISIÇÃO.....	29
4.	METODOLOGIA.....	30
4.1	BANCADA HÍBRIDA.....	30
4.2	MATERIAIS E ENSAIO	32
4.3	ENSAIO DE INÉRCIA DAS HÉLICES.....	34
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	37
5.1	ENSAIO DE INÉRCIA DAS HÉLICES.....	37
5.2	ENSAIO DE TRAÇÃO	37
6.	CONCLUSÕES.....	40
7.	REFERÊNCIAS	41

1. INTRODUÇÃO

Uma das principais áreas do projeto de uma aeronave é a de performance, onde se avalia o desempenho do avião buscando otimizar sua propulsão. Esta é a principal linguagem entre o cliente e o fabricante do avião. Utilizada também como marketing do produto final.

Dentro da *performance*, ainda há projetos atuais e desenvolvimento de motores a pistão, mesmo sendo maioria no mercado os motores à reação (jato). Necessário à esses estudos, está a determinação das curvas de torque e potência em função da velocidade de rotação, que varia com a velocidade de voo. Através delas é possível saber a tração e a potência disponível, que são importantes para determinar o teto de voo da aeronave, seu alcance, autonomia, razão de planeio, etc.

A necessidade de caracterização em motores de baixa cilindrada ($\leq 10\text{cc}$), é devido à recente e crescente pesquisa e desenvolvimento de aeronaves em escala não tripuladas para usos distintos como georeferenciamento, mapeamento de áreas agrícolas, uso recreativo e competitivo.

Neste trabalho serão levantadas as curvas de potência e torque em função da velocidade de rotação de cada hélice, todas para motores de dois tempos de até 10cc, com auxílio de uma bancada híbrida (que será desenhada e construída), equipada com sensores para plataforma Arduino®, sendo adaptável ao solo e à caçamba de uma picape para os ensaios.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

- Obter as curvas de torque e potência de um motor 2 tempos de 10cc com uma bancada híbrida.

2.2. Objetivos Específicos

- Desenhar e construir uma bancada híbrida em aço, que seja possível realizar ensaios em solo e na caçamba de um veículo (tipo picape) em movimento.
- Obter, através de um sistema de aquisição de dados via Arduino®, as curvas de torque e potência de um motor 2 tempos de 10cc, utilizando duas hélices de passo fixo.

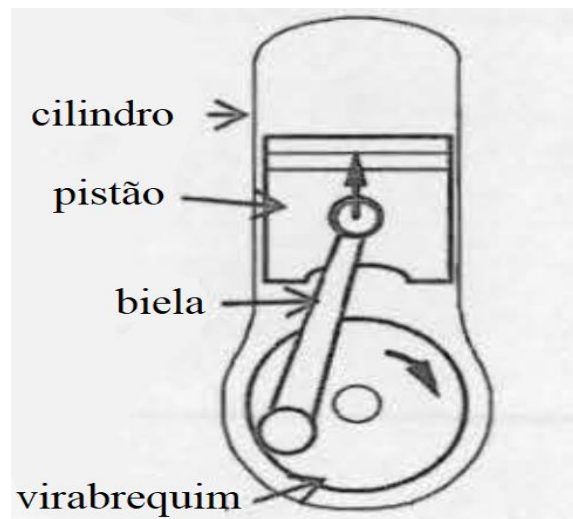
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Será abordado neste tópico o funcionamento do motor de combustão interna 2 tempos, os parâmetros considerados importantes na especificação de um motor, nomenclaturas da carga de trabalho do motor (hélice) que proporciona um torque e potência de saída útil, os métodos utilizados para estimar o momento de inércia das hélices, propriedades e características do combustível e os componentes principais do sistema de aquisição de dados.

3.1 Motor

De acordo com Martins (2006), o motor de combustão interna, mostrado na Figura 1, funciona comprimindo uma mistura de ar e combustível que após a explosão, gera energia térmica para movimentar o pistão, e através do movimento alternativo deste de sobe e desce, transfere trabalho mecânico a um eixo (virabrequim), que gira a hélice.

Figura 1 – Detalhes do Motor de Combustão Interna



Fonte: Martins (2006).

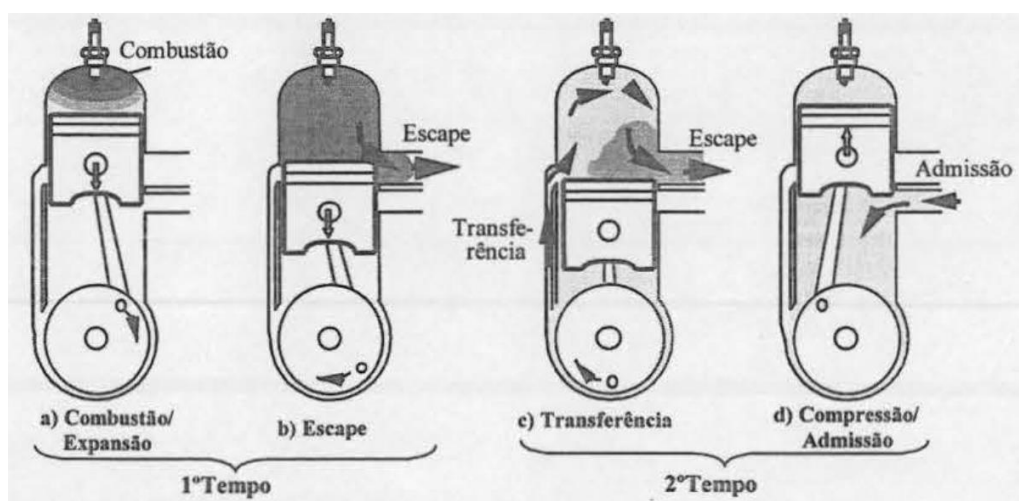
Dentre os motores de combustão interna, existe o motor 2 tempos. No **primeiro tempo** após a compressão da mistura, a vela solta uma faísca e provoca a combustão, aumentando assim a temperatura e pressão no interior da câmara de combustão. O pistão vai do ponto mais alto, denominado Ponto Morto Superior (PMS) para baixo, transferindo a

energia da massa de gás ao virabrequim. Antes de chegar ao ponto mais baixo, conhecido como Ponto Morto Inferior (PMI), o pistão libera a saída (escape) para os gases queimados da combustão serem expulsos. (MARTINS, 2006).

Ao passo que o pistão desce até o PMI, ele comprime a mistura que se encontra no reservatório (cárter) em baixo do pistão, e descobre a janela de transferência, permitindo que a mistura do cárter entre para a câmara de combustão, ajudando a expulsar os gases queimados. Esta etapa é denominada de lavagem. Finalmente, o pistão chega no PMI. (MARTINS, 2006).

No **segundo tempo**, indo do PMI ao PMS, o pistão cobre a janela de transferência e depois a de escape, comprimindo a mistura da câmara. Simultaneamente, o pistão descobre a entrada de admissão, permitindo a entrada de combustível e ar para um novo ciclo. A Figura 2 detalha os tempos e o que ocorre em cada um deles. (MARTINS, 2006).

Figura 2 – Funcionamento do motor 2 tempos



Fonte: Martins (2006).

Esse tipo de motor (2 tempos) monocilindro, é bastante utilizado em competições onde não há exigências ambientais, pois devido à ausência de abafadores de ruído, volantes de inércia, virabrequins, válvulas, balancins, etc. a sua relação potência/peso é maior quando comparado com motores 4 tempos. Seus inconvenientes são: o alto ruído e a emissão de combustível na atmosfera. O motor deste trabalho é do tipo de autoignição, onde a vela incandescente provoca a primeira explosão da mistura, e as paredes quentes auto detonam as misturas seguintes. (MARTINS, 2006).

3.2 Parâmetros dos Motores

De acordo com Martins (2006), a especificação de um motor, geralmente, é dada pelos valores de potência e torque máximos, pois estes são os parâmetros mais expressivos e dão noção da sua dimensão. O Torque (τ), em N.m, pode ser medido por um freio dinamométrico ou de inércia, e seu produto com a velocidade angular (ω), em rad/s, obtém-se a potência útil (P), em W ou hp, podendo esta última ser representada pela Equação 1.

$$P = \tau \cdot \omega \quad (1)$$

Onde, o torque é o produto do momento de inércia (I), em kg.m², da carga com a aceleração angular (α), em rad/s², fornecido pela Equação 2. (HALLIDAY, 2008).

$$\tau = I \cdot \alpha \quad (2)$$

Sendo a aceleração angular, a taxa de variação da velocidade angular em relação ao tempo, Equação 3. (HALLIDAY, 2008).

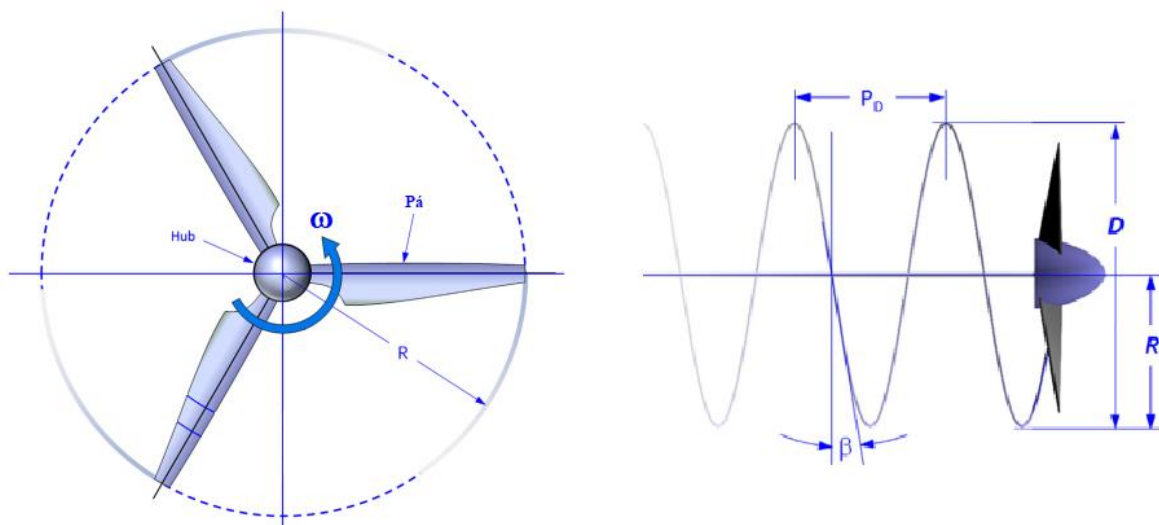
$$\alpha = \frac{d\omega}{dt} \quad (3)$$

Ainda de acordo com Martins (2006), os dinamômetros de inércia são baratos, quando comparado com todos os outros tipos de dinamômetros (hidráulico, de fricção, corrente contínua, corrente alternada, correntes de Foucault, etc.), e de rápida obtenção das curvas de torque e potência, além de não necessitar de arrefecimento. O único inconveniente desse tipo de dinamômetro, é de somente servir para medição das curvas de torque e potência. É indicado para motores de rápidas acelerações e veículos leves, como é o caso das aeronaves do *Aerodesign*.

3.3 Hélice

A hélice, Figura 3, é um dispositivo que transforma energia mecânica em uma força, denominada de tração. Ela é representada pelo número do seu diâmetro, em polegadas e pelo passo (ângulo de inclinação das pás), também em polegadas, como exemplo uma hélice 20x10, tem 20 polegadas de diâmetro e 10 polegadas de passo. O passo representa o valor teórico do avanço da hélice a cada revolução completa. Para um mesmo diâmetro, quanto maior o passo, menor é a variação da tração e consequentemente o torque e potência em relação à velocidade. Por isso é realizado um ensaio dinâmico, que é incidir um fluxo de ar na hélice e variar a velocidade desse fluxo. Outras vezes, é realizado um ensaio estático, onde a hélice é ensaiada acoplada ao motor sem o fluxo de ar. (GUDMUNDSSON, 2014).

Figura 3 – Detalhe da hélice e do passo (P_0)



Fonte: Gudmundsson (2014).

3.4 Momento de Inércia da Hélice

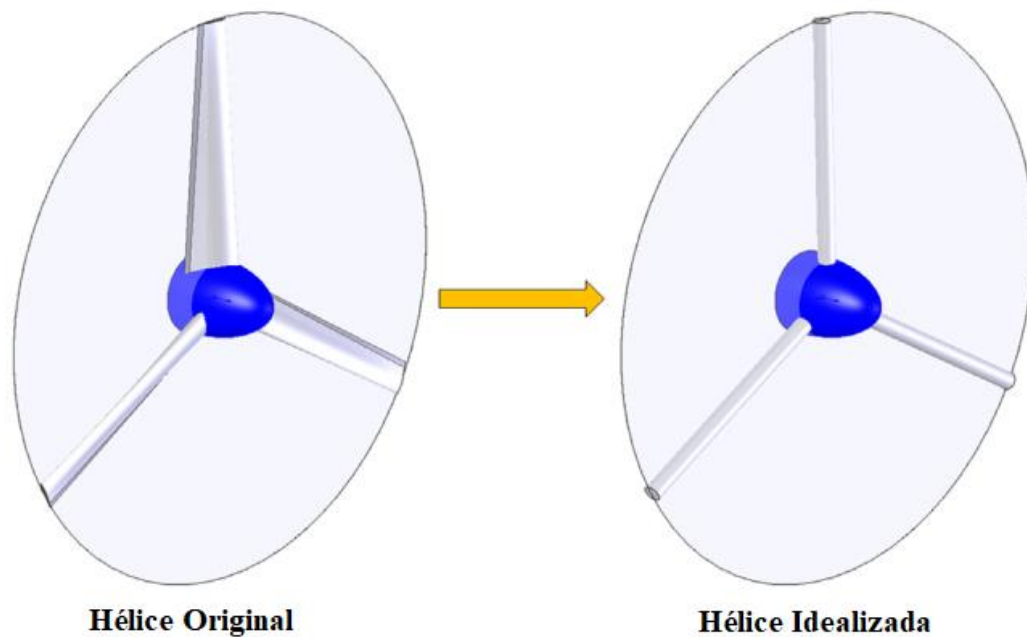
Segundo Halliday (2008), o momento de inércia de massa é a dificuldade de se alterar o estado de rotação de um corpo, em outras palavras, é a sua resistência à aceleração angular. Essa propriedade é avaliada não só pela massa do corpo, mas também como essa massa está distribuída ao longo dele.

Gudmundsson (2014), mostra como estimar o momento de inércia de uma hélice a partir da sua Equação fundamental, a Equação 4:

$$I = \int_V r^2 \cdot \rho \cdot dV \quad (4)$$

O termo “ $\rho \cdot dV$ ”, representa a massa de um volume infinitesimal da pá da hélice. Porém, em sua forma original, o perfil da hélice é complexo e a solução da Equação 4 também assim o é. Uma razoável estimativa, é considerar as pás como barras finas, de área de seção transversal “ A ” (em m^2) constante, como mostrado na Figura 4. (GUDMUNDSSON, 2014).

Figura 4 – Idealização da hélice como barras finas de diâmetro constante



Fonte: Gudmundsson (2014).

Sendo o raio da hélice, “ R ”, seu peso, “ $W_{hélice}$ ”, e o número de pás, “ N_p ”, a massa da hélice “ m ”, pode ser calculada como na Equação 5. (GUDMUNDSSON, 2014).

$$m = \rho_{hélice} \cdot A \cdot R \cdot N_p \quad (5)$$

Onde $\rho_{hélice}$ é a densidade do material utilizado nas pás e “g” a aceleração gravitacional. A massa da hélice pode ser calculada também, pela Equação 6. (GUDMUNDSSON, 2014).

$$m = \frac{W_{hélice}}{g} \quad (6)$$

Substituindo a Equação 5 na Equação 6, e isolando “A” tem-se a Equação 7. (GUDMUNDSSON, 2014).

$$A = \frac{m}{\rho_{hélice} \cdot R \cdot N_p} = \frac{W_{hélice}}{\rho_{hélice} \cdot g \cdot R \cdot N_p} \quad (7)$$

Utilizando a eq. (4), podemos calcular o momento de inércia da hélice de 0 até R, como segue. (GUDMUNDSSON, 2014).

$$I_{hélice} = \int_V r^2 \cdot \rho \cdot dV = \int_0^R \rho_{hélice} \cdot r^2 \cdot A \cdot dr$$

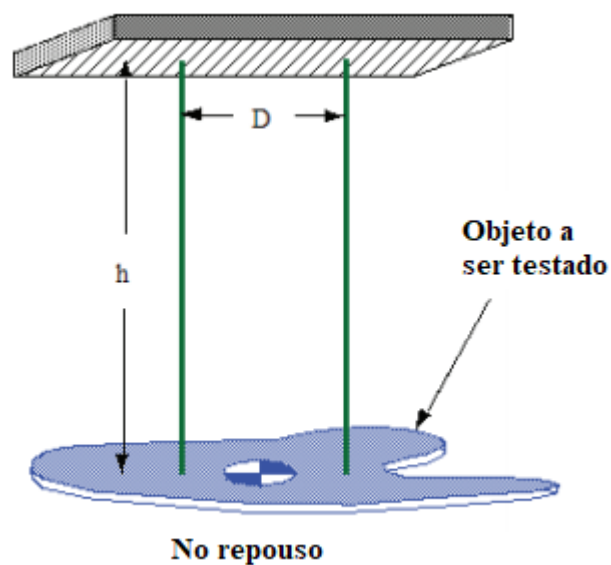
Rearranjando com a Equação 7 e substituindo na Equação 4 e resolvendo a integral, temos o momento de inércia da hélice, Equação 8. (GUDMUNDSSON, 2014).

$$I_{hélice} = \left(\frac{W_{hélice} \cdot R^2}{3g \cdot N_p} \right) \quad (8)$$

Mattey (1974), Chai (2007), Jardim (2010) e French (2016), mostram como estimar de forma experimental o momento de inércia de um corpo complexo como a hélice, utilizando o princípio do pêndulo de torção (*bifilar pendulum*).

O método consiste em pendurar o objeto que se deseja estimar o momento de inércia em dois fios, de comprimento L , espaçados uma distância D , como na Figura 5. (JARDIN, 2010).

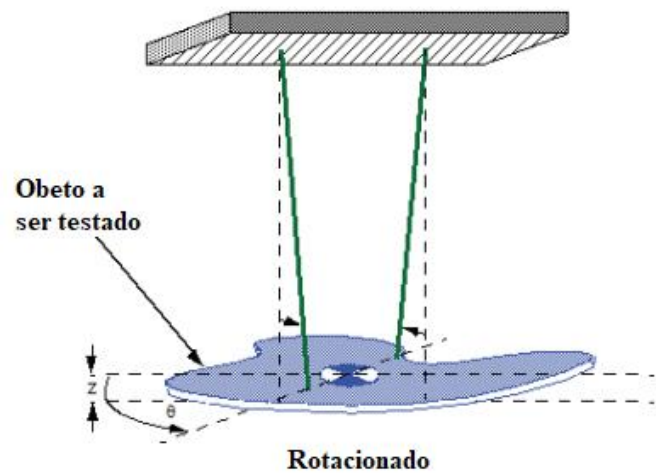
Figura 5 – Esquema do pêndulo de torção



Fonte: Jardim (2010).

Com o objeto preso aos dois fios de massa desprezível e inelásticos, move-se o objeto em torno do seu centro, de modo a provocar uma variação angular em torno do eixo que se quer medir a inércia, como mostrado na Figura 6. (JARDIN, 2010).

Figura 6 – Esquema de torção do pêndulo



Fonte: Jardim (2010).

Para pequenos ângulos (até $\sim 0,4$ radianos ou menos), o valor da função seno e tangente são aproximadamente o ângulo (em radianos). Conforme mostrado numericamente na Tabela 1.

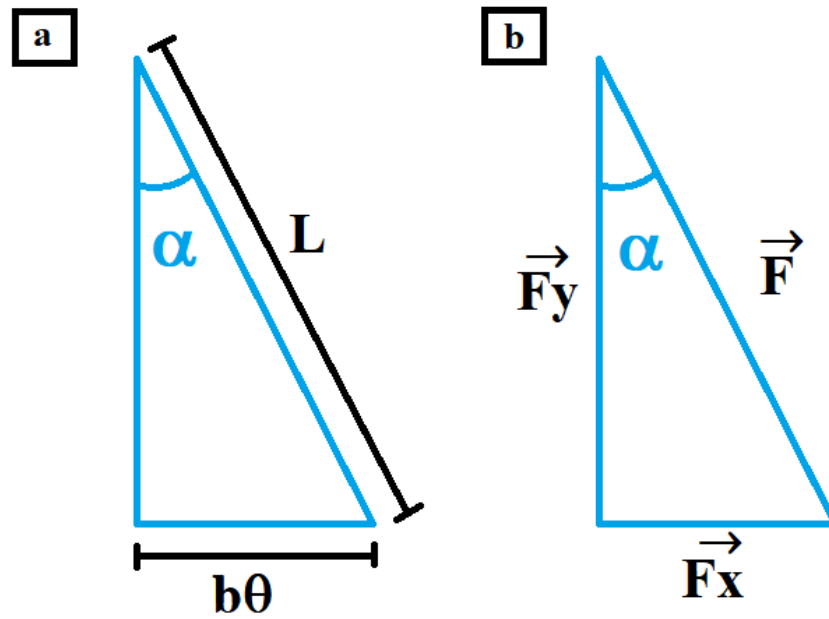
Tabela 1 – Prova numérica da igualdade trigonométrica

Ângulo (rad)	Ângulo (°)	Seno	Tangente	Erro Sen. (%)	Erro Tan. (%)
0	0	0,000	0,000	0%	0%
0,1	6	0,100	0,100	0,2%	0,3%
0,2	11	0,199	0,203	0,7%	1,4%
0,3	17	0,296	0,309	1,5%	3,1%
0,4	23	0,389	0,423	2,6%	5,7%

Fonte: Autoria própria.

Conforme a Figura 6, temos:

Figura 7 – a) Triângulos geométrico. b) Triângulo Físico de forças



Fonte: French (2016).

Sendo “b” a distância do centro de massa da peça até o fio e considerando “ θ ”, pequeno, temos que o comprimento descrito pelo arco é a Equação 9.

$$s = b \cdot \theta \quad (9)$$

Então, segue que:

$$\frac{b \cdot \theta}{L} = \text{Sen}(\alpha) \approx \alpha \quad (10)$$

Analisando o triângulo de forças, vemos:

$$F_x = F_y \cdot \tan(\alpha) \approx \alpha \quad (11)$$

Como cada fio suporta metade do peso do objeto:

$$F_y = \frac{m \cdot g}{2} \quad (12)$$

Segue então:

$$F_x \approx \frac{m \cdot g}{2} \cdot \alpha \quad (13)$$

Combinando a Equação 10 com a Equação 13, temos então:

$$F_x \approx \frac{m \cdot g}{2} \cdot \frac{b \cdot \theta}{L} \quad (14)$$

Para resolver o problema precisamos saber o momento que age no corpo, então segue que:

$$M = -b \cdot F_x$$

$$M = \frac{-m \cdot g \cdot b^2 \cdot \theta}{2 \cdot L} \quad (15)$$

O sinal negativo indica um momento restaurador, isto é, que sempre tenderá ao equilíbrio do corpo e que seu sentido será contrário ao do deslocamento.

Halliday (2008), nos apresenta a segunda lei de newton para rotação, Equação 16, enunciando que o somatório de momentos em torno de um corpo é igual ao seu momento de inércia “I”, multiplicado pela aceleração angular “α”:

$$\Sigma M = I \cdot \alpha = I \cdot \ddot{\theta} \quad (16)$$

Da Equação 15, segue:

$$\frac{-m \cdot g \cdot b^2 \cdot \theta}{L} = I \cdot \ddot{\theta} \quad (17)$$

Assumindo que “ θ ” representa um movimento senoidal, a sua equação (solução da E.D.O.) é a Equação 18, escrita em termos complexos:

$$\theta(t) = A \cdot e^{i\omega t} \quad (18)$$

Obtemos, então, depois de rearranjar as Equações 17 e 18, Isolando I , a Equação 19, que descreve o momento de inércia de um corpo em função do seu período de oscilação torcional T , da sua massa m , da aceleração gravitacional g , do comprimento do fio L , e da distância entre os fios/barbantes, b ou D .

$$I = \frac{m \cdot g \cdot b^2 \cdot T^2}{4 \cdot \pi^2 \cdot L} \quad (19)$$

Ou em termos de “D”:

$$I = \frac{m \cdot g \cdot D^2 \cdot T^2}{16 \cdot \pi^2 \cdot L} \quad (19a)$$

3.5 Combustível

Os motores a 2 tempos de até 10cc, utilizam uma mistura de metanol (70%), óleo sintético (18% ou 16%) e nitrometano (12% ou 14%). Esta mistura é altamente volátil, tóxica, venenosa, inflamável e com alto poder calorífico. (MARTINS, 2006).

Segundo Martins (2006), quando se compara o uso de álcoois combustíveis, a relação ar combustível é muito menor, por isso o consumo aumenta em 70% quando se usa etanol, 130% para o metanol e para o nitrometano um aumento de 850% no consumo. Considerando apenas o poder calorífico, o nitrometano tem $\frac{1}{4}$ do valor da gasolina, porém, como a relação ar-combustível é 8,5 vezes maior, a energia da mistura é mais do dobro da mistura ar-gasolina.

Devido à alta tecnologia empregada na produção do nitrometano e do metanol, o combustível para motores glow 2t, que ainda levam óleo sintético, chega fácil à cifra de R\$ 32/litro, sendo vendidos, geralmente, em galões americanos de 3,78 litros, como mostra a Figura 8. (MARTINS, 2006).

Figura 8 – Combustíveis Glow em galão americano



Fonte: <https://www.google.com.br/search?q=glow+10/18> (Acesso em 24 de Abril de 2018).

3.6 Sistema de Aquisição

O sistema de aquisição foi baseado em Arduino®, e a este acoplado os componentes para aquisição, como mostrado na Figura 9. O Arduino® é uma placa de prototipagem criado com o objetivo de ser fácil de programar, funcional e barato (onde qualquer um pode modificar os seus componentes sem precisar de licença), é bastante utilizado para automação e muito usual quando acoplado com sensores que podem realizar diferente leituras e gravação dos dados. Pode servir, depois de programado, como controlador de temperatura de uma estufa, ar condicionado, luzes de uma casa, até o controle de um braço robótico para automação industrial. (THOMSEN, 2014).

Figura 9 – Placa Arduino® UNO e Componentes



Fonte: <http://www.naylampmechatronics.com/blog/25-Tutorial-trasmisor-de-celda-de-carga-HX711-Ba.html>
(Acesso em 24 de Abril de 2018).

4. METODOLOGIA

Será abordado nesse tópico a fabricação da bancada, os materiais utilizados nos ensaios e seus detalhes de realização.

4.1 Bancada Híbrida

Para realizar os ensaios estáticos (ensaio em solo, sem fluxo de ar), necessita-se de uma bancada em aço, de aproximadamente 1 m de altura, e com um tampo de 0,6m x 0,9m x 0,015m de dimensões, aproximadamente, para acomodar os equipamentos necessários ao ensaio e ainda, caso necessário um computador.

Para o ensaio dinâmico (fluxo de ar incidindo na hélice), necessita-se de um túnel de vento. Porém, como não dispõe-se desse equipamento na universidade, uma alternativa é acoplar a bancada à caçamba de um veículo tipo picape e correr com ele sobre um plano (sem inclinação), e de preferência sem rajadas de vento no local. Para o último ensaio a bancada necessita ter um altura de 0,6m, de modo que fique justa na caçamba do veículo, e mesmas dimensões do tampo mencionadas anteriormente.

Pensando nas duas características de operação e versatilidade, foi desenhada uma bancada (Figura 10) com ajuste de altura e um braço extensor para o aparato de ensaio, visto que ele (aparato), necessita estar distante da carroceria do veículo para evitar interferências aerodinâmicas no ensaio.

A estrutura principal da bancada (Figura 11) foi construída com tubos de aço 1020 de perfil quadrado de 25x25 e os pés e guias do extensor, com o mesmo material, só que com dimensões de 30x30 para que pudessem encaixar nos de menor dimensão, e assim criar um controle deslizante de fácil utilização. Os reforços laterais da bancada, para fornecer maior rigidez e estabilidade, foram fabricado em barra chata também de aço 1020. A espessura dos tubos e das chapas, é de 1,9mm, a maior disponível para venda no comércio local. Tal valor (maior espessura) foi escolhida para evitar sua perfuração durante a soldagem. A união das peças foi realizada via soldagem por eletrodo revestido. O Eletrodo utilizado foi o 6013, devido ao seu baixo custo por kg, e o processo também por ser de baixo custo e facilidade. Todo o material e suas dimensões foram escolhidos apenas visando o menor custo, devido às limitações financeiras do autor.

Figura 10 – Bancada desenhada em 3D



Fonte: Autoria própria.

Figura 11 – Bancada construída em solo na picape



Fonte: Autoria própria.

4.2 Materiais e Ensaio

Para o ensaio foi utilizado um motor ASP 61 SII como mostrado na Figura 12, devido a sua disponibilidade pela Equipe Pegazuls Aerodesign, duas hélices APC, mostradas na Figura 13, que também se encontravam disponíveis, uma célula de carga, para captar a força de tração do motor, um módulo amplificador de sinal com resolução de 0,001 kg, para tornar legível os valores da célula de carga, um Arduino BlackBoard®, para processar os dados, fios para ligação dos componentes, cartão SD para gravação dos dados, protoboard para alocar os componentes e uma bateria de 9V para alimentar o sistema. Os materiais utilizados foram escolhidos com base na disponibilidade (não necessidade de compra) de terceiros. Todo o aparato de aquisição montado é mostrado na Figura 14.

Figura 12 – Motor tipo glow 2 tempos de 10cc



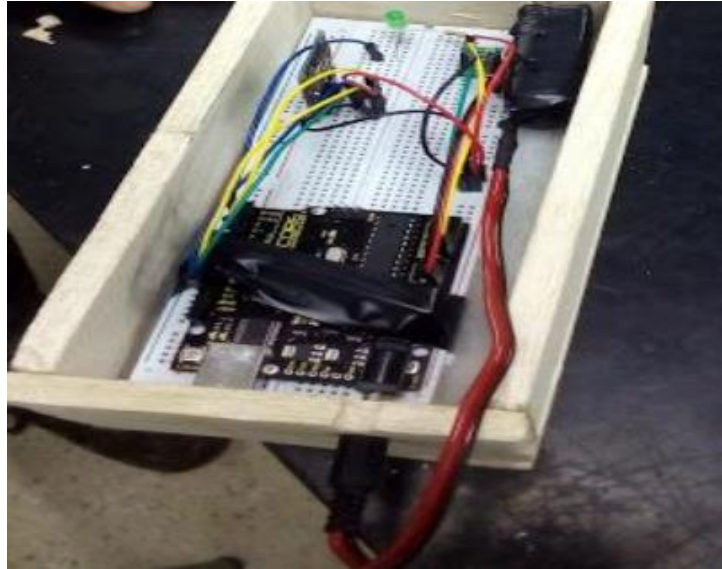
Fonte: https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-868445565-otor-asp-61-2t-glow-nitro-aeromodelo-agulha-no-carburador--_JM (Acesso em 24 de Abril de 2018).

Figura 13 – Hélices APC 12x6 (cima) e APC 12x4 (baixo)



Fonte: Autoria própria.

Figura 14 – Sistema de aquisição de dados montado



Fonte: Autoria própria.

Para captar a rotação, foi utilizado um tacômetro foto digital com resolução de 0,1 RPM , mostrado na Figura 15.

Figura 15 – Tacômetro digital Minipa®



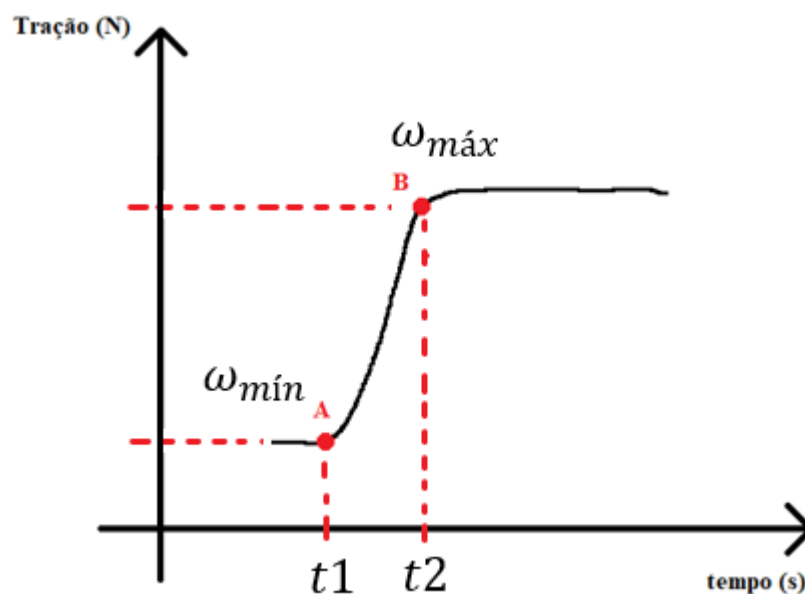
Fonte: <https://www.google.com.br/search?q=minipa+tacometro> (Acesso em 24 de Abril de 2018).

Todo o sistema foi montado e posto na picape como mostrado na Figura 11. Depois, correu-se com o veículo para obter os dados a 3 velocidades (20, 40 e 60 km/h) onde usualmente o motor opera. Os dados foram registrados através do código Anexo A, carregado no Arduino®.

Na medição de tração, para encontrar a aceleração angular, considerou-se que a tração mínima do motor (*idle*), tem um valor mínimo de rotação e no ponto de máxima tração tem uma máxima rotação, já que a tração é proporcional à rotação.

Então, mediu-se através do gráfico da Figura 16, coletado do sistema de aquisição, a rotação na mínima tração (ponto A) e a rotação na máxima tração (ponto B), considerando uma variação linear de um ponto pro outro, ou seja, a reta AB, representando uma aceleração angular constante. De posse da rotação em cada ponto e do seu respectivo tempo, utilizou-se a Equação 3 para encontrar a aceleração angular e a respectiva potência do motor com a Equação 1.

Figura 16 – Gráfico da tração em função do tempo



Fonte: Autoria própria.

4.3 Ensaio de Inércia das Hélices

Para o ensaio de inércia das hélices, foi utilizado uma balança com resolução de 0,01g (Figura 17), dois barbantes presos a um birô e uma fita demarcando uma referência (Figura 18), além de um cronômetro via celular para captar o período de oscilação.

Figura 17 – Balança de precisão utilizada



Fonte: Autoria própria.

Figura 18 – Ensaio de um pêndulo de torção



Fonte: Autoria própria.

Após medir a massa das hélices, cada uma foi torcida um ângulo considerado pequeno em relação à referência (fita) e abandonada, após oscilar, mediu-se 10 períodos de oscilação e tomou-se a média de um período para um resultado mais confiável. Foram medidos também o comprimento do fio e da distância entre os barbantes. O momento de inércia foi estimado com base na Equação 19 e comparado com o valor teórico disposto na Equação 8.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Ensaio de Inércia das Hélices

Após realizar os ensaios de momento de inércia das hélices, foi montada a Tabela 2.

Tabela 2 – Momento de Inércia experimental e teórico

Descrição da Hélice	m (kg)	L (m)	b (m)	D (m)	T(s)	I exp. (kg.m ²)	I teo. (kg.m ²)	Erro (%)
Hélice APC 12x6	0,04124	0,710	0,0710	0,142	1,5302	1,70E-04	1,60E-04	7%
Hélice APC 12x4	0,04086	0,710	0,0765	0,153	1,28825	1,39E-04	1,58E-04	12%

Fonte: Autoria própria.

O erro relativamente alto por parte do momento de inércia teórico se deve ao fato de que a modelagem, considera a hélice como uma barra redonda, onde talvez a forma mais próxima seja a de um barra chata (retangular).

Além disso, outro fonte de erro é que o ângulo impresso no início do movimento não é muito próximo de zero (em torno de 1° a 5°) e o movimento sofre pequenas variações de translação. O que contribui também é a precisão humana de disparar e parar o cronômetro para captar o tempo.

5.2 Ensaio de Tração

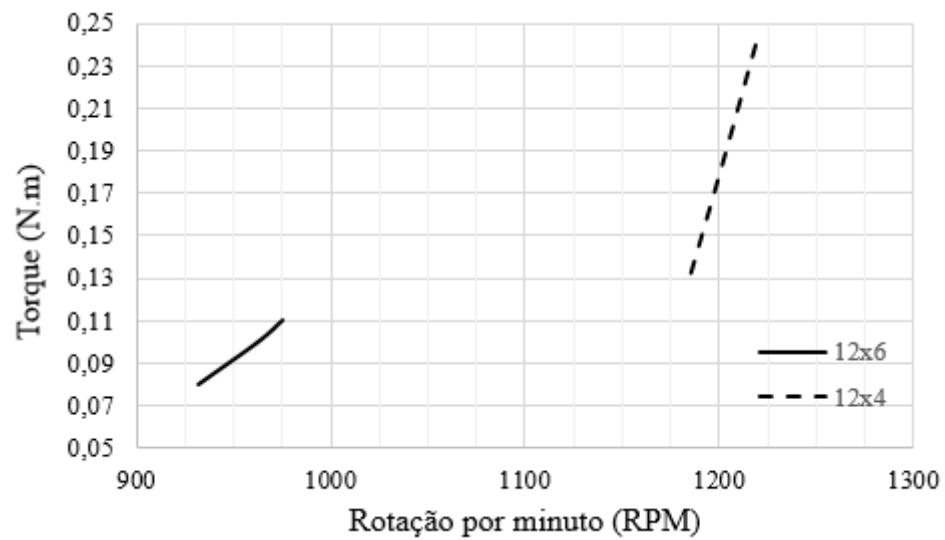
No ensaio de tração, mediu-se graficamente a variação temporal da velocidade angular, e de posse do tacômetro, mediu-se a rotação em cada ponto de tração (mínima e máxima), de posse dos dados, montou-se a Tabela 3 e os Gráficos de performance mostrados na Figura 19 e Figura 20.

Tabela 3 – Dados dinâmicos do motor

Hélice	Vel. (km/h)	$\Delta\omega$ (rad/s)	ΔT (s)	α (rad/s ²)	I exp. (kg.m ²)	τ (N.m)	ω máx (rad/s)	P. Máx (W)	P. Máx (hp)
APC 12x6	20	974,9	1,48	658,7	1,70E-04	0,11	1224,9	137,2	0,18
	40	962,5	1,56	617,0		0,10	1208,5	126,7	0,17
	60	931,6	1,92	485,2		0,08	1167,6	96,3	0,13
APC 12x4	20	1219,3	0,72	1693,4	1,39E-04	0,24	1481,3	348,7	0,47
	40	1200,7	0,94	1277,3		0,18	1457,7	258,8	0,35
	60	1184,6	1,22	971,0		0,13	1432,6	193,3	0,26

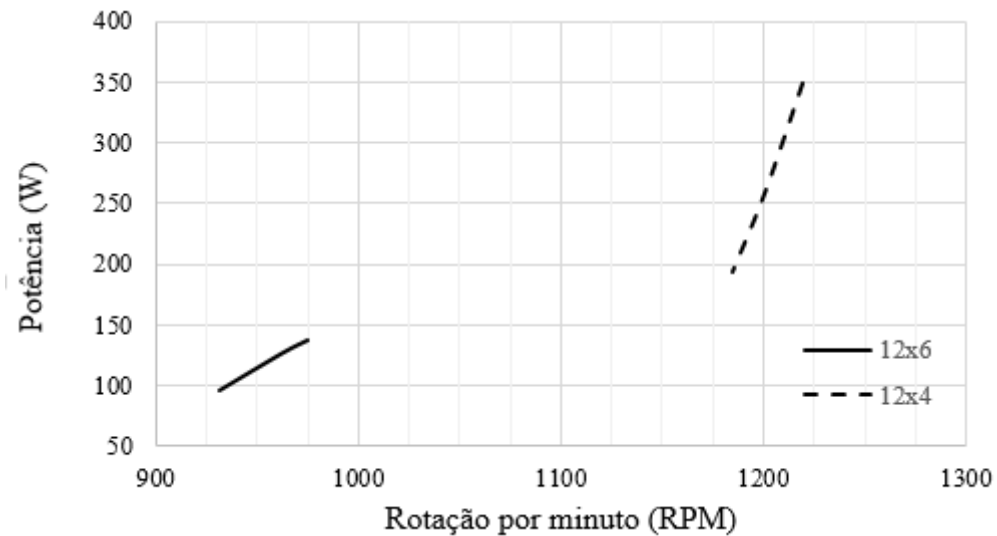
Fonte: Autoria própria.

Figura 19 – Curva de Torque x RPM



Fonte: Autoria própria.

Figura 20 – Curva de Potência x RPM



Fonte: Autoria própria.

Percebe-se que a hélice 12x6 (linha cheia), possui menor torque e potência que a hélice 12x4 (linha tracejada), isso se deve à sua maior inércia e ao seu maior passo. Além disso, a potência entregue pelo motor com a hélice 12x4 é 2 vezes maior que a entregue pela 12x6. Pode-se perceber também que a variação de torque e potência em função da rotação para a 12x6 é menor que a 12x4, pois a primeira é mais indicada para velocidades por ter um passo maior, por isso suas curvas tem variação menos abrupta.

Vê-se ainda que o tempo necessário para acelerar a hélice aumenta quase que exponencialmente. Isso se explica pelo fato do ensaio captar a tração líquida do motor, já incluindo a força de arrasto, e esta última, aumenta exponencialmente com a velocidade.

6. CONCLUSÕES

Durante a realização do trabalho surgiram problemas não previstos no início, o que comprometeu severamente o seu prazo de realização e outras ideias. Uma sugestão pensada foi a de medir também o torque do motor através de um eixo acoplado ao mesmo e captar sua força com a célula de carga. E medir também a curva do consumo em função da rotação. Um outro inconveniente foi o fato de toda a fabricação e execução do projeto ser custeado pelo autor, e sua limitação financeira impactaram negativamente os prazos.

Conseguiu-se construir a bancada híbrida e a metodologia empregada junto com o sistema embarcado mostraram-se promissoras para o levantamento das curvas de torque e potência do motor 2 tempos de 10cc, conseguindo obtê-las de forma versátil e simples. Considerando assim que os objetivos foram alcançados, embora algumas ideias tenham restado como sugestão para trabalhos futuros.

7. REFERÊNCIAS

CHAI, P. Y. **Moment of Inertia Measurement for Propulsion System**. University of Minnesota. 2007.

FRENCH, M. **Measuring Mass Moment of Inertia - Brain Waves**. Purdue Polytechnic. 2016. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=IdhV3lphRcc>>, Acesso em 01 de fev. de 2018.

GUDMUNDSSON, S. **General Aviation Aircraft Design: Applied Methods and Procedures**. 1st Edition, Elsevier, 2014.

HALLIDAY, D., RESNICK, R., WALKER, J. **Fundamentos da Física, Mecânica (volume 1)**. 8ª Edição, LTC, 2008.

JARDIN, M. **Improving Mass Moment of Inertia Measurements**, The MathWorks, Inc. 2010.

MARTINS, J. **Motores de Combustão Interna**. 2ª Edição, Publindústria, 2006.

MATTEY, R. A. **Bifilar Pendulum Technique For Determining Mass Properties Of Discos Packages**. Johns Hopkins University, NTIS, 1974.

THOMSEN, A. **O que é Arduino?**. FilipeFlop. 2014. Disponível em: <<https://www.filipeflop.com/blog/o-que-e-arduino>>, Acesso em 20 de fev. de 2018.

ANEXO A – CÓDIGO DE AQUISIÇÃO DE DADOS DA CÉLULA DE CARGA E MÓDULO HX711

```
#include "HX711.h"
#include <SPI.h> //Incluir a biblioteca do Cartão SD
#include <SD.h>

#define DT A1
#define SCR A0

HX711 cell(DT, SCR);
File file;
float T = 0; //Variável para o tempo
void setup() {
    pinMode(2, OUTPUT);

    Serial.begin(9600);
    while (!Serial) {
        ;
    }
    Serial.print("Inicializando...");
    if (!SD.begin(4)) {
        Serial.println("Falha na inicialização!");
        return;
    }
    Serial.println("Inicialização feita.");
    file = SD.open("test.txt", FILE_WRITE);
    file.print("Peso(kg)");
    file.print("\t");
    file.print("Tempo(s)");
    file.print("\t");
    file.println(" ");
    file.close();
    file = SD.open("test.txt");
    if (file) {
        Serial.println("test.txt:");
        while (file.available()) {
            Serial.write(file.read());
        }
    }
}
```

```
    }
    file.close();
} else {
    Serial.println("erro abrindo test.txt");
}

long val = 0;
float count = 0;

void loop() {
    count = count + 1;

    // Use only one of these
    //val = ((count-1)/count) * val + (1/count) * cell.read(); // take long term average
    //val = 0.5 * val + 0.5 * cell.read(); // take recent average
    file = SD.open("test.txt", FILE_WRITE);
    cell.set_scale(294598.715);
    Serial.println(cell.get_units(1),3);
    if (file) {
        Serial.println("Escrevendo no cartão...");
        file.print(cell.get_units(1),3);
        file.print("\t");
        file.print(T);
        file.println(" ");
        file.close();
        Serial.println("Feito.");
        digitalWrite(2, HIGH);
    } else {
        Serial.println("erro");
        digitalWrite(2, LOW);
    }

    T = (T + 0.1);
}
```

Fonte: Autoria própria.