



DESENVOLVIMENTO DE UMA BANCADA PARA ENSAIOS DE UM MOTOR A COMBUSTÃO UTILIZADO EM UM AEROMODELO RÁDIO CONTROLADO

Otávio Ronconi Amboni¹

Elvys Isaías Mercado Curiz²

Resumo: A escolha do perfil aerodinâmico a ser utilizado em um avião de pequeno porte requer do conhecimento da curva característica de potência, força de arraste, torque, rendimento e consumo específico, o qual requer ensaios com diferentes hélices nas faixas de velocidades que o aeromodelo seria submetido durante o voo. Deste modo, o presente trabalho tem como objetivo a realização do projeto e à manufatura de uma bancada instrumentada, a qual mensura o torque, a tração, a potência e o consumo específico do motor a combustão de um aeromodelo rádio controlado. A partir do conhecimento destas variáveis, com o motor em funcionamento, permite-se determinar a hélice com melhor desempenho para o aeromodelo desenvolvido pela equipe AeroSatc, da instituição Faculdade SATC. Com uma seleção apropriada, se conseguiria participar em melhores condições nas competições anuais da SAE Brasil, contribuindo para aperfeiçoamento dos demais cálculos e ensaios para a fabricação de um Aeromodelo. Foram realizados cálculos que permitiram determinar as células de cargas utilizadas, e verificado através da frequência natural se a parte móvel da bancada entraria em ressonância em alguma velocidade de rotação do motor. A bancada foi projetada em ambiente CAD 3D, utilizando o *software* SolidWorks®, na qual conta com duas células de carga de tração, uma de flexão e um sensor de rotação. Foram selecionadas duas hélices a fim de validar a bancada, uma hélice 12x6” e outra 11x7”. Com a coleta dos sinais das células de cargas e do sensor de rotação através do *software* LabVIEW® foi possível obter os parâmetros pretendidos, constatando que a mesma está apta para demais testes.

Palavras-chave: Bancada. Aeromodelo. Tração. Torque. Potência.

1 INTRODUÇÃO

Para aprimorar a aprendizagem relacionada diretamente à engenharia, a Faculdade SATC, junto ao curso de Engenharia Mecânica, formou a equipe destinada a participar da competição SAE BRASIL AeroDesign, denominada AeroSatc. Nestas competições anuais, cria-se o desafio de projetar e manufaturar um aeromodelo atendendo às normas impostas para uma competição justa.

Os participantes da competição utilizam o motor pré-determinado pelas

¹ Graduado em Engenharia Mecânica, Faculdade Satc. E-mail: otavio_amboni@hotmail.com

² Professor Faculdade Satc. E-mail: elvys.curi@satc.edu.br



normas da SAE Brasil, instalado ao aeromodelo. Para aproveitar o maior rendimento do equipamento nas diferentes condições de voo, é necessário testar o desempenho das hélices na força de tração para mobilizar o avião, assim como, o torque e a potência do motor em função de uma faixa de velocidade que opera durante o voo. Portanto, torna-se necessário o desenvolvimento da bancada para os ensaios experimentais do motor e das hélices do aeromodelo. Essa avaliação se realiza com instrumentos de medida adequados e de *software* para sua coleta, de modo que se possa quantificar os parâmetros do motor utilizado e o consequente aperfeiçoamento da geometria da aeronave.

O projeto tem como objetivo desenvolver uma bancada de ensaios instrumentada para o motor do modelo O.S. 055 AX, padrão das competições SAE Brasil na classe regular. A bancada mensura os principais parâmetros de força de tração do motor, torque, rotação e consumo específico, assim como relacionado as variáveis de torque e rotação no mesmo instante, obtém-se a potência. A proposta contempla o posicionamento dos instrumentos de medida, mas se limita ao projeto, fabricação e validação da mesma, deixando-a apta para demais testes.

Para avaliar uma hélice, requer-se a instalação da mesma em um motor e mensurar seu desempenho. Cada hélice acoplada ao eixo do motor possui suas particularidades, essas estando em movimento ou estáticas, tais como arrasto e a turbulência gerada. Pesquisa explora o levantamento de dados do motor para diferentes tipos de hélices através de uma bancada apropriada.

Uma melhoria nos estudos das características do motor e a definição do melhor desempenho, dos mais variados tipos de hélices, faz com que a equipe de Aerodesign da Faculdade SATC fique melhor conceituada na competição de aeromodelismo SAE, trazendo novos acadêmicos a equipe, e possivelmente atraindo novos investidores à instituição.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O presente capítulo é dividido nos seguintes tópicos: design de produto, desenvolvimento de produto, fases de projeto, motores aeronáuticos, grupo moto-propulsor, eficiência da hélice, medição de torque, medição de potência, medição do consumo específico e bancadas de teste.

2.1 DESIGN DE PRODUTO

Atividade científica de projetar, este é o termo utilizado por Witter (1985) *apud* Niemeyer (2000) para definir o termo Desenho Industrial. Segundo suas considerações, esta atividade possui a capacidade de reunir áreas diversas do conhecimento, para que as necessidades de resolução de problemas de produção do homem e da comunidade sejam atendidas de forma satisfatória.

O atendimento de tais necessidades, de acordo com Löbach (2007) é feito por meio do design industrial, que tem como objetivo adaptar os produtos de uso, fabricados industrialmente, às necessidades físicas e psíquicas de um determinado grupo de usuários. Este processo de adaptação está sujeito a mudanças constantes de conceitos, e requer uma relação de comunicação entre o usuário e o designer industrial, para que sejam feitas as considerações necessárias em suas totalidades. Na concepção de Silva (2011), projetar trata-se de um processo coletivo de comunicação e colaboração dos participantes de uma equipe que busca viabilizar a construção de um produto ainda não existente, ou adequação do mesmo, e em fase de criação. Para isso, os participantes devem expor as informações relevantes a serem consideradas na realização do projeto, possibilitando debates e negociações nas tomadas de decisões.

2.2 DESENVOLVIMENTO DE PRODUTO

Segundo Romano (2003), as etapas para desenvolvimento de um produto se dividem em três macro-fases, planejamento, projeção e implementação, como demonstra a Fig. 1.



Figura 1: Fases do processo de desenvolvimento de produtos

Fonte: Bassetto (2004)



Bassetto (2004) cita que a macro-fase de planejamento envolve as ações para a elaboração de projeto, orientando o desenvolvimento do mesmo nas demais fases. Já a macro- fase de projeção, envolve a transformação das informações de necessidades que o projeto irá precisar em informações técnicas detalhadas da solução proposta. Esta fase é realizada sob os processos de projeto informacional, conceitual, preliminar e detalhado do produto, promovendo um processo evolutivo das informações de projeto. Quanto à fase de implementação consiste na solução técnica proposta e da manufatura para sua produção.

2.3 FASES DE PROJETO

Freitas *et al.* (2014) demonstra que a metodologia para realizar um projeto é separada em fases, sendo elas: projeto informacional, conceitual, preliminar e detalhado.

De acordo com Back (1998) *apud* Ferreira (2002) na fase informacional ocorre o estudo do problema de projeto, a definição do ciclo de vida do produto, o levantamento de necessidades dos clientes, a determinação dos requisitos de projeto e a definição das especificações do projeto. No projeto conceitual, realiza-se o modelamento funcional do componente, a seleção preliminar dos materiais a serem utilizados, junto aos processos de fabricação, a seleção da melhor concepção e a revisão sistemática do projeto conceitual do componente. Na fase de projeto preliminar deve ser realizada a modelagem geométrica aproximada do produto, simulações, desenvolvimento de protótipos e avaliação do custo de produção. Por fim, no projeto detalhado, são realizadas as mesmas tarefas do projeto preliminar, entretanto de uma forma mais profunda e precisa.

2.4 MOTORES AERONÁUTICOS

Aviões de pequeno e médio porte podem sofrer com a diminuição da densidade do ar devido à altitude, por isso, segundo Da Rosa (2006), motores aeronáuticos de combustão interna são geralmente de quatro tempos, no entanto, para aeromodelos podem também ser considerados motores de dois tempos. A

determinação do desempenho do motor é realizada através da caracterização das curvas de potência e torque, que podem ser ensaiadas a partir de uma bancada apropriada com a aplicação de uma carga para frear o mesmo. Para este estudo, pode-se considerar como carga, tanto freios dinamométricos, quanto a própria hélice do motor. No caso da utilização da hélice para o estudo da curva de potência gerada dentro da rotação de trabalho, são necessários testes com variados tipos de hélices, para a obtenção da mais adequada para o projeto.

2.4.1 Grupo Moto-propulsor

De acordo com Rodrigues (2014), o conjunto motor-hélice é denominado como moto-propulsor. Para que haja o perfeito funcionamento do conjunto, o motor deve executar a função de fornecer potência para rotacionar a hélice, com esta rotação, a hélice pode executar sua função de gerar tração e impulsionar o avião. A Fig. 2 mostra a instalação da hélice no eixo, junto ao motor de um aeromodelo. Considera ainda que a partir da rotação do eixo do motor a hélice é colocada em movimento e move suas hélices através do ar, gerando força de sustentação. Tal força de sustentação é denominada como força de tração, e é dada de forma perpendicular ao movimento e paralela ao eixo do motor.

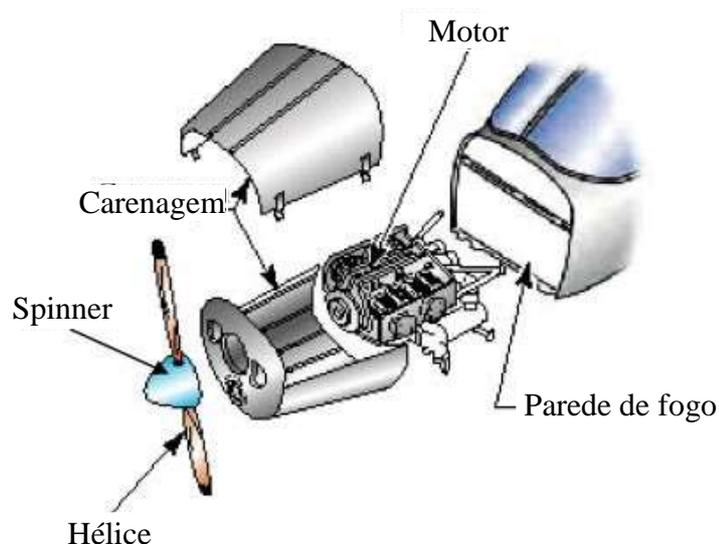


Figura 2: Grupo moto-propulsor
Fonte: Rodrigues (2014)

Rodrigues (2004), diz que devido à indisponibilidade do recurso da hélice



de passo variável para aeronaves de rádio controle, a hélice ideal deve ser encontrada baseada nos limites de atuação que cada uma possui. Hélices com passo grande permitem maior velocidade e menor manobrabilidade às aeronaves, ao contrário das hélices de passo pequeno, que conferem velocidades baixas e maior manobrabilidade. Ou seja, deve-se escolher a hélice mais compatível com o tipo de voo desejado a partir das suas atribuições.

2.4.2 Eficiência da Hélice

De acordo com Miranda (2009) o avanço de uma aeronave está diretamente ligado à eficiência que a hélice irá obter, isto é, a velocidade do voo, o diâmetro e a rotação dela irão determinar qual será seu desempenho. Ainda assim, é de primordial importância que a escolha da hélice seja feita de maneira correta, pois não existe a possibilidade de implantação de hélices de passo variado para aeromodelos de rádio controle, sendo necessária a utilização das hélices de passo fixo, que possuem uma eficiência inferior às de passo variado.

Segundo Rodrigues (2004), uma série de hélices podem ser utilizadas, sabendo que a escolha da mais adequada estará baseada nas características da aeronave em projeto. Fatores como potência do motor e arrasto do avião devem ser observados, pois estes podem se tratar de redutores de eficiência da hélice, uma vez que uma de passo grande não fará o modelo voar mais rápido do que sua capacidade, uma hélice de passo pequeno demais também poderá resultar em perdas de potência e tração. Portanto, para que o propósito da competição AeroDesign seja atendido, é fundamental a escolha da hélice de melhor eficiência, para que esta proporcione maior tração e beneficie o procedimento de decolagem e voo com a maior carga útil possível. A Fig. 3 mostra a relação de passo e avanço do motor.

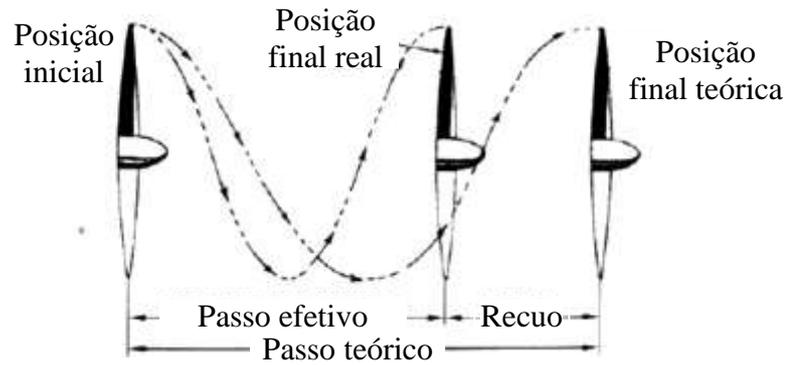


Figura 3: Fatores aerodinâmicos de uma hélice
Fonte: HANGAR 33

2.4.3 Medição de Torque

Para obter uma aeronave com excelentes qualidades de desempenho na competição AeroDesign é de fundamental importância que a tração disponível fornecida pela hélice seja determinada com a maior precisão possível. As técnicas utilizadas para a determinação da tração disponível vão desde uma análise matemática fundamentada em um modelo propulsivo até análises mais sofisticadas como ensaios em túnel de vento, ensaios em voo ou mesmo a utilização de bancadas para testes do motor (MIRANDA, 2009).

De acordo com Cezar (2012), a técnica mais utilizada para fazer a medição do torque em bancadas de teste, é a medição através de células de carga. Para este procedimento, além de ser necessária a calibração do conjunto para a prevenção de erros, é necessário também que os projetos para a célula de carga e o braço de alavanca sejam feitos de forma minuciosa.

$$T = F \times d \quad (1)$$

Onde:

T [Nm]: Torque

F [N]: Força

d [m]: Distância do ponto de aplicação da carga ao centro de giro

2.5 MEDIÇÃO DE POTÊNCIA

Miranda (2009) aponta que a determinação da potência disponível no motor, pode ser conferida pelo produto entre o torque e a velocidade angular do eixo.



Afirma também que quando a rotação aumenta, o motor acaba por produzir menos torque devido à ineficiência da mistura ar/combustível em altas rotações, e por este motivo, quando se tratam de rotações muito elevadas a curva de potência se torna linear e constante, podendo até diminuir. Levando a conclusão de que a hélice mais eficiente é aquela que permite a operação do motor na melhor curva de potência.

Souza (2014) afirma que a medição da potência está atrelada ao produto das medidas de torque e velocidade no mesmo instante, sendo a rotação medida por um encoder de eixo. Explica ainda, sobre o funcionamento básico do encoder de eixo, no qual tem apenas um sinal de saída que consiste em um pulso para cada incremento de deslocamento. Se o movimento é realizado em uma única direção, um contador digital acumula estes pulsos para determinar o deslocamento a partir de um ponto de partida conhecido.

$$W = T \times \omega \quad (2)$$

Onde:

W [W]: Potencia

T [N.m]: Torque

ω [rad/s]: Velocidade Angular

O problema relacionado ao produto dessas duas medidas, segundo Plint e Martyr (1999), é o tempo de amostragem, já que o motor dificilmente trabalha de forma constante por completo, fazendo com que os sinais do transdutor de torque e a velocidade invariavelmente fltuem. Uma leitura instantânea não será necessariamente idêntica à média da mesma em longo prazo. Deve-se escolher o mesmo tempo de amostragem e número de amostragem para a média das medidas, quando estas estão estabilizadas.

2.5 MEDIÇÃO DO CONSUMO ESPECÍFICO

Segundo De Carvalho (2011) o consumo específico representa o consumo mássico de combustível por unidade de trabalho de saída. Um melhor aproveitamento do combustível está associado ao melhor desempenho e menor consumo.

$$CE = \frac{\dot{m}f}{W}$$



(3)

Onde:

CE [kg/kWh]: Consumo Especifico

\dot{m}_f [kg/h]: Vazao Massica de Combustivel

W [W]: Potencia

2.6 BANCADA DE TESTE

Cezar (2012) cita que a base da bancada deve ser suficientemente resistente a ponto de suportar os esforços gerados durante o ensaio, sem comprometê-lo. Comenta também sobre a importância da seleção de isoladores de vibração, já que a inexistência destes equipamentos pode comprometer todo o esforço para o desenvolvimento do projeto, tendo em vista que sua principal função neste caso é reduzir a transmissão das vibrações do motor em teste para o meio e evitar o desnivelamento da base de testes.

De acordo com Leichtweis (2016), a escolha da bancada de testes ideal deve ser feita levando em consideração os diferentes tipos de ensaios que se pretende realizar e as características do motor a ser estudado.

Segundo Lottermann *et al.* (2014), a realização de testes dinâmicos aplicados ao conjunto moto-propulsor de um aeromodelo rádio controlado, voltada a competição SAE AeroDesign, pode significar um aumento expressivo na precisão em relação aos valores de torque e tração disponível durante o voo. Mas ressalta a importância de analisar constantemente a viabilidade técnica em relação à realização destes testes, uma vez que, se executados de maneira grosseira, estes podem representar apenas um acréscimo de trabalho e acabam não refletindo positivamente nos resultados alcançados pela equipe. Nas Fig. 4-a, 4-b, são apresentados alguns modelos de bancadas utilizadas para o mesmo objetivo proposto e utilizados em motor para a competição SAE Aerodesign.



Fig. 4: Bancadas a) Projeto por Leichtweis, (2016), b) Projeto por Lottermann, (2014).

A Fig. 4-a demonstra uma bancada confeccionada por Leichtweis (2016), na qual apresenta de forma detalhada todos os componentes presentes na mesma. Seu princípio de funcionamento se fundamenta em mensurar suas forças com células de carga, semelhante ao proposto pelo presente trabalho. Quanto à bancada descrita no item 4-b, possui uma estrutura e modo de mensurar suas forças diferentes da descrita no item 4-a, onde funciona semelhante a um freio dinamométrico, ou seja, freando o eixo do motor.

3 PROCEDIMENTO METODOLÓGICO

A sequência empregada durante o processo de formulação do projeto da bancada se descreve conforme a Fig. 5, o qual resume a metodologia adotada.

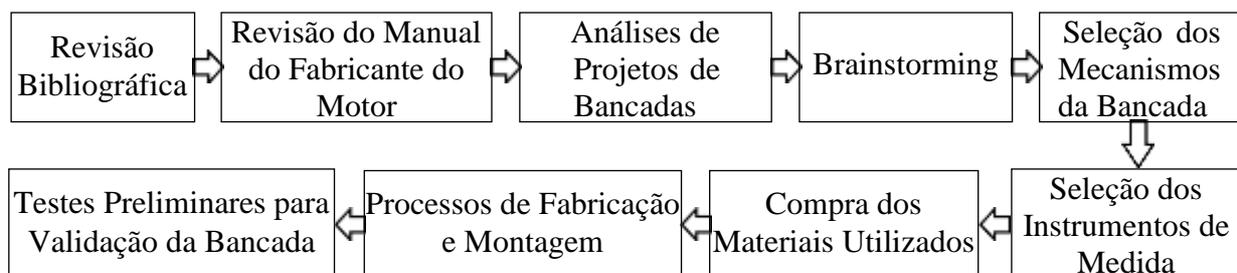


Fig. 5: Sequência das atividades realizadas durante a formulação do projeto



Embasado na revisão bibliográfica, no manual de utilização do motor, e em bancadas construídas para retirar as curvas características do motor, foi possível constatar que a criação da mesma poderia ser realizada de modos distintos. Portanto, foi analisado e comparado cada vantagem e desvantagem de cada proposição, conforme indica a Tab. 1.

Tab 1: Análises dos mecanismos para a formulação do projeto da bancada.

Proposição 1	Escolha	Proposição 2	Escolha
Possibilidade de mensurar o consumo específico utilizando uma célula de carga.	Sim	Possibilidade de mensurar o consumo específico pesando o tanque antes e depois do ensaio.	Não
Medir a velocidade de giro do motor utilizando um Tacômetro.	Não	Medir a velocidade de giro do motor utilizando um sensor de rotação.	Sim
Mensurar o torque utilizando um freio dinamométrico.	Não	Mensurar o torque a partir da força contrária ao giro da hélice.	Sim
Captar os sinais para posterior cálculo do torque, potência e consumo específico.	Não	Realizar uma programação para obtenção instantânea dessas variáveis.	Sim

Com as escolhas das proposições dispostas na Tab.1, partiu-se do pressuposto expresso por Bassetto (2004) referentes às fases que um projeto deve seguir, onde, o projeto informacional foi realizado conforme a revisão bibliográfica expressa no presente trabalho.

Dando início ao projeto conceitual e preliminar da bancada proposta, houve a necessidade do modelamento em ambiente CAD 3D, no *software* SolidWorks®. Com a necessidade de adequar o centro do eixo motor do aeromodelo a uma distância de 9” da base, sendo o diâmetro da maior hélice para este tipo de motor de 14”, e uma folga de 2” para dar a partida no motor utilizando o *starter*.

O tanque de combustível, segundo o manual introdutorial do motor, precisa ser alocado na altura do centro do eixo do motor.

Para a medição do torque deve-se mensurar o movimento de rotação da hélice sem que a mesma seja freada. Para isso, mede-se a força contrária ao giro da hélice, ou seja, o eixo com a hélice tende a girar em sentido horário, enquanto o resto

do motor gira no sentido oposto. A Fig. 6, referente ao projeto preliminar da bancada, sofreu alterações com o decorrer do tempo e das necessidades técnicas revisadas em literatura.

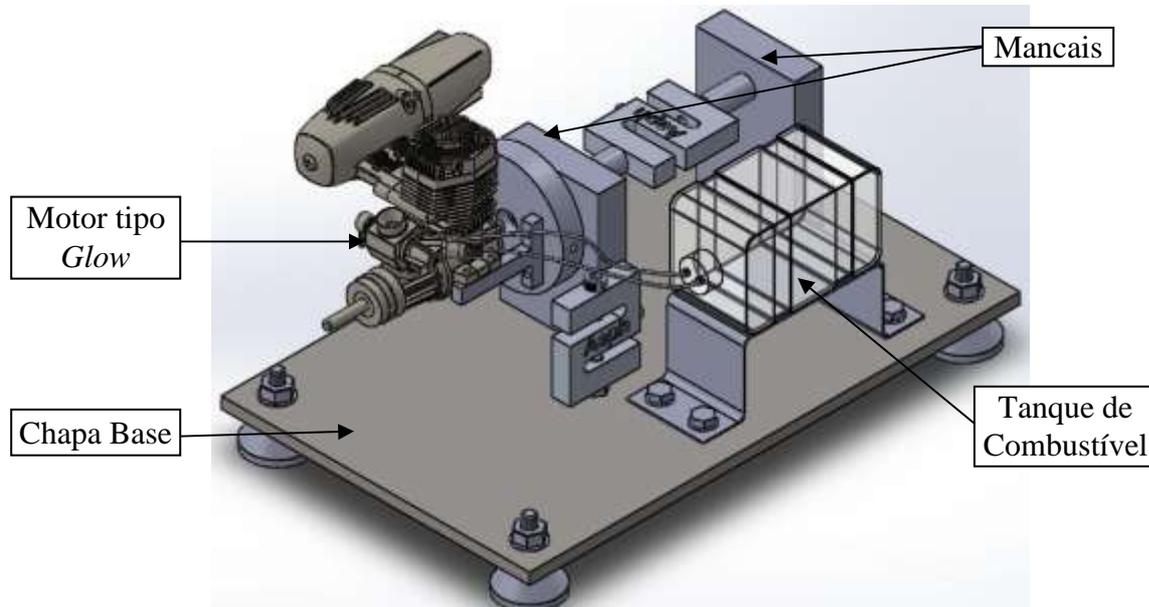


Fig. 6: Projeto preliminar

Analisando que a bancada poderia apresentar pouca estabilidade e rigidez, devido à influência da dinâmica do motor em funcionamento, alterou-se a espessura da chapa base de 1/4", para 3/8". Outro ponto que notou-se que poderia ter pouca estabilidade, foi a área de contato do eixo com os rolamentos dispostos nos mancais, podendo ocorrer a flexão do eixo, distorcendo, mesmo que minimamente, os dados coletados pelas células de carga.

A Fig. 7 demonstra o vão entre os mancais no qual notou-se que era comprido demais, por isso, foi adequado mais um mancal, demonstrado em cor cinza, diminuindo o comprimento entre mancais, dificultando assim, a flexão do eixo.

A possibilidade de apenas encurtar a distância entre os mancais existentes foi estudada, porém descartada devido ao eixo ter apenas dois pontos de apoio, com a carga do motor de um lado e do outro a célula de carga.

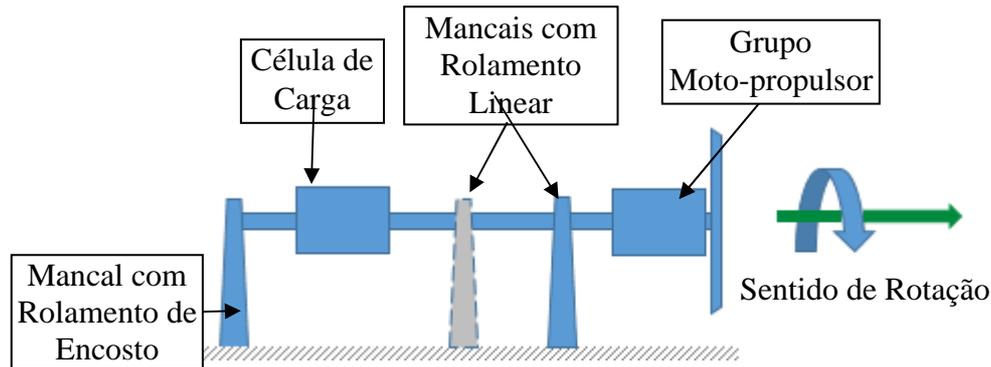


Figura 7: Desenho esquemático da posição do novo mancal

Com o aprofundamento dos estudos, constatou-se a possibilidade de mensurar o consumo específico do motor para os testes a serem realizados, por isso se introduziu uma célula de carga abaixo do tanque de combustível, na qual irá medir a massa do conjunto tanque/combustível a cada instante.

2.5 PROCESSOS DE FABRICAÇÃO

Com as peças e as montagens destas de acordo com o projeto, foi possível fazer o detalhamento técnico para a sua fabricação. Após os itens serem comprados, foi realizado um planejamento da produção e montagem parcial destas.

Para a fabricação da chapa base, foi utilizado um centro de usinagem da marca Hartford, modelo 2016, realizando a programação para usinagem das faces, e também das furações presentes nela, a fim de garantir alinhamento dos mancais.

Dotado do mesmo centro de usinagem, foi realizada a usinagem dos mancais, onde foi necessária uma precisão apurada dos furos onde seriam alocados os rolamentos. Como os mancais localizados a frente da célula de carga de tração na bancada necessitam de deslocamento linear e rotacional, utilizou-se dois rolamentos lineares, marca NTN. Na parte traseira, utilizou-se um rolamento de encosto, marca VBF, e um anel de pressão, garantindo assim que o eixo não se desloque linearmente. Do mesmo modo, utilizando do mesmo centro de usinagem descrito anteriormente, foi usinado as faces do suporte para o berço do motor, no qual é acoplado ao eixo da bancada a fim de transmitir a força de giro e no sentido do eixo.

Os eixos presentes nas bancadas foram usinados em tornos convencionais ROMI, modelo T240, localizados no LAMAN, pertencente à instituição SATC. O eixo

dianteiro apresenta um comprimento maior se comparado ao traseiro. Ambos, com rosca em uma extremidade, a fim de encaixar na célula de carga de tração, presente no centro da bancada.

Para a fabricação dos dois berços do motor, foi utilizado uma fresadora KONE, modelo KFE-3, pertencentes a instituição SATC. Como a peça base apresentava uma espessura muito superior à desejada, a mesma foi primeiramente cortada por uma máquina serra-fita, deixando as duas partes cortadas próprias para usinagem na fresa. A Fig. 8 demonstra as peças mencionadas nos parágrafos acima em estágio de montagem da bancada.

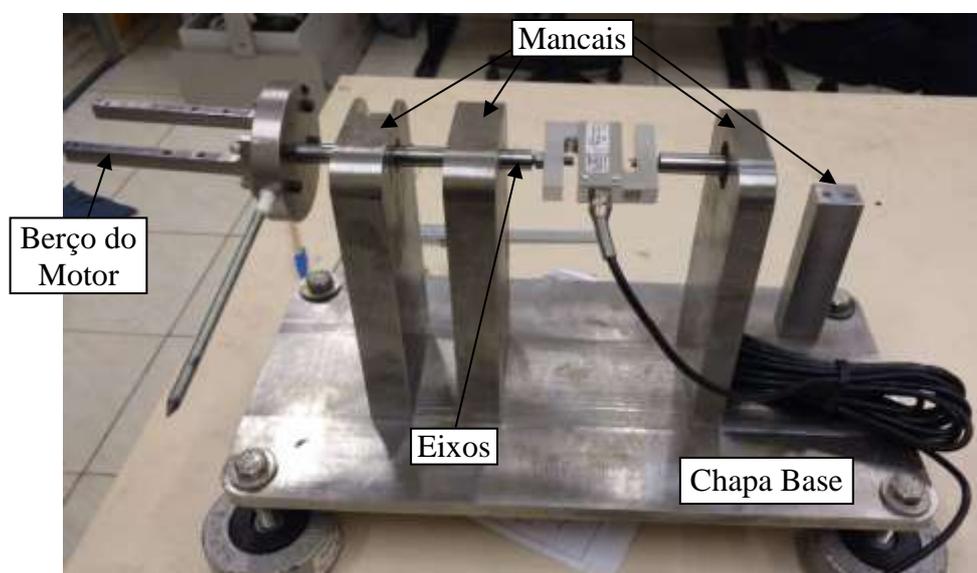
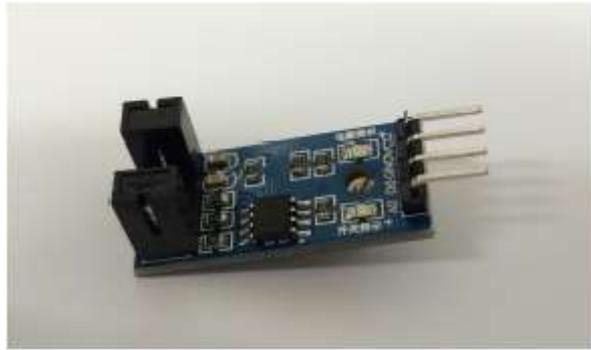


Fig. 8: Bancada em montagem

Como a bancada mede a velocidade de giro do motor, se fez necessário a fabricação de um disco encoder, atrelado a um sensor de rotação, conforme se mostra na Fig. 9.



(a)



(b)

Fig. 9: Sistema de medida da velocidade de giro, a) Sensor de rotação; b) Disco encoder fabricado em impressora 3D.

A partir da necessidade, e das pequenas dimensões para adequá-lo no eixo entre o motor e a hélice, o disco foi produzido em impressão 3D, utilizando uma máquina da marca Cliever, modelo CL1 e material base PLA.

Através da funcionabilidade e características técnicas do sensor, foi fabricado o disco encoder com 4 rasgos, a fim de o sensor conseguir detectar essa diferença de sinais. Relacionando esses espaços vazios de material, a cada 4 não detecção de sinal, contará uma rotação completa.

Para conseguir mensurar o torque fornecido pelo motor, foi adaptado ao berço do motor uma barra roscada, a qual, com um terminal rotular na outra extremidade, transfere a força em sentido perpendicular à célula de carga. Conforme demonstrado na Fig. 10.

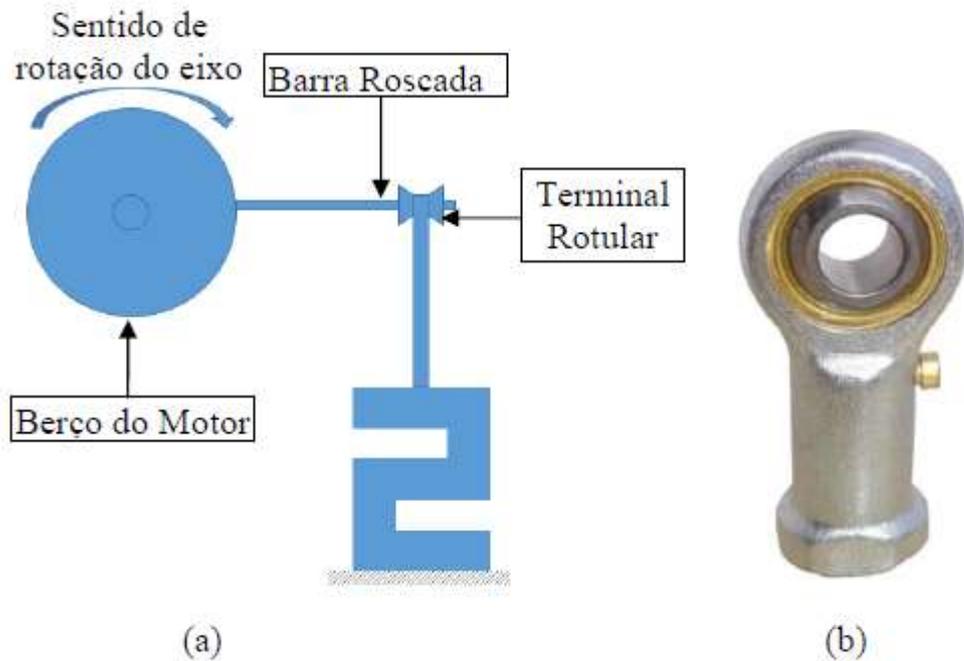


Fig. 10: Modelo para medição do torque, a) Desenho esquemático para mensurar o Torque; b) Modelo de terminal rotular utilizado.

2.6 AVALIAÇÃO DA FREQUÊNCIA NATURAL

Um ponto importante a ser analisado é se o conjunto móvel da bancada não entrará em ressonância devido à rotação do motor. Para isso, foram retirados do projeto base alguns dados importantes, tais como: Módulo de elasticidade dos materiais, no qual foi utilizado o aço SAE 1020, que por norma é de 205 GPa, e o momento de inércia da seção do berço do motor no qual é retirado a partir da seção de onde o mesmo é apoiado.

Para a bancada, o motor é apoiado em duas barras de seção de 10 x 7,5 mm.

$$I = \frac{b \times h^3}{12} \quad (4)$$

Onde:

I [m⁴]: Momento de Inércia da Seção b [m]: Largura

h [m]: Altura



Através da Eq. 4, calcula-se o momento de inércia da seção. Para se determinar o coeficiente de rigidez do material, necessita-se da distância do apoio da base do motor ao centro de massa do mesmo, para isso ao projetar no *software* SolidWorks®, obteve-se a distância de 22,3 mm.

O modelo para calcular o coeficiente de rigidez de uma viga engastada é dado através da Eq. 5.

$$k = \frac{3 \times E \times I}{L^3} \quad (5)$$

Onde:

k [N.m]: Coeficiente de Rigidez

E [GPa]: Módulo de Elasticidade do Material I [m⁴]: Momento de Inércia da Seção

L [m]: Distância do centro de massa ao apoio

Como o motor é apoiado sobre dois berços, divide-se pelo número de apoios seu coeficiente de rigidez, e relacionando com a massa do motor, 0,505 kg, calcula-se a frequência natural do conjunto.

$$\omega n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (6)$$

Onde:

n [rad/s]: Frequência Natural k [N/m]: Coeficiente de Rigidez m [kg]: Massa

2.7 COLETA DE SINAIS

Com a bancada montada, deu-se início aos testes preliminares para seleção dos instrumentos de medida e validar a funcionalidade técnica da mesma. Para isso fez-se necessário conectar as células de cargas presentes na bancada em uma placa de aquisição de dados *National Instruments*, responsável pela conexão entre computador e equipamento. O mesmo foi feito para o sensor de rotação, conectado diretamente a placa.

Com o auxílio do ambiente de programação LabVIEW®, foi possível

realizar um programa para a coleta de dados das células de carga e do sensor de rotação, conforme a Fig. 11.

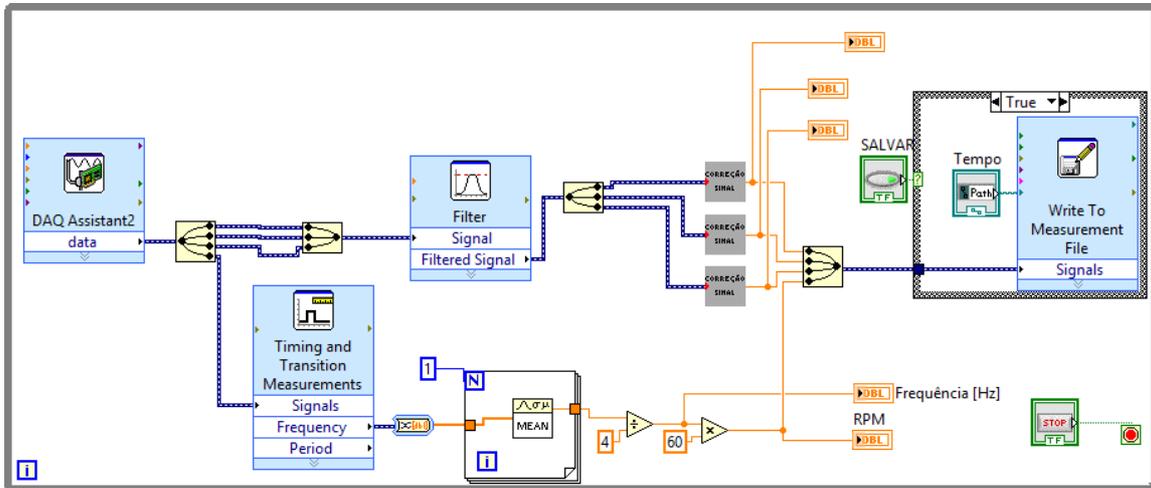


Fig. 11: Programação em blocos no software LabVIEW® para coleta de sinais.

2.8 SELEÇÃO DOS COMPONENTES DE MEDIDA

Para a seleção dos instrumentos pela sua capacidade, foram realizados alguns cálculos a fim de determiná-los com precisão, evitando eventuais erros de medida e sobrecarga no instrumento. Para os testes preliminares para seleção das células de carga de tração, foram adotadas com um *range* máximo de 50 kg. Para a de flexão, como é submetida a uma carga pequena e sem muita variação da mesma, foi utilizada uma célula de carga de flexão com um *range* de 10 kg.

Para a seleção da célula de carga que trará a relação do torque, foi utilizada a Eq. 1 na qual depende da tração máxima retirada do teste preliminar, e a distância do centro de giro ao ponto de aplicação da força, na qual, retirada do software SolidWorks®, é de 0,068 m.

Para a célula de carga de medição da tração, foi possível determinar a capacidade máxima da mesma apenas dividindo seu valor de tração máximo pela gravidade.

Já para a escolha adequada da célula de carga de flexão utilizada para determinar o consumo específico, é importante conhecer a densidade do combustível utilizado, no qual é utilizado o Metanol, um composto de nitrometano e óleos, e possui uma densidade de 792 kg/m³. Através da Eq. 7, calcula-se a massa do combustível,



onde, somado a massa do tanque se obtém a massa que a célula de carga será submetida.

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (7)$$

Onde:

ρ [kg/m³]: Densidade ρ

m [kg]: Massa

v [m³]: volume

Além destes componentes, alguns dos itens utilizados para a confecção da bancada são de cunho comercial.

3 RESULTADOS E ANÁLISES

Os resultados são separados por partes, primeiro com a verificação da frequência natural do sistema móvel com posterior seleção dos componentes de medida, e a apresentação da bancada proposta em ambiente CAD 3D, e a mesma montada, junto a sua validação.

3.1 ANÁLISE DA FREQUÊNCIA NATURAL

Os cálculos do momento de inércia, coeficiente de rigidez e frequência natural são mostradas na Tab. 2.

Tab. 2: Resultados para a frequência natural do conjunto

Momento de Inércia	625,00 mm ⁴
Coeficiente de Rigidez	34,66x10 ⁵ N.m
Frequência Natural	11.716,27 rad/s

Com base nos cálculos da Tab. 2, obtém-se a velocidade crítica do motor junto ao conjunto móvel da bancada, sendo de 11.716,27 rad/s, a qual teria o condição de ressonância.

O fabricante do motor de modelo O.S.055 AX determina a velocidade



angular máxima do mesmo, sendo de 17000 rpm, ou aproximadamente 1780,24 rad/s. O ponto de mínima velocidade para o motor, é a mínima rotação para o motor estar em funcionamento, podendo variar de acordo com as hélices, sendo de aproximadamente 2200 rpm (230,38 rad/s).

Portanto, o valor calculado, frequência natural do primeiro módulo de vibrar, encontra-se fora da faixa de velocidade em que o motor irá ser testado, no caso, o mais próximo possível da velocidade máxima para obter a hélice de maior eficiência. Comparando com os dados expressos pelos testes preliminares da rotação do motor com a frequência natural do sistema, nota-se que a velocidade crítica é extremamente alta, na qual não é possível de se alcançar com o modelo de motor utilizado.

3.2 SELEÇÃO DOS COMPONENTES DE MEDIDA

Através dos testes preliminares utilizando duas hélices diferentes, uma modelo 11x7 (diâmetro x passo) e outra 12x6, obteve-se o máximo torque e a tração máxima ao qual foi submetido o motor. Na tabela 3 se mostram os valores dos torques para cada modelo.

Tab. 3: Teste preliminar utilizando células de carga de maior capacidade

Hélice Utilizada	Modelo 11x7	Modelo 12x6
Torque Máximo	0,6617 N.m	0,6566 N.m
Tração Máxima	33,6661 N	35,1994 N

Com os resultados demonstrados conforme Tab. 3, foi possível realizar os cálculos expressos no procedimento metodológico, determinando-se assim a força máxima que cada célula de carga será submetida, a Tab. 4 representa estes valores e a capacidade adotada para cada célula.

Tab. 4: Escolha da célula de carga para cada aplicação

Aplicação	Carga Máxima	Capacidade Adotada
Torque	0,9919 kg	5 kg
Tração	3,5881 kg	10 kg
Consumo Específico	0,3584 kg	5 kg

Portanto, para mensurar o torque, foi adequada uma célula de carga de tração/compressão tipo S, modelo TS, com capacidade para 5 kg. Já para medir a tração, foi utilizada uma célula de carga de tração/compressão tipo S, modelo TS, com capacidade para 10 kg. Já para o consumo específico, uma célula de carga de flexão, modelo SPLT, com capacidade para 5 kg.

3.2 DETALHES DA BANCADA

Com o projeto da bancada no *software* SolidWorks® realizado, e com algumas mudanças realizadas acima do projeto preliminar, a que se apresenta na Fig. 12.

Detalhes do motor e os sensores são apresentados na Fig. 13, como desenho em SolidWorks® e uma foto da instalação do sensor de velocidade. Como o motor apresenta um tamanho e diâmetro de eixo padrão, e sem haver a possibilidade de modificá-lo, teve-se a necessidade de adequar o sensor de rotação em uma posição que não haveria a possibilidade de se chocar com a hélice e nem interferir no seu resultado.

Outra maneira estudada foi a de inserir um mancal somente para o sensor, porém descartada, pelo fato do motor possuir um deslocamento linear devido a sua força de tração, e que este mancal não seria possível de se deslocar junto. A Fig. 13 demonstra como foi feita a adequação devido à limitação de espaço para o conjunto.

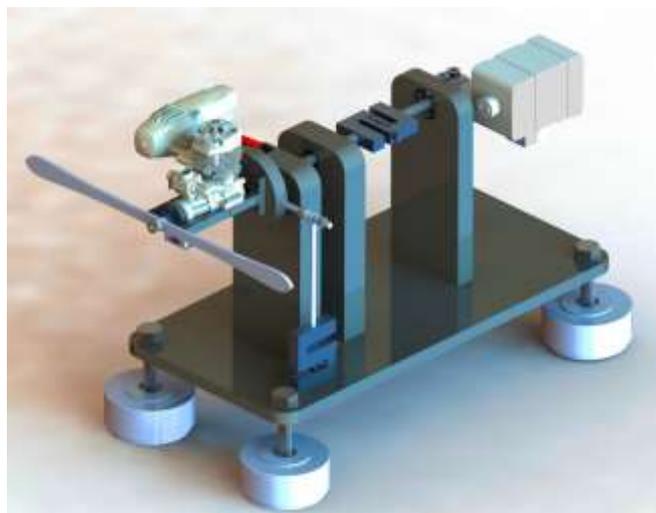


Fig. 12: Bancada projetada em ambiente CAD 3D.

A proposta de bancada, apresentada na Fig. 12, é dotada de duas células de carga de tração/compressão, uma célula de carga de flexão e um sensor de velocidade. Conta também com quatro mancais, dois eixos, uma chapa base, 4 pés antivibratórios, uma base para o motor, elementos de fixação e de transmissão de força.

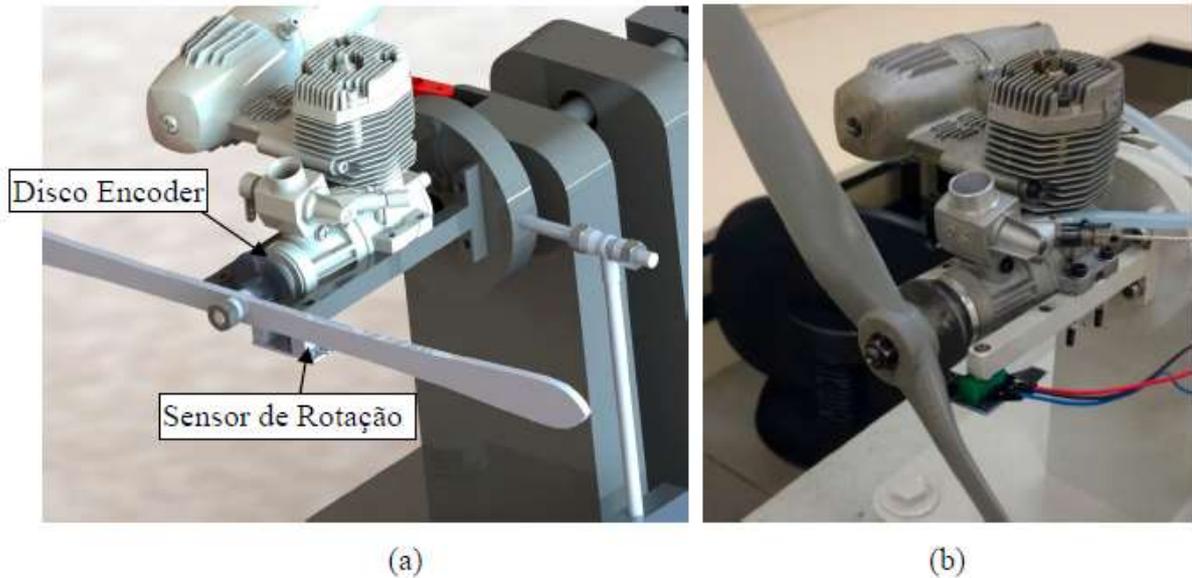


Fig. 13: Detalhe do sensor de rotação, a) Bancada em ambiente CAD 3D; b) Bancada confeccionada.

Com a bancada montada e própria para uso, conforme a Fig.14, foi possível realizar os ensaios para validação da mesma.

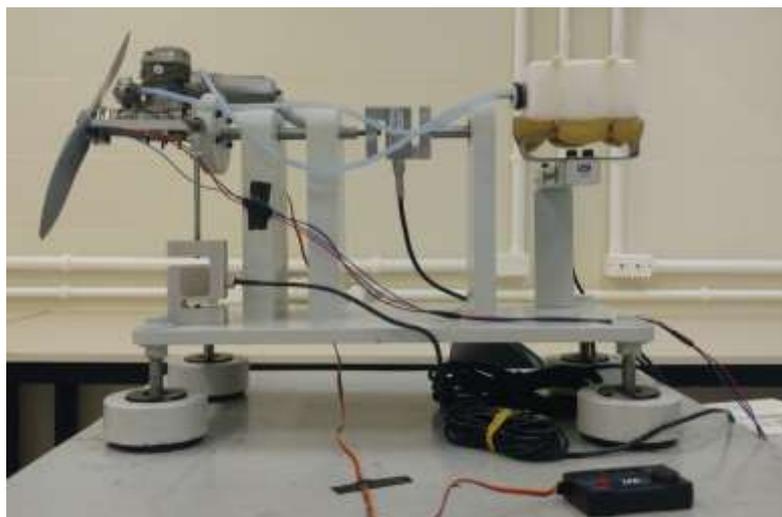


Fig. 14: Bancada com os sensores instalados.

A bancada devidamente instrumentada é mostrada na Fig. 15. O

equipamento esta instalado para o processo de coleta de sinais com o motor em funcionamento. Os ensaios utilizados são em modo estático.

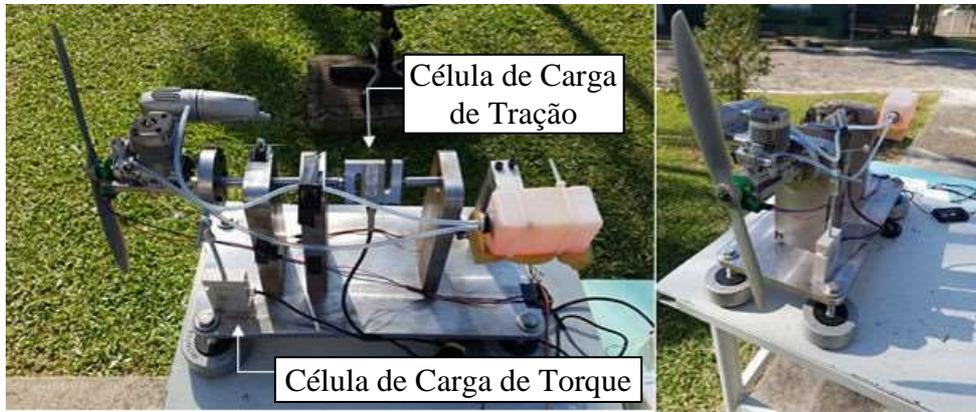


Fig. 15: Bancada instrumentada para teste.

Após a bancada estar devidamente instrumentada, foi possível coletar os sinais para os testes funcionais da mesma. Para isso, foram realizados testes utilizando duas hélices diferentes em sua estrutura, sendo uma hélice modelo 12x6 e outra 11x7. Foi obtido portanto, sinais de torque e tração, pela sua rotação, conforme Fig. 16 e Fig. 17, coletados através do ambiente de programação LabVIEW®.

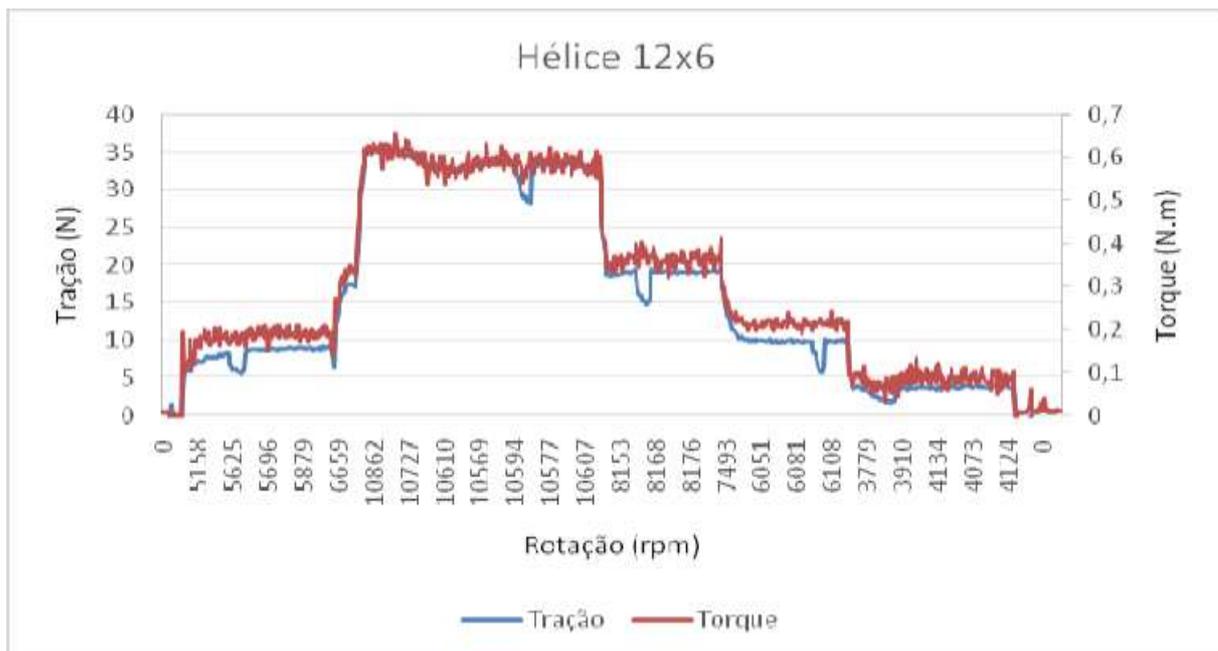


Fig. 16: Gráfico de tração e torque pela rotação para a hélice 12x6.

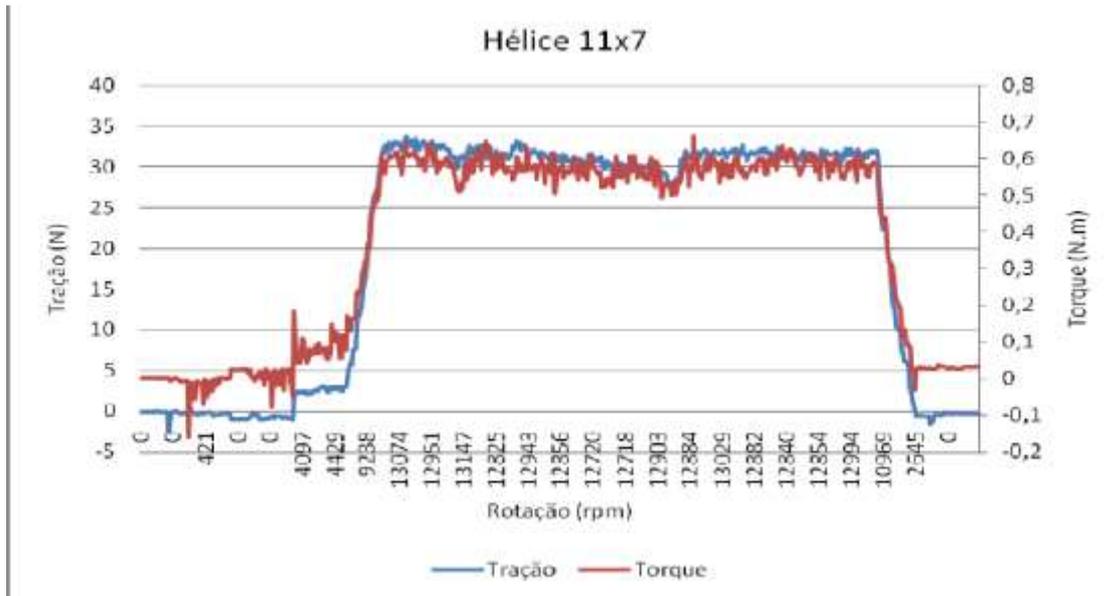


Fig. 17: Gráfico de tração e torque pela rotação para a hélice 11x7.

Nota-se, na apresentação dos dados dispostos nas Fig. 16 e Fig. 17, uma linearidade dos dados para uma rotação média, obtendo uma leitura precisa e constante, sendo de fácil entendimento e observação a comparação dos dados de uma para a outra.

Uma relação entre o torque e sua rotação, trará uma medida exata de potência para cada instante coletado. A Fig. 18 demonstra a potência pelo tempo, deixando clara a possibilidade de obter este parâmetro para diferentes hélices.

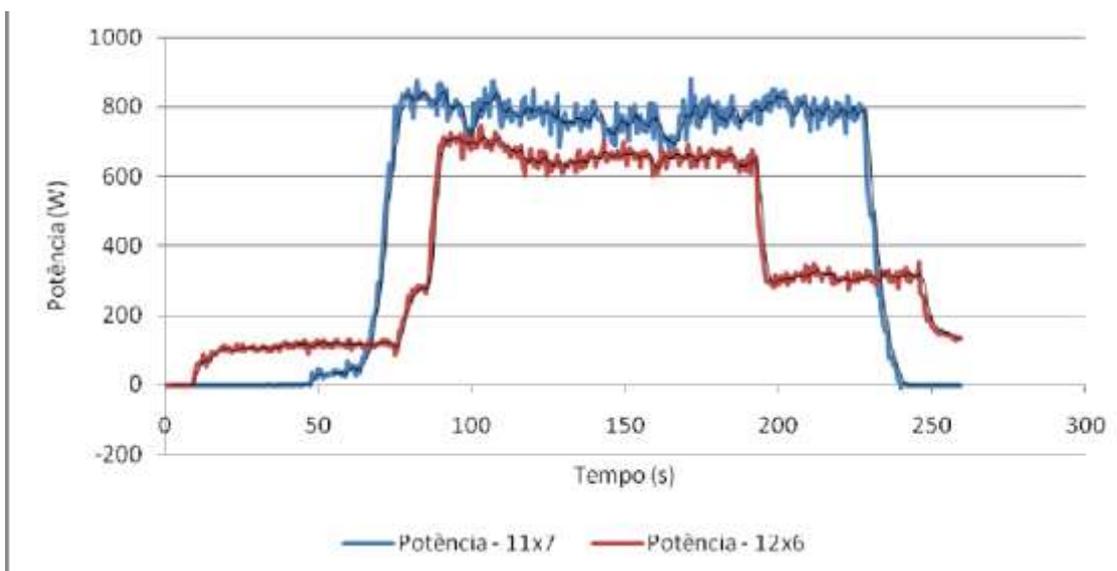


Fig. 18: Gráfico da potência pelo tempo para a hélice 11x7 e 12x6.



Os sinais apresentaram a informação requerida para o padrão de ensaio, que foi acelerar o motor e manter o mais constantes possíveis, verificando se havia variações excessivas nos sinais coletados. Portanto, percebe-se que a bancada fornece informações confiáveis nos dados de saída.

4 CONCLUSÃO

Com a conclusão do presente trabalho pode-se chegar às seguintes considerações:

- A rigidez dos componentes da bancada é de fundamental importância, devido à necessidade de não influenciar na coleta dos sinais.
- A frequência natural do sistema móvel da bancada apresentou um valor alto, o qual não é atingido com as faixas de velocidades angulares do motor utilizado na bancada. Ou seja, em nenhuma faixa de rotação do motor os resultados serão influenciados pela vibração do sistema.
- A necessidade de uma avaliação precisa dos instrumentos de medida, os quais influenciam diretamente nos sinais coletados. Se os sensores tiverem uma capacidade mais baixa que a carga a qual é submetida, podem danificar o instrumento. Se forem muito acima, a resolução dos sinais coletados diminuem.
- Notou-se que para avaliar o consumo específico necessita-se de um tempo de amostragem menor, devido à pequena variação da sua massa durante a coleta dos sinais. Isso se deve também a incerteza que o instrumento de medida pode trazer consigo, junto à interferência dos ruídos da rede elétrica. Por esse motivo, não foi possível obter dados concretos e fieis a realidade. Porém, com uma correta programação utilizando um filtro no *software* que irá coletar os sinais, é possível obter estes dados do consumo específico.
- A bancada apresentou valores coerentes para tração e torque, tornando-a confiável para posteriores testes do motor com diferentes hélices.
- Os testes devem ser padronizados, a fim de melhor comparar os dados coletados.
- Para uma melhor avaliação dos dados coletados, os testes devem apresentar uma menor variação nos pontos de velocidade no qual o motor é submetido, a fim de realizar uma média dos pontos e traçar um gráfico condizente aos que o de um motor



apresentam.

- A bancada com uma correta instrumentação e um estudo aprofundado de uma hélice eficiente para o motor trará benefícios significativos para a equipe AeroSatc na competição SAE Brasil Aerodesign.

Como sugestão para trabalhos futuros, seria interessante a substituição do material do disco encoder, no qual a altas velocidades de giro do motor, tende a deformar, devido ao material utilizado ser um polímero. Outro ponto para estudo é a substituição do meio que transmite a carga à célula de carga que mensura o torque, pois não garantiu fielmente a perpendicularidade da força.

Outra possibilidade é a substituição dos rolamentos lineares por guias deslizantes.

REFERÊNCIAS

Aerodesign. Disponível em: <http://portal.saebrasil.org.br/programas-estudantis/sae-brasil-aerodesign>. Acesso em: 21 de março de 2017.

Bassetto, E. L., 2004, “Proposta de Metodologia para o Ensino das Fases de Projeto Informacional e Projeto Conceitual.” Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis/SC, Brasil.

Cezar, G. V., 2012, “Desenvolvimento de uma Bancada de Testes para Motores a Combustão Interna”, Dissertação de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC-Rio, Rio de Janeiro/RJ, Brasil.

Da Rosa, E., 2006, “Introdução ao Projeto Aeronautico. Uma contribuição à competição SAE Aerodesign”, Ed. Tribo da Ilha, Florianópolis.

De Carvalho, M. A. S., 2011, “Avaliação de um Motor de Combustão Interna Ciclo Otto Utilizando Diferentes Tipos de Combustíveis.” Programa de Pós-graduação de Engenharia Industrial, Universidade Federal da Bahia, Bahia/BA, Brasil.

Ferreira, C. V., 2002, “Metodologia para as Fases de Projeto Informacional e Conceitual de Componentes de Plástico Injetados Integrando os Processos de Projeto e Estimativa de Custos.” Tese de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis/SC, Brasil.

Freitas, F. L., *et al.*, “Processo de Desenvolvimento de Produto: Aplicação em um Projeto de P&D dentro do Programa Aneel.” XXIV Seminário Nacional de Parques Tecnológicos e Incubadoras de Empresas, Setembro, 22 a 26, 2014, Belém, PA,



Brasil.

HANGAR 33. Como as Hélices Funcionam. Disponível em:

<http://blog.hangar33.com.br/como-as-helices-funcionam/>. Acesso em: 17 de outubro de 2017.

Leichtweis, A. C. D., 2016, “Desenvolvimento de uma Bancada para Testes de um Motor de Pistão Tipo Glow”, Trabalho Final de Curso, Faculdade Horizontina-FAHOR, Horizontina/RS, Brasil.

Löblich, B., “Design Industrial: Bases para a configuração dos produtos industriais”. Ed: Blücher, São Paulo, 2007.

Lottermann, L. J. et al., “Aplicação de Ensaios de Tração Dinâmica no Conjunto Moto Propulsor de uma Aeronave Radio Controlada para Competição Sae Aerodesign” XIV Congresso Nacional de Engenharia Mecânica e Industrial – CONEMI, Setembro, 23-26, 2014, Salvador, BA, Brasil.

Miranda, L. (2009). Fundamentos da Engenharia Aeronáutica Aplicações ao Projeto SAE AERODESIGN. Disponível em: http://www.engbrasil.eng.br/index_arquivos/Page364.htm. Acesso em: 20 de maio de 2017.

Niemeyer, L., “Design no Brasil: origens e instalações”. 3 ed. Rio de Janeiro, editora 2AB, 2000.

O.S. Engine. “Introduction Manual MAX-55AX.”

Plint, M., martyr, A. J., 1999, “Engine Testing Theory and Practice”. 2. ed., SAE International.

Rodrigues, J. C., Aerodelismo Teórico e Prático. Versão Digital Comemorativa dos 40 Anos de Edição por José Manuel Padinha Colarejo, 2004. Disponível em: <https://www.passeidireto.com/arquivo/17000849/livro-aerodelismo-teorico-e-pratico---jose-carlos-rodrigues>. Acesso em: 10 de abril de 2017.

Rodrigues, L. E. M. J., 2014, “Fundamentos da Engenharia Aeronáutica com Aplicações ao Projeto SAE-AeroDesign: Aerodinâmica e Desempenho”. Ed. Salto, 1ª edição, São Paulo.

Romano, L. N., 2003, “Modelo de Referência para o Processo de Desenvolvimento



de Máquinas Agrícolas.” Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica – Programa de Pós- Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis/SC, Brasil.

SAE no Brasil. Disponível em: <http://portal.saebrasil.org.br/a-instituicao>. Acesso em: 21 de março de 2017.

Silva, F. D. M., 2011, “O CAD Aplicado ao Projeto do Produto: O Ponto de Vista dos Designers Industriais”. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, Rio de Janeiro/RJ, Brasil.

Souza, S. M. Z. V., 2014, “Projeto de Calibração de Célula de Carga para Aplicação em Dinamômetro Hidráulico com Medição de Curva de Torque e Potência em Motor Otto”, Projeto de Graduação, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro/RJ, Brasil.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente à Deus, por me permitir chegar até aqui. Sem Ele, nada seria possível. Agradeço a minha família e minha namorada, que sempre estiveram presentes e me dando todo suporte necessário para eu finalizar esta caminhada. Aos acadêmicos e amigos Cristian Zehnder, Renato Ghellere e Rodrigo Metzger, por todo o apoio e ajuda neste trabalho. Por fim, agradeço ao meu orientador Dr. Eng. Elvys Isaias Mercado Curi, que depositou sua confiança em mim para executarmos este projeto.