

DESENVOLVIMENTO DE UMA BANCADA DE TESTES DE MOTORES UTILIZADOS EM *DRONES* - CONCEITUAÇÃO E MODELAGEM

Eduardo Silva Lima, eduardo.lima.1@aluno.cefet-rj.br¹
Edielson Pasche Nunes, edielson.nunes@aluno.cefet-rj.br¹
Fabio P.Cardoso, fabio.cardoso@cefet-rj.br¹

¹ Centro Federal de Educação Tecnológica, Endereço: Estrada de Adrianópolis, 1.317 Santa Rita – Nova Iguaçu/RJ - CEP: 26041-271

Resumo. Este trabalho tem como objetivo desenvolver uma bancada de teste para um conjunto motopropulsor (motor e hélice) de drones/VANT's. Essa bancada será responsável por avaliar os parâmetros de torque e empuxo gerado pelo motor e a hélice. A avaliação dessas características é fundamental para otimizar o desempenho e a eficiência dos drones. A bancada será equipada com duas células de carga para medir tanto o torque quanto o empuxo, um sensor HW-201 para coletar a rotação em RPM, e uma microcontroladora Arduino para processar e armazenar os dados. Além disso, sua estrutura contará com perfis em V-slot, proporcionando maior rigidez e flexibilidade no design. Os resultados contribuirão de maneira significativa para o reparo, aprimoramento e no desenvolvimento de novos modelos, tornando essencial a criação dessa bancada para o avanço da tecnologia de drones.

Palavras chave: drone, Bancada, Motor, Tração, Torque.

Abstract. This work aims to develop a test bench for a propulsion system (motor and propeller) of drones/UAVs. This bench will be responsible for evaluating the torque and thrust parameters generated by the motor and the propeller. Assessing these characteristics is fundamental for optimizing the performance and efficiency of the drones. The bench will be equipped with two load cells to measure both torque and thrust, an HW-201 sensor to collect RPM data, and an Arduino microcontroller to process and store the collected data. Additionally, its structure will feature V-slot profiles, providing greater rigidity and flexibility in the design. The results will significantly contribute to the repair, enhancement, and development of new models, making the creation of this bench essential for advancing drone technology.

Keywords: Drone, Workbench, Engine, Traction, Torque.

1. INTRODUÇÃO

Os *drones*, ou VANTs, são aeronaves que funcionam remotamente ou de forma autônoma. Eles têm usos variados na indústria, como em emergências, busca em desastres, combate ao crime e monitoramento ambiental. Para garantir segurança e eficiência, é crucial desenvolver um sistema de controle estável. O controle é feito por comandos do operador, que ajusta a velocidade dos motores. O projeto sugere uma bancada para medir tração e empuxo de motores elétricos com hélices de até 12 polegadas.

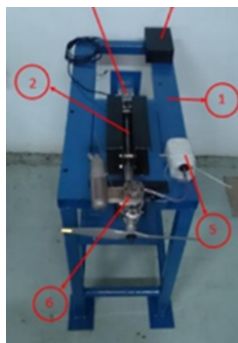
2. ESTADO DA TÉCNICA:

Segundo os estudos de Leichtweis (2023), em projetos de aerodesign, é necessário coletar dados como tração e rotação do motor, usando hélices recomendadas pelos fabricantes. A análise de desempenho busca escolher o conjunto mais eficiente baseado nos dados coletados. Os testes realizados mostraram resultados satisfatórios, especialmente em comparação com valores anteriores.

De acordo com Alexandre Zanardi (2021), é essencial verificar medidas de torção, potência e rotação no desenvolvimento de uma aeronave. A fundamentação da tração fornecida pela hélice é crucial, e uma bancada de teste para motores brushless CC foi desenvolvida. Os testes realizados foram aceitos e a bancada foi considerada segura.

A bancada de Otávio Ronconi Amboni (2018) mede torque, rotação, potência e consumo específico de motores a combustão, analisando a ressonância em diferentes velocidades. Testes foram feitos com várias hélices, levando a resultados coerentes para competições da SAE Brasil.

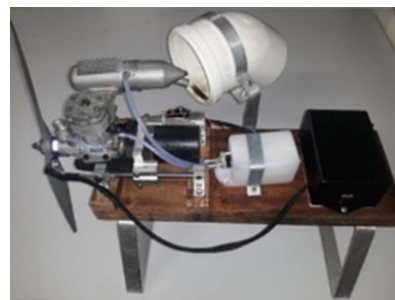
Os estudos de Tavares (2022) sobre VANTs ressaltam a necessidade de sistemas de controle confiáveis. Uma bancada de testes foi desenvolvida para obter parâmetros de comando-empuxo e suas respostas. Apesar de alcançar os objetivos, melhorias são necessárias, como o estudo das frequências naturais da estrutura devido à ressonância. O principal objetivo da bancada é coletar dados variados de motores, assegurando segurança e análise simplificada.



(a) Exemplo: Bancada da FAHOR.



(b) Exemplo: Bancada da UFPR.
Figura 1: Bancada de referencia



(c) Exemplo: Bancada da UFG.

2.0.1 SISTEMA DE CONTROLE

A plataforma *open source* Arduino é utilizada para desenvolver projetos de eletrônica e possui uma serie de opções de arquiteturas disponíveis no mercado (Fig. 2).



Figura 2: Arduino

Para desempenhar a gestão de dados da bancada, a unidade escolhida para dar inicio ao projeto foi o modelo Arduino R3 que será responsável por estabelecer a comunicação entre a interface gráfica e os sensores.

Para captação dos dados gerados pela bancada é possível utilizar alguns sensores de baixo custo baseados em sistemas microeletromecânicos, como no caso das células de carga e dos sensores infravermelhos.

A célula de carga (Fig. 3a) é um conjunto corpo sólido + sensor, construído à partir de um corpo sólido, cujas características geométricas permitem a sua fixação ao aparato experimental, e um sensor capaz de converter a deformação do corpo do sensor em um sinal elétrico, à partir do princípio de resistência elétrica - Lei de Ohm. Quando a célula é deformada pela carga, a sua resistência é alterada o que resulta num sinal elétrico.



(a) Célula de carga + HX711.



(b) Sensor infravermelho.

Figura 3: Sensores típicos

Como o sinal gerado é muito fraco, este conjunto trabalha em combinado com o módulo HX711, que por sua vez, amplifica esse sinal elétrico gerado pela célula de carga e converte o sinal analógico em digital, permitindo que seja interpretado pela placa microcontroladora. Na bancada, serão utilizados dois conjuntos de célula de carga e HX711, e as forças capturadas serão convertidos em torque e empuxo.

Já o sensor de interferência HW-201 (Fig. 3b) é um dispositivo que detecta a presença de obstáculos sem a necessidade de contato físico. O sensor funciona emitindo luz infravermelha, quando encontra um obstáculo a luz é refletida de volta para o sensor.

2.1 Conjunto Moto-Propulsor

O motor brushless - BLDC (ver Fig. 4a) é um motor elétrico que utiliza um sistema eletrônico para controlar a corrente nas bobinas, tornando sua operação mais eficiente e confiável do que motores DC e de combustão. Suas características principais são durabilidade, eficiência energética e baixa manutenção. Motores brushless são populares em *drones* e aeromodelos devido à sua alta performance.



(a) Motor *Brushless*.



(b) Controlador Eletrônico de velocidade (ESC).

Figura 4: Alguns componentes do conjunto moto-propulsor

O controlador eletrônico de velocidade (ESC) regula a velocidade de um motor elétrico, especialmente os brushless. Ele atua como um intermediário entre a bateria e o motor, controlando a energia que chega a ele. O ESC ajusta a velocidade, possibilita aceleração e inversão de direção, útil em *drones*, e monitora a temperatura e corrente, protegendo o motor de sobrecargas e superaquecimento.

2.2 Parâmetros do Conjunto Moto-Propulsor

O torque em motores brushless está ligado à sua força rotacional, gerada pela interação dos campos magnéticos e proporcional à corrente elétrica nas bobinas do estator. Segundo estudos de Cezar (2012), o torque pode ser medido de forma direta ou indireta, sendo esta última mais comum e exigindo calibração e correta posição da célula de carga. Considerando torque (Q), a força mecânica (F) e a distância (d) do braço de alavanca ocorre que:

$$Q = F \cdot d \quad (1)$$

Para motores elétricos, especialmente motores sem escovas, a equação do torque pode ser tanto relacionada à corrente, ao número de espiras e ao campo magnético. Assim, considerando a corrente elétrica (I) o campo magnético (B), o número de bobinas e o ângulo do vetor do campo magnético e o vetor normal a espira (θ), o torque desenvolvido pelo motor fica:

$$Q = N \cdot I \cdot B \cdot \sin \theta \quad (2)$$

De acordo com estudos de Pinheiro (2014), o coeficiente de torque (K_Q) é o coeficiente que relaciona o torque gerado pelo motor e as características do fluido (massa específica do fluido ρ), e as características do escoamento, à saber, a rotação (n) e o diâmetro do hélice (D). Dessa forma, para o coeficiente K_Q , a Eq. 3 fica:

$$K_Q = \frac{Q}{\rho \cdot n^2 \cdot D^5} \quad (3)$$

O empuxo gerado pelos propulsores é a força responsável pela sustentação do voo, em particular em multirrotores, e que pode ser descrito pela Eq. 4 que relaciona o empuxo (T), a massa específica do fluido (ρ), a área da pá do hélice (A) e a velocidade angular do hélice (ω).

$$T = \rho \cdot A \cdot \omega^2 \quad (4)$$

Ainda de acordo com estudos de Pinheiro (2014), a Eq. 5 expressa a relação entre o empuxo provocado e as características do escoamento e do fluido. Conforme a Eq. 5, o coeficiente de empuxo (K_T) é dado por:

$$K_T = \frac{T}{\rho \cdot n^2 \cdot D^4} \quad (5)$$

Já a potência de saída (P) também está relacionada ao torque e à velocidade angular do motor pela Eq. 6:

$$P = Q \cdot \omega \quad (6)$$

No entendimento de Rodrigues (2013), quando um torque específico é aplicado, um valor alto de K_Q limita a corrente a um nível mais baixo. Essa relação é crucial para avaliar a eficiência do sistema, pois o consumo reduzido de corrente resulta em menor dissipação de energia. Além disso, como o torque é proporcional à velocidade, podemos representar isso graficamente, mostrando que o torque diminui com o aumento da velocidade.

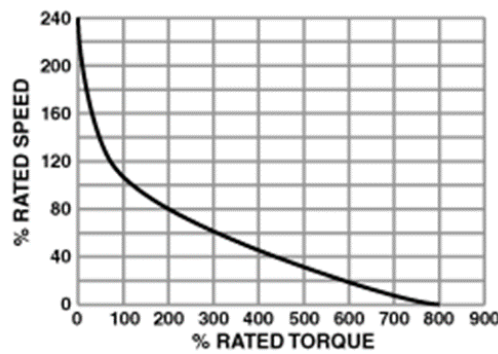


Figura 5: Exemplo da relação entre torque e velocidade.

3. METODOLOGIA

O objetivo avaliar o desempenho do grupo motopropulsor em diferentes condições operacionais. Este estudo é experimental, direcionado especificamente para motores elétricos de *drones*.

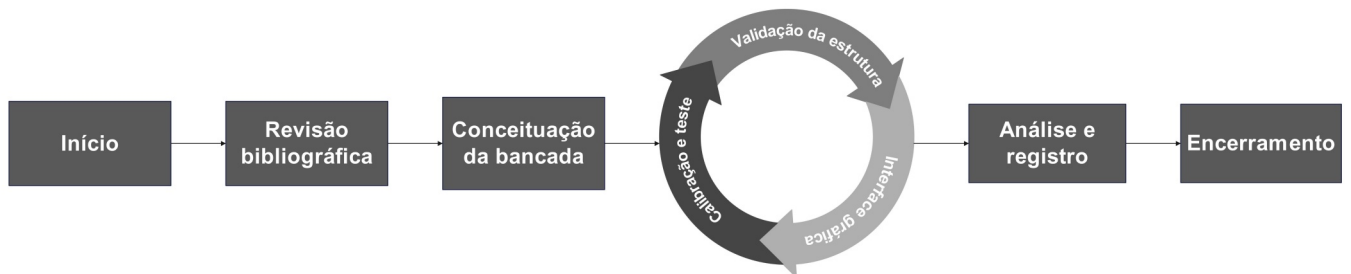


Figura 6: Sequência de atividades

3.1 Materiais e métodos:

A bancada em desenvolvimento servirá como plataforma de testes para os conjuntos moto-propulsores de VANTs, e demandará instalação tanto de controladores de velocidade (ESC), hélices, a serem testados, quanto as células de carga, demais sensores e microcontroladores além da bateria em uma infraestrutura estruturada.

3.2 Procedimento:

O procedimento inicia com a definição da bancada de teste, importante para a finalidade e requisitos do experimento. Depois, valida-se a estrutura para garantir a integração dos componentes. Em seguida, desenvolve-se a interface gráfica para facilitar a comunicação do sistema com o usuário. Permitindo a coleta de dados e ajustes em tempo real. Monta-se a bancada conforme o projeto, seguidas pela calibração de sensores. Testes são realizados variando velocidade, modelo do motor e tipo de hélice, coletando dados de torque, empuxo e RPM. Por fim, todos os dados são organizados para análise e conclusões sobre o desempenho da bancada.

3.3 Sistemática para a captura e análise de dados:

O software escolhido para desenvolvimento da interface homem-máquina foi o Visual Studio, com a linguagem Visual Basic.

Nesse ambiente de desenvolvimento é possível desenvolver uma interface que conecte a bancada e seus eletrônicos com o computador, permitindo assim o processamento dos dados gerados pela bancada, e por sua vez os relatórios dos testes à partir das informações de sensores.

3.4 Processo de prototipagem:

A integração dos componentes, para um futuro prototipo da bancada, será feita em etapas para facilitar ajustes e correções.

Na primeira etapa, será feita a comunicação entre o Arduino e a interface gráfica, além do sensor HW-201 para coleta do RPM e exibição em tempo real.

A segunda etapa envolve montar a base da estrutura, fixar a célula de carga, implementar a equação do empuxo, calibrar e plotar resultados em tempo real.

A terceira etapa consiste em definir o elemento de absorção de vibração, posicioná-los abaixo da estrutura principal, fixar a segunda célula de carga

A quarta e última etapa compreende a implementação da lógica do sistema e integração com a interface.

4. DESENVOLVIMENTO

4.1 Modelagem matemática:

Para compreender o comportamento da estrutura mediante a ações estáticas e dinâmicas é importante para o projeto, uma vez que com base nesses parâmetros a estrutura será dimensionada.

Na análise estática, as condições de equilíbrio são fundamentais, pois permitem determinar as reações de apoio nos pontos onde a estrutura está apoiada.

Assumindo que a estrutura pode ser representada pelo diagrama da Fig. 7, as condições de equilíbrio para esse problema ficam definidas conforme a Eq. 7:

$$\sum F_x = 0, \sum F_y = 0, \sum M = 0 \quad (7)$$

Essas condições garantem que a estrutura permaneça estável e segura, evitando arranjos estruturais passíveis de falhas.

Ao analisar o equilíbrio, podemos calcular com precisão as forças e momentos atuantes, assegurando a integridade da estrutura.

Considerando que o diagrama de corpo livre para a estrutura da bancada seja apresentado na Fig. 7, ocorre que para o Estudo de Equilíbrio da estrutura tem-se que:

Já a análise dinâmica é essencial para entender como os sistemas reagirão às ações variantes com o tempo.

Esse comportamento é representado por uma equação diferencial de segunda ordem, cuja solução é compatível com a resposta de osciladores, e por sua vez é também compatível com o problema de análise das oscilações da estrutura em questão, considerando as condições iniciais e frequência(s) natural(is).

O deslocamento indica a posição da estrutura e prevê seu comportamento. Batimentos podem ocorrer quando frequências próximas interagem, modulando a amplitude do deslocamento, o que reforça a necessidade de análise.

Logo, a Fig. 8 representa o diagrama simplificado para a análise dinâmica do sistema, onde o bloco M/M_{eq} corresponde a massa da estrutura em 3D e 2D, respectivamente, e suspensa por corpos com certa flexibilidade sendo representados pelas molas em série também em 3D e 2D, respectivamente.

Assumindo que M_{eq} é a massa total do sistema e que k_1, k_2, k_3, k_4 são os coeficientes de mola, a Fig. 8 representa o diagrama para a análise dinâmica do sistema.

Assim, considerando o diagrama apresentado na Fig. 8 e a sua respectiva Equação Diferencial Ordinária (EDO) de

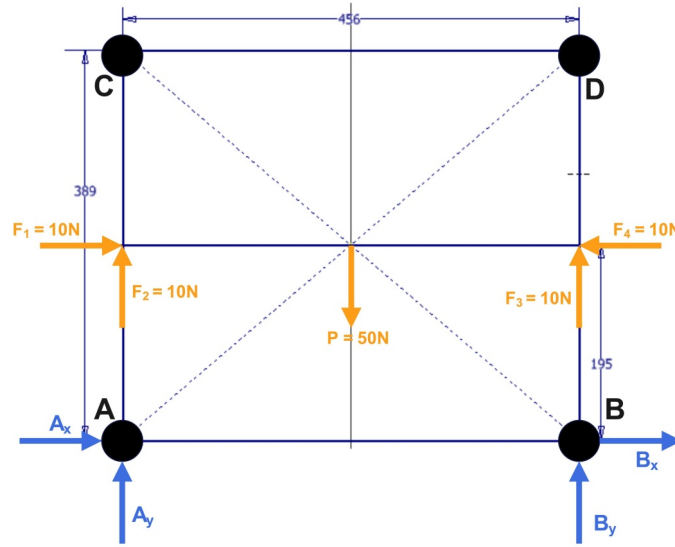


Figura 7: Esquema conceitual da bancada. Distâncias em "mm"

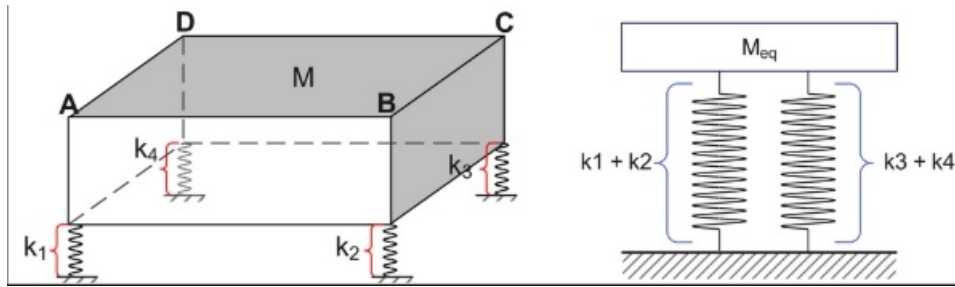


Figura 8: Modelagem simplificada da bancada

segunda ordem aplicada num caso de Problema de Valor Inicial (PVI), ocorre que:

$$m\ddot{x} + kx = F_0 \cos(\omega t) \quad (8)$$

onde: $\dot{x}(0) = 0$ e $x(0) = 0$, para $\omega \neq \omega_0$.

A solução da Eq. 8 permite avaliar a amplitude da oscilação da estrutura e assim determinar a flexibilidade mais compatível com o projeto, permitindo dimensionar os elementos flexíveis da bancada.

5. RESULTADOS

Considerando o diagrama de corpo livre apresentado na Fig. 7 e aplicando as condições de equilíbrio das Eq. 7, ocorre que para a bancada o:

a) Somatório de momento em C (forças em \$N\$ e distâncias em \$m\$):

$$\sum M_C = 0 \rightarrow A_x = 0 \rightarrow B_x = 0$$

b) Somatório das forças \$F\$ em "x" e em "y" (forças em \$N\$):

$$\sum F_x = 0 \rightarrow A_x = -B_x$$

$$\sum F_y = 0 \rightarrow A_y + B_y = 30 \text{ N}$$

b) Somatório dos momentos \$M\$ em relação a "A" e a "C" (forças em \$N\$ e distâncias em \$m\$):

$$\sum M_A = 0 \rightarrow B_y = 15 \text{ N} \rightarrow A_y = 15 \text{ N} \rightarrow A_y = B_y = 15 \text{ N}$$

Ressalta-se que nesse caso cada ponto de apoio terá como reações 7,5 N na vertical.

Já sob o ponto de vista da Dinâmica, considerando o modo de vibração forçada e sem amortecimento, foi estimado que o sistema possuirá uma massa de 5 kg, uma amplitude de 3 mm e está sujeito a uma força externa de 10 N.

Com o auxílio do MATLAB para realizar simulações dinâmicas, onde as equações de frequência natural, deslocamento e batimento estão em função de (k) e os parâmetros utilizados foram:

- Frequência externa (ω): 188 rad/s
- Tempo: de 0 a 100 s
- Força (F_0): 10,0 N ($\cong 1,00 \text{ kgf}$)
- Amplitude: 3 mm
- Constante de mola (k): variando de 0,005 a 12,070 kgf/mm

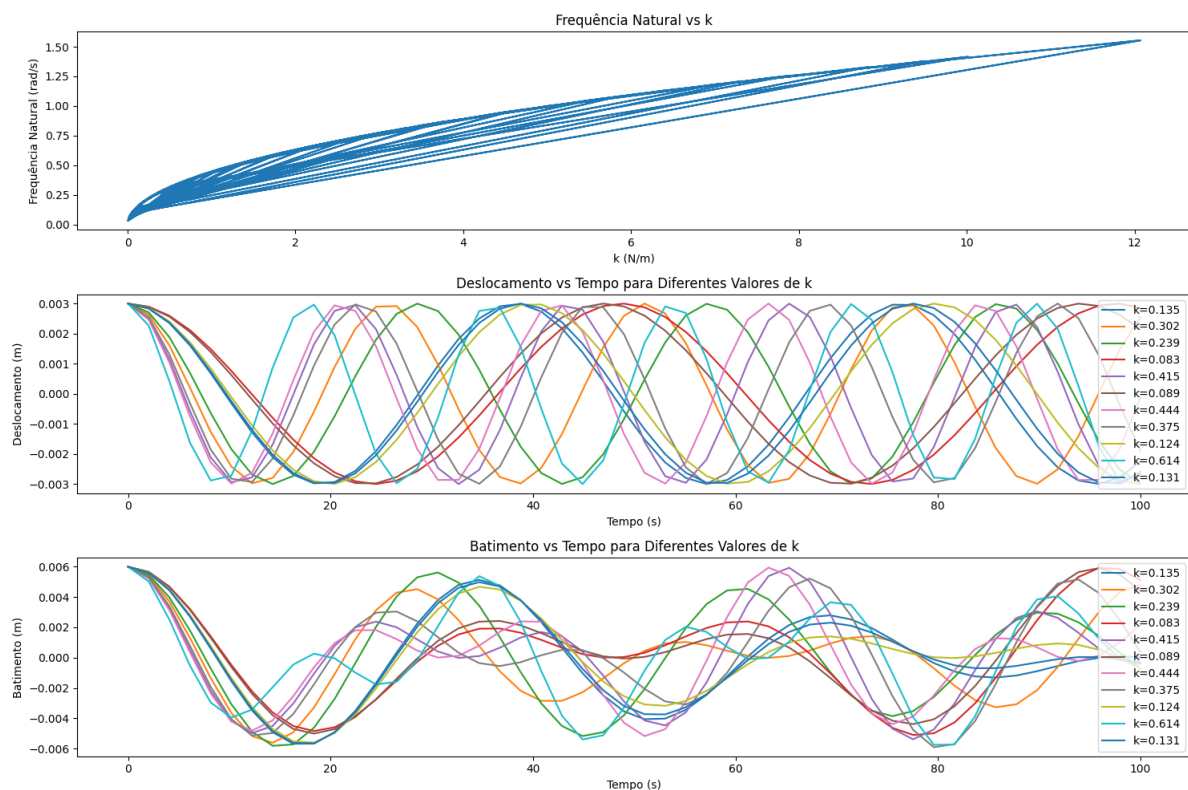


Figura 9: frequência natural, deslocamento e batimento

No entanto, ao analisar as curvas resultantes de todos os valores da constante de mola (k) em relação a uma única força (F_0), observa-se que não refletem o comportamento natural da estrutura. Para determinar esse comportamento com maior precisão, e considerando um intervalo de 1 kgf a 10 kgf para os motores brushless, a quantidade de curvas será reduzida para se aproximar do comportamento real da estrutura. Além disso, serão testadas frequências de 30, 60, 90 e 120 Hz, mantendo-se a mesma amplitude.

5.1 Modelagem Física da Bancada:

O conceito da bancada foi elaborado à partir das necessidades básicas de estimar os parâmetros do motor e avaliar a resposta do conjunto moto-propulsor.

À partir desses requisitos, foram elaborados e avaliados diferentes arranjos geométricos, sob a perspectiva de redução de custos e com o máximo de eficiência na coleta de dados, sem comprometer a segurança.

Para a estrutura, optou-se por utilizar o "**V-Slot**", perfil comercial fabricado em alumínio, o que lhe confere leveza e resistência. O motor é preso em um suporte com furações para dois tipos de motores, motores Glow (combustão) e motores elétricos (Brushless). As molas mantêm o sistema equilibrado, evitando interferência nos dados. A bancada também conta com duas células de carga para medir empuxo e velocidade angular, e hélices de até 12" (305 mm). O sistema final é adequado para as aplicações do projeto (ver Fig. 10).

Além da leveza e resistência, o uso "**V-Slot**" permite uma maior modularidade na integração da estrutura com a eletrônica, o que é outra vantagem no uso desse recurso.

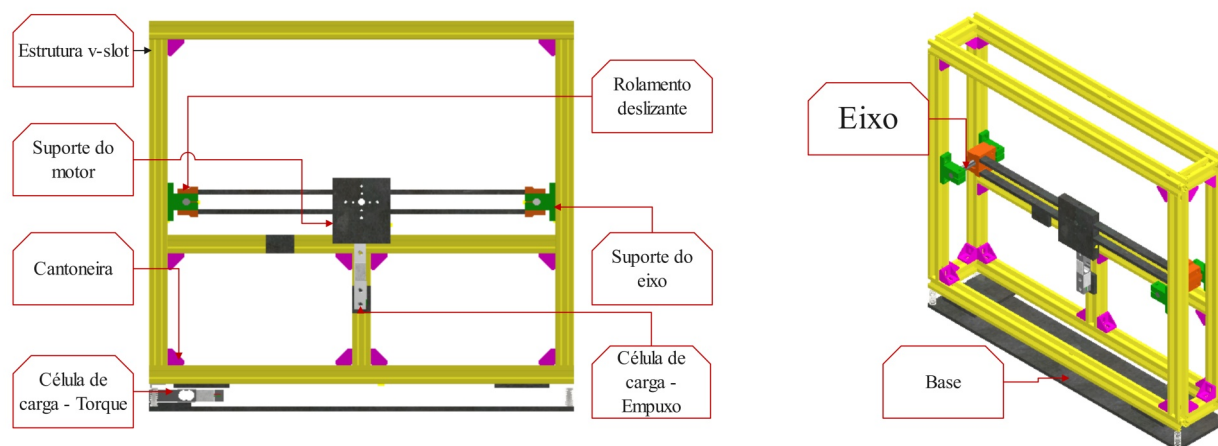


Figura 10: Bancada CEFET 2023

6. CONCLUSÃO

O desenvolvimento de infraestrutura útil ao desenvolvimento de *drones* é essencial para explorar características técnicas e ampliar a capacidade de carga e a robustez do sistema ante às condições de operação, climáticas ou ambientais.

As avaliações preliminares mostraram que o desenvolvimento do sistema de medição é viável e promissor e as análises perpretadas permitem constituir uma configuração preliminar para o arranjo físico do sistema. Além desses, com a prospecção de itens de mercado, foi possível vislumbrar itens e componentes eletrônicos com vistas a um protótipo futuro.

Os próximos passos no desenvolvimento desse projeto incluem:

1. Modelagem 3D - Validação da estrutura e detalhamento de *cases* para maior proteção de componentes eletrônicos e demais itens sensíveis;
2. Análises estruturais - continuidade no desenvolvimento da validação estrutural (dinâmica e integridade);
3. projeto da Interface Homem-Máquina - desenvolvimento da Interface Homem-Máquina utilizando um plataforma de desenvolvimento de código livre; e
4. prototipagem - desenvolvimento de protótipos dos subsistemas do sistema de medição.

7. REFERÊNCIAS

- Alexandre Zanardi, B., 2021. “Desenvolvimento de uma bancada de teste de tração para motores brushless cc aplicado ao aerodesign”. <https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/34466>. Accessed: 2023-12-19.
- Cezar, G.V., 2012. “Desenvolvimento de uma bancada de testes para motores a combustão interna”. *Pontificia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, agoste de*.
- Leichtweis, A.C., 2023. “Desenvolvimento de uma bancada para testes de um motor de pistão tipo glow”. <https://fahor.com.br/publicacoes/TFC/EngMec/2016/>. Accessed: 2023-12-19.
- Otávio Ronconi Amboni, E.I.M.C., 2018. “Desenvolvimento de uma bancada para ensaios de um motor a combustão utilizado em um aeromodelo rádio controlado”. *Revista Vincci*, Vol. 3, No. 2, pp. 70–97.
- Pinheiro, T.P., 2014. *Obtenção de Torque e Empuxo de Propulsores através do Uso de Sistema de Medição de Eixo por Telemetria*. Ph.D. thesis, Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- Rodrigues, L.E.M.J., 2013. *Fundamentos da engenharia aeronáutica aplicações ao projeto SAE-AERODESIGN*. Cenage, 2nd edition.
- Tavares, R.T., 2022. “Projeto e fabricação de bancada para medição de tração de grupos motopropulsores de pequeno porte”. *Centro de Tecnologia e Geociências*, Vol. 1, p. 82.

8. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.