

BANCADA DE ANÁLISE DE RESPOSTAS DINÂMICAS: MODELAGEM E SIMULAÇÕES

Kauan de Souza Costa, kauan.costa@aluno.cefet-rj.br¹

Bruno Lemos Frazão Santos, bruno.frazao@aluno.cefet-rj.br¹

Fabio Pinheiro Cardoso, fabio.cardoso@cefet-rj.br¹

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

Resumo. A implantação de uma bancada de respostas dinâmicas destinada à pesquisa e ao desenvolvimento de Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) representa um avanço significativo para as atividades acadêmicas e tecnológicas no campus. A proposta visa à criação de uma infraestrutura que possibilite a realização de ensaios dinâmicos e calibração de modelos aerodinâmicos, contribuindo para a redução de custos com testes externos e ampliando as possibilidades de experimentação no ambiente institucional. O projeto concentra-se no estudo e construção de uma bancada capaz de testar plataformas aéreas multirrotores com volume de até 1,0 metro cúbico. A estrutura permitirá a medição de grandezas como aceleração, variação angular e resposta dinâmica, fundamentais para a análise do comportamento dos sistemas de voo. Espera-se também que a bancada permita o ajuste dinâmico dos ganhos dos comandos e do sistema de estabilização, por meio de interação com um sistema computacional, viabilizando a otimização dos parâmetros de controle em tempo real. Assim, a bancada funcionará como ferramenta de apoio à validação experimental e ao aprimoramento de projetos aeronáuticos desenvolvidos na instituição.

Palavras chave: Trimagem, Modelagem, Veículo Aéreo Multirotor, Estabilização

Abstract. The implementation of a dynamic response analysis test bench for research and development of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) represents a significant advancement for academic and technological activities on campus. The proposal aims to create infrastructure that enables dynamic testing and aerodynamic model calibration, contributing to cost reduction with external tests and expanding experimentation opportunities within the institution. The project focuses on the study and construction of a bench capable of testing multirotor aerial platforms with a volume of up to 1.0 cubic meter. The structure will allow the measurement of variables such as acceleration, angular variation, and dynamic response, which are essential for analyzing the behavior of flight systems. It is also expected that the bench will enable dynamic adjustment of command gains and the stabilization system through interaction with a computational system, allowing real-time optimization of control parameters. Thus, the bench will serve as a support tool for experimental validation and improvement of aeronautical projects developed at the institution.

Keywords: Trimming. Stabilization. Multirotor aerial vehicle

1. INTRODUÇÃO

O uso de Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) tem se expandido rapidamente em diversos setores, como a agroindústria, a indústria de processos e o ordenamento urbano. Esses sistemas se tornaram ferramentas valiosas para otimizar operações e ampliar a eficiência em diferentes aplicações.

Para que um VANT opere com precisão, é essencial realizar a trimagem e verificar sua resposta dinâmica. Esses ajustes garantem que o veículo responda de forma estável e confiável aos comandos do piloto.

Diante disso, este projeto propõe a modelagem de uma bancada de testes voltada para a trimagem de VANTs, com foco na automação do processo de calibração do controlador. A integração entre o sistema de aquisição de dados e um microcomputador permitirá a geração, visualização e registro de informações por meio de uma interface gráfica interativa, facilitando o monitoramento em tempo real e contribuindo para a confiabilidade dos testes.

2. ESTADO DA TÉCNICA

Infraestruturas para testes e configurações de VANTs constituem ferramentas úteis para explorar os limites de performance do sistema.

Uma proposta de sistema de auxílio à configuração de sistemas VANTs é apresentada pela empresa Eureka Dynamics®, que mostra uma plataforma com capacidade de realizar testes em VANTs envolvendo performance de motores e sua resposta dinâmica, avaliação do controle Proporcional Integral Derivativo (PID) e sensores, além de treinar novos pilotos.

Da literatura, trabalhos como o do Jibril (2020) e do Veyna (2021) descrevem sistemas com capacidades de avaliação do controle PID, de calibração dos controladores de PID e sensores e portabilidade. Além disso aspectos como o tamanho e o custo estimado para a fabricação da estrutura são características destacadas nesses trabalhos.

Já o trabalho de Mukras (2021), além das premissas anteriormente estabelecidas, teria por proposta permitir mais liberdade para o sistema testado.

Para a seleção dos sensores utilizou-se o trabalho do Huo (2016), que destaca aplicações práticas do uso de giroscópios para auxiliar na validação da modelagem dinâmica e avaliar a capacidade de Momento Angular do sistema.

Outro trabalho analisado foi o do Alves (2022), que destaca o desenvolvimento do *firmware* responsável pela captação dos dados de PID e processamento das respostas PWM de controle do grupo Motopropulsor.

Os trabalhos citados tem foco em veículos aéreos não tripulados e a análise de suas características foram essenciais para realizar a modelagem desse projeto.

Um resumo comparativo das principais características dos sistemas avaliados podem ser observadas na Tab.1.

Tabela 1. Comparativo entre alguns conceitos de bancada

Nome	Testes Realizáveis			Portabilidade	Custo	Tamanho
	PID	PID e Sensores	Capacidade			
A	✓	✓	Multirotor	✓	X	✓
B	✓	X	Multirotor	X	✓	Grande
C	✓	✓	Quadrirotor	✓	✓	Pequeno
D	✓	✓	Multirotor	X	X	Médio
E	✓	✓	Multirotor	X	X	Médio

(A). Eureka Dynamics© , (B). Mukras (2021), (C). Veyna (2021), (D). Jibril (2020),

(E). Alves (2022).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Modelagem Física do Sistema

O conceito proposto teve por premissas o uso de itens comerciais, a facilidade de montagem, a facilidade de adaptação e integração de novos itens, portabilidade e modularidade.

Levando em consideração as observações da Tab.1, os modelos A e C se destacaram pelas premissas estabelecidas inicialmente.

Considerando as opções disponíveis na literatura, a proposta final para o leiaute do sistema proposto teve por base a opção A e pode ser observado a seguir na Fig.1.

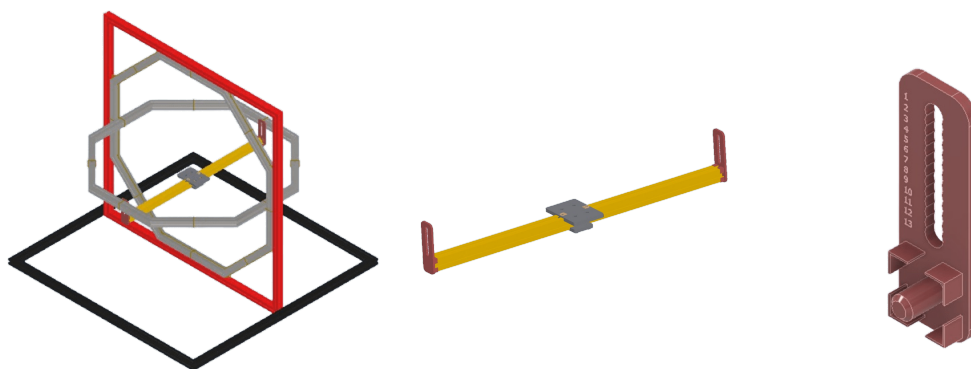


Figura 1. Modelagem do sistema e componentes moveis

A utilização dos octógonos se mostrou uma escolha adequada em vez de aros dada a sua maior facilidade de fabricação,

precisão e facilidade de manutenção. As partes da bancadas serão feitas utilizando o perfil Vslot, que corrobora com a implementação de elementos de fixação e o acoplamento dos sensores tanto como reduz o peso total da bancada.

3.2 Ajuste da Barra Central

Com o intuito do projeto sendo, a modelagem de uma bancada que atende inúmeros tipos de VANT's, a barra central fixa dificultaria o processo. Sendo assim foi pensado em duas soluções, uma sendo uma barra em formato U, móvel, que regularia a altura do drone na bancada que pode ser observado na Fig.1., porem a barra em U limitaria a capacidade de VANT's.

Sendo assim o modelo escolhido foi o modelo de fixação móvel onde foi realizado um ajuste tornando-se possível a regulação da altura da barra na conexão entre barra e octógono, de modo que o centro de massa do drone-bancada fique no centro do sistema.

A Fig.1, está representando tanto modelagem final da bancada como a barra com todos os seus componentes quanto a versão detalhada do encaixe lateral que será utilizado para a regulação do centro de massa do drone com o bancada,

3.3 Análise Estrutural

A estrutura desempenha o importante papel no sistema, uma vez que suportará todas as possíveis cargas aplicadas pelas configurações de atitudes do VANT, além de absorver a energia dos potenciais movimentos de translação (se estivesse livre) decorrente das simulações, proporcionando a captação de todas as interações provocadas no sistema.

A partir da estrutura modelada, a análise do arranjo geral pode ser conduzida à partir das bases matemáticas em Melconian (1999), Hibbeler (2004), e Meriam (2016), separando o conceito geral da estrutura em seções menores a saber:

- a) Barra central;
- b) Octógono interno;
- c) Octógono externo; e
- d) Base estática.

Analisando a estrutura modelada foi feito um D.C.L.(Diagrama de Corpo Livre) dos componentes isolados da bancada, o mesmo pode ser observado na Fig.2, nesse diagrama é possível esquematizar as forças e momentos presente no sistema.

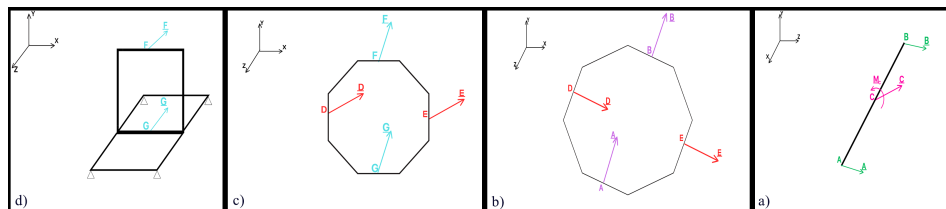


Figura 2. Diagrama de corpo livre

Assim, aplicam-se as condições da estática conforme Eq.1 em cada uma das das seções, começando da mais interna para a mais exterior, isto é, começando da Barra central, passando pelos Octógonos chegando até a Base estática.

$$\sum F_X = 0 \quad \sum F_Y = 0 \quad \sum M_A = 0 \quad (1)$$

Além da análise matemática convencional, utilizou-se a ferramenta Frame Analysis® da Autodesk Inventor®. Conforme Creed (2002), esse recurso computacional permite simular o comportamento mecânico da estrutura estudada, permitindo obter/obtenção de resultados numéricos e gráficos para o estudo da estática das estruturas analisadas.

3.4 Instrumentação

A instrumentação possível de ser utilizada em sistemas com essa finalidade pode envolver sensores do tipo célula de carga, que permitirão verificar as potenciais acelerações do sistema; do tipo giroscópio, que vai mensurar a sua rotação relativa; e do tipo acelerômetro, que pode auxiliar da verificação das possíveis acelerações do sistema. A escolha de tais sensores vem de pesquisas realizadas em documentos como o de Sá (2012) que obtém sucesso ao captar dados utilizando tal instrumentação.

Um diagrama geral do sistema proposto é apresentado na Fig.3 em que são integrados os componentes de instrumentação da proposta.

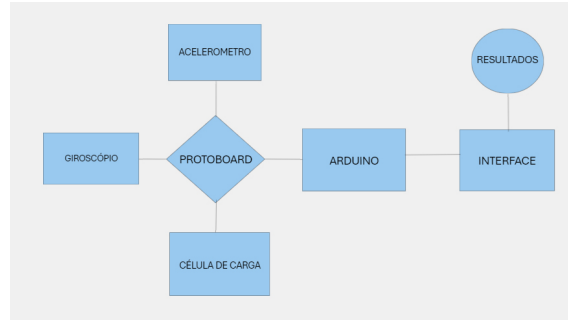


Figura 3. Diagrama do Sistema

3.5 Prototipagem da Instrumentação

Considerando o diagrama geral do sistema proposto na Fig.3, uma prototipagem pode ser realizada utilizando uma *protoboard*, um giroscópio digital MPU6050 e placa de desenvolvimento da plataforma Arduino, com a finalidade de avaliar uma possível viabilidade de integração de sistemas e experimentar potencialidades e limitações dessas soluções quando aplicadas em processos de coleta, filtragem e processamento de dados.

Nessa etapa do projeto, o giroscópio foi empregado como sensor de entrada ligado por protocolo I2C ao Arduino, e este ao computador, que é o componente responsável pela consolidação dos dados.

Baseado na biblioteca "tockn", o código para leitura de dados do giroscópio foi implementado como pode ser observado na Fig.4.

```

1  #include <MPU6050_tockn.h>
2  #include <Wire.h>
3
4  MPU6050 mpu6050(Wire);
5
6  long timer = 0;
7
8  void setup() {
9      Serial.begin(115200);
10     Wire.begin();
11     mpu6050.begin();
12     mpu6050.calcGyroOffsets(true);
13 }
14 void loop() {
15     mpu6050.update();
16
17     if(millis() - timer > 121){
18         Serial.print("X: ");
19         Serial.println(mpu6050.getAngleX());
20         Serial.print("Y: ");
21         Serial.println(mpu6050.getAngleY());
22         Serial.print("Z: ");
23         Serial.println(mpu6050.getAngleZ());
24
25         Serial.print("gX: ");
26         Serial.println(mpu6050.getGyroX());
27         Serial.print("gY: ");
28         Serial.println(mpu6050.getGyroY());
29         Serial.print("gZ: ");
30         Serial.println(mpu6050.getGyroZ());
31
32         Serial.print("accX: ");
33         Serial.println(mpu6050.getAccX());
34         Serial.print("accY: ");
35         Serial.println(mpu6050.getAccY());
36         Serial.print("accZ: ");
37         Serial.println(mpu6050.getAccZ());
38
39         Serial.print("\n");
40         timer = millis();
41     }
42 }

```

Figura 4. Código do giroscópio no Arduino

O código inclui a biblioteca responsável pelo gerenciamento do módulo MPU6050, e envia os valores obtidos do sensor no Monitor Serial, que é recebido pela aplicação gráfica no "Visual Studio", expondo os dados ao usuário, em um formato consolidado.

3.6 Comportamento dinâmico do Veículo Aéreo Não Tripulado

Utilizando as leis de Newton, é possível definir o comportamento dinâmico do VANT com a finalidade de compreender o seu funcionamento, além de definir como as ações do VANT podem influenciar no comportamento da estrutura.

Nesse trabalho, a equação do movimento do VANT pode ser definida pela equação Eq.2 conforme Allenspach *et al.* (2020).

$$\{\tau\} \ddot{\underline{q}} + h\dot{\underline{q}}_i\dot{\underline{q}}_j + \underline{G} = \underline{Q} \quad (2)$$

onde:

$\{\tau\}$ Representa a matriz de inércia do corpo;

$\ddot{\underline{q}}$ Representa a aceleração no referencial do corpo;

$\dot{\underline{q}}_i$ Representa a velocidade no referencial do corpo;

$h\dot{\underline{q}}_i\dot{\underline{q}}_j$ Representa os efeitos centrífugos, de Coriolis e Giroscópicos

$\underline{G}$ Representa os efeitos gravitacionais; e

$\underline{Q}$ Representa a forças e momentos aplicados no referencial o corpo

Como o sistema fica confinado na plataforma de ensaios, nesse caso, o termo de Coriolis na Eq.2 pode ser desprezado. Logo:

$$\{\tau\} \ddot{\underline{q}} + \underline{G} = \underline{Q} \quad (3)$$

Essa resposta dinâmica pode auxiliar na obtenção da orientação do corpo, informação esta que é útil para estabelecer o provável comportamento do VANT estudado.

3.7 O processo de trimagem

O processo de trimagem consiste na sincronização do controlador do VANT e seus atuadores, considerando a sua geometria e inércia.

Essa sincronização é feita a partir de testes que devem ser realizados numa sequência de movimentos constituídos por “Ascensão”, que é responsável por gerar movimento translacional na direção z, “Rolagem”, que consiste no movimento rotacional em torno do eixo x, “Arfagem”, responsável pela rotação em torno do eixo y, e “Guinada”, que é o responsável pelo movimento rotacional do objeto em torno do eixo z. Esses movimentos contribuem para verificação da comunicação entre o comando do controle e a mudança na atitude (mudança de orientação) do VANT em todos os eixos.

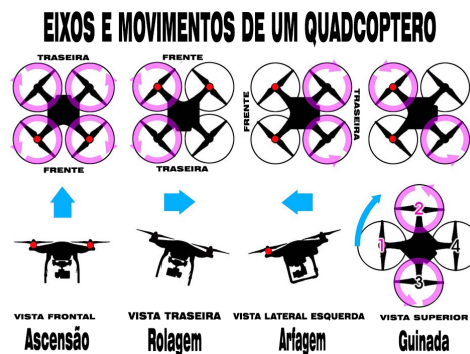


Figura 5. Eixos e movimentos de um Quadcóptero

3.8 Interface Gráfica

A Interface Homem Máquina foi desenvolvida pensando em facilitar a visualização dos dados obtidos pelo Arduino ao usuário. Seu layout é de fácil interpretação, integrando todos os sensores da bancada em apenas uma tela. Através dessa interface é possível visualizar os dados, calibrar os sensores e efetuar a telemetria dos dados. Em sua versão final, será capaz de integrar outras bancadas complementares para total calibração do Vant. Interface essa que utiliza todas as informações que são emitidas pelo arduino via portal serial onde o Visual Studio confirma esses dados e interpreta de forma que elas possam ser emitidas na interface, que esta sendo representada na Fig 6

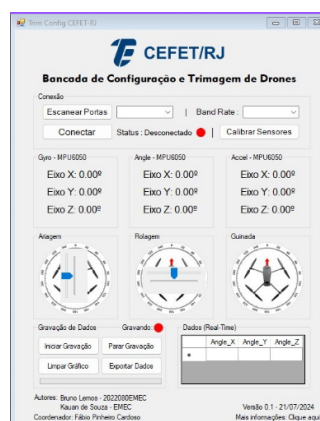


Figura 6. Interface Gráfica

4. RESULTADOS

4.1 Simulação Estrutural

A simulação estrutural foi realizada em duas partes, primeiramente foi realizado os testes na parte interior da bancada, que consiste nos dois octógonos, interno e externo, e na barra que suportará o VANT, já a segunda parte da avaliação consiste na inspeção da estrutura base, que serve de apoio para as reações que ocorreram na parte móvel da bancada.

Foram feitas três aplicações, a primeira de uma força de 50N, logo após outra com força de 150N e por fim uma simulação com a força de 500N, através do método *frame analysis*®, com o intuito de simular diferentes tipos de VANTs em cima da bancada, com isso foi possível observar o deslocamento(A), força de cisalhamento(B), e o momento(C). A figura a seguir, Fig.7, mostra o processo da simulação com força de 500N.

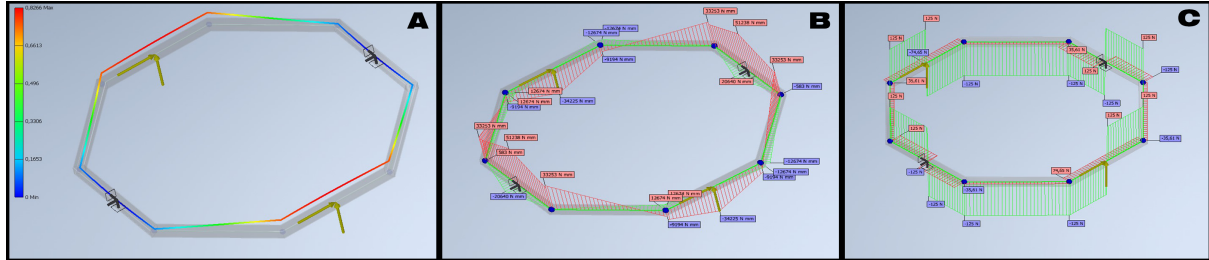


Figura 7. Simulações no octógono Interno

Após o resultados obtidos pela simulação foi feita a verificação analítica dos mesmo através da equação do equilíbrio de forças a apresentada a seguir pela Eq.4.

$$\sum F_y = -P + A_y + B = 0 \quad (4)$$

onde:

P Representa a Carga;

A_y Representa as reações de apoio;

B Representa as reações de apoio.

A tabela abaixo, Tab.2, mostra os valores obtidos analiticamente das variáveis necessária para que a estrutura se mantenha em equilíbrio e do deslocamento máximo δ_{max} .

Tabela 2. Valores obtidos por cada aplicação de força

Componente	50N			150N			500N		
	B(N)	$A_y(N)$	δ_{max} (mm)	B(N)	$A_y(N)$	δ_{max} (mm)	B(N)	$A_y(N)$	δ_{max} (mm)
Octógono Interno(N)	25	25	0,004	75	75	0,012	250	250	0,042
Octógono Externo(N)	25	25	0,005	75	75	0,016	250	250	0,053
Barra Central(N)	25	25	0,087	75	75	0,261	250	250	0,87
Base estática(N)	25	25	0,095	75	75	0,283	250	250	0,945

Os resultados da simulação foram validados utilizando as equações Eq.5 e Eq.6, conforme Gere (2010) e Meriam (2016).

$$\frac{-PL^3}{48EI} = \delta_{max} \quad (5)$$

$$\frac{-Pb(L^2 - b^2)^{3/2}}{9\sqrt{3}EIL} = \delta_{max} \quad (6)$$

onde:

P Representa a Carga;

L Representa o Comprimento Total;

E Representa o Coeficiente Elástico do Material;

I Representa o Momento de inercia a Área;

b Posição da carga.

Tabela 3. Valores dos deslocamentos máximos obtidos analiticamente

b	Octógono Interno	Octogono Externo	Barra Central	Base Estática
L/2	0,042mm	0,053mm	0,870mm	0,945mm
<L/2	0,028mm	0,036mm	0,582mm	0,632mm

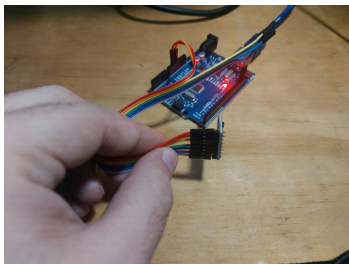
A partir dos resultados obtidos nas simulações apresentadas nas Tab.2, e comparando-os com as estimações analíticas expostas na Tab.3, os valores apresentados corroboram o comportamento mecânico esperado e previsto nas verificações analíticas, nas quais a estrutura mantém a sua integridade mediante as solicitações.

4.2 Protótipo do sistema de medição

Considerando o arranjo físico do protótipo foram realizados alguns testes de conexão e acesso aos dados, conforme a figura Fig.8

Com esses testes foi possível avaliar as possíveis respostas dos sensores do sistema e experimentar algumas das possíveis limitações quando aplicadas em campo na coleta de dados, além de possibilidades de interfaces para interação com o usuário.

O giroscópio MPU6050 possui em sua saída informações orientadas no Sistema Cartesiano, que após interpretadas pela biblioteca Tockn podem variar entre -10g até +10g. O giroscópio foi submetido à uma série de inclinações, a fim de obter uma resposta no Monitor Serial relativa ao eixo respectivo de inclinação.



Serial Monitor		Output
Message (Enter to send message to 'Arduino')		
X: -10.00	Y: -0.63	Z: -0.94
X: -10.24	Y: -0.67	Z: -0.98
X: -10.04	Y: -0.86	Z: -0.98
X: -10.04	Y: -0.75	Z: -0.94
X: -10.08	Y: -0.98	Z: -0.78
X: -9.69	Y: -1.14	Z: -0.98
X: -10.08	Y: -1.02	Z: -0.90
X: -10.00	Y: -1.06	Z: -0.94
X: -10.16	Y: -1.22	Z: -0.94
X: -10.00	Y: -1.14	Z: -0.82
X: -9.89	Y: -1.29	Z: -0.71
X: -10.28	Y: -1.22	Z: -0.82
X: -9.89	Y: -0.94	Z: -0.90
X: -10.00	Y: -1.10	Z: -0.94
X: -9.96	Y: -0.98	Z: -0.98

Figura 8. Giroscópio MPU6050

Um resumo das médias dos valores informados nos pontos máximos e mínimos de inclinação do Acelerômetro podem ser observadas na Tab4 a seguir. Com isso será possível relacionar proporcionalmente a atitude do VANT em relação aos valores obtidos.

Tabela 4. Valores máximos e mínimos do Giroscópio

Eixos/Inclinações	-90°	0	+90°
X	-10,4g	-0,2g	+10,1g
Y	-10,3g	+0,3g	+10,3g
Z	-8,7g	+0,1g	+8,5g

5. PROTOTIPO DA BANCADA

A construção de protótipos é essencial no desenvolvimento da bancada, permitindo validar e ideias iniciais, sendo assim aperfeiçoando-as para o modelo final. Neste caso, utilizamos uma impressora 3D FDM da Creality, modelo K1, reconhecida por sua precisão e confiabilidade, junto com o ABS Premium da GTMax3D, material amplamente usado na indústria por sua resistência mecânica, durabilidade e excelente acabamento.

O processo envolveu um tempo total de impressão de 39 horas, abrangendo etapas como a preparação do modelo 3D em software CAD, configuração da impressora, calibração dos parâmetros de temperatura e execução em ambiente controlado para evitar deformações. Após a impressão, realizamos acabamentos como lixamento para melhorar a aparência

e resistência da peça. Essa combinação de equipamento e material demonstrou ser eficiente para a criação de protótipos funcionais.



Figura 9. Protótipo da bancada

6. CONCLUSÃO

Esse projeto teve por propósito desenvolver um estudo da infraestrutura de ensaios dinâmicos de plataforma aéreas, particularmente multirotores com volume de até 1,0 metro cúbico.

Considerando as informações constantes na Tab.2 é possível verificar que as reações dos pontos de apoio, e também o deslocamento máximo simulado em cada componente do conjunto apresentam o valor máximo de 0,9 mm no eixo Y. Os valores simulados são compatíveis com os valores determinados na Tab.3 que foram obtidos utilizando as equações Eq.5 e Eq.6.

Já na fase de prototipagem da instrumentação foi possível constatar as possibilidades de uso da placa de desenvolvimento Arduino e o sensor. Os resultados obtidos a partir do acelerômetro ADXL345 expostos na Tab.4 cumprem o papel de conseguir a comunicação entre o sensor e o sistema Arduino, de tal maneira que a variação obtida indica a inclinação do sistema.

Como trabalhos futuros pretende-se realizar as demais integrações dos sensores, construção e montagem das componentes estruturais e demais integrações do sistema, além de especificar uma interface iterativa com o usuário.

7. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio da Autodesk™ para a realização desse projeto.

8. REFERÊNCIAS

- Allenspach, M., Bodie, K., Brunner, M., Rinsoz, L., Taylor, Z., Kamel, M., Siegwart, R. and Nieto, J., 2020. "Design and optimal control of a tiltrotor micro-aerial vehicle for efficient omnidirectional flight". *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 39, No. 10-11, pp. 1305–1325.
- Alves, Leonardo Teixeira e Ribeiro, R.S., 2022. "Bancada de ensaios de controle para drones utilizando arquiteturas arm e fpga".
- Creed, WE Douglas e Langstraat, J.A.e.S.M.A., 2002. "A picture of the frame: Frame analysis as technique and as politics". *Organizational research methods*, Vol. 5, No. 1, pp. 34–55.
- Gere, M e Goodno, J., 2010. "Mecânica dos materiais—tradução da 7a edição norte-americana".
- Hibbeler, R., 2004. "Engineering mechanics".
- Huo, Xin e Feng, S.e.L.K.e.W.L.e.C.W., 2016. "Aerodynamic drag analysis of 3-dof flex-gimbal gyrowheel system in the sense of ground test". *Sensors*, Vol. 16, No. 12, p. 2081.
- Jibril, Mustefa e Tadese, M.e.H.N., 2020. "Position control of a three degree of freedom gyroscope using optimal control".
- Melconian, S., 1999. *Mecânica técnica e resistência dos materiais*. Saraiva Educação SA.
- Meriam, JL e Kraige, L., 2016. "Mecânica para engenharia-estática, volume 1. tradução: Hector reynaldo meneses costa".
- Mukras, Saad MS e Omar, H.M., 2021. "Development of a 6-dof testing platform for multicopter flying vehicles with suspended loads". *Aerospace*, Vol. 8, No. 11, p. 355.
- Sá, R.C., 2012. "Construção, modelagem dinâmica e controle pid para estabilidade de um veículo aéreo não tripulado do tipo quadrirotor".
- Veyna, Uriel e Garcia-Nieto, S.e.S.R.e.S.J.V., 2021. "Quadcopters testing platform for educational environments". *Sensors*, Vol. 21, No. 12, p. 4134.