



Fundação Universidade Federal do ABC

Pró reitoria de pesquisa

Av. dos Estados, 5001, Santa Terezinha, Santo André/SP, CEP 09210-580

Bloco L, 3º Andar, Fone (11) 3356-7617

iniciacao@ufabc.edu.br

Relatório Final de Iniciação Científica referente
ao Edital: 01/2021

Título do projeto: Estudo e desenvolvimento preliminar de um sistema de empuxo vetorial para foguetemodelismo.

Palavras-chave do projeto: foguete, empuxo vetorial, TVC, sensor, controle, estabilidade

Área do conhecimento do projeto: Engenharia Mecânica com ênfase em Projetos de Máquinas e Fenômenos de Transporte.

Santo André - SP

07 de outubro de 2022

SUMÁRIO

RESUMO	3
1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA	4
2 OBJETIVOS	5
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	5
3.1 Empuxo Vetorial – <i>Thrust Vector Control</i> (TVC)	5
3.2 Sistemas de Controle	7
3.3 Microcontroladores e Sensores	8
4 METODOLOGIA	10
5 CRONOGRAMA DE ATIVIDADES	14
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	15
6 CONCLUSÃO	21
REFERÊNCIAS	22

RESUMO

O presente trabalho visou a pesquisa teórica sobre a metodologia de estabilidade e controle baseada no empuxo vetorial, denominada TVC - sigla em inglês para *Thrust Vector Control* – em aplicação específica para foguetemodelismo, e criação de um sistema preliminar de controle utilizando o método. Em termos específicos, propôs-se o desenvolvimento de um sistema capaz de corrigir a orientação de uma estrutura cilíndrica fixa por um eixo, de apenas um grau de liberdade, através da correção do fluxo de água que sai pela parte inferior da estrutura baseado em dados coletados por sensores giroscópio e acelerômetro da unidade de medição MPU6050 processados por um microcontrolador Arduino. O projeto de pesquisa se inseriu no contexto do grupo de foguetemodelismo UFABC Rocket Desing que utiliza outras metodologias para controle de seus foguetes em voo. Assim, o desenvolvimento preliminar do método de controle TVC possibilitará a exploração de novos métodos de controle para as aeronaves da entidade, assim como comparação entre as diferentes tecnologias de comando. Em estudos futuros, mediante aprimoramento do sensor utilizado e metodologia de testes será possível conhecer o comportamento do sistema criado em aplicações práticas e, ainda, executar a aplicação direta do TVC nos veículos aeroespaciais desenvolvidos pela UFABC para melhora de seu controle e estabilidade durante voo. Testes foram executados sobre a estrutura criada para observar o comportamento do sistema de controle por empuxo vetorial na alteração da angulação do aparato. Os testes foram divididos em três frentes: a primeira visava observar o comportamento do sistema de controle criado na correção da angulação do tubo para um valor especificado em programação, a segunda desenvolveu-se a fim de extrair dados da resposta do servomotor mediante alterações dos valores do sensor de posição e a terceira buscou alterar o vetor do empuxo e observar a alteração de angulação do tubo a partir da leitura do sensor de angulação e análise de imagens frente uma escala em forma de arco de ângulos graduado. Após a análise dos dados recolhidos, conclui-se que é possível defletir o tubo em orientação diferente da de repouso através da implementação de empuxo vetorial. Mais especificamente, na última fase de testes, mediante direcionamento do servomotor que controlou a angulação do bocal ejeter entre 20 e 170°, foi possível defletir o tubo articulado em, aproximadamente, 0 e 17°, respectivamente. No entanto, em todos os testes avaliou-se a variação da angulação captada pelo sensor MPU como incoerente ou nula. Em adição, na segunda etapa de testes foi possível observar a resposta do sistema de controle proporcional-integral-derivativo implementado de maneira coerente com o esperado. Uma razão levantada na discussão do trabalho para essa incoerência nas leituras do sensor é a falta de um componente de regulação voltaica para os pinos de saída entre a unidade e o microcontrolador.

1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

É inegável que o desenvolvimento aeroespacial possui relação direta com o desenvolvimento de um país. A exploração espacial modificou o panorama moderno a partir das inúmeras descobertas científicas que foram consequências diretas dessa atividade. Porém, a extensão do mercado espacial gerou também um mercado lucrativo, que se mantém de forma perene. Pode-se citar como exemplo o ramo de telecomunicações, estritamente dependente do funcionamento de satélites. Esses diversos benefícios resultantes da atividade aeroespacial justificam a necessidade de constantes investimentos nacionais para o desenvolvimento desse setor [1].

A vertente mais importante que viabiliza a elaboração de novas tecnologias para a área espacial é a pesquisa relacionada à produção e à otimização de foguetes. Um foguete é denominado por uma aeronave que obtém como propulsão o jato provocado pela expansão de gases gerados por um motor que queima propelentes. [2]. Nesse cenário, enquadra-se a equipe de foguetemodelismo Rocket Design da Universidade Federal do ABC (UFABC). A entidade não apenas constrói e desenvolve foguetes, como também participa de diversos eventos e competições de foguetemodelismo, inclusive em cenário internacional. No ano de 2019, a equipe participou da *Spaceport America Cup*, competição no Novo México (EUA) e da *Latin American Space Challenge* (LASC), no Brasil, conquistando nessa última o segundo lugar na categoria “Apogeu 3 quilômetros”.

Os foguetes desenvolvidos pela Rocket já possuem computador de voo, capaz de reconhecer e salvar dados provenientes de sensores relacionados com a orientação da aeronave, como acelerômetro e giroscópio. Nesse contexto, o projeto em questão se enquadra: da necessidade de buscar novas maneiras de executar a estabilidade e controle no foguetemodelismo da entidade para posterior comparação aos métodos já utilizados, e consequente desenvolvimento da equipe em relação a temática da dinâmica aeroespacial. Assim, será pesquisada a teoria de funcionamento do sistema de estabilidade e controle baseado no empuxo vetorial, chamado TVC – *Thrust Vector Control*, assim como suas aplicações para o foguetemodelismo, especificamente. Após a pesquisa teórica sobre os conceitos que norteiam o método, será criado um sistema modelo composto de servoatuador e de um microcontrolador para desenvolvimento preliminar de um sistema de TVC baseado na aplicação para foguetemodelismo e posterior testagem das características do modelo criado. O sistema de controle será implementado em uma estrutura cilíndrica com rotação livre em um grau de liberdade e controlará a direção do fluxo de água que saíra pela extremidade inferior do tubo. O objetivo principal do trabalho será fazer com que o sistema de controle seja capaz de rotacionar o tubo cilíndrico na angulação desejada, com base nos valores obtidos pelo conjunto de sensores. Vale ressaltar que o projeto possui caráter introdutório, portanto não serão utilizados propulsores: o sistema de propulsão será emulado a partir de um fluxo de água ejetado por meio de um tubo exaustor na extremidade inferior do tubo cilíndrico. Além disso, a testagem do sistema se baseará no estudo da correção da orientação executada pelo sistema de controle.

2 OBJETIVOS

O objetivo geral do trabalho de pesquisa em questão consiste na pesquisa a cerca de uma nova forma de executar a estabilidade e controle de foguetes endo-atmosféricos visando posterior comparação com os métodos já utilizados pela equipe de foguetemodelismo da UFABC, Rocket Desing.

Em termos específicos, foi realizada uma pesquisa teórica dos conceitos e fundamentos matemáticos e físicos que determinam a utilização do sistema de controle por empuxo vetorial TVC – *Thrust Vector Control*, assim como a criação de um sistema eletrônico composto de um microcontrolador, de uma unidade de medição inercial composta por acelerômetros e giroscópios para reconhecimento de orientação espacial e de um servoatuador. Mediante a introdução desses componentes em um tubo cilíndrico com rotação livre de um só grau de liberdade, e junção dos componentes criados, visou-se acionar o servo de forma a corrigir a orientação de um bocal que representou o bocal ejetor de fluxo de água e, utilizando os dados resultantes da parte sensorial, direcionar o tubo cilíndrico em uma angulação desejada. Após essa etapa, testou-se o sistema de forma a extrair dados de comando do servomotor, leitura do MPU e angulação efetiva do sistema utilizando uma escala de ângulos e análise de imagem.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Empuxo Vetorial –*Thrust Vector Control* (TVC)

Na modelagem de veículos aeroespaciais deve-se considerar as técnicas que serão utilizadas para controle de seus movimentos e o modo com que esses controles serão executados. A técnica mais utilizada para controle de veículos endo-atmosféricos é o controle aerodinâmico através do movimento de superfícies móveis em contato com o escoamento do ar. Ao mover essas superfícies aerodinâmicas, são gerados momentos em relação ao centro de massa da aeronave, e os ângulos resultantes da deflexão farão com que a aeronave seja direcionada na direção desejada. No entanto, essa metodologia não é a única existente para o controle de aeronaves. Para a navegação extra-atmosférica não há aerodinâmica e o controle do movimento deve ser efetuado através da ação de forças diretas, pela técnica RCS, sigla em inglês para Sistema de Controle de Reação. Já para a navegação dentro da atmosfera, além do controle aerodinâmico, há também outras técnicas que podem ser empregadas. Uma dessas é a técnica TVC, sigla em inglês para Controle de Empuxo Vetorial, foco desse projeto de pesquisa. [3]

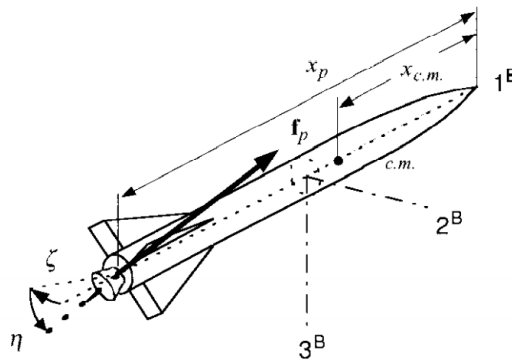
Antes de discorrer sobre as características inerentes do sistema de empuxo vetorial, deve-se fundamentar a matemática que envolve o empuxo de um foguete. Empuxo é caracterizado como a

força de reação da liberação sentida pelo veículo aeroespacial pela ejeção de matéria a altas velocidades pelo sistema de propulsão. Para um empuxo e fluxo de massa constantes, velocidade de exaustão axial e uniforme e pressão ambiente igual a pressão de saída do bocal temos a definição de empuxo como apresentado na equação 1, onde F é a força de empuxo, m é a massa exalada, \dot{m} o fluxo de massa, v a velocidade de exaustão, w é o peso efetivo total do propelente, e o fluxo desse peso é \dot{w} . g_0 , por sua vez, é uma constante arbitrária. Essa equação por si só não consegue determinar com clareza a força de empuxo de um foguete real, no entanto, possui grande valor como passo inicial para a compreensão sobre sistema de propulsão de veículos aeroespaciais. [4]

$$F = \frac{dm}{dt} v = \dot{m} v = \frac{\dot{w}}{g_0} v \quad (1)$$

O controle de empuxo vetorial é utilizado através da deflexão do jato de propulsão através de aletas, manejo do pino injetor na queima do combustível, ou pelo direcionamento direto do bocal do propulsor, geralmente por servotransdutores [5]. Diante dessas ações, produz-se um momento em relação ao centro de massa da aeronave, e essa poderá ser direcionada da forma desejada. As técnicas podem também ser combinadas para obter maior desempenho. No presente trabalho, o foco será o estudo da aplicação do TVC utilizando o movimento direto do bocal do propulsor. A figura 1 demonstra o esboço da geometria de funcionamento desse sistema. Um foguete pode sofrer a ação de três momentos diferentes, o de rolagem, o de arfagem e o de guinada. O sistema de TVC é utilizado para controlar o movimento de arfagem e o de rolagem do veículo aeroespacial.

Figura 1 – Esboço da Geometria de Funcionamento do Sistema TVC Para Foguetes



Fonte: [LAZIC, D.; RISTANOVIC, M., 2007. p. 436]

Na figura, $c.m.$ representa o centro de massa do foguete, 1^b , 2^b e 3^b são três diferentes planos, $x_{c.m.}$ a distância do centro de massa para a coifa, x_p a distância entre o bocal do propulsor e a coifa do foguete, η o ângulo de deflexão para o plano 1^b e 3^b , e ζ o ângulo de guinada no plano 1^b e 2^b . [5]. Considerando a figura 1, o momento de arfagem é caracterizado por $f_p(x_p - x_{c.m.})\sin(\eta)$. De forma análoga, pode ser encontrado o momento de guinada para o foguete. [4].

Sistemas de TVC podem ser aplicados tanto para motores de propelentes líquidos quanto para sólidos ou híbrido. No entanto, geralmente, a maior parte dos sistemas de TVC são específicos para implementação em apenas uma das categorias de propulsão. Em adição, os sistemas conceituais de empuxo vetorial podem ser divididos em dois: de bocal único e de múltiplos bocais. O foco do presente trabalho recai apenas sobre os que possuem bocal único, devido a melhor aplicabilidade para o foguetemodelismo. Esse sistema conceitual pode ser construído com diferentes mecanismos. O primeiro incorpora a deflexão mecânica do bocal ou da câmara de empuxo, a segunda atua através da inserção de corpos termorresistentes no jato de exaustão, já o terceiro utiliza a injeção de fluido no lado da seção divergente do bocal para causar distorção assimétrica do fluxo de exaustão, e o quarto e último mecanismo separa dispositivos de produção de empuxo que não são parte do fluxo principal. Novamente, trabalharemos apenas com o primeiro mecanismo, apontado como mais eficiente que seus pares e aplicado normalmente a foguetes de propelente sólido. [4]

Há inúmeras razões pelas quais se decide usar o empuxo vetorial como sistema de controle de uma aeronave. As principais finalidades de se aplicar o sistema são: para alterar a trajetória do veículo, corrigir o desvio da trajetória ou atitude desejada e para corrigir o desalinhamento de empuxo em relação ao centro de gravidade. No entanto, aletas aerodinâmicas ainda se sustentam como umas das estratégias de construção mais efetivas para controlar o voo de um veículo dentro da atmosfera, devido a sua eficiência em termos do peso do veículo, do momento criado para alterar a trajetória e também do consumo de energia dos atuadores.

Os atuadores de TVC são comandados pelo Sistema de Navegação e Controle do veículo. Aqui, mede-se a posição 3D, os vetores velocidade e as taxas rotacionais do veículo. A partir desses dados, executa-se a comparação com a posição, velocidade e taxas rotacionais desejadas. Assim, os erros entre esses dois conjuntos de números são transformados em controles de TVC de tempo de atuação, aceleração e magnitude da deflexão, para reduzir a discrepância a zero. Para testagem de aceitação de um sistema de empuxo vetorial devem se definir várias grandezas a fim de entender o funcionamento do mecanismo, como poder de *input*, acuracidade das posições defletidas, velocidades ou acelerações angulares, características de respostas do sinal enviado aos servos ou ainda a validação de parada de *overtravel*. Além desses parâmetros analisados, pode haver outros requisitados para melhor compreensão do sistema antes de sua efetiva aplicação. [4]

3.2 Sistemas de Controle

Um foguete é um sistema não-linear com múltiplos inputs e outputs caracterizado por dinâmica instável devido a diversos distúrbios internos e externos aplicados durante todo o decorrer da missão de lançamento. Além disso, o foguete necessita executar o controle sobre tais influências em tempo real, atingindo, assim, um voo estável. Para executar interpretar os dados de entrada lidos por

diversos sensores no foguete e transformá-los em ações corretivas pode-se utilizar diversos sistemas de controle. O sistema de controle mais popular utilizado por sistemas de controle de foguetes, como o TVC, é o sistema proporcional, integral e derivativo – *proportional-integral-derivative* (PID). O PID é um sistema de controle baseado em três componentes, sendo um proporcional, um integral e um derivativo. Por mais que o sistema PID seja desenvolvido na teoria do controle linear, seus resultados para o sistema não-linear de um foguete são satisfatórios devido a simplicidade de inserção, desde que esse sistema possa ser considerado fracamente não-linear. Diversos trabalhos acadêmicos já foram realizados com a finalidade de buscar modelos de controle mais adequados para o problema de missão espaciais e foguetemodelismo. No entanto, esse é um tema a parte a ser pesquisado dentro da grande amplitude dos assuntos que compreendem a ciência de foguetes. [6]

O sistema tem sua ação de controle como uma soma de três termos: o proporcional, o integral e o derivativo. A parte proporcional corresponde a um sistema de *feedback* simples, representado pelo ganho do controle K multiplicado pelo erro do controle $e(t)$. O erro é a diferença entre o ponto requisitado $y_{sp}(t)$ vezes um peso para o ponto requisitado b e a saída do processo $y(t)$. Logo, o controle proporcional é dado pela equação 2.

$$u_p(t) = Ke(t) = K(by_{sp}(t) - y(t)) \quad (2)$$

Prosseguindo, a parte integral é responsável por remover um erro de estado-estático do controle, introduzido pelo controle proporcional. O controle integral é dado pela fórmula 3, onde k_i é o ganho em um tempo T_i .

$$u_i(t) = k_i \int^t e(s)ds = \frac{K}{T_i} \int^t e(s)ds \quad (3)$$

Por fim, a parte derivativa do sistema PID é usada para promover ação antecipada e é definido pela equação 4, onde k_d é um ganho do sistema em um tempo T_d .

$$u_D(t) = k_d \frac{de(t)}{dt} = KT_d \frac{de(t)}{dt} \quad (4)$$

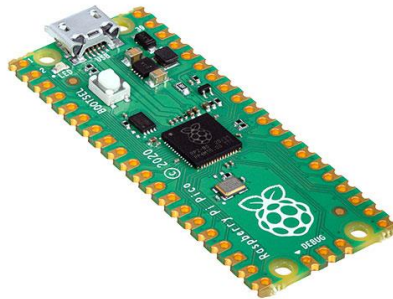
Vale ressaltar que o sistema PID possui muitas outras nuances além das apresentadas nesse tópico. Para o sistema de controle TVC desenvolvido, foi implementado um sistema de controle PID para processamento dos dados dos sensores na criação do comando de saída para os servomotores controlarem o bocal de saída de água. [7]

3.3 Microcontroladores e Sensores

Microcontroladores são placas constituídas por um microprocessador, responsável por processar os dados e interpretar o programa, pinos de entrada e saída para comunicação com periféricos, como sensores, e memória. A memória pode ser dividida em uma memória de programa,

onde há um armazenamento perene da rotina carregada, e uma memória volátil [8]. Diversos microcontroladores estão presentes no mercado, sendo necessária a revisão das suas características básicas para observar a aplicabilidade nos projetos pretendidos. Entre as placas disponíveis, a que foi selecionada primeiramente para o controle do projeto foi a Raspberry Pico, devido a seu baixo custo, característica compacta e alto poder de processamento. A placa conta com memória RAM de 264Kb, suporte para memória FLASH de até 16Mb com 2Mb na placa, *clock* de 133MHz, microcontrolador RP2040 ARM Cortex-MO+ Dual Core e roda programações em Python e C++. A figura 2 demonstra a placa. [9]

Figura 2 – Raspberry Pico



Fonte: Felipe Flop [10]

Durante o desenvolvimento da pesquisa, a placa citada foi trocada por outra, a Arduino UNO VER 3, devido a problemas de integração com o sistema operacional do computador para programação. Um Arduino é uma placa de prototipagem de código livre. As placas Arduino são capazes de receber canais de entrada e, através de um código que é implementado na plataforma de desenvolvimento da placa – The Arduino Software (IDE) – o controlador as transforma em informações de saída. A linguagem de programação utilizada é C/C++. Ademais, diversas modificações e personalizações podem ser executadas no microcontrolador, de forma que sensores adicionais sejam implementados para atribuições específicas [10]. O modelo de Arduino UNO REV 3 possui integrado o microcontrolador ATmega328P, e a fotografia de sua estrutura está expressa na figura 3. O microcontrolador possui velocidade de processamento de seu processador de até 16MHz e memória FLASH de 32Kb.

Figura 3 - Microcontrolador Arduino



Fonte: Loja Oficial Arduino (2021). [11]

Esse microcontrolador será utilizado para controlar o servomotor que direcionou o fluxo de água ejetado. Em uma aplicação definitiva, esse atuador serviria para direcionar o propulsor de um foguete. Como o projeto proposto tem característica introdutória, apenas será criado um sistema composto de um sensor capaz de reconhecer a sua própria orientação e de um servomotor que corrigirá essa orientação quando ela não estiver compreendida entre valores especificados. Por mais que a placa definitiva utilizada no projeto foi o Arduino UNO, é interessante retomar as particularidades da Raspberry Pi Pico devido a seu alto poder de processamento, portanto, aplicabilidade em sistemas de controle mais complexos.

4 METODOLOGIA

A parte metodológica do projeto será dividida em várias etapas. A primeira etapa da metodologia consistiu na revisão bibliográfica dos temas do ramo da física e matemática que regem o comportamento de um foguete em voo e os comandos de estabilidade com empuxo vetorial e está explícita na seção “Fundamentação Teórica” do presente relatório. Ainda, retomou-se a teoria sobre o sistema de controle proporcional-integral-derivativo. A partir dessa fundamentação teórica, foi possível desenvolver um modelo de mecanismo de controle. Vale ressaltar que o foco do projeto é o foguetismo, portanto não houve aprofundamento da temática para voos extra-atmosféricos.

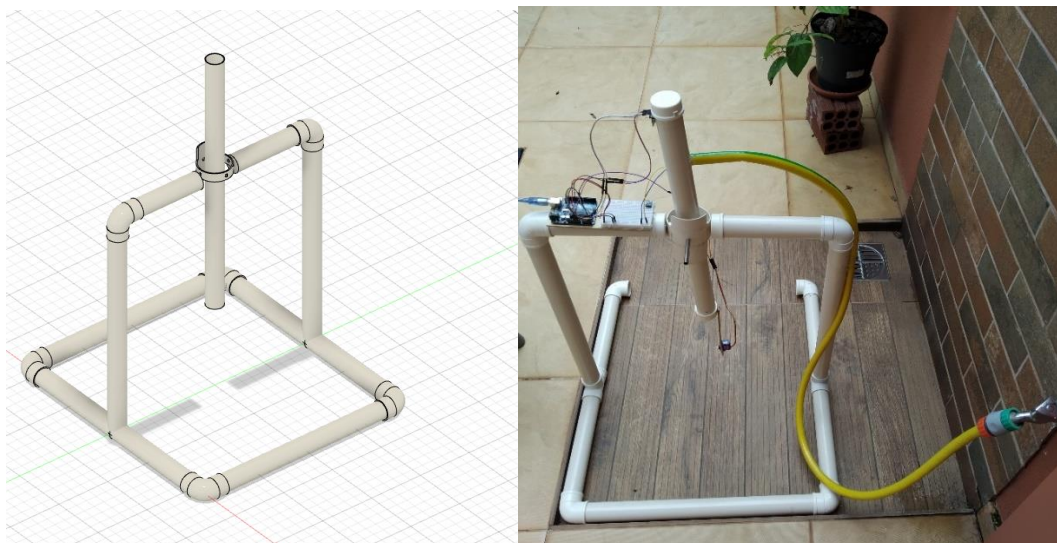
A segunda parte metodológica abrangeu a modelagem e construção do aparato que emula, conceitualmente, um foguete, utilizando canos PVC de 40 e 50 mm de diâmetro. Primeiramente, foi executada a modelagem 3D do aparato no *software Autodesk Fusion 360*, e depois, sua construção definitiva. A etapa de modelagem é importante pois possibilita alterações e otimizações no *design* antes da compra dos componentes. Ao final da montagem, obteve-se a um tubo articulado em uma extremidade, portanto, com rotação possível em um grau de liberdade apenas.

A estrutura principal é caracterizada como um tubo PVC de 40 mm de diâmetro e 50 cm de comprimento onde, em suas extremidades, foram inseridos dois caps PVC para esgoto de 40 mm de diâmetro, de forma que o fechasse totalmente. Para criar o fluxo que promoveu o empuxo na estrutura,

foi feito um furo na parte superior do tubo onde inseriu-se uma mangueira flexível de 1.5 m, de forma que o vetor velocidade da água que entra fosse perpendicular ao vetor velocidade da água exausta. Essa mangueira foi ligada a uma torneira simples de água. O cap na parte inferior do tubo foi furado para inserção de um canudo flexível de plástico comum que foi utilizado para a exaustão da água. Em sequência, foi executado um furo transversal na posição de CG da estrutura, perpendicular ao vetor velocidade de entrada da água. Nesse furo foi inserido um canudo rígido de metal comum que foi utilizado para fixar o tubo principal em uma seção de cano PVC de 50 mm de diâmetro e 10 cm de comprimento, responsável por fixar o tubo principal e articular a estrutura em apenas um grau de liberdade. A seção foi furada em direções perpendiculares de forma que, em uma delas, o canudo de metal fosse inserido e, na outra, dois parafusos de 6 mm fossem inseridos e rosqueados em cada extremidade para fixação do aparato na base. As superfícies de contato da mangueira, dos caps, do canudo de plástico e do canudo de metal foram seladas com selante acrílico a base de água TYTAN para impedir vazamentos de água e garantir que não haveria rotação em torno do eixo do canudo de metal. Um pedaço de MDF de 4 x 20 cm foi recortado e parafusado ao cap inferior do tubo para abrigar o servomotor.

A base foi composta apenas de canos PVC de 40 mm de diâmetro. Para a montagem, os canos foram cortados em 6 pedaços de 25 cm e 4 de 50 cm. Também foram utilizados 6 joelhos, 2 conexões T e 2 caps de mesmo diâmetro. Os dois caps foram furados para abrigar os parafusos que uniram a base a estrutura principal que emula um foguete com apenas um grau de liberdade. Os parafusos foram ajustados de forma que não ficassem muito presos para garantir a rotação livre da estrutura principal nesse eixo. A modelagem 3D e a fotografia do sistema desenvolvido estão expressas na figura 4.

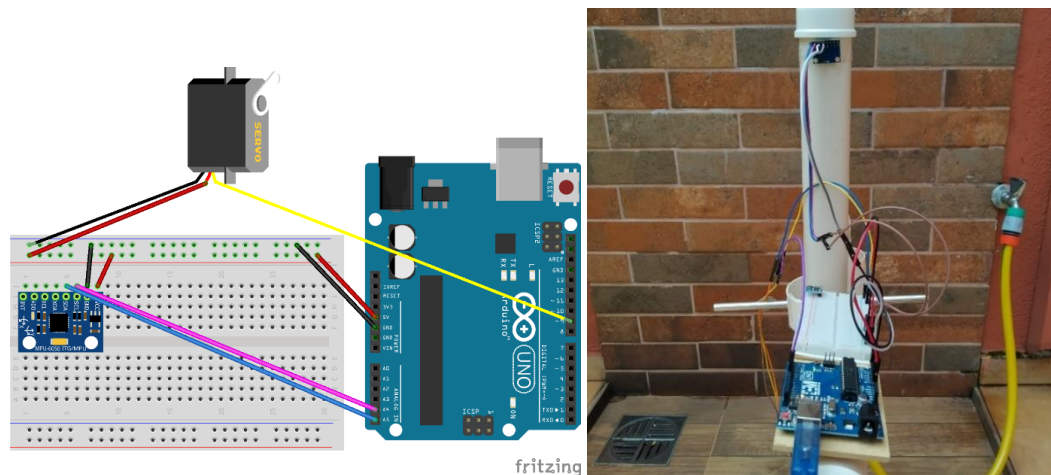
Figura 4 – Modelagem 3D e Fotografia do Sistema Desenvolvido na Quarta Etapa Metodológica



Fonte: Próprios autores. Modelagem executada no *software* Fusion 360, da Autodesk.

A terceira etapa metodológica consistiu na montagem do sistema composto pelo microcontrolador e pelos sensores giroscópio e acelerômetro. O sistema de controle foi criado utilizando-se uma placa de desenvolvimento Arduino UNO REV 3, um servomotor SG92R e uma Unidade de Medição de Posição – Measuring Position Unit (MPU) – MPU6050, placa composta por dois componentes indispensáveis para medição de posicionamento, um acelerômetro e um giroscópio. A conexão desses componentes a placa de desenvolvimento Arduino está expressa na figura 5, composta pelo desenho esquemático e pela fotografia de sua efetiva implementação.

Figura 5 – Esquematisação e Fotografia do Sistema de Controle



Fonte: Próprios autores, modelagem executada no *software* Fritzing.

O MPU foi colocado na parte superior do tubo e fixado com fita adesiva simples. O servo motor foi inserido em um corte feito no MDF na parte inferior do tubo, e sua aleta foi fixada ao canudo de plástico através de um prego. Dessa forma, os resultados coletados pelo MPU podem ser tratados pelo microcontrolador e controlar o servo motor para defletir o canudo de forma a alterar, consequentemente, a direção de exaustão da água e alterar o empuxo do aparato. A Figura 6 é uma fotografia que demonstra como foi montado o servomotor.

Figura 6 –Fotografia da Fixação do Servomotor



Fonte: Fotografia realizada pelos próprios autores.

A quarta etapa metodológica foi a efetiva programação do Arduino para processamento dos dados do MPU através de um método de controle e comando ao servomotor. Para isso, foi criado um código em C++ e com a biblioteca PID desenvolvida por Brett Beauregard [12] para processamento dos dados em um sistema proporcional-integral-derivativo. O código utilizado pode ser encontrado no [GitHub](#) do autor.

A quinta etapa metodológica consistiu em testes efetivos com o sistema completo. Os testes foram divididos em três frentes: a primeira visava corrigir a orientação do tubo para uma angulação desejada através de um sistema de controle PID, a segunda visava apenas obter os valores de comando do servomotor para correção de uma angulação, já a terceira almejava acionar o servo para direcionar o empuxo em uma variação específica de ângulos e observar a alteração da leitura de ângulos pelo MPU.

Na primeira frente de testes, iniciou-se o teste configurando, no ambiente de programação, a angulação desejada final para o aparato e as constantes do sistema de controle. As constantes do sistema de controle foram fixadas em $K_p = 4$, $K_i = 10$, $K_d = 2$ para todos os testes. Na sequência, abriu-se a mangueira com o tubo na posição vertical em repouso e, assim, o fluxo de água foi liberado. Com as mãos, o tubo foi mexido levemente para eliminar quaisquer bolhas de ar que pudessem atrapalhar o fluxo de água. A partir desse ponto, o sistema de controle trabalhou para corrigir a orientação do tubo de maneira a direcioná-lo na angulação desejada definida. Os dados lidos pelo MPU e enviados ao servomotor foram salvos para posterior análise. Os testes foram assumidos completos quando nenhuma alteração de orientação e de comandos era visualizada por, pelo menos, 20 dados sequenciais. Essa etapa compreendeu o teste1, teste2, teste3 e teste 4.

Os parâmetros utilizados para esses testes estão descritos na tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros do teste1, 2, 3 e 4.

	Teste1	Teste2	Teste3	Teste4
Ângulo Desejado	-3.00°	-1.00°	-1.00°	1.00°
Limite Inferior Servo	40	40	20	20
Limite Superior Servo	140	140	170	170

Fonte: Próprios autores.

Na segunda frente de testes, o teste foi executado a seco. No ambiente de programação a angulação desejada foi inserida, e após carregar o código no microcontrolador, o tubo articulado foi direcionado com as mãos, de forma a atingir um valor lido pelo MPU nos limites superiores e inferiores do ângulo desejado - 0.30° - para observar a resposta do sistema de controle. Os limites de angulação do servomotor foram mantidos em 20 e 170°. Esse teste compreende o teste5 e 6.

Na terceira e última frente de testes, o teste voltou a ser executado com o fluxo de água. Aqui, o código de controle foi alterado de forma a comandar o servomotor em uma amplitude específica de ângulos e os retornar os valores do MPU. Essa rotina está, também, disponível no [GitHub](#) do autor. Os valores lidos, então, foram salvos. Para enriquecer a análise, um arco de circunferência graduado em intervalos de 5° foi colado na parede atrás do aparato de testes. Uma câmera foi posicionada de frente ao tubo para observar a angulação promovida pelo empuxo vetorial no aparato e compará-la aos valores colhidos pelo sensor no topo do cano. Aqui, comandou-se o servomotor entre os ângulos de 20 e 170°, novamente. O teste foi considerado completo após 5 ciclos para o servomotor. Essa metodologia compreende os dados do teste7.

A sexta etapa metodológica foi o tratamento dos dados obtidos. Foram criados gráficos com os valores lidos pelo MPU e com os valores enviados ao servomotor e a partir da observação e interpretação dos dados, as conclusões finais do projeto foram consolidadas.

5 CRONOGRAMA DE ATIVIDADES

Com base na metodologia exposta no tópico anterior, as atividades foram ordenadas cronologicamente e são apresentadas no cronograma a seguir. As atividades em negrito dentro da tabela 2 representam a conclusão de sua execução.

Atividades:

A1: Pesquisa Bibliográfica; A2: Familiarização com a placa Raspberry Pico e sensores; A3: Modelagem 3D do Sistema para Posicionamento dos Servoatuadores; A4: Montagem do Sistema; A5: Relatório Parcial; A6: Criação da Rotina para o Arduino; A7: Testes Preliminares; A8: Coleta e Análise dos Resultados; A9: Relatório Final.

Cronologia: Bimestres estão representados pelas letras B.

Tabela 2 – Cronograma do projeto.

Atividades / Bimestre	B1	B2	B3	B4	B5
A1	XX	XX	XX		
A2	XX				
A3		XX			
A4			XX		
A5			XX		
A6				XX	
A7				XX	
A8					XX
A9					XX
A10					XX

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Diante na análise da tabela conclui-se que o projeto foi finalizado de acordo com o cronograma.

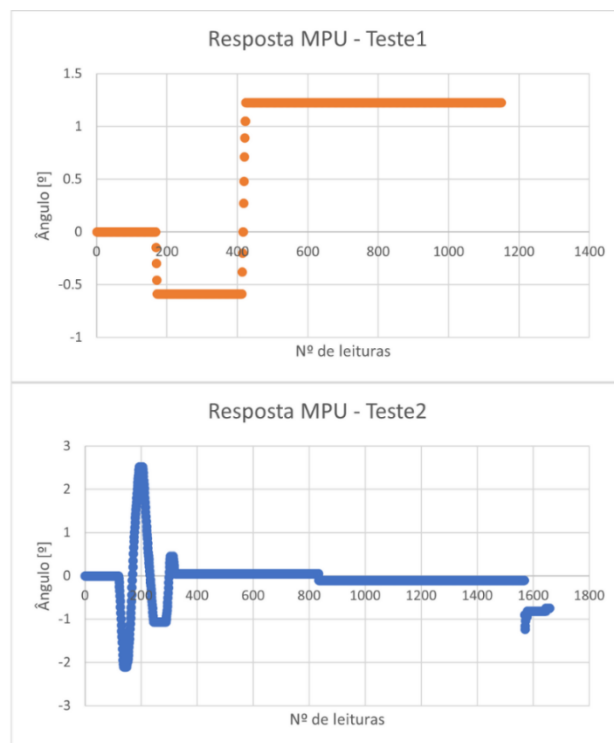
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados da pesquisa foram divididos em aspectos qualitativos e quantitativos e estão relacionados às diversas etapas metodológicas comentadas. O tubo articulado em apenas um grau de liberdade que possui como finalidade emular um foguete foi desenvolvido com sucesso, passando pela fase de *design* em *software* de modelagem 3D e efetiva construção. Após a construção, foi desenvolvido o código em C++ que utiliza o sistema de controle proporcional, integral e derivativo (PID) para comando do servomotor com base nos valores obtidos de ângulo do MPU. Outro código foi desenvolvido, também, com a finalidade de movimentar o servomotor em um arco específico de ângulos e retornar a leitura do MPU. As características específicas desses métodos, assim como os parâmetros utilizados, estão expressas na seção “Metodologia”.

Os testes de 1 a 5 basearam-se na correção da orientação do tubo articulado para ângulos pré-definidos em programação. Em todos os testes foi observado, visualmente, alteração de angulação do

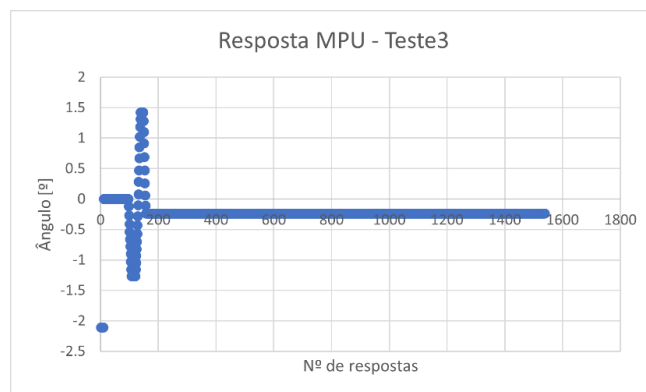
aparato. Porém, em poucos testes houve alteração nos dados do MPU. As oscilações iniciais dos ângulos estão relacionadas ao movimento manual do tubo para remoção de bolhas de ar e não possuem relação com o sistema de controle atuante. Os resultados dos testes 1 e 2 estão expostos na imagem 7. No teste 1 e no teste 2 o comando enviado ao servomotor permaneceu no valor mínimo de 40° por toda a extensão do teste. Já no teste 3, o comando enviado ao servomotor permaneceu no valor mínimo, agora, de 20°, uma vez que esse parâmetro foi alterado entre um teste e outro. Os resultados desse teste estão expostos na imagem 8.

Figura 7 – Dados do Teste 1 e do Teste 2



Fonte: Próprios autores. Gráfico gerado no software *Microsoft Excel*.

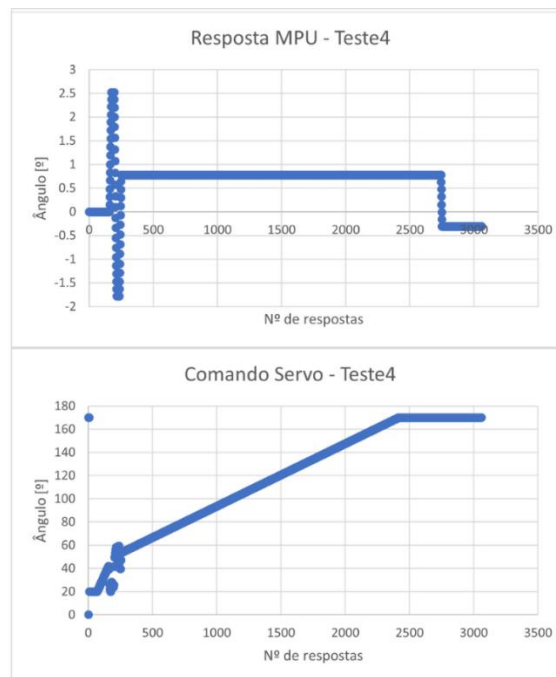
Figura 8 – Dados do Teste 3



Fonte: Próprios autores. Gráfico gerado no software *Microsoft Excel*.

O teste4 obteve valores mais significativos do que os outros três testes anteriores. Observando as curvas de leitura do MPU e a de resposta do servomotor observa-se que o movimento do servomotor conseguiu alterar os valores lidos pelo MPU. No entanto, outros detalhes podem ser observados nesses gráficos: por mais que a estrutura tenha retornado ao estado de equilíbrio após o procedimento para remoção de bolhas, a leitura do MPU não retornou para nulo, e a curva de resposta dos ângulos lidos pelo sensor não se alterou até próximo do final da ação do servomotor. Os dados estão expressos na figura 8. Em todos os quatro primeiros testes foi observada, visualmente, alterações de orientação no tubo articulado.

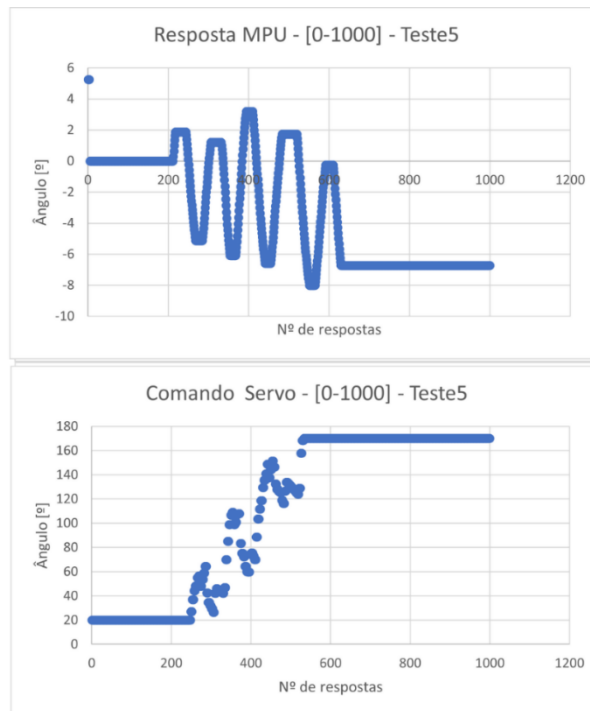
Figura 8 – Dados do Teste4



Fonte: Próprios autores. Gráfico gerado no software *Microsoft Excel*.

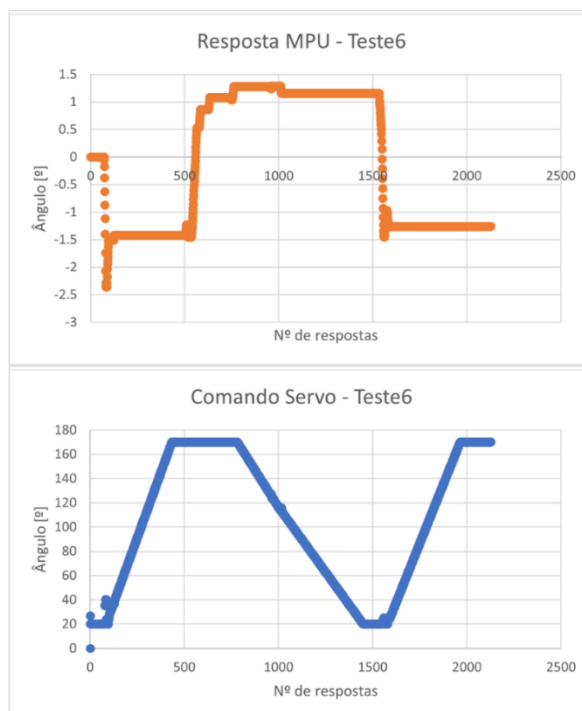
Prosseguindo com os testes, executou-se o teste5 e 6 visando outra finalidade. Nesses testes, visou-se observar a resposta do sistema de controle frente a perturbações nos ângulos lidos pelo MPU e foi realizado a seco. O movimento do componente foi realizado manualmente até atingir resposta pelo sensor desejada. Para esses testes, o ângulo almejado inserido na programação foi de 0.30°. Os gráficos desses dois testes estão expressos nas figuras 9 e 10, respectivamente.

Figura 9 – Dados do Teste5



Fonte: Próprios autores. Gráfico gerado no software *Microsoft Excel*.

Figura 10 – Dados do Teste6



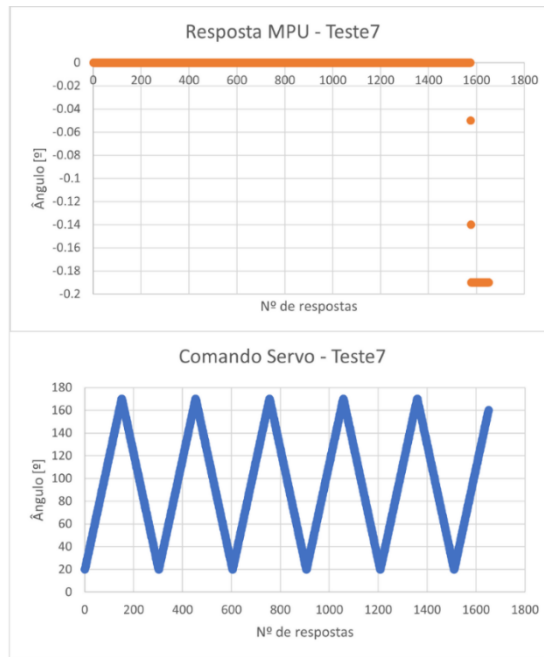
Fonte: Próprios autores. Gráfico gerado no software *Microsoft Excel*.

A observação mais importante a ser extraída desses resultados é a de que o sistema de controle respondeu e corrigiu de maneira coerente as perturbações impostas, trabalhando entre os limites de angulação impostos. Outra análise importante é a de que, no teste5, ao sistema ser solto e recolocado

em repouso na posição vertical, o MPU não retornou seus valores lidos para a posição inicial e manteve constante em -6.74° .

O último teste que foi efetuado comandou o servomotor para se mover entre os limites de 20° e 170° e os valores de angulação lidos pelo sensor giroscópio foram colhidos. Os valores obtidos estão expressos na figura 11.

Figura 11 – Dados do Teste7



Fonte: Próprios autores. Gráfico gerado no software *Microsoft Excel*.

Para complementar as análises dessa etapa metodológica, utilizou-se uma impressão de um arco de circunferência graduado para observar visualmente os ângulos do tubo defletido. Uma câmera foi posta em frente ao sistema para gravar as oscilações durante o teste. Os ângulos de deflexão durante o teste7 atingiram, aproximadamente, 90° e 107° do arco graduado em cada ciclo quando o servomotor estava defletido em 20° e 170° , respectivamente. Nesse caso, 90° corresponde a 0° lido pelo MPU, ângulos maiores de 90° representam valores negativos do MPU e os menores que 90° , valores positivos. Logo, os valores de inclinação do MPU durante o teste7 deveriam se compreender entre, aproximadamente, 0 e 17° . Em contraponto, não foi verificada nenhuma alteração nos dados lidos pela unidade de medição de posição. As fotografias captadas entre o mínimo e o máximo de deflexão do servo estão expressas na figura 12.

Figura 12 – Dados do Teste7



Fonte: Próprios autores. Gráfico gerado no software *Microsoft Excel*.

A partir de todos os resultados obtidos durante os testes pode-se inferir que foi possível defletir a estrutura articulada a partir da alteração do bocal ejetor de água utilizando princípios de controle de empuxo vetorial. No entanto, essa deflexão não foi lida de forma fidedigna pelo sensor de medição de posição MPU6050. O MPU6050 apresentou valores de movimento claros quando a alteração de inclinação foi executada rapidamente, como no caso do procedimento para remoção das bolhas de ar do aparato. Porém, quando a derivada da inclinação pelo tempo foi pequena, o sensor não respondeu prontamente ou mesmo não teve seu valor de leitura alterado, por mais que o empuxo vetorial tenha defletido o cano de forma significativa para visualmente ser reconhecido. A figura 13 mostra a estrutura defletida através do empuxo vetorial durante pré-testes.

Figura 13 – Fotografia do Sistema Defletido por Empuxo Vetorial



Fonte: Fotografia de autoria dos próprios autores.

A partir da visualização da incoerência dos dados lidos pelo MPU, pesquisou-se causas para essa falha. O artigo “Acelerômetro MPU6050 com o Arduino”, do Mundo Projeto, comenta a necessidade do uso de um regulador de tensão para conexão do Arduino ao MPU, pois esse sensor possui limite de 3.46V para sinais recebidos em suas portas. Já o Arduino trabalha com sinais enviados em até 5V [13]. Pode-se inferir que a falta desse componente no conjunto eletrônico influenciou nas leituras obtidas. No entanto, análises mais profundas devem ser executadas para investigar as causas da falha do sensor.

6 CONCLUSÃO

O trabalho de pesquisa apresentado almejou a pesquisa teórica sobre a metodologia de controle denominada empuxo vetorial – *Thrust Vector Control (TVC)*, em inglês – aplicada para foguetemodelismo, assim como a criação de um sistema de controle preliminar que corrigisse a angulação de uma estrutura através da deflexão de uma saída de água utilizando o método. Mais especificamente, foi desenvolvido um sistema capaz de corrigir a orientação de uma estrutura cilíndrica montada de forma que apenas aceitasse movimentos em um grau de liberdade, através da deflexão de um fluxo de água que é ejetado a partir de sua face inferior, utilizando um servomotor como atuador e dados obtidos através de sensores giroscópio e acelerômetro dentro de uma unidade de medição de posição (MPU – Measuring Position Unit) como entrada, processados por um microcontrolador Arduino.

O desenvolvimento preliminar de um sistema de empuxo vetorial promove ao grupo de foguetemodelismo da Universidade Federal do ABC, UFABC Rocket Design, a exploração de novos métodos de controle e comparação entre diferentes tecnologias de comando. Atualmente, a entidade utiliza majoritariamente em seus lançamentos aletas aerodinâmicas como parte do sistema de estabilidade e controle do veículo. Com suporte nos resultados obtidos por esse trabalho, a equipe poderá, ao aprimorar o sensor criado e os métodos de teste, conhecer o comportamento do sistema criado em aplicações práticas, e proporcionar aos lançamentos de veículos aeroespaciais da UFABC a possibilidade da melhora de sua estabilidade e controle a partir da aplicação direta do TVC.

O projeto desenvolveu-se até a criação física da estrutura com apenas um grau de liberdade que simulou o foguete, do sistema eletrônico composto de um Arduino, um servomotor e um sensor unidade de medição de posição MPU6050 que utiliza giroscópios e acelerômetros para determinação de sua posição espacial e acelerações de deslocamentos e do código de controle que utiliza o método proporcional-integral-derivativo (PID – *Proportional-Integral-Derivative*) para comando do servomotor a partir de dados de angulação fornecidos pelo MPU.

Três etapas de testes foram utilizadas para analisar o sistema criado: a primeira objetivou direcionar o tubo articulado para uma orientação desejada através do sistema de controle PID, a

segunda possuía como finalidade obter os comandos enviados ao servomotor para correção de angulação a partir de uma alteração manual na orientação do aparato, e a terceira visou acionar o motor para direcionar o empuxo em uma amplitude de ângulos, observar a alteração da leitura pelo MPU e compará-las à variação angular do sistema obtida através de análise de imagens. Na primeira etapa de testes, não foi observada alteração nos valores de ângulo lidos pelo MPU mediante os comandos do servomotor, por mais que essa mudança pudesse ser observada visualmente. Na segunda etapa, foi observado o comando do sistema de controle do servomotor mediante alteração dos valores lidos pelo MPU. Assim, foi verificado o funcionamento do sistema de controle como o esperado. Na terceira e última etapa de testes analisou-se a resposta do MPU e a angulação defletida através de comandos do servomotor entre 20 e 170°. Aqui, o MPU retornou constantemente valores de 0° para a inclinação do aparato. No entanto, por meio da análise de imagem observou-se que o aparato oscilou entre 0 e 17°, quando o servo estava comandado em 20 e 170°, respectivamente.

A partir dos dados obtidos por esses testes, conclui-se que a construção de um sistema de empuxo vetorial preliminar foi consolidada. Portanto, o sistema criado foi capaz de vetorizar um empuxo e direcionar a estrutura em uma orientação distinta da de repouso. Todavia, devido a problemas com a leitura do sensor MPU, não foi possível acionar o sistema de controle para direcionar o tubo articulado em angulação desejada pré-definida em programação. Frente a essa dificuldade, analisou-se a mudança de orientação utilizando análise de imagem e de dados retornados pelo MPU. Criou-se um código que direcionou o bocal através de comandos do servomotor de forma cíclica. Aqui, foi verificada a alteração de orientação pela implementação de empuxo vetorial entre 0 e 17°. Logo, a partir dos dados obtidos com esse trabalho observou-se a possibilidade do uso de empuxo vetorial para alteração da orientação de um objeto articulado e, a partir de aprimoramento e otimização do sistema criado e metodologia utilizada, poder-se-á utilizar um sistema de controle de empuxo vetorial para aplicações práticas e, ainda, inserir o TVC nos veículos aeroespaciais da UFABC Rocket Design para melhora de sua estabilidade e controle em voo.

REFERÊNCIAS

- [1]: AGÊNCIA ESPACIAL BRASILEIRA. Benefícios da Exploração Espacial. Brasília: 2018. [2]: AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL. RBAC 01: Regulamentos Brasileiros de Aviação Civil. Definições, regras de redação e unidades de medida. Brasília, 2008.
- [2]: AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL. RBAC 01: Regulamentos Brasileiros de Aviação Civil. Definições, regras de redação e unidades de medida. Brasília, 2008.
- [3] ZIPFEL, P. Modeling and Simulation of Aerospace Vehicle Dynamics. 2 ed. Reston, VA: American Institute of Aeronautics and Astronautic Inc., 2007.
- [4] SUTTON, G., BIBLARZ, O. Rocket Propulsion Elements. 7 ed. New York, NY. Wiley-Interscience, 2001
- [5] LAZIC, D.; RISTANOVIC, M. Eletrohydraulic thrust vector control of twin engines with position feedback via angular transducers. Control Engineering Practice v. 15, n.5, p. 583-594, mai., 2007. Disponível em: [\(PDF\) Electrohydraulic thrust vector control of twin rocket engines with position feedback via angular transducers \(researchgate.net\)](#). Acesso em: 18 mai. 2021. DOI 10.1016/j.conengprac.2006.10.015.

- [6] SUMATHI, R., USHA, M. Pitch and Yaw Attitude Control of a Rocket Engine Using Hybrid Fuzzy-PID Controller. The Open Automation and Control Systems Journal, v. 6, p. 29-29, abr. 2014.
- [7] LEVINE, W. The Control Handbook: vol. 1. CRC Press. Boca Ratón, FL, 2000.
- [8] DAL AGNOL, C. Comparação Entre Microcontroladores e Aplicação do FPGA no Controle do Conversor Boost. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) – Centro Universitário UNIFACVEST, Lages, 2018.
- [9] RASPBERRY PI FOUNDATION. Raspberry Pi Pico Tech Specs. Disponível em <<https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-pico/specifications/>>
- [10] ARDUINO. What Is Arduino? 2020. Disponível em: < <https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction> > . Acesso em: 17 mai. 2020.
- [11] ARDUINO. Arduino UNO REV3. 2021. Disponível em < <https://store.arduino.cc/usa/arduino-uno-rev3> > Acesso em: 27 mar. 2021.
- [12] BEAUREGARD, B. Arduino PID Library. Disponível em < <https://playground.arduino.cc/Code/PIDLibrary/#.UySeevldUpo> > . Acesso: 05 out. 2022.
- [13] PROJETADO, M. Acelerômetro MPU6050 com o Arduino. Disponível em: < <https://mundoprojetado.com.br/acelerometro-mpu6050-arduino/> > . Acesso em 5 out. 2022.
- [14] GUSE, R. Novidade! Nova placa Raspberry Pi Pico. 2021. Disponível em <<https://www.filipeflop.com/blog/nova-placa-raspberry-pi-pico/>> Acesso em: 9 jun. 2021.
- [15] BPS.SPACE. Thrust Vector Control. 2021. Disponível em <<https://bps.space/tvc>>. Acesso em: 12 mai. 2021.