

DESENVOLVIMENTO DE UM MECANISMO DE VETORIZAÇÃO DE EMPUXO PARA UM AEROMODELO COM CAPACIDADE STOVL¹

André Basco Becker²

RESUMO

Este artigo apresenta o desenvolvimento e a implementação de um mecanismo de vetorização de empuxo, destinado a aeromodelos. O 3BSM (Three-Bearing Swivel Module), que é um mecanismo de vetorização, é um sistema versátil que oferece três posições de operação distintas, adaptando-se a diferentes demandas de voo. A implementação do mecanismo requer uma abordagem iterativa, levando em consideração a geometria das seções do sistema e a seleção de componentes, como rolamentos e servo-motores. A metodologia adotada abrange a descrição detalhada das seções do 3BSM, cada uma desempenhando um papel crucial no direcionamento do fluxo de exaustão. Além disso, são discutidas as adaptações mecânicas e eletrônicas realizadas nos servos para possibilitar movimentos amplos e contínuos, superando suas limitações de rotação padrão. A integração dos componentes e adaptações resultou em um mecanismo funcional capaz de controlar as rotações das seções, oferecendo uma operação precisa. Esse estudo apresenta uma abordagem abrangente para o desenvolvimento de sistemas físicos iterativos, destacando a importância da prototipagem e ajustes contínuos no contexto do projeto de estrutura para aeromodelos.

Palavras-chave: Vetorização de Empuxo. 3BSM. Design Iterativo. Aeromodelismo.

¹ Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para obtenção do grau de bacharel no Curso de Ciência e Tecnologia, Centro Tecnológico de Joinville (CTJ), Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), sob orientação do Prof. Dr. Antônio Otaviano Dourado.

² Graduando como Bacharel em Ciência e Tecnologia. E-mail: andrebbecker@hotmail.com

ABSTRACT

This article presents the development and implementation of a thrust vectoring mechanism designed for model aircraft. The 3BSM (Three-Bearing Swivel Module) is a versatile system that offers three distinct operational positions, adapting to various flight demands. Implementing the mechanism requires an iterative approach, considering the geometry of the system's sections and the selection of components such as bearings and servo-motors. The adopted methodology encompasses a detailed description of the 3BSM sections, each playing a crucial role in directing the exhaust flow. Additionally, mechanical and electronic adaptations to the servos are discussed to enable wide and continuous movements, overcoming their standard rotation limitations. The integration of components and adaptations resulted in a functional mechanism capable of controlling section rotations, offering precise operation. This study presents a comprehensive approach to the development of iterative physical systems, emphasizing the importance of prototyping and continuous adjustments in the context of structure design for model aircraft.

Keywords: Thrust Vectoring. 3BSM. Iterative Design. Model Aircraft.

1 INTRODUÇÃO

O aeromodelismo, além de ser uma paixão para entusiastas, desempenha um papel fundamental na formação de futuros engenheiros aeroespaciais, fornecendo um campo prático e inspirador para o desenvolvimento de habilidades técnicas e criativas (Silvar et al., 2020). A busca pela compreensão e aprimoramento das aeronaves vai além dos grandes aviões comerciais e militares; encontra-se também nos detalhes precisos e desafios enfrentados na construção e operação de aeromodelos.

De acordo com Mavris e Pinon (2012) a engenharia aeroespacial é uma disciplina que exige não apenas conhecimento teórico, mas também experiência prática. O aeromodelismo oferece um ambiente de aprendizado único, permitindo que estudantes e entusiastas experimentem conceitos complexos de aerodinâmica, controle de voo, estruturas leves e sistemas de propulsão em uma escala reduzida, mas significativa. A aviação moderna tem sido constantemente impulsionada pela busca por inovação e eficiência. Nesse contexto, o desenvolvimento de mecanismos de vetorização de empuxo, como o 3BSM tem desempenhado um papel significativo na melhoria da manobrabilidade e na otimização do desempenho de aeronaves. O presente estudo se concentra no desenvolvimento do 3BSM para aplicação em um aeromodelo inspirado no caça F-35B, versão de decolagem em pista curta e pouso vertical. (SVTOL - Short Take Off and Vertical Landing), explorando a possibilidade de criação do mecanismo por meio de impressão 3D.

O estudo detalhado do 3BSM em um aeromodelo, por meio da técnica de Aprendizado Baseado em Problemas (Blair et al., 2002), não apenas demonstra a aplicação prática de conceitos teóricos, mas também destaca a importância do aeromodelismo como um laboratório experimental valioso para a formação desses profissionais. Ao enfrentar os desafios técnicos e explorar as possíveis adaptações desse mecanismo em uma escala reduzida, os estudantes não apenas expandem seu conhecimento, mas também desenvolvem habilidades essenciais para futuras inovações na indústria aeroespacial. Este estudo busca, portanto, desenvolver e investigar o funcionamento e os desafios práticos de um vetorizador de empuxo no campo do aeromodelismo, desde o processo de concepção em programa CAD, passando pelos cálculos pertinentes ao seu funcionamento e a subsequente implementação por impressão 3D, complementando a formação acadêmica e preparando engenheiros aeroespaciais para desafios complexos e inovações futuras.

2 CONCEITOS FUNDAMENTAIS

A vetorização de empuxo é uma técnica na engenharia aeronáutica que possibilita o controle dinâmico do empuxo gerado pelos motores das aeronaves. Por meio dessa técnica, é viável direcionar ou redirecionar o fluxo de gases de escape, fundamental para aprimorar a manobrabilidade, a eficiência e o desempenho das aeronaves em várias circunstâncias de voo. Para alcançar esse controle preciso, distintos métodos são empregados, cada um com particularidades e aplicações específicas.

Diversos estudos exploraram o potencial da vetorização de empuxo para aprimorar o desempenho de aeronaves. Berrier e Re (1978) e Vinayagam e Sinha (2013) destacam os benefícios da vetorização de empuxo, sendo que este último ressalta especificamente as vantagens da vetorização multiaxial. Atesoglu e Özgören (2007) e Capone e Mason (1986) também demonstram a eficácia da vetorização de empuxo em aumentar a manobrabilidade e o controle em voos de alto ângulo de ataque e em aeronaves STOVL, respectivamente. Esses resultados sugerem que a integração da vetorização de empuxo em um aeromodelo poderia aumentar significativamente seu desempenho e capacidades de controle. Neste contexto, é crucial compreender as diferentes formas de vetorização de empuxo utilizadas na aviação contemporânea.

2.1 FORMAS DE VETORIZAÇÃO DE EMPUXO EM AERONAVES

A vetorização de empuxo, pode ser abordada de diferentes maneiras, tais como:

- **Bocais Variáveis:** O uso de bocais variáveis é um método consagrado de vetorização de empuxo, comumente utilizados em aeronaves de alta performance. De acordo com Páscoa et al. (2013), nesse método, o formato do bocal do motor pode ser ajustado durante o voo para direcionar o fluxo de gases de escape. Isso é alcançado por meio de mecanismos que alteram a geometria do bocal, aumentando ou diminuindo sua abertura ou modificando sua forma para ajustar a pressão e a velocidade dos gases expelidos. Essas mudanças na geometria do bocal possibilitam ajustes na direção do empuxo, proporcionando maior controle sobre a aeronave em diferentes condições de voo, como decolagem, cruzeiro e pouso.
- **Controle de Gases:** O controle de gases é uma estratégia que envolve a manipulação direta dos gases de escape do motor para modificar a direção do empuxo. Isso pode ser alcançado de várias maneiras, incluindo a variação da velocidade do fluxo de gases ou a utilização de defletores posicionados

estrategicamente (Páscoa et al., 2013). O ajuste na velocidade ou direção dos gases de escape pode ser realizado por meio de sistemas de válvulas ou dutos direcionais, permitindo uma flexibilidade maior no redirecionamento do empuxo da aeronave. Esse método é frequentemente aplicado em aeronaves de diferentes portes e configurações para melhorar a eficiência durante manobras e situações específicas de voo.

- **Mecanismos de Pás Móveis:** Os mecanismos de pás móveis ou vaneamento utilizam superfícies móveis, conhecidas como vanes, inseridas no fluxo de gases de escape para alterar a direção do empuxo. Essas vanes podem ser controladas mecanicamente e posicionadas estrategicamente no caminho dos gases de escape para desviar o fluxo de forma desejada. Ao ajustar a posição e o ângulo das vanes, é possível direcionar o empuxo de maneira mais precisa e controlada. Esse método é conhecido por sua eficácia em proporcionar mudanças rápidas na direção do empuxo, permitindo manobras ágeis e precisas durante o voo (Majil, 2016).

Essas abordagens oferecem diferentes formas de controlar o empuxo das aeronaves, cada uma com suas vantagens específicas em termos de desempenho, eficiência e aplicabilidade em diversas situações operacionais.

2.2 RELEVÂNCIA DA VETORIZAÇÃO DE EMPUXO EM AERONAVES

Segundo Berrier e Re (1978) a capacidade de vetorizar o empuxo de um motor oferece algumas vantagens para as aeronaves, incluindo:

- **Melhoria na Manobrabilidade:** A capacidade de direcionar o empuxo oferece benefícios significativos à manobrabilidade da aeronave. Especialmente em situações de baixa velocidade, como durante decolagens e pousos ou durante manobras precisas, a capacidade de redirecionar o empuxo permite ajustes rápidos e precisos. Isso é essencial para a estabilidade durante manobras críticas, proporcionando maior controle direcional e facilitando a realização de curvas mais fechadas ou movimentos bruscos, aumentando a agilidade e a segurança durante operações críticas.
- **Aumento da Eficiência:** A vetorização de empuxo contribui para a eficiência operacional da aeronave ao otimizar a distribuição do empuxo de acordo com as condições de voo. Em diferentes fases do voo, como decolagem, cruzeiro e pouso, as demandas de empuxo podem variar significativamente. A capacidade de direcionar o empuxo permite ajustar a potência do motor de forma mais precisa, reduzindo o consumo de combustível e otimizando o desempenho aerodinâmico. Isso resulta em uma operação mais eficiente e econômica da aeronave, economizando combustível e reduzindo custos operacionais.

- **Versatilidade Operacional:** A habilidade de alterar a direção do empuxo amplia a capacidade de uma aeronave, possibilitando operações variadas em diferentes contextos. Isso é particularmente útil em aeronaves militares, onde a capacidade de realizar manobras especiais, como decolagens e pousos curtos ou em espaços reduzidos, é crucial. Além disso, em situações táticas, como mudanças rápidas de direção ou evasões, a capacidade de vetorizar o empuxo oferece flexibilidade e versatilidade operacional, possibilitando adaptações rápidas e eficientes às condições de voo e às necessidades operacionais em tempo real.

Essas vantagens destacam a importância da vetorização de empuxo como uma tecnologia versátil e essencial para aprimorar a capacidade, a eficiência e a adaptabilidade das aeronaves em uma variedade de situações operacionais.

2.3 ESCOLHA DO 3BSM COMO MECANISMO DE VETORIZAÇÃO DE EMPUXO

O 3BSM se destaca como um mecanismo versátil de vetorização de empuxo devido a :

- **Configurações Flexíveis:** Com suas posições horizontal, inclinada e vertical, o 3BSM oferece um amplo espectro de direcionamento do empuxo, adequado para diversas situações operacionais. (Qi et al., 2020).
- **Eficácia Comprovada:** Implementações práticas do 3BSM em aeronaves reais demonstraram resultados consistentes e melhorias significativas na manobrabilidade e eficiência (Robbins et al., 2018), validando a capacidade do 3BSM de proporcionar ajustes precisos e rápidos no direcionamento do empuxo, maior controle direcional, capacidade de manobra aprimorada e uma resposta mais ágil em diversas condições de voo. Essa eficácia comprovada reforça a relevância do 3BSM como um mecanismo confiável de vetorização de empuxo.
- **Adaptação ao Contexto de Aeromodelismo:** A versatilidade do 3BSM não se limita a aeronaves convencionais, mas se estende ao contexto específico de aeromodelismo. Sua capacidade de ser adaptado e implementado em um aeromodelo e a possibilidade de ser desenvolvido por meio de impressão 3D, torna-o uma escolha relevante e desafiadora para estudos nesse campo e oferece uma oportunidade única para estudar sua eficácia em uma escala reduzida, ao mesmo tempo em que proporciona percepções valiosas sobre a viabilidade técnica, e desafios associados à integração desse mecanismo em modelos em escala.

Esses pontos destacam a versatilidade, eficácia e adaptabilidade do 3BSM como um mecanismo de vetorização de empuxo, tanto em aeronaves reais quanto em contextos de aeromodelismo, demonstrando sua relevância e potencial para aplicações práticas e estudos acadêmicos.

3 METODOLOGIA

No trabalho desenvolvido por Ulrich e Eppinger (2012), os autores exploram metodologias iterativas aplicáveis à projeto de equipamentos, destacando a importância de prototipagem, testes iterativos e ajustes contínuos no desenvolvimento de componentes e sistemas físicos. Sendo esta a metodologia a ser seguida.

3.1 REQUISITOS DE PROJETO

Primeiramente serão listados os requisitos à serem cumpridos durante o desenvolvimento

- O mecanismo deve respeitar a escala do aeromodelo (1:13).
- O mecanismo deve ser acoplado a um motor de 90mm de diâmetro.
- O vetor resultante do empuxo não pode comprometer a estabilidade do avião durante os movimentos de transição.
- Deve-se buscar reduzir ao máximo o número de peças necessárias para o funcionamento.

3.2 DESCRIÇÃO DO 3BSM

Os desafios técnicos inerentes à implementação do 3BSM exigem uma abordagem iterativa, como demonstrado por Giangrande et al. (2018) e Ceccarelli (2009), da geometria das seções do mecanismo até a seleção de componentes como rolamentos e servo-motores, respeitando a escala do aeromodelo. Ao descrever e analisar os aspectos técnicos e os procedimentos de implementação, este estudo visa oferecer uma compreensão abrangente e aprofundada do funcionamento e das possíveis limitações do 3BSM no contexto do aeromodelismo.

O mecanismo tem como objetivo principal direcionar o empuxo gerado pelo motor principal, oferecendo três posições de operação distintas para atender a diferentes demandas de voo:

- **Posição 1 - Horizontal:** Esta posição é dedicada a situações de voo normais, onde o bocal do sistema permanece totalmente na horizontal, alinhado com o eixo central da aeronave.
- **Posição 2 - Inclinação de 45 graus:** Projetada para decolagens em pistas curtas, esta posição permite que o bocal se incline a 45 graus em relação à horizontal, direcionando o empuxo de forma adequada para uma decolagem mais eficiente em espaços reduzidos.

- **Posição 3 - Inclinação de 90 graus:** Destinada ao pouso vertical, esta posição posiciona o bocal em um ângulo de 90 graus em relação à horizontal, permitindo uma direção vertical do empuxo para a desaceleração e aterrissagem em locais com espaço limitado.

Para obter as 3 posições de operação é necessário que o mecanismo do 3BSM seja composto por quatro seções distintas (Fa, 2014):

- **Seção de Entrada de Fluxo e Controle de Rotação:** Esta seção recebe o fluxo proveniente do motor principal e controla a rotação ao redor do eixo axial do duto de exaustão.
- **Primeira Seção de Direcionamento:** Com uma extremidade perpendicular ao eixo do fluxo e a outra inclinada a 22,5 graus, essa seção inicia o direcionamento do fluxo de exaustão.
- **Segunda Seção de Direcionamento:** Com ambas as extremidades inclinadas a 22,5 graus, esta seção continua a alteração do fluxo para a direção desejada.
- **Terceira Seção - Bocal de Direcionamento:** Esta seção é o bocal que finaliza o direcionamento do escoamento para fora da aeronave, conforme configurado para cada uma das três posições de operação.

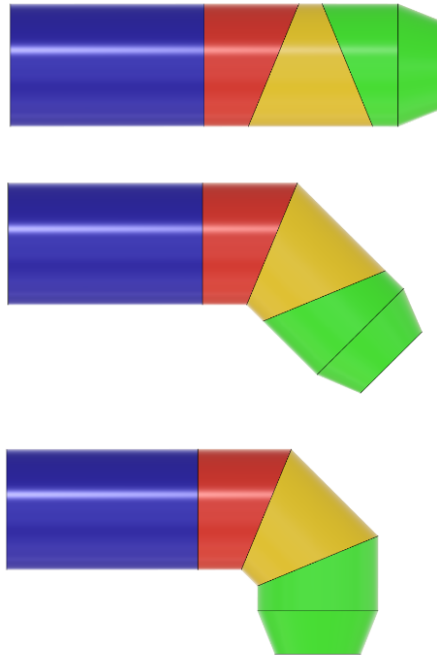
Cada uma dessas seções desempenha um papel crucial no direcionamento e na manipulação do fluxo de exaustão, possibilitando uma operação versátil e adaptável do 3BSM em diferentes situações de voo.

A ilustração na Figura 1 representa apenas a geometria do mecanismo, não refletindo sua funcionalidade. Uma análise inicial revela a necessidade de dois componentes essenciais para o seu funcionamento. O primeiro componente é responsável por unir duas seções, permitindo uma rotação relativa entre elas. O segundo componente, por sua vez, é encarregado de executar essa rotação necessária para o correto desempenho do mecanismo.

3.3 IMPLEMENTAÇÃO DOS MECANISMOS

Para iniciar a implementação de um mecanismo que permita o movimento, primeiro deve ser verificada a continuidade da geometria. Analisando isoladamente a Primeira e a Segunda Seção de Direcionamento, é possível verificar na Figura 2a o alinhamento de todo o perímetro das bordas em contato, no entanto é possível notar na Figura 2b que a região em contato forma uma elipse ao invés de um círculo, isso causa um problema de desalinhamento durante o movimento, ilustrado na Figura 2c.

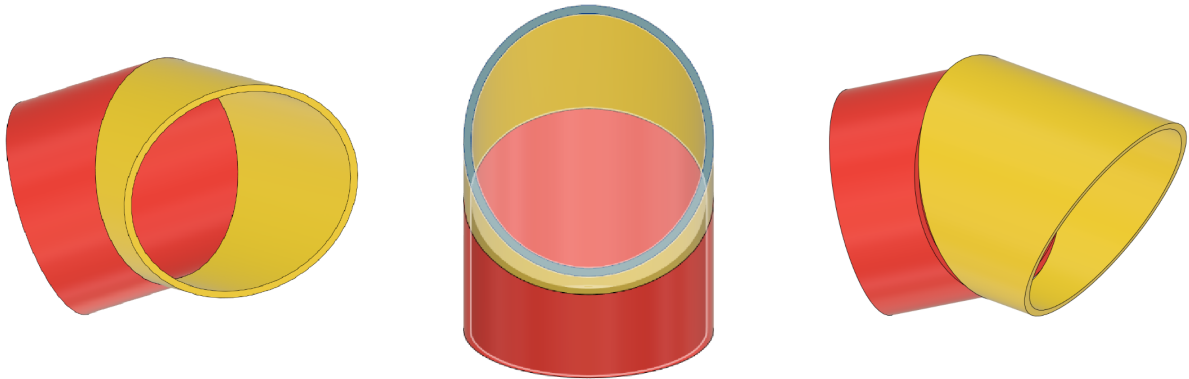
Figura 1 – Ilustração das 3 posições possíveis de operação



Fonte: Autor

Figura 2 – Diferentes posições relativas

- (a) Perímetro alinhado na intersecção
 (b) O perímetro em contato forma uma elipse
 (c) Desalinhamento durante rotação



Fonte: Autor

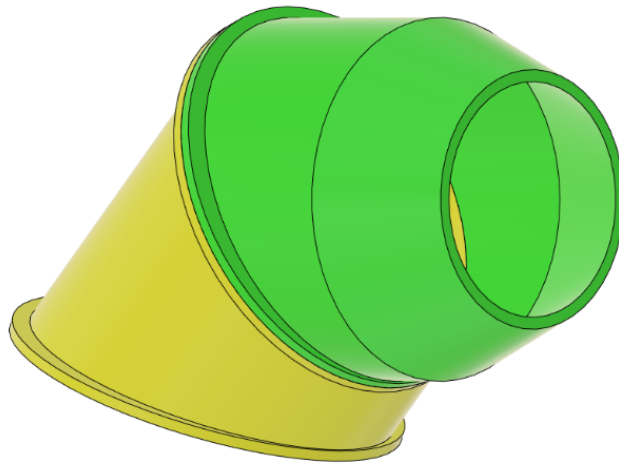
3.3.1 Resolvendo o desalinhamento

Uma solução para o desalinhamento entre as peças em rotação é a criação de uma extrusão circular em cada extremidade da conexão. Essa extrusão deve abranger todo o perímetro da elipse resultante do corte em ângulo e, crucialmente, o centro do círculo deve coincidir com o centro de rotação relativa entre as duas peças. Ao realizar essa extrusão circular, garantimos uma superfície contínua e uniforme ao longo do ponto de conexão, permitindo a rotação suave e contínua das peças sem

desalinhamentos.

Ao eliminar qualquer descontinuidade ou irregularidade na junção, essa adaptação geométrica viabiliza a construção de um mecanismo físico coeso para facilitar o movimento fluido entre as seções. A Figura 3 representa o resultado dessa implementação, destacando a conformidade geométrica obtida após a aplicação das extrusões circulares.

Figura 3 – Segunda Seção de Direcionamento e Seção do Bocal depois de receber a extrusão circular, permitindo uma rotação alinhada



Fonte: Autor

3.3.2 Rolamentos

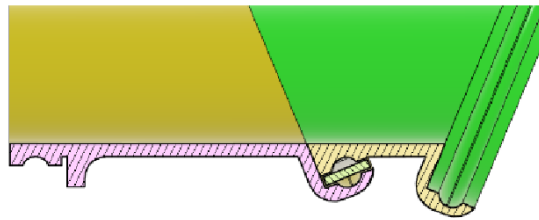
De acordo com Budynas (2016), mancais de rolamentos são utilizados para descrever a classe na qual a carga principal é transferida por elementos em contato rolante em lugar de contato de deslizamento. As duas categorias principais são por meio de esferas ou por meio de cilindros rolantes.

Uma primeira iteração será feita utilizando esferas plásticas com 6 mm de diâmetro, em cada junção do mecanismo a disposição planejada envolve a integração do anel externo do rolamento à peça mais próxima do motor, enquanto o anel interno será incorporado à peça mais distante do motor. Para manter as esferas alinhadas, será desenvolvido um retentor fino entre essas duas partes.

A Figura 4 representa as peças já com a implementação do rolamento integrado à estrutura. A utilização de rolamentos nesse contexto visa minimizar o atrito e oferecer

uma rotação mais suave, além de proporcionar uma capacidade superior de suportar cargas quando comparados aos mancais de deslizamento, o que é essencial para o funcionamento adequado do mecanismo em questão.

Figura 4 – Corte Seccional das peças, é possível verificar a fusão dos anéis do rolamento em cada estrutura e uma visão do retentor entre os anéis



Fonte: Autor

A Figura 5 ilustra o retentor, peça esta que mantém as esferas em um afastamento constante umas das outras.

Figura 5 – Visão do Retentor, com espaço para 10 esferas plásticas de 6mm



Fonte: Autor

3.3.3 Acionamento

Nesta seção, exploramos o sistema de acionamento utilizado para controlar as rotações das seções do 3BSM. A escolha do servo-motor e a relação de redução foram decisivas para garantir um movimento preciso e controlado das peças.

3.3.3.1 Seleção do Servo-Motor

A escolha do servo-motor para um aeromodelo deve considerar as necessidades de alto torque e baixa inércia (Basu; Moosavian; Morandini, 2005). O uso do Micro Servo 9g SG90 para o 3BSM foi fundamentada em seu baixo consumo de energia, leveza e dimensões compactas, oferecendo um equilíbrio ideal entre desempenho e tamanho. Pelas limitações geométricas de redução, a possibilidade de fornecer o torque necessário para movimentar as seções do mecanismo foi um ponto crucial na seleção, garantindo uma operação precisa e controlada. Além disso, a ampla disponibilidade desse modelo no mercado e seu custo acessível tornaram-no uma escolha prática e viável para o projeto, facilitando a aquisição e, se necessário, a substituição do componente. Esses atributos foram determinantes para a sua seleção no contexto específico do mecanismo.

3.3.3.2 Relação de Redução e Engrenagens

O dispositivo gerador de empuxo é um EDF (Electric Ducted Fan), um motor elétrico com um ventilador embutido de 90 mm de diâmetro, correspondente ao diâmetro interno ao longo de todo o comprimento do 3BSM até o bocal. O servo-motor possui dimensões compactas e deve ser posicionado bem próximo à estrutura para acomodar todo o sistema dentro do aeromodelo. Durante a redução, é crucial considerar as restrições geométricas do sistema. A coroa, embutida na estrutura, deve ter um diâmetro primitivo que exceda os 90 mm, somando a espessura das paredes, enquanto o pinhão, acionado pelo servo, deve ter dimensões reduzidas para não aumentar significativamente as dimensões do aeromodelo.

Portanto, uma distância entre centros apropriada para o sistema de engrenagens, que movimentará a junção entre a Seção de Entrada e a Primeira Seção de Direcionamento, situa-se entre 64 mm e 65 mm. As limitações geométricas restringem a redução para 5:1 ou 6:1. Devido à maior inércia do primeiro sistema, optamos por uma redução de 6:1 para diminuir a demanda de torque do servo-motor.

Partindo de uma distância entre centros de 64,8 mm e uma redução de 6:1, é possível determinar os diâmetros primitivos por meio das Equações 1 e 2.

$$i = \frac{D_{p2}}{D_{p1}} = \frac{Z_2}{Z_1} \quad (1)$$

$$C = \frac{D_{p2} + D_{p1}}{2} \quad (2)$$

Onde:

D_{p1} : Diâmetro primitivo do pinhão.

D_{p2} : Diâmetro primitivo da coroa.

Z_1 : Número de dentes do pinhão.

Z_2 : Número de dentes da coroa.

i : Relação de Redução/Transmissão

C : Distância entre os centros.

m : Módulo

Com isso, foi possível determinar um diâmetro primitivo de 18,5 mm para o pinhão e 111,1 mm para a coroa, considerando um ângulo de contato de 20°. Outro parâmetro de escolha na atual iteração é a escolha de 32 dentes para o pinhão, resultando em 192 dentes para a coroa. Com esses dados, foi possível determinar o módulo usando a Equação 3.

$$m = \frac{D_{p2}}{Z_2} \quad (3)$$

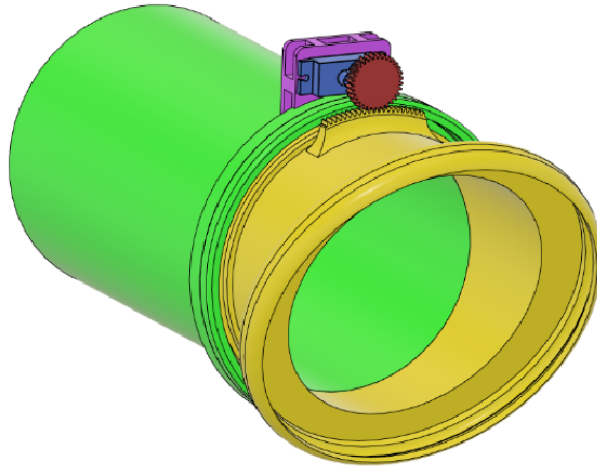
Resultando em um módulo de 0,6 mm.

A junção entre a Seção de Entrada e a Primeira Seção de Direcionamento demanda uma rotação mínima, usada apenas para controlar a guinada enquanto o aeromodelo estiver com empuxo vertical. Assim, uma liberdade de rotação de poucos graus para cada direção é suficiente; especificamente, uma rotação de 18° para cada lado atende aos requisitos. Após o desenho e integração da engrenagem na estrutura, é necessário criar um suporte inicial para o servo-motor. Ao concluir todas essas implementações, obtemos o resultado mostrado na Figura 6.

3.3.3.3 Demais Seções

A conexão entre a Primeira Seção com a Segunda Seção e entre a Segunda Seção com o Bocal de Direcionamento segue os mesmos princípios básicos, mas com algumas distinções específicas:

Figura 6 – Engrenagens implementadas para movimentação da seção



Fonte: Autor

- **Distância entre os Centros:** A distância entre os centros aumenta para 71,6 mm, já que a engrenagem deve acompanhar paralelamente o corte da seção, demandando um diâmetro primitivo mínimo maior que na seção anterior.
- **Relação de Redução:** Devido aos esforços reduzidos nas seções mais distantes do motor e à necessidade de uma rotação mais ampla, a relação de redução é ajustada para 5:1. Cada junção analisada requer um movimento de 180° para atingir seu objetivo, e a nova relação de redução permite uma amplitude menor na rotação do servo-motor.
- **Amplitude de movimento:** Cada junção necessita de uma amplitude de movimento de 180°. Para evitar possíveis falhas por desencaixe ou fim de curso, a porção da coroa que será integrada à estrutura terá uma amplitude de 210°.

Com a nova distância entre os centros, mantendo o mesmo ângulo de pressão e o mesmo número de dentes no pinhão, a Equação 1 determina 160 dentes para a coroa. Resolvendo novamente o sistema das Equações 1 e 2, obtemos um diâmetro primitivo do pinhão de 23,8mm e um diâmetro primitivo da coroa de 119,2mm. Aplicando na Equação 3, o módulo resultante é de 0,75mm.

3.3.4 Integração

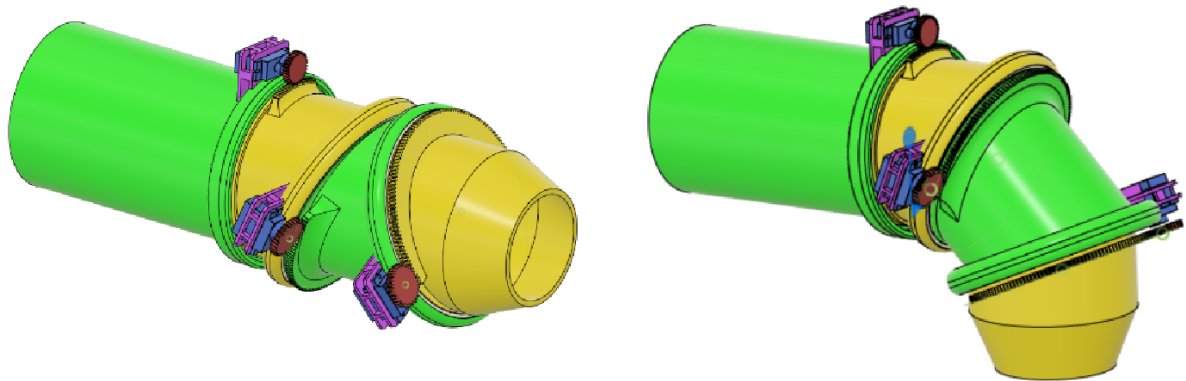
Ao posicionar os servos em seus suportes designados e instalar os pinhões nos respectivos servos, fundindo todos os trechos de coroas na estrutura, o resultado

da primeira iteração é representado nas Figuras 7a e 7b.

Figura 7 – Mecanismo resultante da 1ª iteração

(a) Modo de empuxo paralelo

(b) Modo de empuxo perpendicular



Fonte: Autor

3.4 ADAPTAÇÕES NOS SERVOS

Para garantir o funcionamento adequado das seções do 3BSM e superar as limitações dos servos, foram necessárias modificações significativas tanto no aspecto mecânico quanto eletrônico. Este tópico abordará as adaptações eletrônicas feitas nos servos para contornar suas limitações de rotação padrão e possibilitar movimentos mais amplos e contínuos.

3.4.1 Limitações dos Servos e Soluções

Os servos utilizados originalmente possuem uma restrição padrão de rotação de 180°. Contudo, para o funcionamento adequado do 3BSM, são requeridos movimentos que ultrapassam consideravelmente essa amplitude. Diante dessa limitação, foi necessária uma abordagem para ampliar a amplitude de movimento dos servos.

Para solucionar esse entrave, realizamos modificações mecânicas nos servos, removendo travas internas que limitavam a rotação a 180°. Essa intervenção permitiu uma amplitude de movimento mais ampla, possibilitando rotações contínuas. A Figura 8 exemplifica a adaptação necessária.

Figura 8 – Adaptação mecânica no servo-motor

(a) Caixa de engrenagens exposta



(b) Trava que necessita ser cortada



Fonte: Autor

3.4.2 Adaptações no Circuito

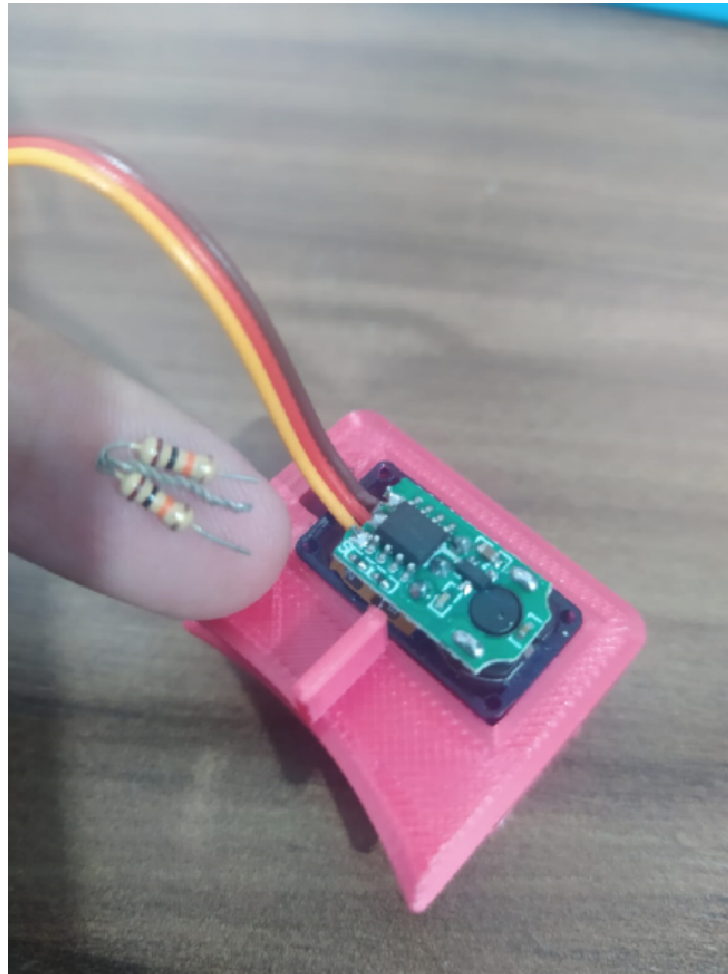
Além das intervenções mecânicas, adaptações no circuito interno dos servos foram essenciais para permitir um controle eficiente dos movimentos das seções do 3BSM. A limitação original estava relacionada ao potenciômetro interno do servo, que sinalizava o fim do curso ao atingir os 0° e 180° . Para superar essa restrição, realizamos uma modificação no circuito do potenciômetro, substituindo-o por um divisor de tensão com duas resistências de 10k Ohm (Figura 9). Essa alteração foi crucial para que o circuito interpretasse uma posição angular constante de aproximadamente 90° , permitindo movimentos contínuos enquanto o sinal de controle era transmitido.

Essas modificações, tanto mecânicas quanto eletrônicas, foram fundamentais para garantir o funcionamento fluido e contínuo das seções do 3BSM, possibilitando a execução adequada das diferentes posições operacionais. Essa abordagem integrada foi crucial para superar as limitações dos componentes e alcançar os objetivos de projeto do mecanismo.

3.5 SEGUNDA ITERAÇÃO: DESAFIOS E MELHORIAS

Nesta etapa, realizamos uma segunda iteração no projeto do 3BSM, visando aprimorar seu funcionamento e resolver as limitações encontradas na primeira versão.

Figura 9 – Divisor de tensão prestes a ser soldado no lugar do potenciômetro



Fonte: Autor

3.5.1 Identificação dos Problemas na Primeira Versão

Na versão inicial do 3BSM, foram identificados alguns problemas significativos que afetaram o desempenho e a funcionalidade do mecanismo. Esses problemas incluíram:

3.5.1.1 Problema 1: Movimento de Transição

Durante a análise cinemática da transição entre as diferentes posições de operação, foi observado que o vetor de empuxo não permanece coplanar com o plano de cabragem durante toda a transição. Isso ocorre apenas nos pontos inicial e final da transição, acarretando sérias consequências no controle da aeronave e gerando momentos indesejados.

A origem desse erro remonta a uma suposição equivocada abordada no tópico 3.3.3.2, ao assumir que a rotação necessária para a primeira junção abrange apenas o movimento para guinada. Na realidade, é necessária uma rotação ao longo

da transição para contrabalançar a dinâmica das outras junções, mantendo o vetor resultante de empuxo sempre alinhado com o plano de cabragem.

3.5.1.2 Problema 2: Folga no Rolamento

Uma outra suposição incorreta foi identificada no projeto do rolamento. Após a prototipagem, observou-se uma dinâmica de deslizamento em vez de rotação, acompanhada por uma folga que permitia a rotação relativa com o mínimo esforço, comprometendo a precisão do movimento. Isso decorre da existência de uma distância máxima entre as pistas de esferas dos anéis de 6,5 mm, enquanto a esfera possui apenas 6 mm, impedindo assim o movimento de rolagem ao não permitir o contato simultâneo com os dois anéis. Além disso, encontrou-se uma considerável dificuldade ao tentar inserir as esferas de plástico por meio de pressão.

3.5.1.3 Problema 3: Tamanho dos Dentes

Apesar de funcionar perfeitamente no CAD, o tamanho dos dentes gerou problemas durante a prototipagem. O módulo diminuto, aliado à precisão de impressão, resultou em uma transmissão de movimento deficiente, com frequente deslizamento, afetando negativamente o desempenho e precisão do mecanismo. A Figura 10 ilustra o tamanho dos dentes em relação à estrutura.

Figura 10 – O módulo diminuto deixa os dentes quase imperceptíveis



Fonte: Autor

3.5.2 Mudanças Necessárias e Ajustes Realizados

Para solucionar os problemas identificados na versão anterior, foram realizadas três principais mudanças e ajustes no projeto do 3BSM.

3.5.2.1 Alteração 1: Amplitude Angular da Coroa

Para viabilizar a rotação completa, uma adaptação na estrutura da Primeira Seção de Direcionamento é necessária, exigindo uma amplitude da coroa a ser fundida na estrutura de 360°. Essa modificação é crucial para permitir a execução total do movimento rotacional, garantindo a adequada transição entre as diferentes posições operacionais do sistema.

3.5.2.2 Alteração 2: Ajustes de Dimensionamento do Rolamento

Para garantir o funcionamento ideal, é crucial que as esferas estejam em contato simultâneo com ambos os anéis. As pistas de esferas foram redimensionados para permitir o movimento de rolagem das esferas. No entanto, durante a operação, a orientação do mecanismo, juntamente com as forças exercidas pelo peso e outros carregamentos, podem resultar em deslocamentos, que combinados com a precisão de fabricação típica de uma impressora 3D, podem afetar o desempenho do mecanismo. Portanto, é fundamental dimensionar o número de esferas para garantir que, mesmo sob cargas radiais, pelo menos 3 estejam sempre em contato com as duas paredes. A decisão foi utilizar um total de 10 esferas para assegurar que pelo menos 3 delas estejam sob compressão, permitindo o funcionamento correto do mecanismo. Além disso, outra alteração realizada foi a remoção de uma pequena seção do anel externo, realocado com posterior colagem, facilitando assim a inserção das esferas.

3.5.2.3 Alteração 3: Redimensionamento das Engrenagens

Duas mudanças devem ser consideradas, o ângulo de pressão ϕ entre os dentes e o módulo do par de engrenagens. Visando melhorar a transmissão de movimento, o ângulo de pressão foi aumentado de 20° para 27°. O módulo pode ser encontrado pela Equação 3, mas agora o número de dentes do pinhão será dado pelo número mínimo de dentes para evitar interferência (Z_{\min}). Uma regra prática para estimar Z_{\min} é dada pela Equação 4.

$$Z_{\min} = \frac{2}{\sin^2(\phi)} \quad (4)$$

Resultando em um Z_{\min} de 10 dentes para o pinhão e um módulo de 1,85mm.

Aplicando os mesmos passos para as demais seções, obtemos um novo dimensionamento para as engrenagens.

Tabela 1 – Propriedades das engrenagens da iteração 2

	Pinhão Par 1	Coroa Par 1	Pinhão Pares 2 e 3	Coroa Pares 2 e 3
m (mm)	1,85	1,85	2,38	2,38
D_p (mm)	18,5	111,1	23,8	119,2
Z	10	60	10	50
ϕ (°)	27	27	27	27

A Figura 11 representa a implementação de todas as alterações, uma maior amplitude angular da coroa, reformulação das pistas de esferas do rolamento, retirada de uma pequena seção para facilitar a inserção de esferas e o módulo dos dentes ampliado, resultando assim em uma peça mais robusta e coerente.

Figura 11 – Junção de seções com todas as alterações implementadas



Fonte: Autor

3.6 RESULTADOS E MELHORIAS OBTIDAS

A segunda iteração do 3BSM envolveu um processo de aprimoramento e ajustes significativos no projeto original, visando resolver as limitações identificadas na versão anterior. Essas modificações foram cuidadosamente planejadas e implementadas para melhorar o desempenho, a estabilidade e a eficiência do mecanismo. Neste contexto, é essencial compreender o impacto dessas mudanças, não apenas na resolução dos problemas anteriores, mas também no aprimoramento geral do funcionamento do sistema. A seguir, discutiremos os principais impactos dessas

alterações no desempenho e na funcionalidade do 3BSM

- **Desempenho Aprimorado:** As modificações implementadas, como o ajuste do ângulo de pressão das engrenagens e o redimensionamento dos componentes, resultaram em um desempenho aprimorado. Isso se refletiu em maior precisão nos movimentos das seções do mecanismo.
- **Estabilidade do Vetor de Empuxo:** Um dos principais desafios anteriores estava relacionado à estabilidade do vetor de empuxo durante a transição entre as diferentes posições de operação. Após as mudanças, houve uma melhoria substancial nesse aspecto, com o vetor de empuxo mantendo-se mais estável ao longo de toda a transição.
- **Redução de Deslizamentos e Folga:** Problemas como deslizamentos indesejados e folga nos rolamentos foram significativamente reduzidos, contribuindo para um movimento mais suave e preciso das engrenagens.
- **Aprimoramento da Robustez:** A nova configuração das engrenagens resultou em um mecanismo mais robusto, capaz de lidar melhor com os carregamentos e movimentos durante a operação.
- **Melhor Funcionamento Geral:** O conjunto de modificações realizadas contribuiu para um funcionamento geral mais estável, confiável e consistente do 3BSM.

Essas melhorias não apenas resolveram os problemas identificados na iteração anterior, mas também elevaram a eficiência e a confiabilidade do mecanismo, garantindo um desempenho mais consistente e adequado às demandas de operação.

3.7 CONCLUSÃO

Ao longo deste estudo, identificamos desafios significativos no desenvolvimento do mecanismo de vetorização de empuxo (3BSM) para aeromodelos. Esses desafios incluíram questões relacionadas à transição entre as diferentes posições de operação, problemas de dimensionamento de engrenagens e limitações nos componentes, como o rolamento. Por meio de iterações e a implementação de melhorias específicas, foi possível superar muitos dos obstáculos iniciais.

As mudanças realizadas, incluindo ajustes dimensionais, alterações nos ângulos de pressão das engrenagens e adaptações nos rolamentos, resultaram em melhorias substanciais no desempenho geral do 3BSM. Os resultados obtidos destacaram a importância de ajustes precisos nos componentes, como os rolamentos e engrenagens, para garantir o funcionamento adequado do mecanismo. Além disso, as alterações no ângulo de pressão das engrenagens demonstraram impactos significativos na eficiência da transmissão de movimento. É importante ressaltar que as melhorias implementadas neste estudo não apenas solucionaram os problemas identificados, mas também forneceram ideias valiosas para projetos futuros. As

adaptações mecânicas e eletrônicas realizadas podem ser aplicadas como diretrizes em projetos semelhantes, contribuindo para o avanço e aprimoramento de mecanismos para aeromodelos. Dessa forma, os resultados alcançados não apenas atenderam aos objetivos estabelecidos inicialmente, mas também forneceram uma base sólida para futuras pesquisas e aplicações práticas na área de mecanismos de vetorização de empuxo para aeromodelos.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A jornada ao longo deste estudo forneceu uma base sólida para a continuidade da pesquisa e desenvolvimento do aeromodelo. A experiência adquirida e os aprimoramentos implementados no mecanismo de vetorização de empuxo demonstraram a importância da abordagem iterativa e adaptativa no desenvolvimento de sistemas complexos. As melhorias realizadas no 3BSM representam um passo significativo no aprimoramento do aeromodelo, porém, este trabalho é apenas o início de uma jornada mais ampla. A visão para futuras pesquisas inclui a expansão do escopo para abranger o desenvolvimento integral do aeromodelo.

Os planos subsequentes de pesquisa direcionam-se para explorar áreas adicionais de otimização e refinamento do sistema. Há uma aspiração clara de avançar na investigação de outros componentes do aeromodelo, integrando o aprendizado obtido neste estudo para desenvolver um projeto mais abrangente e refinado. Portanto, este trabalho marca o ponto de partida para um ciclo contínuo de aprimoramento e desenvolvimento do aeromodelo. A expectativa é de que futuras pesquisas possam expandir os horizontes, explorando novas possibilidades e refinando ainda mais os detalhes do projeto.

REFERÊNCIAS

- ATESOGLU, O.; ÖZGÖREN, M. K. High-alpha flight maneuverability enhancement of a fighter aircraft using thrust-vectoring control. **Journal of Guidance, Control, and Dynamics**, American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA), v. 30, n. 5, p. 1480–1493, set. 2007. ISSN 1533-3884. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.2514/1.28620>.
- BASU, A.; MOOSAVIAN, S. A.; MORANDINI, R. Mechanical optimization of servo motor. **Journal of Mechanical Design**, ASME International, v. 127, n. 1, p. 58–61, jan. 2005. ISSN 1528-9001. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1115/1.1804196>.
- BERRIER, B.; RE, R. A review of thrust-vectoring schemes for fighter applications. In: **14th Joint Propulsion Conference**. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1978. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.2514/6.1978-1023>.
- BLAIR, K. et al. Problem based learning in aerospace engineering education. In: **2002 Annual Conference Proceedings**. ASEE Conferences, 2002. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.18260/1-2--10974>.
- BUDYNAS, R. G. **Elementos de máquinas de Shigley**. [S.l.]: AMGH, 2016. 1096 p.
- CAPONE, F.; MASON, M. Multiaxis aircraft control power from thrust vectoring at high angles of attack. In: **4th Applied Aerodynamics Conference**. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1986. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.2514/6.1986-1779>.
- CECCARELLI, M. Challenges for mechanism design. In: _____. **SYROM 2009**. Springer Netherlands, 2009. p. 1–13. ISBN 9789048135226. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1007/978-90-481-3522-6_1.
- FA, Y. Design and analysis of three bearing swivel nozzle inner contour. **Aeronautical Computing Technique**, 2014. Disponível em: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:114118642>.
- GIANGRANDE, P. et al. Design and testing of pmsm for aerospace ema applications. In: **IECON 2018 - 44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society**. IEEE, 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1109/IECON.2018.8591318>.
- MAJIL, D. Design and analysis of jet vane thrust vectoring nozzle using cfd and optimization of nozzle parameters. **Indian Journal of Science and Technology**, Indian Society for Education and Environment, v. 9, n. 39, out. 2016. ISSN 0974-6846. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.17485/ijst/2016/v9i39/100778>.
- MAVRIS, D. N.; PINON, O. J. An overview of design challenges and methods in aerospace engineering. In: _____. **Complex Systems Design amp; Management**. Springer Berlin Heidelberg, 2012. p. 1–25. ISBN 9783642252037. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-25203-7_1.

PÁSCOA, J. et al. A review of thrust-vectoring in support of a v/stol non-moving mechanical propulsion system. **Central European Journal of Physics**, v. 3, p. 374–388, 07 2013.

QI, H. et al. Development research and crucial technology analysis of scaled 3-bearing swivel duct nozzle rotary drive system. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, IOP Publishing, v. 816, n. 1, p. 012–015, mar. 2020. ISSN 1757-899X. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/816/1/012015>.

ROBBINS, D. et al. F-35 subsystems design, development amp; verification. In: **2018 Aviation Technology, Integration, and Operations Conference**. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.2514/6.2018-3518>.

SILVAR, S. B. L. et al. Desenvolvimento de uma aeronave radio controlada para transporte de carga. In: . [s.n.], 2020. Disponível em: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:213722333>.

ULRICH, K.; EPPINGER, S. **Product Design and Development**. [S.l.]: Internat. ed, McGraw-Hill, 2012.

VINAYAGAM, A.; SINHA, N. K. An assessment of thrust vector concepts for twin-engine airplane. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering**, SAGE Publications, v. 228, n. 6, p. 960–979, maio 2013. ISSN 2041-3025. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1177/0954410013485697>.