Universidade Federal de Pernambuco
Centro de Tecnologia e Geociências
Departamento de Engenharia Mecânica

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO:

Análise de Eficiência e Ruído: Hélices Toroidais versus Hélices Tradicionais

ALUNO:

Artur Felipe Silva de Souza Canto

PROFESSOR ORIENTADOR:

Justo Emilio Alvarez Jácobo

Recife - PE
2025

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO

CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ARTUR FELIPE SILVA DE SOUZA CANTO

ANÁLISE DE EFICIÊNCIA E RUÍDO:

Hélices Toroidais versus Hélices Tradicionais

TCC apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, como requisito para a obtenção do título de bacharel em engenharia mecânica.

Orientador: Justo Emilio Alvarez Jácobo

RECIFE
2025

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Canto, Artur Felipe Silva de Souza.
ANÁLISE DE EFICIÊNCIA E RUÍDO: Hélices Toroidais versus Hélices Tradicionais / Artur Felipe Silva de Souza Canto. - Recife, 2025.
50 : il., tab.

Orientador(a): Justo Emilio Alvarez Jácobo
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia Mecânica - Bacharelado, 2025.
Inclui referências.

1. hélices toroidais. 2. empuxo. 3. ruído. 4. propulsão elétrica. 5. eficiência energética.. I. Jácobo, Justo Emilio Alvarez. (Orientação). II. Título.

620 CDD (22.ed.)

Universidade Federal de Pernambuco
Departamento de Engenharia Mecânica Centro de Tecnologia e Geociências- CTG/EEP

DEMEC

ATA DE SESSÃO DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO – TCC2

Ao 10° dia do mês de abril do ano de dois mil e vinte e cinco, às 19:00 horas, reuniu-se a banca examinadora para a sessão pública de defesa do Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco, intitulado **Análise de Eficiência e Ruído: Hélices Toroidais versus Hélices Tradicionais**, elaborado pelo aluno **Artur Felipe Silva de Souza Canto**, matrícula 20180017262, sob a orientação do Prof. **Justo Emilio Alvarez Jácobo**. A banca foi composta pelos avaliadores: Prof. **Justo Emilio Alvarez Jácobo** (orientador), Profa. **Paula Suemy Arruda Michima** (avaliadora), e Prof. **Alysson Nascimento de Lucena** (avaliador). Após a exposição oral do trabalho, o candidato foi arguido pelos componentes da banca que em seguida reuniram-se e deliberaram pela sua aprovação, atribuindo-lhe a média 9 (nove), julgando-o apto(x) / inapto( ) à conclusão do curso de Engenharia Mecânica. Para constar, redigi a presente ata aprovada por todos os presentes, que vai assinada pelos membros da banca.

Orientador:	Prof. Justo Emilio Alvarez Jácobo	Nota:
Assinatura		9 (nove)
Avaliadora Interna:	Profa. Paula Suemy Arruda Michima	Nota:
Assinatura		9 (nove)
Avaliador Externo:	Prof. Alysson Nascimento de Lucena	Nota:
Assinatura		9 (nove)

Recife, 10 de abril de 2025.

Prof. Marcus Costa de Araújo
Coordenador de Trabalho de Conclusão de curso - TCC
Curso de Graduação em Engenharia Mecânica – CTG/EEP-UFPE

RESUMO

Diante dos desafios da mobilidade elétrica e da demanda por soluções mais eficientes e silenciosas, este trabalho analisa comparativamente o desempenho de hélices toroidais e hélices tradicionais quanto à eficiência propulsiva e à emissão sonora. Trata-se de uma investigação aplicada, com abordagem metodológica mista: quantitativa, por meio da medição de empuxo e ruído em condições controladas; e qualitativa, por meio da análise geométrica e da observação da propagação sonora em diferentes ambientes. A pesquisa foi guiada pelo método hipotético-dedutivo, a partir da hipótese de que hélices toroidais apresentam desempenho superior. Foram modelados protótipos tridimensionais, fabricados por impressão 3D e testados sob as mesmas condições operacionais, considerando variáveis como empuxo absoluto, nível de ruído, área da pá e empuxo específico por área. Os resultados mostraram que, apesar do maior empuxo absoluto das hélices toroidais, seu desempenho específico por metro quadrado foi inferior. Em ambientes fechados, geraram menos ruído, mas em espaços abertos apresentaram maior emissão sonora. Conclui-se que a geometria toroidal tem potencial em aplicações específicas, sendo necessário avançar em otimizações de design e análise energética para viabilizar seu uso em larga escala.

Palavras-chave: hélices toroidais; empuxo; ruído; propulsão elétrica; eficiência energética.

ABSTRACT

In response to the challenges of electric mobility and the demand for more efficient and quieter propulsion systems, this study presents a comparative analysis between toroidal and traditional propellers in terms of thrust efficiency and noise emission. This is an applied investigation, using a mixed methodological approach: quantitative, through measurements of thrust and noise under controlled conditions; and qualitative, through geometric analysis and observation of sound propagation in different environments. The research followed the hypothetical-deductive method, based on the hypothesis that toroidal propellers deliver superior performance. Three-dimensional models were developed, manufactured using 3D printing, and tested under identical operational conditions, considering variables such as absolute thrust, noise levels, blade surface area, and specific thrust per square meter. The results showed that although toroidal propellers generated greater absolute thrust, their specific performance per unit area was lower. In closed environments, they emitted less noise, but in open areas, they produced higher levels of sound. The study concludes that the toroidal geometry holds promise for specific applications, but requires further design optimization and energy efficiency analysis for broader implementation.

Keywords: toroidal propellers; thrust; noise; electric propulsion; energy efficiency.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO **8**
1.1 OBJETIVOS 10
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA **11**
2.1 HÉLICES TRADICIONAIS 11
2.1.1 Funcionamento das hélices tradicionais 11
2.1.2 Passo da hélice 13
2.1.3 Componentes e Configuração das Hélices 13
2.1.4 Teoria do elemento de pá 14
2.2 Nível de Ruído 19
2.3 Propagação de onda sonora 21
2.4 Potencial inovativo das hélices toroidais 21
3 METODOLOGIA **24**
3.1 PROPOSTA DO TRABALHO 25
3.2 MODELAGEM 3D NO AUTODESK FUSION 360 25
3.2.1 Passo a passo para a criação do primeiro protótipo 25
3.3 CÁLCULO DE ÁREA DAS HÉLICES 32
3.4 FATIAMENTO E IMPRESSÃO DAS HÉLICES 35
3.5 REALIZAÇÃO DOS TESTES 36
3.5.1 Teste de Empuxo 36
3.5.2 Teste de Ruído 37
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES **39**
4.1 Apresentação dos resultados 39
4.2 Análise e interpretação dos resultados 43
4.2.1 Eficiência Aerodinâmica (Empuxo) 43
4.2.2 Comportamento Acústico e Redução do Ruído 45
4.2.3 Relação Entre Eficiência e Ruído 46
4.3 Implicações e aplicações práticas 47
4.3.1 Uso em Drones e Aeronaves Elétricas 47
4.3.2 Sustentabilidade e Economia de Energia 47
5 CONCLUSÃO **48**
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS **49**

1 INTRODUÇÃO

No cenário global atual, caracterizado por uma constante evolução tecnológica, os setores de propulsão aérea e marítima enfrentam desafios significativos. Entre eles, destacam-se a necessidade de promover a eficiência energética e a urgência em mitigar os impactos ambientais adversos. A demanda crescente por soluções que alinhem eficiência e sustentabilidade nesses setores impulsionou a busca por inovações disruptivas capazes de atender a essas exigências. Esse contexto se agravou com o aumento de 1% no consumo global de energia primária em relação ao ano anterior, situando-se 3% acima dos níveis pré-pandemia de 2019, além do crescimento recorde de 0,8% nas emissões de dióxido de carbono, evidenciando a necessidade premente de transição para fontes de energia mais limpas e sustentáveis (Statistical Review of World Energy, 2023).

Em paralelo, o avanço das energias renováveis tornou-se cada vez mais relevante, à medida que a sociedade global se conscientizou sobre a importância de transitar para fontes de energia mais limpas e sustentáveis. Esse movimento não apenas refletiu uma resposta às mudanças climáticas, mas também representou uma oportunidade para redefinir os paradigmas de produção e consumo de energia nos setores de transporte aéreo e marítimo. A geração de energia renovável, excluindo a hidroelétrica, registrou um aumento significativo de 14% em 2022, consolidando-se como um vetor crucial na mitigação dos impactos ambientais associados ao setor energético. No entanto, a transição para um futuro energético mais sustentável enfrentou barreiras significativas, incluindo incertezas políticas e regulatórias, procedimentos de licenciamento complicados, além de desafios financeiros e de infraestrutura (XICBPE, 2018).

Diante dos desafios enfrentados pelos sistemas de propulsão elétrica, a investigação sobre a hélice toroidal surge como uma alternativa promissora para reduzir a emissão sonora e otimizar o desempenho aerodinâmico. O ruído gerado por hélices tradicionais representa um fator limitante em aplicações urbanas e comerciais, influenciando desde a aceitação pública até regulamentações para drones e aeronaves elétricas. A geometria toroidal minimiza a formação de vórtices nas extremidades das pás, reduzindo significativamente as ondas sonoras perceptíveis ao ouvido humano. Dessa forma, a adoção dessa tecnologia pode

mitigar os impactos da poluição sonora sem comprometer a eficiência propulsiva. A hélice toroidal apresenta potencial para diversas aplicações comerciais, especialmente em sistemas de propulsão elétrica para drones e aeronaves de pequeno porte. Além disso, seu design inovador pode ser explorado em sistemas de ventilação industrial, onde a redução de ruído e a eficiência aerodinâmica são fatores críticos.

Embora as hélices toroidais tenham ganhado notoriedade recentemente, a literatura científica carece de estudos experimentais que validem suas vantagens em relação às hélices tradicionais. As análises disponíveis são predominantemente teóricas e descritivas, sem uma metodologia padronizada que permita comparações quantitativas sobre eficiência energética e emissão sonora. Além disso, não há registros detalhados sobre os processos de desenvolvimento e fabricação dessas hélices, tornando necessária uma abordagem experimental para validar sua viabilidade prática.

Dessa forma, a motivação desta pesquisa foi impulsionada pela necessidade de desenvolver tecnologias sustentáveis que possam potencializar a transformação das práticas de propulsão. Este estudo propõe uma avaliação experimental, fornecendo dados concretos sobre a conversão de potência em empuxo e a propagação sonora das hélices toroidais em comparação com as convencionais. Os resultados contribuirão para uma base científica mais sólida, permitindo uma análise embasada de sua aplicabilidade em diferentes setores.

Para obter uma avaliação técnica da viabilidade das hélices toroidais, este estudo analisou o desempenho aerodinâmico e acústico desses modelos em comparação com as hélices tradicionais, quantificando sua eficiência energética e seu impacto sonoro. Até o momento, dentre as fontes pesquisadas, não foram encontrados estudos quantitativos detalhados que avaliem essas métricas sob condições controladas. Assim, além de verificar as vantagens sugeridas desse novo design, esta pesquisa estabeleceu um referencial inicial para futuras investigações na área.

Os achados deste estudo servirão como base para o desenvolvimento de tecnologias mais eficientes e sustentáveis na propulsão aérea e marítima, fornecendo dados experimentais concretos sobre a conversão de potência em empuxo e a dispersão sonora em diferentes condições operacionais.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é analisar a eficiência e os impactos sonoros da hélice toroidal circular de 3 pás em comparação com a hélice tradicional de 3 pás, explorando seu potencial na propulsão aérea e marítima. Como objetivos específicos,destacam-se:

- Desenvolver modelagem 3D;
- Avaliar a Viabilidade da Fabricação por Impressão 3D;
- Comparar a Eficiência de Propulsão;
- Comparar Emissões Sonoras;
- Aferir Viabilidade Econômica.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 HÉLICES TRADICIONAIS

2.1.1 Funcionamento das hélices tradicionais

Um aerofólio, também conhecido como perfil aerodinâmico, é uma seção em duas dimensões projetada especificamente para alterar tanto a direção quanto a velocidade que incide em tal estrutura. Essas alterações resultam em uma variação nas pressões registradas na parte superior e inferior do perfil, em conformidade com o Princípio de Bernoulli. Tal fenômeno dá origem a uma força denominada resultante aerodinâmica.

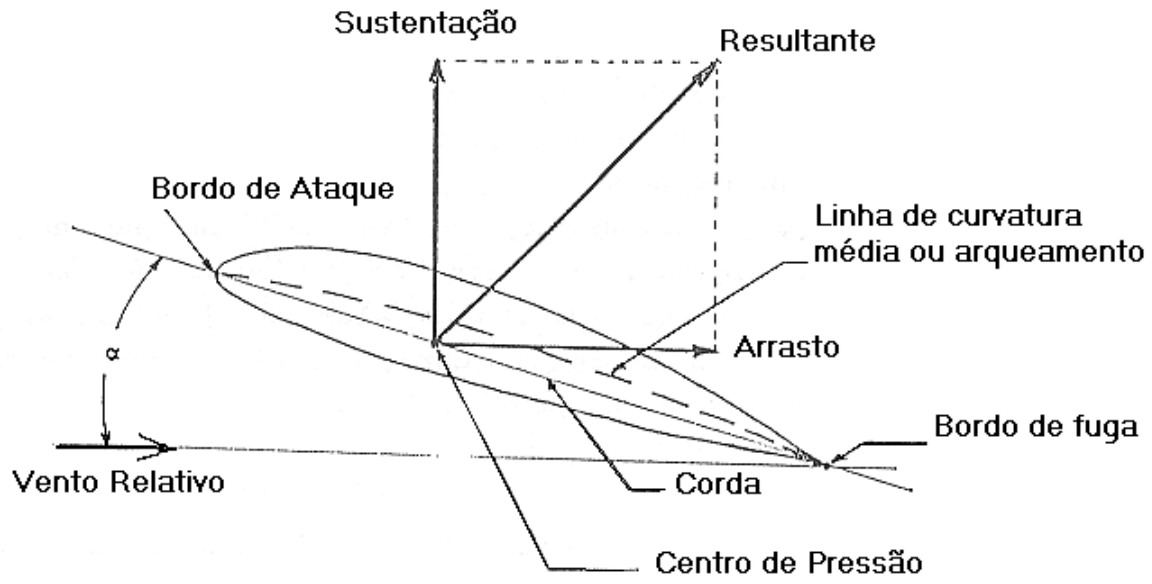
À medida que nos afastamos do centro de rotação de uma hélice, a velocidade linear da pá em relação ao ar aumenta proporcionalmente à distância radial. Em termos simples, a velocidade tangencial de um elemento de pá é dada por $V = \omega \times r$ é a velocidade angular (em rad/s) e r é o raio até aquele elemento. Assim, regiões próximas à ponta da hélice movem-se muito mais rápido pelo ar do que regiões perto do cubo. Além disso, quando a aeronave está avançando, soma-se à velocidade de rotação da pá a velocidade de avanço do fluxo de ar, resultando em uma velocidade relativa *helicoidal* ainda maior nas pontas. Em consequência, as partes externas da pá experimentam os maiores números de Mach relativos. O número de Mach se dá pela razão entre a velocidade do objeto (*V*) e a velocidade do som no ambiente (a) como mostra na equação 1. De fato, projetistas de hélices concentram atenção especial no Mach nas proximidades da ponta, pois geralmente é o fator limitante de desempenho (KITPLANES, 2025).

$$Mach = \frac{V}{a} \tag{1}$$

Quando alguma porção da pá atinge velocidades supersônicas (Mach ≥ 1) em relação ao ar, surgem efeitos aerodinâmicos adversos. Em hélices convencionais, normalmente evita-se chegar a Mach 1 na ponta, pois além desse ponto surgem ondas de choque intensas que degradam drasticamente o desempenho. Em termos

práticos, isso significa que a eficiência da hélice despenca quando a velocidade relativa local excede a do som. Esse fenômeno está associado à conhecida “barreira do som”, caracterizada por um grande aumento de arrasto e outros efeitos indesejáveis ao se aproximar de Mach 1. No caso de hélices, conforme a ponta aproxima-se do regime transônico, a força de resistência (arrasto compressível) e o torque requeridos aumentam abruptamente, prejudicando a propulsão útil.

Figura 1. Forças geradas num perfil aerodinâmico.



Fonte: Charles Nunes (2024)

As forças mencionadas são determinadas por coeficientes específicos a cada perfil, os coeficientes de sustentação e arrasto, que são influenciados diretamente pelo ângulo de ataque e pela forma do perfil. O ângulo de ataque em uma hélice é definido pela relação entre o passo geométrico da pá — ou seja, a inclinação da seção transversal da hélice em relação ao plano de rotação — e a direção do escoamento relativo do ar. Esse escoamento é representado pela soma vetorial da velocidade tangencial da pá (devida à rotação do motor) com a velocidade de avanço do veículo (como um drone ou aeronave de asa fixa).

Quanto maior a velocidade de avanço para uma mesma rotação, menor será o ângulo de ataque efetivo. Da mesma forma, para uma hélice parada em um túnel

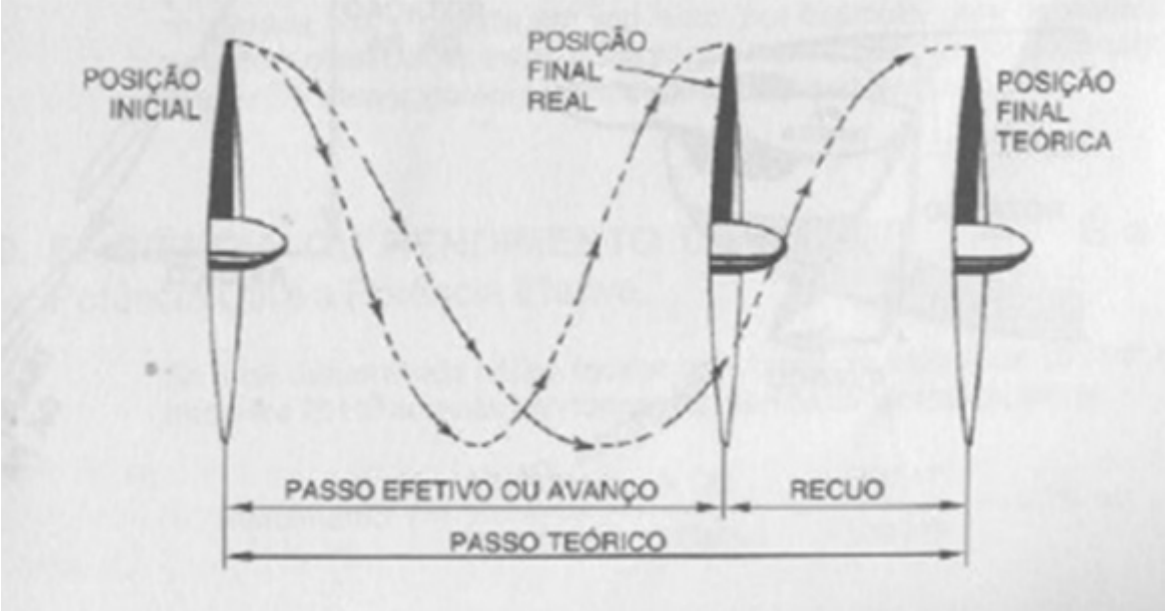
de vento (ou drone estático), o ângulo de ataque será maior. Essa relação dinâmica é fundamental para compreender a eficiência aerodinâmica da hélice em diferentes regimes de voo.

2.1.2 Passo da hélice

Em um sistema helicoidal como o da hélice, define-se o passo como a distância teórica que a hélice avançaria em uma rotação completa, caso estivesse se deslocando em um meio sólido, sem recuo. Na prática, o ar é um fluido compressível, e há perda de energia devido ao arrasto e à compressibilidade do escoamento, o que faz com que a distância efetiva de avanço seja menor que o passo teórico.

A figura 2 ilustra esse conceito:

Figura 2. Passo de uma hélice.



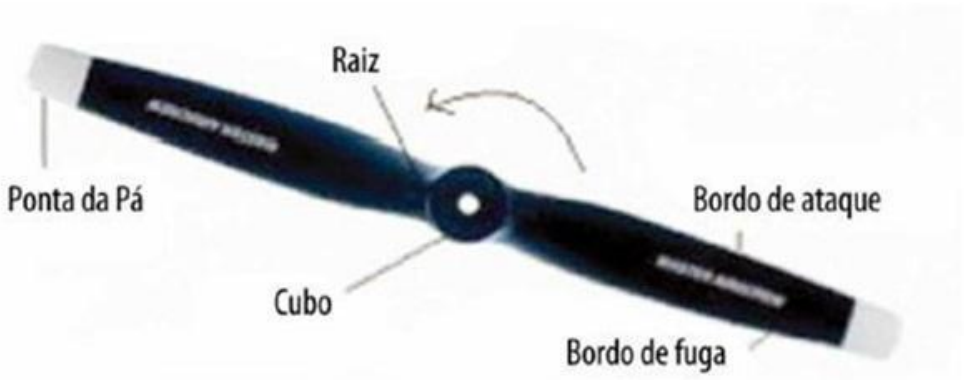
Fonte: Blog Hangar

2.1.3 Componentes e Configuração das Hélices

A hélice desempenha um papel crucial na dinâmica de voo, sendo responsável por converter a energia mecânica do motor em força propulsiva.

Fundamentalmente, trata-se de um elemento propulsivo composto por um núcleo preso ao eixo de rotação, a que chama-se cubo ou bosso, do qual radialmente se estendem perfis aerodinâmicos com torção ao longo do raio, denominados pá que opera em um movimento circular, posicionado de tal forma que a interação entre o ângulo de incidência do fluxo de ar e esse ângulo de ataque é que absorvem o torque do motor e geram a sustentação. favorecendo a geração de tração alinhada com a direção de voo do drone. As hélices podem variar em sua configuração, abrangendo modelos de uma única pá (mono-pá), duas (bi-pá), três (tri-pá) ou mais pás. Vários aspectos influenciam o rendimento de uma hélice, incluindo o diâmetro, que está diretamente ligado à velocidade de rotação, a área das pás, que afeta a capacidade de conversão de potência em tração, e o passo geométrico de cada seção da hélice. Este último, juntamente com o diâmetro - ambos geralmente expressos em polegadas - são as dimensões fundamentais que definem uma hélice, estabelecendo os parâmetros básicos para seu desempenho aerodinâmico e eficiência propulsiva. A figura 3 apresenta uma hélice de duas pás, com suas respectivas nomenclaturas.

Figura 3. Partes constituintes de uma hélice.



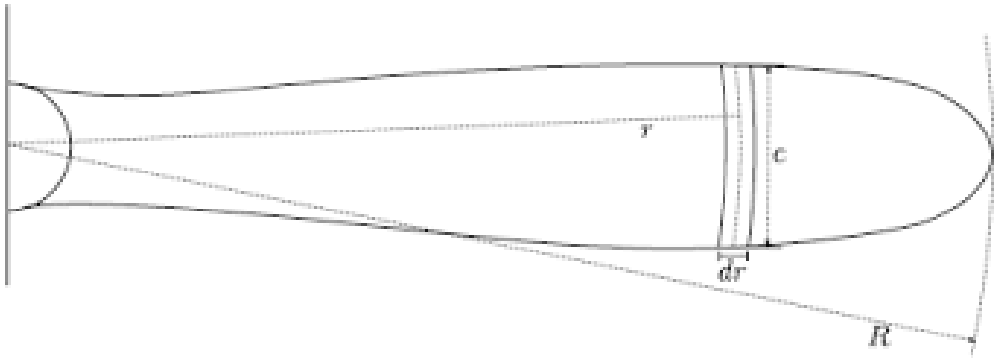
Fonte: Hooked on RC Airplanes, 2012. Adaptado por Campos, 2011.

2.1.4 Teoria do elemento de pá

Esta teoria oferece uma base para a análise do escoamento ideal em hélices, permitindo a estimativa de um limite operacional. Contudo, ela não contempla os

efeitos do torque gerado por uma hélice. Ademais, não realiza o cálculo das forças que incidem individualmente sobre cada pá da hélice, o que limita a capacidade de análise detalhada do movimento das hélices. Por outro lado, essa teoria analisa as forças atuantes em pequenos segmentos transversais de cada pá, permitindo determinar a força total resultante, conforme ilustrado na figura subsequente. Esta abordagem permite a agregação dessas forças para determinar a força total atuante em cada pá. Na figura 4 apresenta a representação dos elementos infinitesimais de uma asa.

Figura 4. Faixa transversal de comprimento infinitesimal em uma pá.



O movimento de um elemento da pá de uma hélice em operação segue um caminho helicoidal. O ângulo de ataque depende da velocidade e varia de acordo com a distância do cubo, pois a velocidade tangencial (V_θ) de rotação do elemento é diretamente proporcional ao seu raio(*r*) , segundo a equação 2:

$$V_\theta = \omega \cdot r \tag{2}$$

Em que ω é a velocidade angular da hélice, à medida que o raio aumenta, essa velocidade tangencial também aumenta, alterando o vetor resultante de velocidade relativa que incide sobre o perfil da pá. Como a componente axial da velocidade do fluxo tende a se manter aproximadamente constante, o aumento da componente tangencial faz com que o fluxo relativo se incline em direção ao plano

de rotação, reduzindo assim o ângulo de ataque efetivo nos pontos mais distantes do eixo.

Para compensar essa variação e manter o ângulo de ataque dentro de uma faixa eficiente ao longo de toda a extensão da pá, aplica-se uma torção geométrica ao longo do perfil. Essa torção consiste em projetar a pá com um ângulo geométrico maior na raiz e progressivamente menor em direção à ponta, garantindo que cada elemento opere próximo ao seu ponto ideal de sustentação e eficiência aerodinâmica.

Segundo a Teoria do Elemento de Pá a sustentação é calculada pela equação 3:

$$dT = \frac{1}{2}\rho \cdot V^2 \cdot c \cdot (C_L cos(\theta) - C_D sen(\theta))dr \quad (3)$$

Em que ***c*** é a corda do perfil, ***V*** a módulo da velocidade da água incidente sobre o elemento, θ o formado entre o vetor velocidade e a linha de zero sustentação do perfil, conforme indicado na Figura 4. O **ρ** a densidade do ar, C_L o coeficiente de sustentação e C_d o coeficiente de arrasto. O coeficiente adimensional, e que ambos são função de ***r*** e theta; $C_L = C_d(r,\theta)$. em que ***r*** é a distância do elemento em questão ao centro do eixo do hélice.

Da mesma forma se consegue calcular o torque gerado pela hélice, com pequenas mudanças, tanto trigonométricas quanto na adição do raio (r), segundo a equação 4:

$$dQ = \frac{1}{2}\rho \cdot V^2 \cdot c \cdot (C_L sen(\theta) + C_D cos(\theta)) \cdot r \cdot dr \quad (4)$$

As forças finais geradas pela hélice são obtidas pela integral das equações acima ao longo do raio ***r***, resultando na força gerada por apenas uma pá.

Para garantir uma comparação independente da escala entre as de dimensões diferentes, foram utilizados parâmetros adimensionais, permitindo uma

análise eficiente em diferentes velocidades. A velocidade do ar de voo adimensional pode ser expressa em termos do coeficiente de avanço (J):

$$J = \frac{V}{nd_p} \tag{5}$$

Na equação 5 é o número de rotação do eixo da hélice, em rotações por segundo [rps] em unidades fundamentais (embora possa ser expressa em rotações por minuto [RPM]) e o d_p represento o diâmetro da hélice em metros.

No experimento realizado, a força de empuxo (T) foi obtida por meio de testes experimentais com a hélice. Esse parâmetro pode ser calculado com o ângulo de ataque, segundo o artigo Voo Propulsionado: A Engenharia da Propulsão Aeroespacial (David R. Greatrix).

Considere dois parâmetros de desempenho adicionais, além da eficiência propulsiva da hélice η_{pr}, que frequentemente são traçados em relação ao coeficiente de avanço (J), para uma hélice com um determinado número de pás. Dado que a força no contexto da hélice é o produto da pressão dinâmica (referenciada à velocidade de rotação da hélice) e da área, pode-se produzir a seguinte correlação para o coeficiente de empuxo (C_T), conforme a equação 6:

$$C_T = \frac{F}{\rho n^2 d^4} \tag{6}$$

De forma semelhante, se considerarmos a potência como o produto da força pela velocidade, pode-se produzir a seguinte correlação para o coeficiente de potência da hélice (C_P), conforme a equação 7:

$$C_P = \frac{Ps}{\rho n^3 d^5} \tag{7}$$

Note que a potência do eixo requerida pelo motor (PS), pode ser determinada pela equação 8:

$$PS = Q\omega \tag{8}$$

onde (Q) é o torque atuando no eixo da hélice com uma velocidade de rotação angular (ω).

Por fim temos a eficiência da hélice com a equação 9:

$$\eta_{pr} = \frac{C_T}{C_P} J \tag{9}$$

Esses coeficientes podem ser usados para escalonar a avaliação do desempenho necessário de uma hélice, em conjunto com o coeficiente de avanço, que relaciona o empuxo necessário e o torque da hélice para uma determinada velocidade de voo. Na tabela 1 temos comparações dos coeficientes tradicionais.

Tabela 1: Comparação entre os coeficientes tradicionais e os números normalizados usados para avaliar o desempenho de uma hélice.

Parameter	Legacy Coefficient	Normalized Number	Observations
Thrust	$C_T = \frac{T}{\rho\, n^2\, D^4}$	$\eta_T = \frac{T}{\frac{1}{2}\,\rho\, {v_b}^2\, S_b}$	$C_T \neq \eta_T$
Torque	$C_Q = \frac{Q}{\rho\, n^2\, D^5}$	$\eta_Q = \frac{Q}{\frac{1}{2}\,\rho\, {v_b}^2\, S_b\, D}$	$C_Q \neq \eta_Q$
Power	$C_P = \frac{P}{\rho\, n^3\, D^5}$	$\eta_P = \frac{P}{\frac{1}{2}\,\rho\, {v_b}^2\, S_b\, n\, D}$	$C_P \neq \eta_P$
Efficiency	$\eta_{prop} = \frac{T\, v_\infty}{P} = \frac{C_T}{C_P} J = \frac{\eta_T}{\eta_P} J$		$\frac{C_T}{C_P} = \frac{\eta_T}{\eta_P}$

3

Fonte: Jornal internacional de Aviação, Aeronáutica e Aeroespacial (2019).

2.2 Nível de Ruído

O som é uma onda mecânica longitudinal que se propaga por meio de um meio material, como ar, água ou sólidos. Sua propagação depende da compressão e rarefação das partículas do meio, sendo caracterizada por parâmetros como frequência, comprimento de onda, amplitude e velocidade.

A sensibilidade do ouvido humano varia dentro de uma faixa extremamente ampla de intensidades. O menor deslocamento detectável no ouvido humano está na ordem de 10^{-11}m, enquanto o maior deslocamento tolerável é da ordem de 10^{-5} m. Essa variação reflete uma diferença de 12 ordens de magnitude na intensidade sonora (*I*), a qual é proporcional ao quadrado da amplitude de vibração (HALLIDAY et al., 2016). Conforme a equação 9:

$$I = \frac{1}{2}\rho v \omega^2 S_m^2 \tag{9}$$

Dado esse amplo intervalo, a medição da intensidade sonora em unidades lineares torna-se impraticável. Por isso, utiliza-se uma escala logarítmica, baseada em decibéis (*dB*), que comprime essa variação para uma escala mais manejável. O nível de pressão sonora (β) é definido pela equação:

$$\beta = 10 \cdot log \frac{I}{I_0} \tag{10}$$

Onde:

- *I* é a intensidade sonora medida (em W/m²),
- $I_0 = 10^{-11} W/m^2$ é a intensidade de referência, que corresponde ao limiar de audibilidade humana.

A tabela 2 apresenta alguns exemplos de ruídos típicos e seus respectivos níveis em decibéis:

Tabela 2. Níveis de decibéis e origem.

Nível em dB	Origem
110	Turbina de um avião a jato a 100m
100	Martelete Pneumático
80	Autopista
70	Tráfego intenso
60	Tráfego normal
50	Conversa em voz alta
40	Conversa em um tom de voz normal
30	Pássaros voando
20	Tic-tac de um relógio de parede
10	Ruído de folhas caindo

Fonte: Adaptado de Cartolano (2020).

No âmbito dos Drones comerciais fabricados pela DJI, observa-se que o nível médio de ruído alcança 76 *dB*, denotando uma sonoridade significativa quando comparado com referenciais anteriormente mencionados. Tal observação sublinha a importância da sonoridade na avaliação de desempenho e na aceitação desses aparelhos em variados contextos de uso, evidenciando a imperatividade de se levar em conta aspectos acústicos durante o desenvolvimento e implementação desses Veículos Aéreos não Tripulados (VANTs). Esta análise, conforme discutida por Silva

(2023), realça a necessidade de considerações acústicas na engenharia e utilização dos Drones.

2.3 Propagação de onda sonora

A forma como o som se propaga é fortemente influenciada pelo meio e pelo ambiente. Em ambientes fechados, as ondas sonoras sofrem múltiplas reflexões e absorções, fazendo com que parte da energia acústica seja dissipada ou atenuada, especialmente em superfícies com tratamento acústico. Já em ambientes abertos, o som se propaga livremente, com menor interferência, o que pode resultar em maior alcance, porém com menor dissipação das componentes de alta frequência.

Além disso, o comprimento de onda influencia diretamente a capacidade de uma onda contornar obstáculos ou ser absorvida. Sons de baixa frequência (comprimento de onda maior) tendem a se propagar por distâncias maiores e atravessar barreiras com mais facilidade, enquanto sons de alta frequência são mais facilmente atenuados e absorvidos por superfícies ou materiais porosos.

A análise da dispersão sonora em ambientes distintos é relevante para o entendimento do desempenho acústico de dispositivos como hélices. Em particular, hélices toroidais que operam com padrões de emissão sonora distintos podem se comportar de forma muito diferente quando avaliadas em espaços abertos e fechados, como observado nos experimentos realizados neste trabalho.

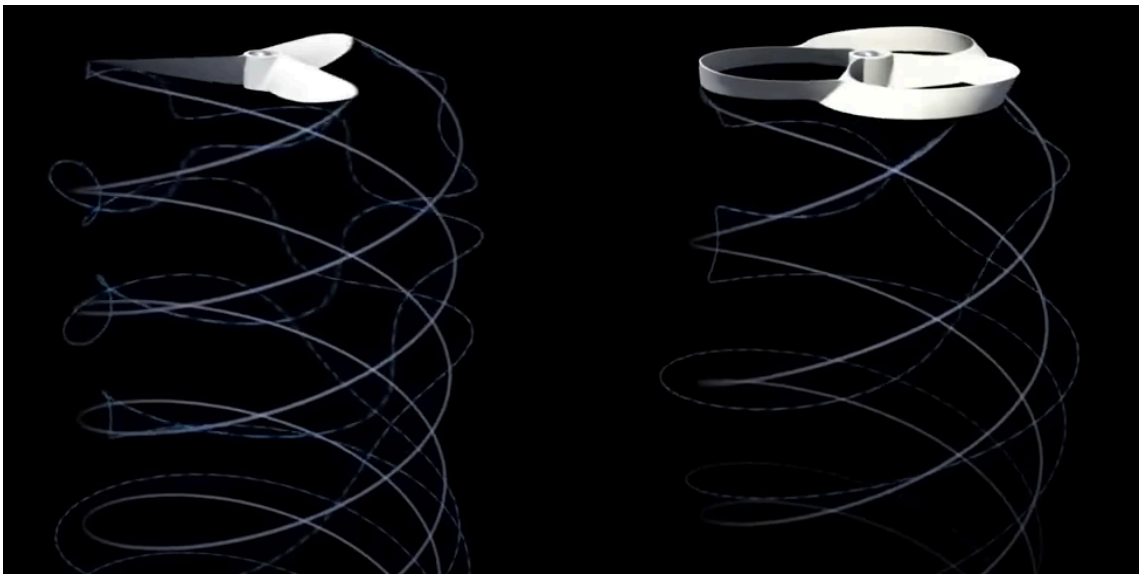
2.4 Potencial inovativo das hélices toroidais

O design das hélices toroidais permite a formação de um vórtice aberto entre as pás, um aspecto crucial para a redução do ruído através da anulação parcial das ondas sonoras e para a distribuição mais eficaz das forças aerodinâmicas, otimizando a eficiência. Além disso, a aplicação dessas hélices em barcos demonstrou uma redução notável no ruído dos motores e um aumento na eficiência, evidenciando a versatilidade da tecnologia (FERREIRA, 2023).

A chave que pensávamos ser essencial para a eficiência do combustível reside no fato de distribuir os vórtices gerados pela hélice por toda a sua forma, em vez de apenas na ponta. Isso faz com que, efetivamente, eles se dissipam mais

rapidamente na atmosfera. O vórtice na ponta não se propaga tão longe, portanto, é menos provável que ouça (MIT Lincoln Lab, 2022).

Figura 5. Vórtices produzidos pelas hélices tradicionais e toroidais.

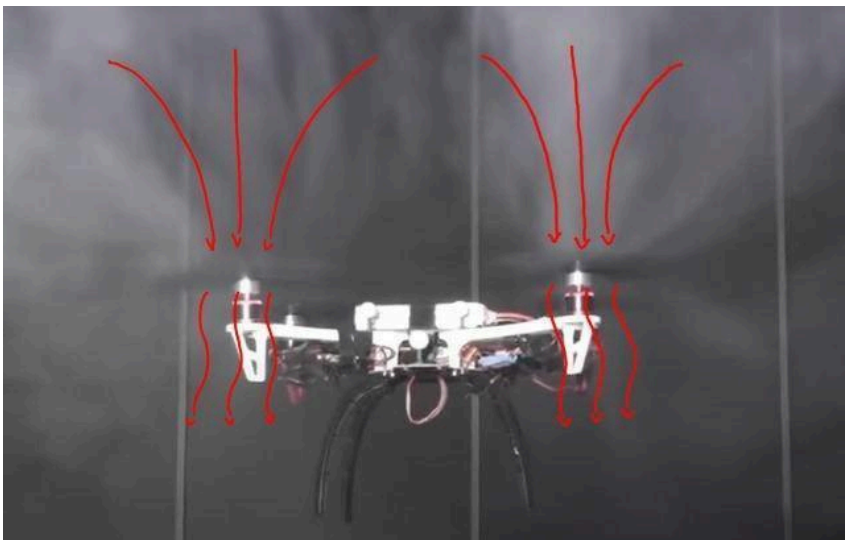


Fonte: MIT LIncoln Lab (2022).

A distribuição dos vórtices gerados pela hélice ao longo de toda a sua extensão, em vez de concentrá-los apenas na ponta, tem implicações significativas para a eficiência do combustível e o impacto ambiental.

Na imagem abaixo vemos uma representação de como sai o vórtice em um experimento feito pelo MIT.

Figura 6. Vórtices da hélice toroidal.



Fonte: Adaptada MIT LIncoln Lab (2022).

Essas hélices, graças à versatilidade da impressão 3D, podem ser personalizadas para se adequarem a uma ampla gama de drones, proporcionando uma solução prática como substituições diretas nos modelos de drones existentes no mercado. Esse método de produção permite ajustes precisos nas dimensões e na forma das hélices para otimizar o desempenho de acordo com as especificidades de cada drone.

Embora o conceito de hélices toroidais tenha ganhado notoriedade recentemente, sua análise quantitativa ainda é limitada. Não foi encontrado pelo autor estudos que comparem diretamente suas características de empuxo e ruído com as de hélices tradicionais, tornando esta pesquisa pioneira na área. Para suprir essa lacuna, este estudo utilizará parâmetros bem estabelecidos na análise aerodinâmica de hélices convencionais e aplicará esses princípios na avaliação experimental da tecnologia toroidal. Dessa forma, espera-se criar um referencial inicial que permita futuras comparações e otimizações.

3 METODOLOGIA

Este trabalho configurou-se como uma investigação de natureza aplicada, pois busca oferecer uma solução prática e mensurável para um problema técnico: a análise comparativa entre hélices toroidais e tradicionais quanto à eficiência e ao ruído. Além disso, o estudo apresenta caráter integrativo, na medida em que reúne conhecimentos de aerodinâmica, acústica e modelagem computacional, articulando diferentes áreas da engenharia para compreender o comportamento de uma geometria inovadora de hélice.

A abordagem metodológica adotada foi quantitativa e qualitativa simultaneamente. O caráter quantitativo está presente na coleta de dados experimentais precisos de empuxo e ruído em diferentes configurações, enquanto a abordagem qualitativa se manifesta na análise comparativa das formas geométricas, na percepção dos padrões de ruído e no entendimento fenomenológico dos comportamentos observados.

A pesquisa foi orientada pelo método hipotético-dedutivo, partindo da hipótese de que hélices toroidais apresentam desempenho aerodinâmico e acústico superior ao das hélices convencionais. Para testar essa hipótese, foram desenvolvidos modelos tridimensionais dos dois tipos de hélice, impressos em 3D e submetidos a testes sob as mesmas condições operacionais.

Como não há diretrizes consolidadas na literatura sobre testes de hélices toroidais, a metodologia experimental foi inspirada em práticas consagradas para hélices convencionais, adaptando procedimentos para garantir resultados. As variáveis principais consideradas nos testes foram:

- Empuxo absoluto (medido por balança de precisão);
- Nível de ruído (medido por decibelímetro);
- Área da pá (calculada em software de modelagem CAD);
- Empuxo específico por área (kgf/m²);
- Comparações em diferentes ambientes acústicos (aberto e fechado).

Algumas medições indiretas foram realizadas por percepção auditiva ou inferência de grandezas derivadas, como o padrão de dispersão sonora. Portanto, a comparação entre os modelos tem caráter quantitativo nas medições de força e

ruído, e qualitativo nas observações sobre propagação sonora e comportamento geométrico.

Essa estrutura metodológica permitiu uma análise robusta sobre o desempenho das hélices, mesmo diante das limitações de sensores ou recursos laboratoriais, e fundamenta as conclusões apresentadas ao final deste estudo.

3.1 PROPOSTA DO TRABALHO

Devido à ausência de diretrizes experimentais estabelecidas para a análise de hélices toroidais, a metodologia deste estudo foi desenvolvida com base em princípios amplamente aplicados na avaliação de hélices convencionais. A escolha dos parâmetros de teste — empuxo e nível de ruído — fundamentou-se em sua importância para a eficiência e aceitação comercial de sistemas de propulsão. Além disso, como não foram encontrados estudos sobre o desempenho dessas hélices, pretende-se que os resultados sirvam como um primeiro conjunto de dados quantitativos para futuras análises e otimizações.

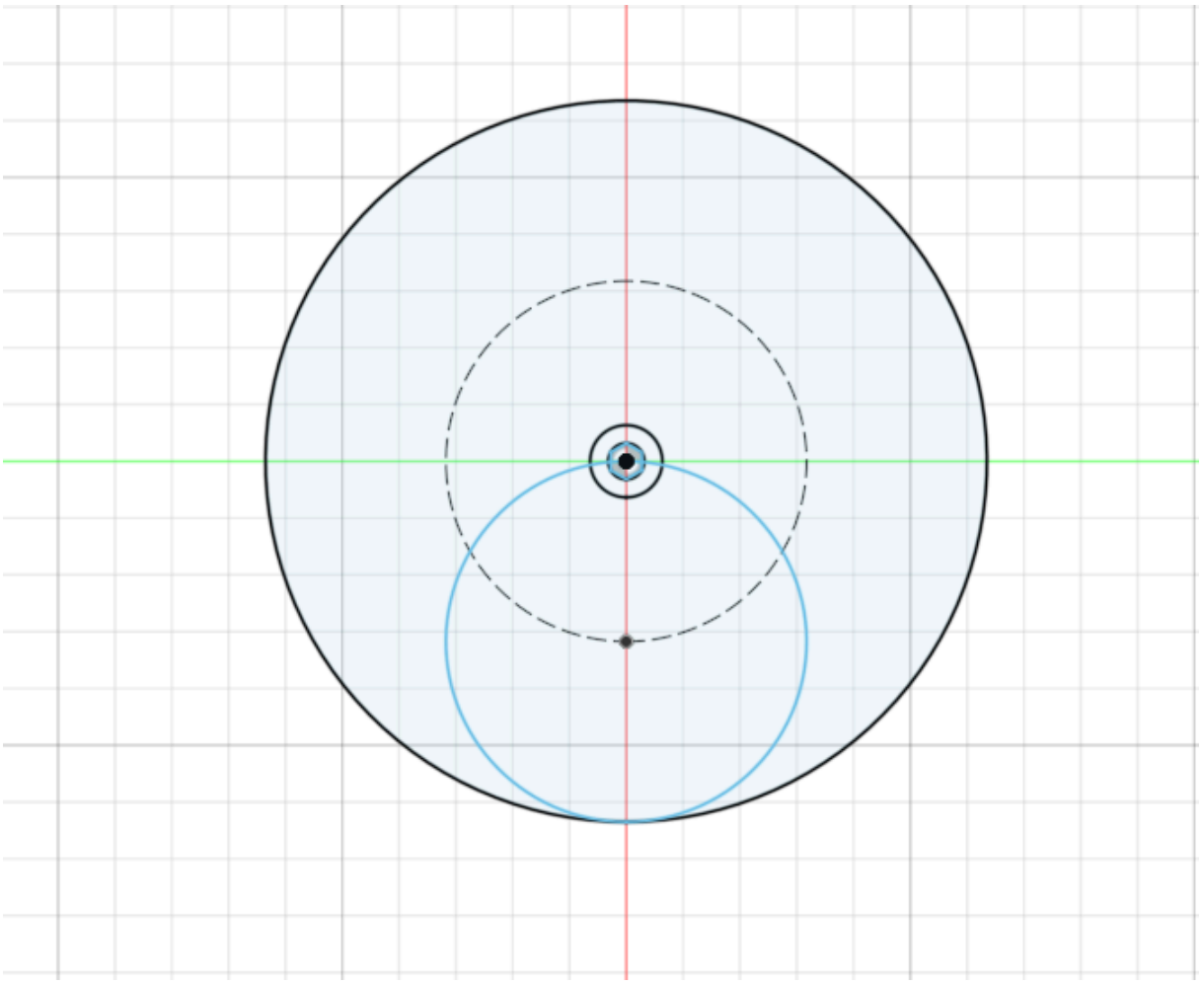
3.2 MODELAGEM 3D NO AUTODESK FUSION 360

O desenvolvimento do protótipo iniciou-se com a modelagem tridimensional utilizando a ferramenta CAD 3D, especificamente o software Fusion 360. Esse software foi escolhido por sua precisão e facilidade de uso, permitindo uma modelagem detalhada das hélices toroidais. Como a hélice toroidal é um potencial inovativo e pouco estudado, foi necessário desenvolver uma técnica específica para a preparação do protótipo 1.

3.2.1 Passo a passo para a criação do primeiro protótipo

Passo 1: Primeiramente, foi elaborado um esboço circular com o tamanho desejado para a hélice. Esse valor passou a compor o código da hélice nos dois primeiros dígitos. É importante ressaltar que as medidas foram expressas em polegadas (in).

Figura 7. Esboço da hélice



Fonte: Autoria própria, AutoDesk Fusion 360 (2025).

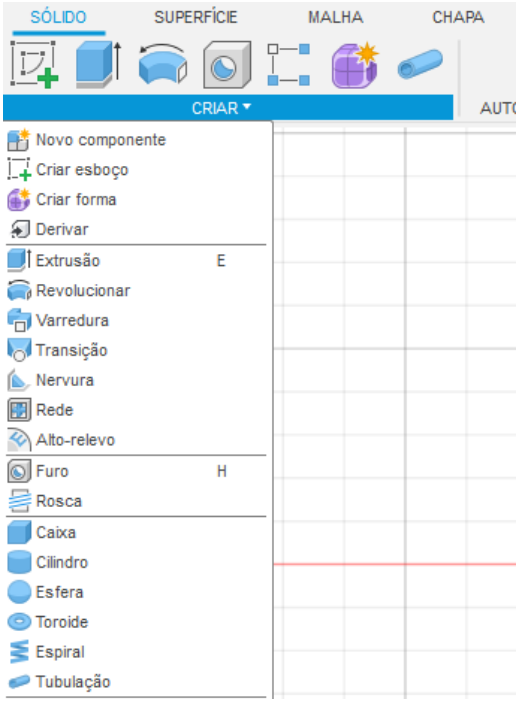
Depois do círculo maior, foi necessário incluir um círculo médio de construção para centralizar a hélice.

Passo 2: Com o esboço terminado foi gerado um espiral de referência. Esse elemento teve a função de garantir que as pontas da hélice adquirissem um movimento arredondado, ajustando melhor a direção na qual a turbulência seria dissipada.

Para criar a espiral, foi utilizado o seguinte caminho:

Criar > Espiral :

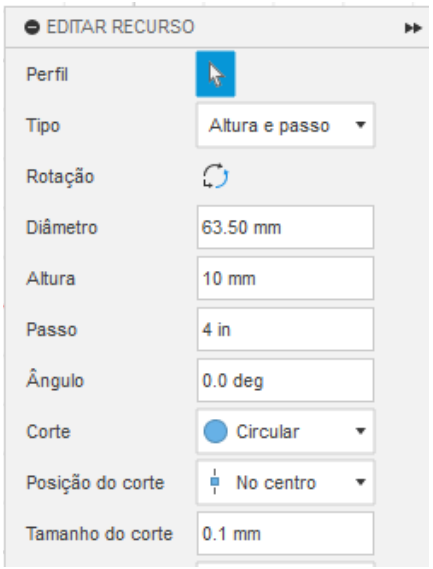
Figura 8. Recurso base para criação da hélice



Fonte: Autoria própria, AutoDesk Fusion 360 (2025).

Nos recursos da ferramenta do vai selecionar com linha de contorno a linha de construção feita no passo anterior.

Figura 9. Definição do passo da hélice



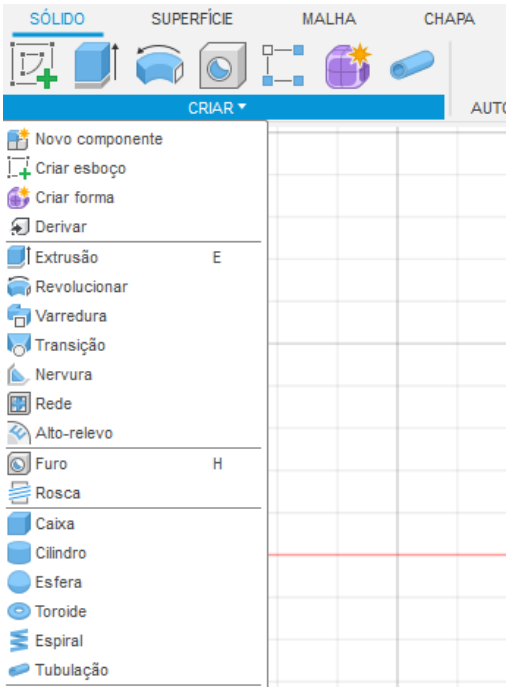
Fonte: Autoria própria, AutoDesk Fusion 360 (2025).

O diâmetro utilizado é exatamente a metade do valor do diâmetro da hélice total. No modelo selecionamos Altura e passo, pois são eles que vão definir a altura que será utilizada, que no caso do protótipo foi de 10 mm, e também será definido o passo, em polegadas. Com essa forma de execução temos como mudar facilmente o ângulo de ataque da hélice, no caso dos meus experimentos serão utilizados o passo de 4, 4,5 e 5 polegadas.

Detalhe importante: Deve ser utilizado posição do corte no centro e o tamanho de corte mínimo pois se trata apenas de uma referência para o próximo passo.

Passo 3: Foi realizada uma varredura na espiral com o formato circular que definimos como a hélice no primeiro passo.

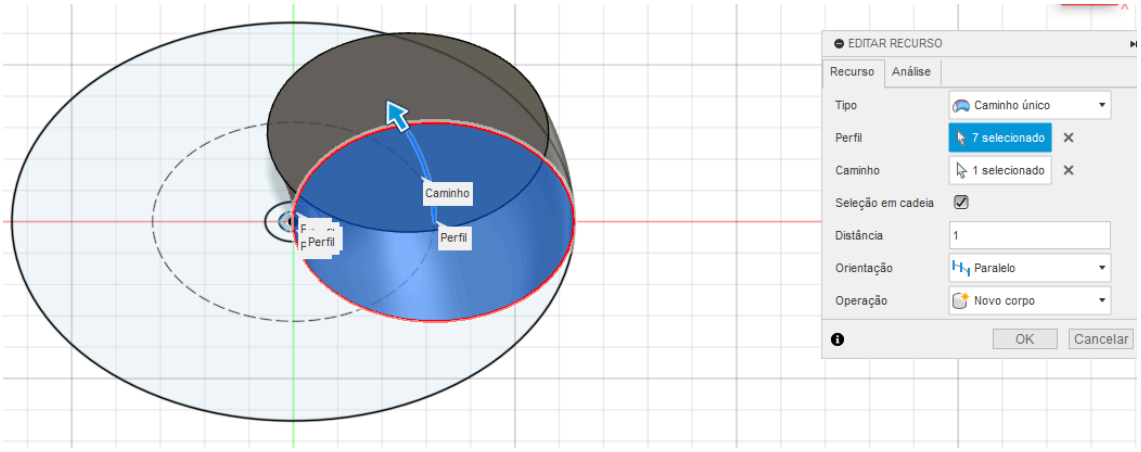
Figura 10. Ferramenta de varredura.



Fonte: Autoria própria, AutoDesk Fusion 360 (2025).

Vamos selecionar o perfil da hélice e depois selecionar o caminho que será o espiral.

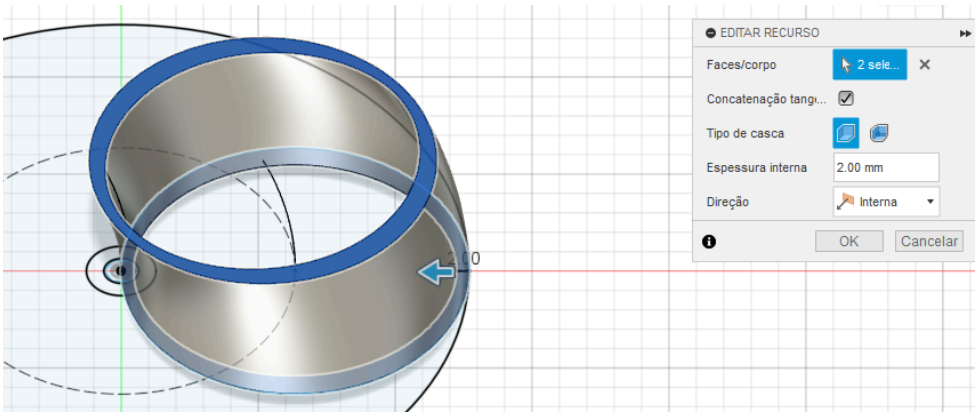
Figura 11. Utilização da ferramenta de varredura



Fonte: Autoria própria, AutoDesk Fusion 360 (2025).

Passo 4: Com o sólido pronto vamos usar a ferramenta de Casca para que fique apenas as paredes da hélices. Importante selecionar o topo e o fundo para que tenha um vazamento total da peça.

Figura 12. Esboço de uma pá da hélice.

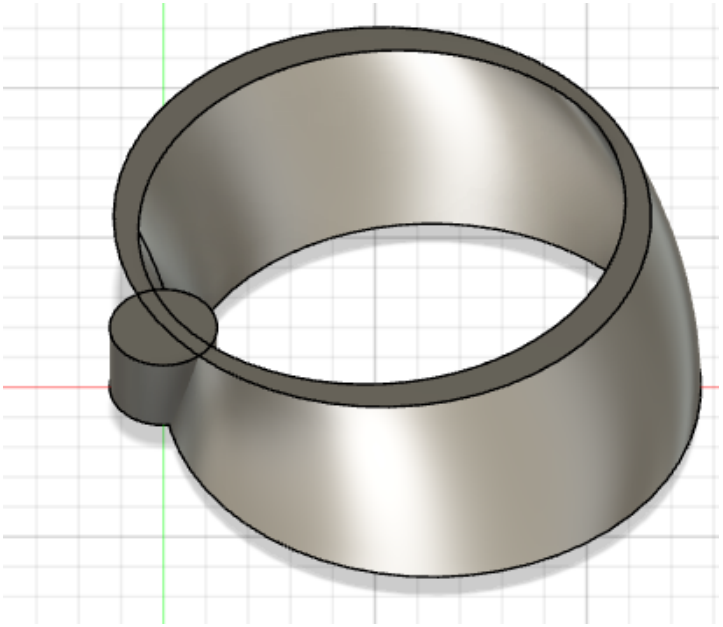


Fonte: Autoria própria, AutoDesk Fusion 360 (2025).

Nesse passo pode ser adicionado ou diminuído a espessura da hélice. Caso ela seja maior, pode causar instabilidade.

Passo 5: Uma vez feita uma das pás, para replicá-la e posicionar a nova pá em outra posição na hélice, é necessário criar o cubo que determina a posição do eixo de simetria radial do propulsor., precisa selecionar o tamanho conforme as especificações do seu motor e extrudar até altura definida no passo 2.

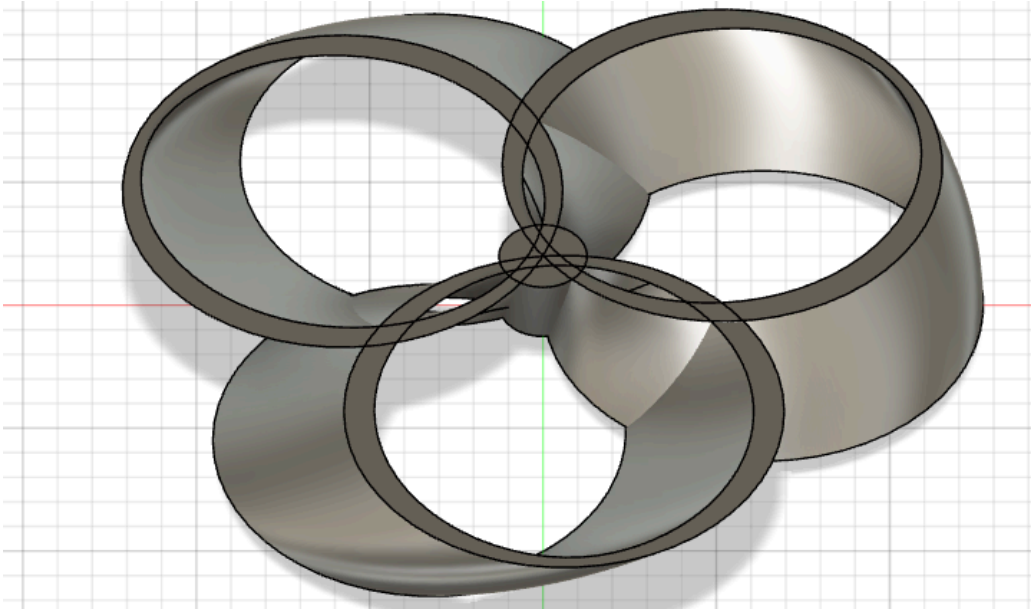
Figura 13. Junção pá + cubo.



Fonte: Autoria própria, AutoDesk Fusion 360 (2025).

Passo 6: Vamos criar um padrão circular com o eixo de centro no meio da peça. Nesse modo conseguimos colocar quantas pás desejar, porém referência sempre é falado para utilizar 2 ou 3 pás para evitar cavitação.

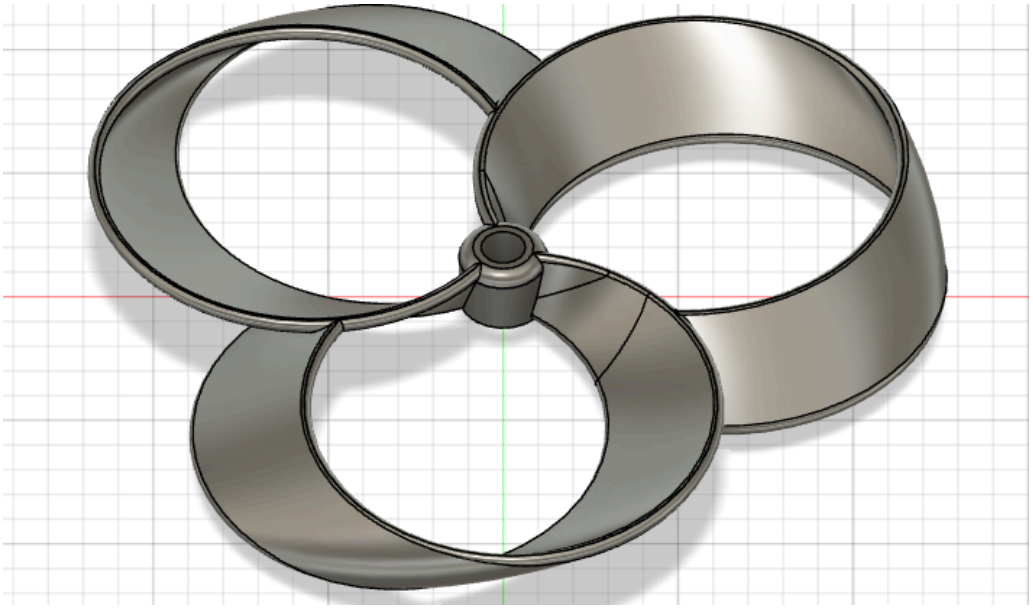
Figura 14. Hélice toroidal com 3 pás



Fonte: Autoria própria, AutoDesk Fusion 360 (2025).

Passo 7: Remove-se as partes desnecessárias que causam a interferência no fluxo, ajuste os filetes para melhor acabamento da peça e faça o furo do acoplamento do motor.

Figura 15. Hélice toroidal finalizada



Fonte: Autoria própria, AutoDesk Fusion 360 (2025).

3.3 CÁLCULO DE ÁREA DAS HÉLICES

Para a análise comparativa da eficiência aerodinâmica das hélices testadas, foi realizada a medição da área superficial das pás utilizando o próprio ambiente de modelagem tridimensional do software Autodesk Fusion 360. Esse recurso permite, com alta precisão, a extração de propriedades físicas do modelo 3D, incluindo a área de cada pá.

Foram considerados três modelos de hélice:

- Hélice tradicional de duas pás, utilizada como referência;
- Hélice toroidal 5x5;
- Hélice toroidal 5x4,5.

O cálculo foi feito individualmente para uma pá, e posteriormente multiplicado pelo número total de pás de cada modelo para obter a área total da hélice. A Tabela X apresenta os resultados consolidados, incluindo a conversão da área para metros quadrados, o empuxo absoluto obtido nos testes experimentais e o valor normalizado de empuxo por metro quadrado.

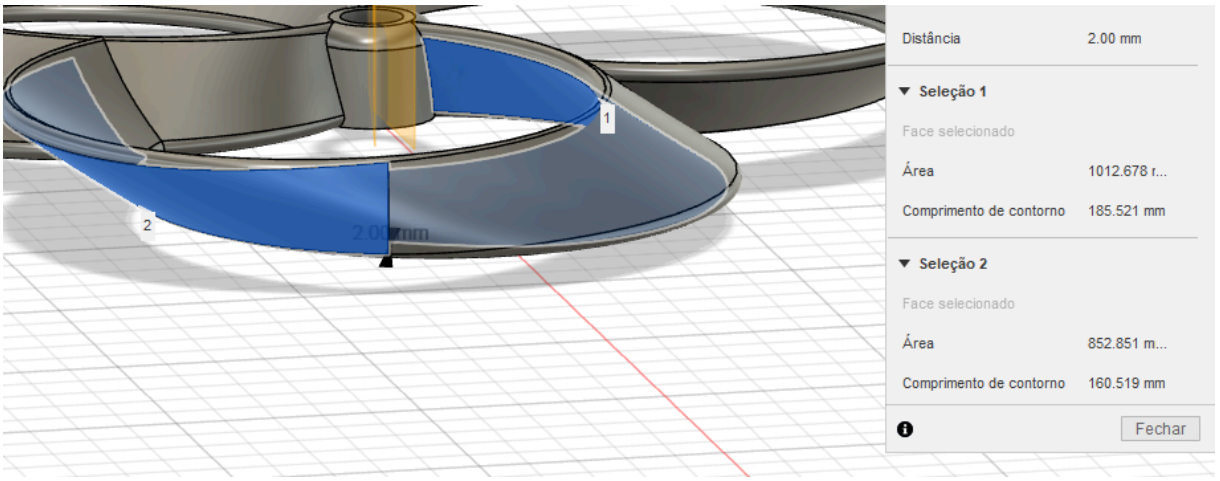
Tabela 3. Área de superfície exposta ao fluxo incidente

Modelo de Hélice	**Área por pá (mm²)**	**Área total (mm²)**	**Área total (m²)**
Tradicional	665,933	1.997,79	0,0019978
Toroidal 5x5	1.865,52	5.596,56	0,0055966
Toroidal 5x4,5	2.073,63	6.220,89	0,0062209

A análise dos dados revela que, embora as hélices toroidais tenham apresentado maior empuxo absoluto, o desempenho relativo à área de superfície (kgf/m²) foi inferior ao da hélice tradicional. O modelo toroidal 5x5 gerou cerca de 53,28% menos empuxo por metro quadrado, enquanto o modelo 5x4,5 teve um desempenho 50,42% inferior nessa mesma métrica.

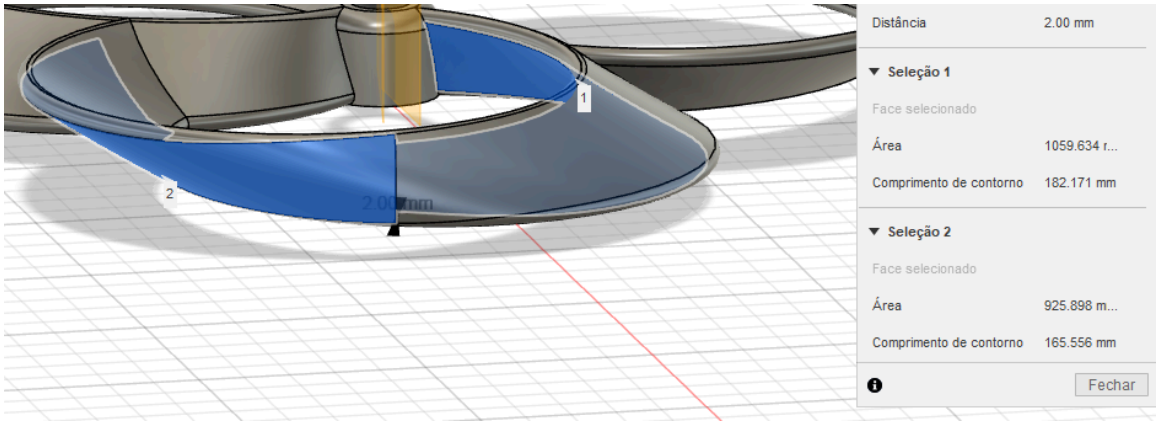
Esse resultado presume que o aumento no empuxo observado nos testes com hélices toroidais está diretamente relacionado ao aumento da área de superfície das pás, e não necessariamente a uma eficiência aerodinâmica superior do perfil. Essa constatação reforça a importância de normalizar os resultados por área quando se comparam geometrias distintas, a fim de evitar conclusões distorcidas sobre o desempenho dos modelos analisados.

Figura 16. Cálculo de área da hélice toroidal 5x5.



Fonte: Autoria própria, AutoDesk Fusion 360 (2025).

Figura 17. Cálculo de área da hélice toroidal 5x4,5.



Fonte: Autoria própria, AutoDesk Fusion 360 (2025).

Figura 18. Cálculo de área da hélice tradicional.

Fonte: Autoria própria, AutoDesk Fusion 360 (2025).

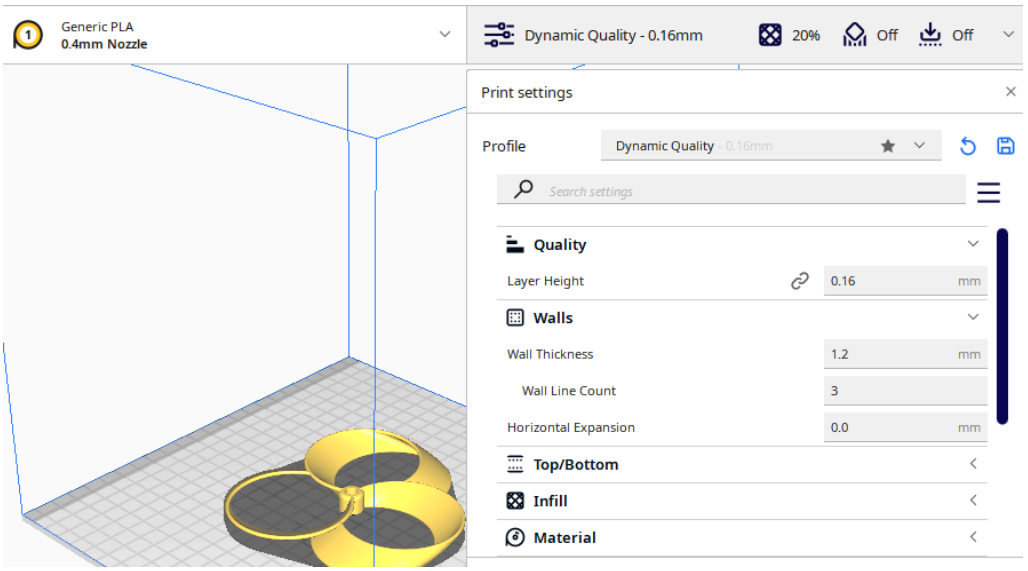
3.4 FATIAMENTO E IMPRESSÃO DAS HÉLICES

Após a conclusão da modelagem, foi escolhido o material ácido polilático (PLA) para a impressão, devido à sua resistência e baixa densidade. A impressão das hélices foi realizada utilizando uma impressora 3D Ender-3, conhecida por sua precisão e capacidade de trabalhar com uma ampla variedade de materiais, garantindo uma reprodução fiel do da geometria criada.

O fatiamento da peça no software UltiMaker Cura é uma das etapas mais importantes do experimento, pois nesse processo foi possível refinar e ajustar a peça para minimizar perdas de carga por arrasto e aumentar a eficiência aerodinâmica.

Para assegurar a reprodutibilidade do experimento, foram registradas as configurações de impressão utilizadas. É importante ressaltar que, caso haja uma redução na escala da impressão, a qualidade precisa ser aumentada para minimizar a rugosidade relativa da superfície da hélice.

Figura 19. Fatiamento na impressora 3D Ender 3.



Fonte: Autoria própria, Ultimaker Cura (2025).

Não é necessário que tenha suporte para peças com passo a partir 3,5 in, pois o acabamento fica bem feito e pelos testes em laboratórios foram obtidos resultados satisfatórios.

3.5 REALIZAÇÃO DOS TESTES

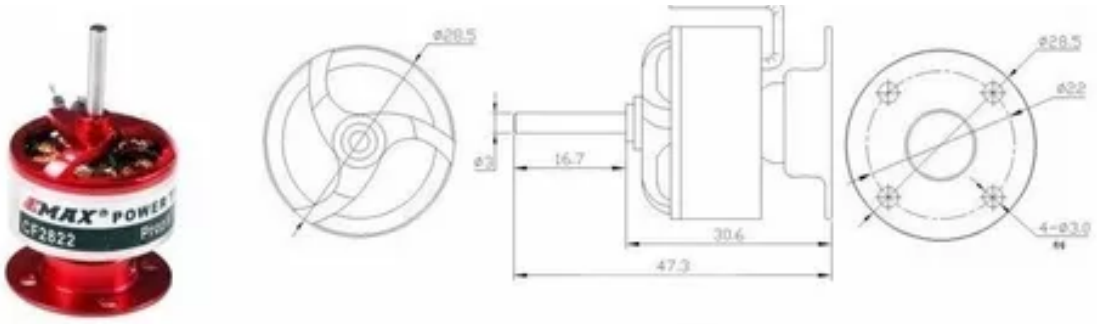
Com os protótipos de hélices toroidais e tradicionais finalizados, foram conduzidos testes em ambiente indoor para avaliar o desempenho de cada modelo.

3.5.1 Teste de Empuxo

Inicialmente, foi realizado um teste de empuxo utilizando uma garrafa e uma balança de precisão configurada para medir a força gerada por cada hélice. Esse teste permitiu quantificar a eficiência energética das hélices sob condições controladas.

Dependendo da voltagem, vamos ter rotações diferentes, por isso, vamos utilizar a tabela do motor que foi utilizado para os testes. Imagem abaixo:

Figura 20. Especificações do motor Emax.

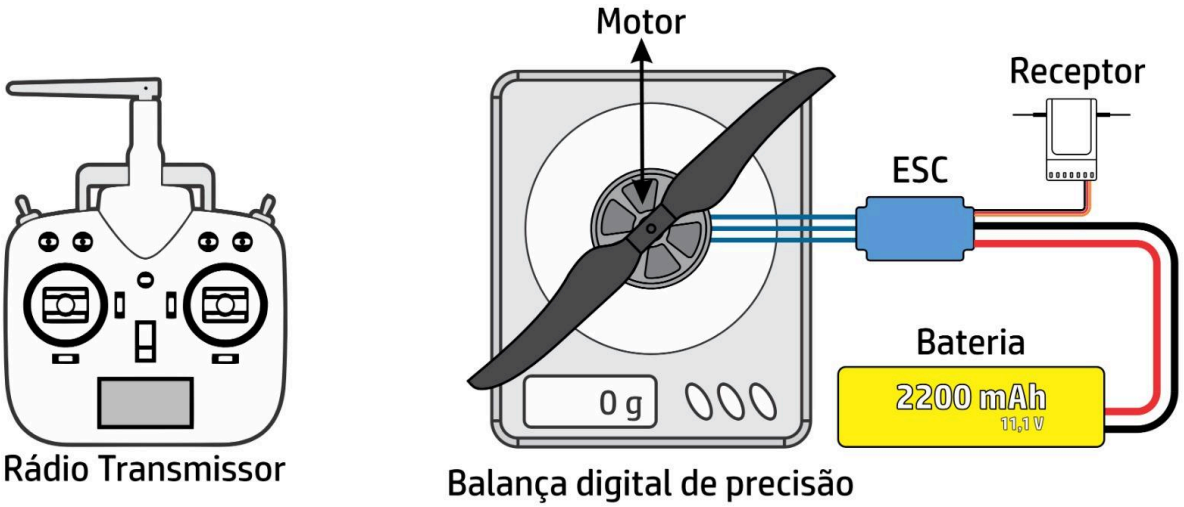


No.Of cells	2-3X LI-Poly
Stator dimensions	22x10mm
Shaft diameter	3mm
Weight	39g/1.38oz
Recomended model weight	200-600g
Recomended prop without gearbox	APC 7X6 APC 8X3.8 APC 9X4.5 APC10X5

Model	Cell Count	RPM/V	Prop (APC)	RPM	MAX current (<60S)	Thrust
CF2822	3S	1200	10x5	7700	15A	840g 1.85lb.
			10X4.7 (SLOW)	7100	16.5A	850g 1.87lb.
CF2812	3S	1534	7x4	12250	10.5A	580g 1.27lb.
			7x6	11000	15.5A	730g 1.61lb.

Fonte: Stunt Hobby, 2025.

Figura 22. Esquema do teste de empuxo.



Fonte: Autoria própria (2025).

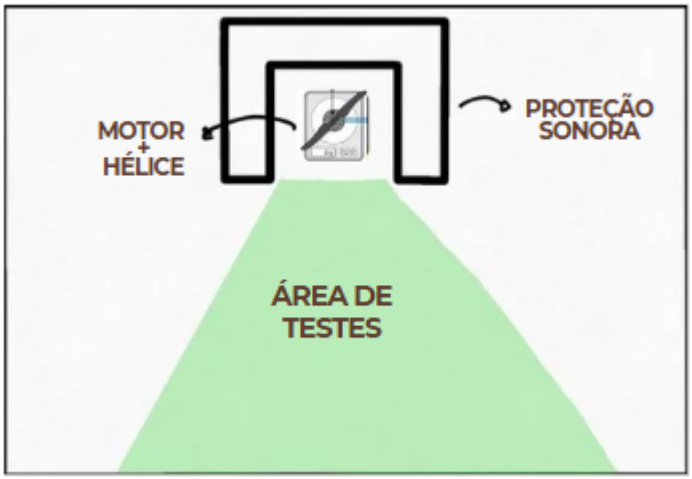
3.5.2 Teste de Ruído

Após a medição do empuxo, foi implementado o teste de ruído para determinar os níveis de decibéis produzidos por cada tipo de hélice. Utilizou-se um decibelímetro calibrado para garantir a precisão das medições.

A análise dos dados coletados focou na comparação da eficiência energética e da poluição sonora dos dois modelos de hélice. O estudo permitiu uma avaliação detalhada do custo-benefício entre os dois tipos, considerando não apenas o desempenho energético, mas também o impacto ambiental e a aceitabilidade em aplicações práticas.

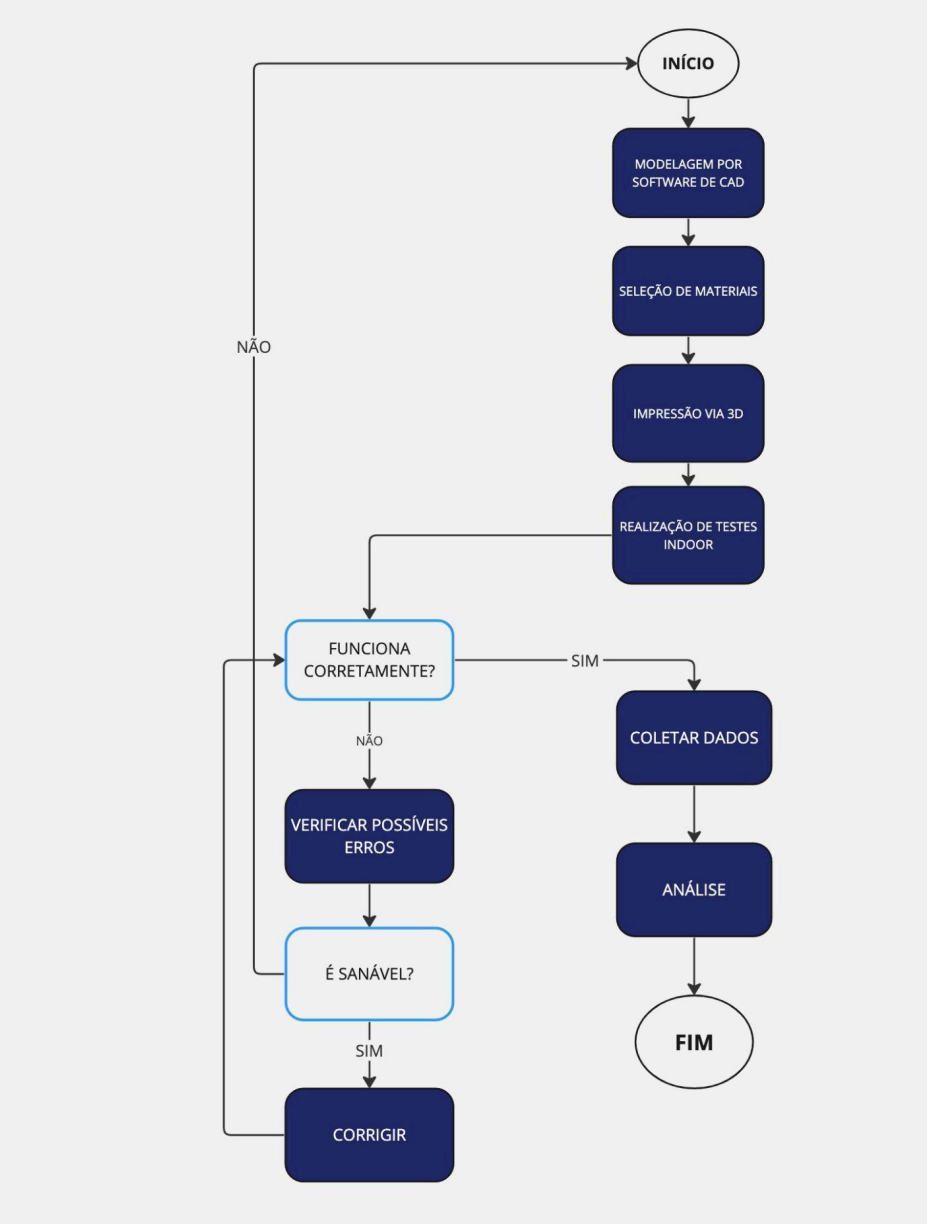
Foi utilizado um material acolchoado em todo o entorno lateral do drone, a um raio de aproximadamente 30 cm de seu centro. Apenas a parte superior (equivalente ao teto) ficou aberta para possibilitar visualização e realização do experimento. Esse teste foi feito para medir o som do ruído feito pelo hélice em contato com o ar sem levar em consideração o ruído emitido pelos vórtices. O segundo ambiente utilizado foi um ambiente aberto na qual existiam poucas barreiras de reverberação do som.

Figura 23. Esquema do teste de ruído simulando uma sala anecóica.



Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 24. Fluxograma dos procedimentos utilizados neste trabalho.



Fonte: Autoria própria.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Apresentação dos resultados

Para garantir a precisão dos dados, os testes foram realizados utilizando a mesma bateria, mantendo voltagem e amperagem idênticas para ambas as hélices. Essa padronização eliminou possíveis variáveis externas, assegurando que os resultados refletissem exclusivamente a eficiência e o ruído de cada modelo testado.

Além disso, os experimentos foram conduzidos em ambiente controlado, sem interferências de ventos externos, garantindo que as medições acontecessem em condições iguais ou muito próximas uma das outras. Entretanto, os testes de ruído foram realizados em dois tipos de ambiente: uma isolação acústica parcial, minimizando a dispersão sonora, e um ambiente aberto, permitindo a propagação do som sem barreiras até o equipamento de medição.

Os testes foram divididos em duas partes principais:

- Teste de Empuxo: Medição da força gerada por cada hélice sob a mesma tensão(*V*) elétrica.
- Teste de Ruído: Realizado tanto em ambiente fechado quanto em ambiente aberto, com medições efetuadas em quatro distâncias distintas do conjunto motopropulsor (1m, 2m, 4m e 6m), permitindo avaliar a dispersão sonora no espaço.

Os gráficos a seguir ilustram os resultados do experimento:

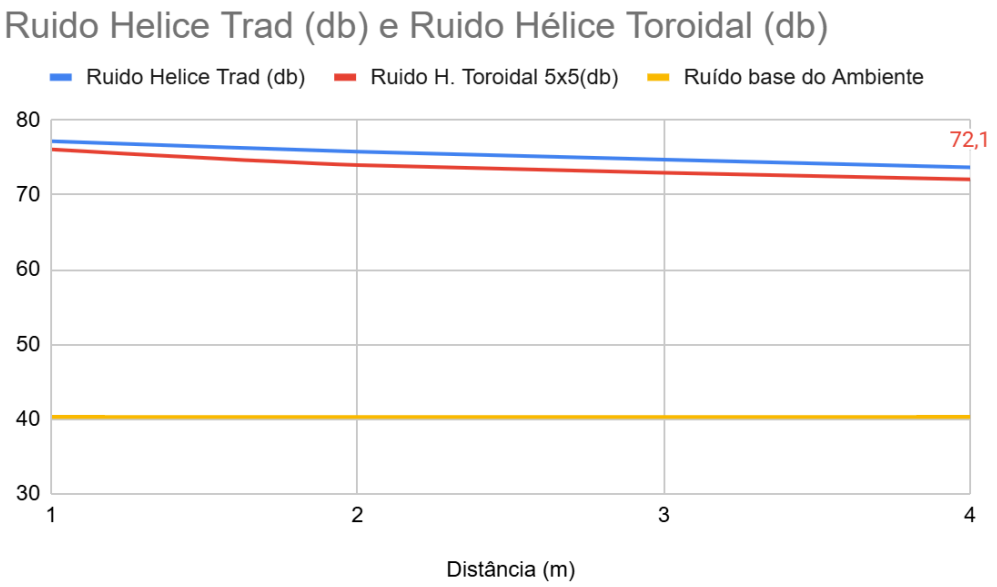


Gráfico 1: Comparação de ruído entre as hélices ambiente fechado

Tabela 4: Dados do teste de ruído em ambiente fechado e isolado

Distância (m)	Ruido Helice Trad (db)	Ruido H. Toroidal 5x5 (db)	Ruído base do Ambiente (db)	% da Tradicional
1	77,2	76,1	40,3	-1,42%
2	75,8	74	40,3	-2,37%
4	73,7	72,1	40,3	-2,17%

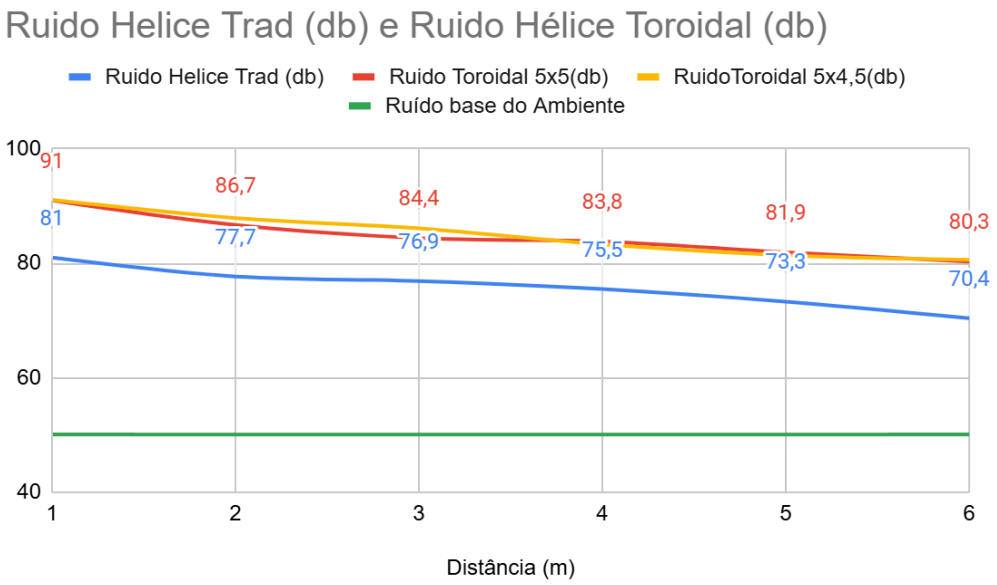


Gráfico 2: Comparação de ruído entre as hélices ambiente aberto teste 1

Tabela 5: Dados do teste 1 de ruído em ambiente aberto

Distância (m)	Ruido Helice Trad (db)	Ruido Toroidal 5x5(db)	RuidoToroidal 5x4,5(db)	Ruído base do Ambiente	% Tradicional	% Tradicional
1	81	91	91,1	50,1	12,35%	12,47%
2	77,7	86,7	87,9	50,1	11,58%	13,13%
3	76,9	84,4	86,1	50,1	9,75%	11,96%
4	75,5	83,8	83,3	50,1	10,99%	10,33%
5	73,3	81,9	81,4	50,1	11,73%	11,05%
6	70,4	80,3	80,6	50,1	14,06%	14,49%

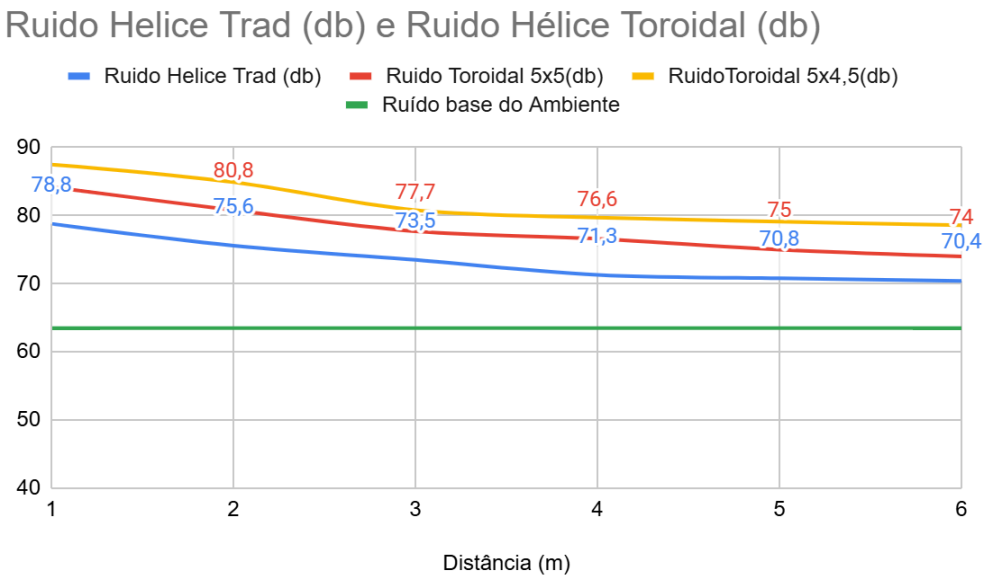


Gráfico 3: Comparação de ruído entre as hélices ambiente aberto teste 2

Tabela 5: Dados do teste 2 de ruído em ambiente aberto

Distância (m)	Ruido Helice Trad (db)	Ruido Toroidal 5x5(db)	RuidoToroidal 5x4,5(db)	Ruído base do Ambiente	% a mais da Tradicional	% a mais da Tradicional
1	78,8	84,2	87,5	63,5	6,85%	11,04%
2	75,6	80,8	84,9	63,5	6,88%	12,30%
3	73,5	77,7	80,8	63,5	5,71%	9,93%
4	71,3	76,6	79,7	63,5	7,43%	11,78%
5	70,8	75	79,1	63,5	5,93%	11,72%
6	70,4	74	78,6	63,5	5,11%	11,65%

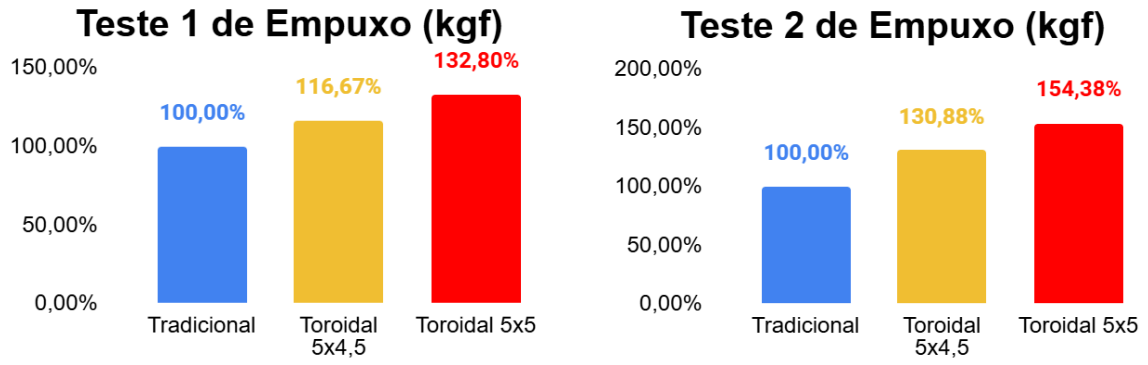


Gráfico 4: Comparação de empuxo entre as hélices

4.2 Análise e interpretação dos resultados

4.2.1 Eficiência Aerodinâmica (Empuxo)

Os testes experimentais indicaram que as hélices toroidais apresentaram um empuxo absoluto superior ao da hélice tradicional. A hélice toroidal 5x4,5 alcançou um empuxo de 0,335 kgf (54,38% superior), enquanto a toroidal 5x5 registrou 0,284 kgf (30,88% superior), em comparação com os 0,217 kgf obtidos pela hélice tradicional. Este desempenho bruto mais elevado pode inicialmente sugerir uma maior eficiência da geometria toroidal na conversão da energia elétrica em força

propulsiva.

Contudo, uma análise mais criteriosa que considera a área total das pás revela uma perspectiva diferente. A hélice toroidal 5x4,5 possui uma área superficial total de 0,00622089 m² e a 5x5 de 0,00559656 m², ambas significativamente maiores que a da hélice tradicional (0,001997799 m²). Quando os dados são normalizados por metro quadrado, observa-se que a hélice tradicional apresentou o melhor desempenho relativo: 108,62 kgf/m², contra 59,86 kgf/m² para a toroidal 5x5 e 45,65 kgf/m² para a 5x4,5. Isso representa uma perda relativa de eficiência específica por área de 44,89% e 57,97%, respectivamente:

Tabela 7. Empuxo por área.

Modelo de Hélice	Área por pá(mm²)	Área total (mm²)	Área total (m²)	Empuxo (kgf)	Empuxo por m² (kgf/m²)	Ganho por área (%)
Tradicional	665,933	1997,799	0,0019978	0,217	108,6195358	
Toroidal 5x5	1865,52	5596,56	0,00559656	0,335	59,85819861	-44,89%
Toroidal 5x4,5	2073,63	6220,89	0,00622089	0,284	45,6526317	-57,97%

Esses dados indicam que o ganho de empuxo absoluto nas hélices toroidais está associado ao aumento da área de superfície das pás, e não necessariamente a uma superioridade aerodinâmica do perfil. Portanto, o desempenho das hélices toroidais não pode ser interpretado isoladamente como mais eficiente, já que depende proporcionalmente da área empregada.

Essa constatação reforça a necessidade de considerar não apenas o empuxo absoluto, mas também o empuxo específico por unidade de área, especialmente em aplicações onde o espaço, o peso e o consumo energético são fatores limitantes. Para uma avaliação completa da viabilidade da geometria toroidal, recomenda-se a realização de testes complementares envolvendo medições de torque, corrente elétrica e consumo de potência. A análise da razão empuxo por Watt será

fundamental para determinar o real potencial dessa solução em sistemas de propulsão que exijam alto desempenho com eficiência energética.

4.2.2 Comportamento Acústico e Redução do Ruído

Os dados coletados indicam que a hélice toroidal apresentou um comportamento acústico variável, dependendo do ambiente de teste.

1. Em ambientes isolados acusticamente, a hélice toroidal apresentou níveis de ruído mais baixos do que a hélice tradicional. Esse comportamento pode estar associado à melhor dissipação das ondas sonoras dentro de um espaço fechado, onde a energia acústica se dispersa e sofre absorção pelas superfícies do ambiente.
2. Em ambientes abertos, a hélice toroidal apresentou um aumento significativo do ruído, chegando a níveis superiores ao da hélice tradicional. Esse fenômeno sugere que o design toroidal altera a propagação do som, espalhando a energia sonora em múltiplas direções, o que pode torná-la mais perceptível em espaços abertos.

Dessa forma, a percepção de menor ruído da hélice toroidal ocorre somente em condições controladas, enquanto em operações ao ar livre, o ruído pode se tornar um fator crítico a ser considerado.

Esse comportamento pode ser explicado por três fatores principais:

- Dispersão sonora mais ampla: Diferentemente da hélice tradicional, que direciona a propagação do som, a toroidal espalha as ondas sonoras em um padrão menos concentrado, tornando-as mais audíveis em ambientes abertos.
- Interferência de ondas acústicas: Em um ambiente fechado, as ondas podem se anular devido a múltiplas reflexões. Em ambientes abertos, essa interferência pode ser reduzida, tornando o ruído mais perceptível.
- Possível emissão de ruído em frequências diferentes: A estrutura toroidal pode estar gerando ruídos em espectros que se propagam mais

eficientemente em espaços abertos, aumentando a percepção do som.

Embora a redução do ruído em ambientes fechados seja uma vantagem, o aumento do ruído em locais abertos pode limitar sua aplicabilidade em determinados cenários.

4.2.3 Relação Entre Eficiência e Ruído

Os resultados obtidos neste estudo oferecem uma visão inédita e quantitativa sobre o desempenho aerodinâmico e acústico de hélices toroidais, especialmente em comparação com hélices tradicionais. Embora os modelos toroidais tenham apresentado empuxo absoluto superior, a análise por unidade de área demonstrou que a hélice tradicional possui melhor desempenho específico, o que indica que o ganho obtido pelas toroidais está relacionado principalmente à maior área de superfície, e não necessariamente a uma eficiência aerodinâmica superior.

No aspecto acústico, verificou-se que a hélice toroidal apresenta comportamento dependente do ambiente. Em locais acusticamente isolados, o nível de ruído medido foi inferior ao da hélice tradicional, sugerindo melhor dissipação de energia sonora e menor geração de turbulência. No entanto, em ambientes abertos, às toroidais emitiram ruídos mais intensos, possivelmente devido à propagação mais eficiente de ondas de baixa frequência, característica inerente à sua geometria.

Essas constatações reforçam que o desempenho das hélices toroidais não deve ser avaliado apenas por métricas absolutas, mas também em função do contexto operacional e das restrições técnicas da aplicação. A tecnologia toroidal apresenta potencial, mas requer análises complementares sobre consumo energético, torque, materiais e eficiência acústica em ambientes reais. Dessa forma, os resultados deste trabalho servem como ponto de partida para novas investigações dentro da engenharia de propulsão, com foco em aplicações práticas que demandam equilíbrio entre eficiência, silêncio e sustentabilidade.

4.3 Implicações e aplicações práticas

4.3.1 Uso em Drones e Aeronaves Elétricas

A geometria toroidal demonstrou potencial para aplicações em ambientes fechados e controlados, nos quais o comportamento acústico é favorável. Nesses cenários, como instalações industriais, estúdios de filmagem e operações logísticas indoor, a menor emissão sonora da hélice toroidal pode ser vantajosa, principalmente por sua emissão mais estável e suave, associada à menor geração de vórtices.

Por outro lado, os testes realizados em campo aberto evidenciaram níveis de ruído superiores em comparação com a hélice tradicional, devido à maior propagação de ondas sonoras de baixa frequência. Isso representa um ponto de atenção para aplicações urbanas e operações em áreas sensíveis ao ruído, como centros urbanos, zonas residenciais ou operações noturnas.

Em relação à eficiência, embora a hélice toroidal tenha apresentado maior empuxo absoluto, sua eficiência relativa por área foi inferior à da hélice tradicional. Portanto, seu uso em aeronaves elétricas e drones que operam sob restrições de espaço e energia deve ser avaliado com cautela, considerando o consumo energético necessário para gerar o empuxo adicional.

4.3.2 Sustentabilidade e Economia de Energia

A hélice toroidal ainda representa uma alternativa promissora no contexto da mobilidade elétrica e da aviação sustentável, desde que sejam considerados aspectos técnicos como o custo de fabricação, peso estrutural e a exigência energética por unidade de empuxo.

Para que essa geometria possa ser aplicada de forma eficiente em larga escala, será fundamental avançar nas pesquisas sobre consumo por Watt, comportamento acústico em diferentes condições e dimensionamento otimizado das pás, visando equilibrar performance, sustentabilidade e impacto sonoro.

5 CONCLUSÃO

A análise experimental conduzida neste trabalho demonstrou que a hélice toroidal possui maior empuxo absoluto em relação à hélice tradicional, indicando um potencial promissor para aplicações em sistemas de propulsão elétrica. No entanto, a análise por unidade de área revelou que essa eficiência pode estar mais relacionada ao aumento da superfície das pás do que a uma superioridade aerodinâmica propriamente dita. Além disso, os testes acústicos mostraram que, embora a hélice toroidal apresente níveis de ruído mais baixos em ambientes fechados, ela se mostrou mais ruidosa em ambientes abertos, o que impõe uma limitação importante para sua aplicação prática.

Cabe destacar que o protótipo utilizado neste estudo foi desenvolvido com recursos simples e fabricação aditiva, e que seu design ainda pode ser amplamente aprimorado. Técnicos consultados apontam que ajustes no formato, nos ângulos e nas proporções da hélice podem resultar em ganhos significativos de desempenho e, possivelmente, em uma redução no consumo energético.

Atualmente, não se pode afirmar que a hélice toroidal seja mais vantajosa de forma geral, pois seu maior empuxo pode vir acompanhado de um maior consumo de energia, o que tornaria sua aplicação inviável em diversos contextos. Portanto, é fundamental que estudos futuros sejam realizados, com foco na medição precisa do consumo elétrico, no comportamento da hélice em diferentes regimes de voo e, sobretudo, na otimização do design para alcançar o equilíbrio entre empuxo, ruído e eficiência energética.

Este trabalho, assim, se posiciona como um ponto de partida para investigações mais aprofundadas sobre a viabilidade e a evolução das hélices toroidais na engenharia de propulsão elétrica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ALVES, D. Contribuições Para o Estudo e a Aplicação de Bombas Funcionando Como Turbinas na Geração Descentralizada. 2010. Trabalho de Dissertação de Mestrado (Engenharia Elérica) - Escola de Engenharia da UFMG, 2010.
2. BUTLER, H. Innovative Toroid Propeller Design. 2023. Disponível em: changediscussion.com/innovative-toroid-propeller-design/. Acesso em: 15 Nov. 2023.
3. CAMPOS, A. Conhecimento Geral das Aeronaves (Asas Fixas). 2011. Universidade do Sul de Santa Catarina.
4. CARTOLANO, G. Ruídos gerados pelos Drones e formas de amenizá-los. 2020. Disponível em: https://pt.linkedin.com/pulse/ru%C3%ADdos-gerados-pelos-drones-e-formas-de-ameniz%C3%A1-los-geraldo-cartolano. Acesso em: 09 Dez 2023.
5. CYPRIANO, Marcos et al. Estudo das forças geradas por um hélice. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Espírito Santo, 2014.
6. FERRELL, M. Why Is This Propeller Getting so Much Attention?. 2023. Disponível em: www.youtube.com/watch?v=UzYHO4tksTc. Acesso em: 02 Nov. 2023.
7. GIBRAN, K. Estudo do impacto sonoro no uso de drone em campo livre. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Física) - Universidade Federal de São Carlos, 2022.
8. HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. Fundamentos de física. 9.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012. v.l.
9. MINHO, UNIVERSIDADE DO. Velocidades E Ângulos: *Micro Eólica*. Disponível em: microeolica.weebly.com/velocidades-e-acircngulos.html.

Acesso em: 15 Nov. 2023.

10. MIT LINCOLN LABORATORY. Toroidal Propeller: *Technology in Support of National Security*. 2022.
11. PAGEL, Uonis et al. Análise dos principais desafios ao desenvolvimento das energias renováveis no Brasil. 2018. Universidade Federal do Espírito Santo.
12. SEBASTIAN, TSTREM, C. Toroidal Propeller. United States Patent Application Publication. 2017.
13. BIANCHINI, Denis. Conhecimentos Técnicos-Piloto Privado e Comercial Conhecimentos Técnicos-Piloto Privado e Comercial. Editora Bianch, 2015.
14. KITPLANES. *Understanding Propeller Noise*. Disponível em: https://www.kitplanes.com/understanding-propeller-noise/
15. PILOTFRIEND. Aerodynamics of wing vortices. Disponível em: <http://www.pilotfriend.com/training/flight_training/aero/wng_vort.htm>
16. HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. *Fundamentos de Física – Volume 2: Oscilações e Ondas, Termodinâmica*. 10. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.
17. NUNES, Charles Eduardo Duarte. *Aula de Helicóptero*. [S.l.]: [s.n.], [20--]. Disponível em: https://hangarmma.com.br/blog/teoria-sobre-helicoptero/.