

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE  
CENTRO DE CIÊNCIAS COMPUTACIONAIS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM COMPUTAÇÃO  
CURSO DE MESTRADO EM ENGENHARIA DE COMPUTAÇÃO

Dissertação de Mestrado

## **Robôs Híbridos Ar-Água: Um Veículo Não Tripulado do Tipo Quadricóptero com Foco na Eficiência Energética**

Alexandre de Campos Horn

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Computação da Universidade Federal do Rio Grande, como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Computação

Orientador: Prof. Dr. Paulo Lilles Jorge Drews Jr.  
Coorientador: Prof. Dr. Armando Alves Neto

Rio Grande, 2019

## Ficha catalográfica

H 813r Horn, Alexandre de Campos.  
Robôs híbridos ar-água: um veículo não tripulado do tipo quadricóptero com foco na eficiência energética / Alexandre de Campos Horn. – 2019.  
83 f.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande – FURG, Programa de Pós-Graduação em Computação, Rio Grande/RS, 2019.  
Orientador: Dr. Paulo Lilles Jorge Drews Jr.  
Coorientador: Dr. Armando Alves Neto.

1. Veículo Híbrido 2. UAV 3. UUV 4. Não Tripulado 5. Eficiência Energética 6. Robôs Híbridos I. Drews Jr, Paulo Lilles Jorge II. Alves Neto, Armando III. Título.

CDU 621.865.8

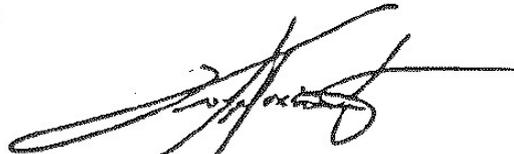


MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE  
CENTRO DE CIÊNCIAS COMPUTACIONAIS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM COMPUTAÇÃO  
CURSO DE MESTRADO EM ENGENHARIA DE COMPUTAÇÃO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**Robôs Híbridos Ar-Água: Um Veículo Não Tripulado do Tipo  
Quadricóptero com Foco na Eficiência Energética**  
Alexandre de Campos Horn

Banca examinadora:



---

Prof. Dr. Tiago Pereira do Nascimento



---

Prof. Dr. Rodrigo Zelir Azzolin



---

Prof. Dr. Paulo Lilles Jorge Drews Jr.  
Orientador(a)



---

Prof. Dr. Armando Alves Neto  
Coorientador(a)

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus pelo dom da vida e por todas as oportunidades que tive nela de amadurecimento, dedicação e aprendizado. Sem as quais não teria chegado ao fim dessa jornada e alcançado mais essa conquista.

À minha família: irmão, avós, tios, sogros e amigos; por todo o amor, orações, incentivo, ajuda e principalmente o exemplo que representam.

À minha mãe, Viviana, por todos os cuidados, amor e carinho e dedicados diariamente, muitas vezes não retribuídos, mas que foram fundamentais para mim.

Ao meu pai, Fernando, por nunca ter poupado esforços em me mostrar a direção correta, por ser exemplo de homem e minha referência de caráter e educação.

À minha namorada, Érica, por ser meu equilíbrio, minha amiga e companheira. Pelo seu amor e por me fazer uma pessoa melhor a cada dia.

À todos os meus colegas de projeto e laboratório, em destaque ao Cesão e ao Pedrão, que me ajudaram a superar as mais inesperadas adversidades e a aprender que engenharia é muito mais do que apenas a parte técnica.

Finalmente, agradecer a todos os funcionários e professores do Centro de Ciências Computacionais da Universidade Federal do Rio Grande - FURG pelo auxílio, ensinamentos e dedicação ao longo destes anos de convivência. Em especial ao professor Drews e ao professor Armando, que ao me orientar neste trabalho, permitiram a continuidade de um sonho.

## RESUMO

HORN, Alexandre de Campos. **Robôs Híbridos Ar-Água: Um Veículo Não Tripulado do Tipo Quadricóptero com Foco na Eficiência Energética**. 2019. 84 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Computação. Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande.

Nas últimas décadas, alguns tipos de veículos híbridos do tipo ar-água foram propostos para uma série de diferentes aplicações. Inspeções de estruturas parcialmente submersas e o mapeamento de regiões em ambientes alagadiços são alguns exemplos. Porém, o tempo gasto na realização de tais operações é relativamente elevado, sendo normalmente necessário sistemas com grande autonomia operacional. Apesar das vantagens no uso de sistemas do tipo quadricópteros, sua autonomia ainda é bem limitada devido a restrições das baterias disponíveis. Focando na questão energética, neste trabalho inicialmente são apresentadas análises das diferentes configurações de veículos híbridos do tipo ar-água existentes. Na sequência são realizadas avaliações com diferentes configurações de motores e hélices. Nesses ensaios identifica-se diferentes formas de aumentar a eficiência do sistema propulsor do veículo, reduzir o arrasto e também diminuir a massa adicional do veículo em operações subaquáticas. Dessa forma, este trabalho propõe uma nova plataforma híbrida do tipo quadrirrotor, focada em um melhor desempenho e uma melhor eficiência do consumo energético.

**Palavras-chave:** Veículo Híbrido, UAV, UUV, Não Tripulado, Eficiência Energética, Robôs Híbridos.

## ABSTRACT

HORN, Alexandre de Campos. **Hybrid Air-Water Robots: An Unmanned Vehicle Quadrotor like with Focus on Energy Efficiency**. 2019. 84 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Computação. Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande.

In the last few decades, some types of hybrid air-water vehicles have been proposed in the literature for several diverse applications. Inspection of partially submerged structures and mapping of marshy regions are examples of such applications. However, the time spent in carrying out such missions is relatively high, and systems with a high operating autonomy are normally required. Such autonomy is still quite limited in quadrotor-like platforms due to restrictions of the available batteries. This work initially presents analyzes of the different configurations of existing hybrid air-water vehicles to assist in this problem. Following, we evaluated engine and propeller configurations. These tests identify different ways to increase the efficiency of the vehicle's propulsion system, reduce drag and also decrease the additional mass of the vehicle in underwater operations. In this way, this work proposes a new hybrid platform of the quadrotor-like vehicle, focused on a better performance and a better efficiency of the energy consumption.

**Keywords:** Hybrid Vehicle, UAV, UUV, Unmanned, Energy Efficiency, Hybrid Robots.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	Veículo híbrido não tripulado proposto e detalhado no Capítulo 5. . . . .	20
Figura 2.1	Exemplo de plataforma tipo quadricóptero composta por uma cápsula central e 4 braços com motores nas suas extremidades. . . . .	21
Figura 2.2	HUAUV apresentado em Stewart et al. (2018). . . . .	22
Figura 2.3	HUAUV apresentado em Moore, Fein e Setzler (2018). . . . .	23
Figura 2.4	HUAUV apresentado em Tan, Siddall e Kovac (2017). . . . .	23
Figura 2.5	HUAUV apresentado em Drews, Neto e Campos (2014). . . . .	24
Figura 2.6	HUAUV apresentado em Ma, Feng e Yang (2018). . . . .	24
Figura 2.7	HUAUV apresentado em Maia, Soni e Diez-Garias (2015). . . . .	25
Figura 2.8	Naviator, HUAUV apresentado em Mercado, Maia e Diez (2017). . . . .	25
Figura 2.9	Loon Copter, HUAUV apresentado em Alzu'bi et al. 2017. . . . .	25
Figura 2.10	Gráficos 3D de eficiência dos hélices. Adaptado de Alzu'bi et al. (2015). . . . .	27
Figura 2.11	Gráfico de desempenho do hélice no ar e na água. Adaptado de Maia, Soni e Diez-Garias (2015). . . . .	27
Figura 2.12	Gráficos comparativos dos hélices no ar e na água. Fonte: Alzu'bi, Mansour e Rawashdeh (2017). . . . .	28
Figura 3.1	Sistemas de coordenadas. . . . .	30
Figura 3.2	Transição entre ambientes. . . . .	31
Figura 3.3	Forças e momentos gerados na proposta de veículo híbrido. . . . .	32
Figura 3.4	Pixhawk, versão 2.4.8. Fonte: (PIXHAWK, 2018). . . . .	37
Figura 3.5	Afro ESC - 30 A. Fonte: (HOBBYKING, 2018). . . . .	37
Figura 3.6	Modelo padrão das cápsulas fechadas. . . . .	39
Figura 3.7	Fixação entre a tampa e a base. . . . .	39
Figura 3.8	Vedação entre base e tampa - Modelo A. . . . .	40
Figura 3.9	Vedação entre base e tampa - Modelo B. . . . .	40
Figura 3.10	Fixação dos braços. . . . .	41
Figura 3.11	Canal de conexão interior-exterior. . . . .	42
Figura 3.12	Hélices aéreo e aquático. . . . .	43

Figura 3.13	Gráfico característico de hélices. Fonte: Fox, Pritchard e Mcdonald (2010). . . . .	45
Figura 3.14	Hélice aéreo único acionado por um motor. . . . .	46
Figura 3.15	Hélices aéreos acionados por dois motores. . . . .	46
Figura 3.16	Hélices aéreo e aquático acionado por motores diferentes. . . . .	47
Figura 3.17	Hélices aéreo e aquático acionados por um motor com acoplamento. . . . .	47
Figura 3.18	Hélices aéreo e aquático a 90° acionado por motores diferentes. . . . .	48
Figura 3.19	Hélices aéreo e aquático a 90° acionado por um motor com acoplamento. . . . .	48
Figura 3.20	Sustentação e movimentação aérea, 4 hélices. . . . .	49
Figura 3.21	Sustentação e movimentação aérea, 8 hélices. . . . .	50
Figura 3.22	Rotação no eixo vertical. . . . .	50
Figura 3.23	Posições do CE e CM. . . . .	51
Figura 3.24	Forças e torque restaurador. . . . .	51
Figura 3.25	Equilíbrio em qualquer orientação. . . . .	51
Figura 3.26	Física do veículo de 4 hélices com flutuabilidade positiva. . . . .	52
Figura 3.27	Física do veículo de 8 hélices com flutuabilidade positiva. . . . .	52
Figura 3.28	Física do veículo de 4 hélices com flutuabilidade negativa. . . . .	53
Figura 3.29	Física do veículo de 8 hélices com flutuabilidade negativa. . . . .	53
Figura 3.30	Flutuabilidade neutra e $CE = CM$ . . . . .	54
Figura 3.31	Flutuabilidade neutra e $CE \neq CM$ . . . . .	54
Figura 3.32	Flutuabilidade neutra com lastro variável. . . . .	55
Figura 3.33	Configuração com combinação à 90°. . . . .	55
Figura 4.1	Representação teste de movimento. . . . .	58
Figura 4.2	Representação teste hidrostático. . . . .	59
Figura 4.3	Cápsulas após o teste hidrostático. . . . .	59
Figura 4.4	Motor brushless Gattt 3508 700 KV. . . . .	60
Figura 4.5	Arcabouço utilizado para a coleta dos dados experimentais. . . . .	61
Figura 4.6	Combinações utilizadas nos experimentos no ar. . . . .	62
Figura 4.7	Detalhe da assimetria na <b>Combinação E</b> . . . . .	62
Figura 4.8	Hélices de 12, 10, 8 e 7 polegadas. . . . .	63
Figura 4.9	Rendimento do hélice de 7 polegadas no ar. . . . .	64
Figura 4.10	Rendimento do hélice de 8 polegadas no ar. . . . .	64
Figura 4.11	Rendimento do hélice de 10 polegadas no ar. . . . .	65
Figura 4.12	Rendimento do hélice de 12 polegadas no ar. . . . .	65

Figura 4.13	Gráfico comparativo entre os hélices nas <b>Combinações A e B</b> no ar. . . . .	66
Figura 4.14	Gráfico comparativo entre os hélices na <b>Combinação E</b> no ar. . . . .	66
Figura 4.15	Realização dos experimentos. . . . .	66
Figura 4.16	Configurações dos experimentos na água. . . . .	67
Figura 4.17	Hélices utilizados nos experimentos aquáticos. . . . .	68
Figura 4.18	Rendimento do hélice de 8 polegadas na água. . . . .	69
Figura 4.19	Rendimento do hélice de 11 polegadas na água. . . . .	69
Figura 4.20	Rendimento dos hélices aquáticos. . . . .	70
Figura 4.21	Curvas de todos os hélices experimentados na água. . . . .	70
Figura 5.1	Formato hidrodinâmico para melhor escoamento. Fonte: Fox, Pritchard e Mcdonald (2010). . . . .	74
Figura 5.2	Comparação do arrasto hidrodinâmico entre as formas de funcionamento. . . . .	74
Figura 5.3	Comparação das áreas projetadas entre as formas de funcionamento. . . . .	74
Figura 5.4	Modelo de veículo híbrido proposto. . . . .	75
Figura 5.5	Minimização da obstrução gerada pelos propulsores à 90°. . . . .	76
Figura 5.6	Detalhe da vedação da cápsula escolhida. . . . .	76
Figura 5.7	Protótipo do modelo proposto, Hydron. . . . .	77
Figura 5.8	Trajetória percorridas pelos veículos na simulação. . . . .	78

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Levantamento dos veículos e análise de suas características. . . . .	26
Tabela 4.1	Resultados dos testes de estanqueidade . . . . .	60
Tabela 4.2	Hélices utilizados nos experimentos aéreos. . . . .	63
Tabela 4.3	Hélices utilizados nos experimentos aquáticos. . . . .	67
Tabela 5.1	Parâmetros do hélices e motores utilizados . . . . .	77
Tabela 5.2	Parâmetros do modelo do veículo proposto . . . . .	78
Tabela 5.3	Comparativo entre os resultados das simulações. . . . .	79

## LISTA DE SÍMBOLOS

$C_A(\nu)$	Matriz Coriolis e Centrípeta da Massa Adicional
$C_V(\nu)$	Matriz Coriolis e Centrípeta do Veículo
$D(\nu)$	Matriz de Arrasto e Sustentação
$D(uvw)$	Parâmetro de Arrasto do Veículo nas direções de <b>u</b> , <b>v</b> e <b>w</b>
$D(pqr)$	Parâmetro de Arrasto do Veículo nos sentidos de <b>p</b> , <b>q</b> e <b>r</b>
$F_E$	Força de Empuxo
$F_P$	Força Peso
$f_{\rho i}$	Força gerada pelos Hélices
$G(\vartheta)$	Vetor de Forças e Momentos Restauradores
$I$	Corrente Elétrica
$J$	Coefficiente de Avanço
$J(\vartheta)$	Matriz de Transformação dos Ângulos de Euler
$J_A$	Parâmetros de Inércia da Massa Adicional do Veículo
$J_V$	Parâmetro de Inércia do Veículo
$K_P$	Coefficiente Potência Empuxo
$K_T$	Coefficiente Empuxo
$l$	Distância entre o Eixo de Rotação dos Motores
$M_A$	Matriz de Inércia da Massa Adicional
$M_V$	Matriz de Inércia do Veículo
$n$	Rotação
$P$	Potência
$T$	Empuxo
$V$	Tensão Elétrica
$v_a$	Velocidade de Avanço
$x_E$	Posição do Centro de Empuxo sobre o eixo <b>X</b> do Referencial do Veículo
$x_G$	Posição do Centro de Gravidade sobre o eixo <b>X</b> do Referencial do Veículo
$y_E$	Posição do Centro de Empuxo sobre o eixo <b>Y</b> do Referencial do Veículo

$y_G$	Posição do Centro de Gravidade sobre o eixo <b>Y</b> do Referencial do Veículo
$z_E$	Posição do Centro de Empuxo sobre o eixo <b>Z</b> do Referencial do Veículo
$z_G$	Posição do Centro de Gravidade sobre o eixo <b>Z</b> do Referencial do Veículo
$\vartheta$	Vetor de Posição e Orientação no Referencial Inercial
$\dot{\vartheta}$	Vetor de Velocidades Linear e Angular no Referencial Inercial
$\rho$	Massa Específica
$\zeta_M$	Parâmetro de Ganho do Motor
$\eta$	Eficiência do Hélice
$\eta_M$	Parâmetro de Arrasto do Motor
$\nu$	Vetor Velocidade no Referencial do Corpo
$\dot{\nu}$	Vetor Aceleração no Referencial do Corpo
$\tau$	Vetor de Forças e Momento dos Propulsores
$\phi, \theta, \psi$	Ângulos com relação ao eixos <b>XYZ</b> do Sistema de Coordenadas Inerciais
$\dot{\phi}, \dot{\theta}, \dot{\psi}$	Velocidade Angular com relação ao eixos <b>XYZ</b> do Referencial Inercial
$\omega$	Torque sobre o Veículo
$\varnothing$	Diâmetro
$\nabla$	Volume

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

CE	Centro de Empuxo
CM	Centro de Massa
UV	Unmanned Vehicle
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
UUV	Unmanned Underwater Vehicle
HUV	Hybrid Unmanned Vehicle
HUAUV	Hybrid Unmanned Aerial Underwater Vehicle
ROV	Remotely Operated Vehicle
VTOL	Vertical Take-Off and Landing

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	16
1.1	Motivação	17
1.2	Problema	18
1.3	Objetivos	19
1.4	Contribuições	19
1.5	Organização do Trabalho	20
<b>2</b>	<b>ESTADO DA ARTE</b>	21
2.1	Modelos de HUAUVs Bioinspirados	22
2.2	Modelos de HUAUVs baseados em Multirrotores	23
2.3	Estado da Arte sobre o Desempenho de HUAUVs	26
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b>	29
3.1	Modelagem Matemática do Veículo	30
3.1.1	Transição Ar $\longleftrightarrow$ Água	31
3.1.2	Modelagem dinâmica do sistema	32
3.2	Software	36
3.3	Hardware	36
3.4	Cápsula Hermética	38
3.4.1	Modelo de Cápsula	38
3.5	Sistema Propulsor	42
3.5.1	Hélices	43
3.5.2	Sistemas de propulsão utilizados em HUAUVs	45
3.5.3	Física do Sistema de Propulsão	49
<b>4</b>	<b>RESULTADOS EXPERIMENTAIS</b>	57
4.1	Testes de Estanqueidade da Cápsula	57
4.1.1	Teste de Movimento	57

4.1.2	Teste Hidrostático . . . . .	58
4.1.3	Resultados dos testes . . . . .	60
<b>4.2</b>	<b>Testes do Sistemas de Propulsão . . . . .</b>	<b>60</b>
4.2.1	Instrumentação Utilizada nos Testes . . . . .	61
4.2.2	Experimento no Ar . . . . .	61
4.2.3	Experimento Água . . . . .	67
4.2.4	Análise dos Experimentos . . . . .	71
<b>5</b>	<b>PROPOSTA DE VEÍCULO HÍBRIDO . . . . .</b>	<b>72</b>
<b>5.1</b>	<b>Sistema de Propulsão da Proposta . . . . .</b>	<b>72</b>
5.1.1	Funcionamento Aéreo . . . . .	72
5.1.2	Funcionamento Aquático . . . . .	72
<b>5.2</b>	<b>Modelo de Cápsula . . . . .</b>	<b>76</b>
<b>5.3</b>	<b>Modelo Dinâmico . . . . .</b>	<b>77</b>
<b>5.4</b>	<b>Resultados de Simulações do Veículo . . . . .</b>	<b>78</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS . . . . .</b>	<b>80</b>
<b>6.1</b>	<b>Conclusões . . . . .</b>	<b>80</b>
<b>6.2</b>	<b>Trabalhos Futuros . . . . .</b>	<b>81</b>
	<b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>	<b>82</b>

# 1 INTRODUÇÃO

O uso de veículos não tripulados tem crescido muito nos últimos anos, especialmente devido a seu baixo custo. Na literatura, podemos encontrar um grande volume de pesquisas científicas e tecnológicas realizadas em diversas áreas, como Shen, Fan e Wang (2018), Rastgoftar e Atkins (2017), Powers et al. (2018), Cummings et al. (2014) e Miranda et al. (2013), por exemplo. Veículos não tripulados são aqueles cujo controle é feito remota ou autonomamente. Entende-se por controle remoto a operação manual de um piloto a distância por meio de um rádio-transmissor ou computador com rede sem fio. Já o controle autônomo diz respeito ao emprego de computadores que, valendo-se de sensores e atuadores embarcados, permite que o veículo seja capaz de tomar decisões autonomamente.

Veículos não tripulados, também chamados *UVs* (do inglês, *Unmanned Vehicles*), podem ser divididos em diversas categorias, conforme seu ambiente de atuação, sendo as principais: veículos aéreos; veículos terrestres; e veículos aquáticos ou subaquáticos. Dentre eles, os mais populares são os *Drones* (no popular para robôs aéreos) e os *ROVs* (do inglês, *Remotely Operated Vehicles*). Esses tipos de veículos não tripulados fazem parte de dois grupos distintos, os veículos aéreos não tripulados ou UAVs (do inglês, *Unmanned Aerial Vehicles*) e os veículos subaquáticos não tripulados ou UUVs (do inglês, *Unmanned Underwater Vehicles*), respectivamente. Além desses, também existem os chamados *UGVs* (do inglês, *Unmanned Ground Vehicles*), os veículos que operam em solo, são para operações terrestres.

Os UVs são utilizados nas mais diversas áreas e para as mais diversas aplicações. Porém, de maneira geral, pode-se dizer que esses veículos possuem três finalidades diferentes: lazer, atuação e monitoramento (sensoreamento ou percepção). Nesse trabalho foram levadas em consideração apenas as finalidades de atuação e monitoramento. Atuação diz respeito a realização de alguma ação do veículo no ambiente, seja coletando informações, movendo algum objeto ou realizando alguma tarefa. Exemplos de atuação são a coleta de dados para pesquisas científicas, ou a abertura ou fechamento de alguma válvula que esteja localizada em alguma parte remota da indústria. Já monitoramento ocorre através de sensores presentes no veículo. Por meio desses sensores, o UV percebe o ambiente

identificando alguma grandeza e armazenando os dados coletados por eles. Atividades que se enquadram dentro de monitoramento são geração de imagens, medição de temperatura e mapeamento subaquático, por exemplo, como apresentado por McLeod e Jacobson (2011) e Ahn et al. (2018).

UAVs e UUVs geralmente são mais apropriados para atuar em seus respectivos ambientes, porém existem algumas situações onde poderia ser mais interessante o emprego de um veículo capaz de operar tanto no ar e na água. Como no caso de plataformas de petróleo, onde há a necessidade de inspeção tanto da parte submersa quanto da parte que se encontra fora d'água. Outro exemplo são as estruturas em regiões alagadiças, como na Floresta Amazônica. Nesse caso, além da região ser de difícil acesso, dependendo da época do ano, pode estar alagada ou seca. Como consequência, determinada estrutura pode estar submersa ou exposta. Para esses casos, onde nem os UAVs nem os UUVs conseguem desempenhar a tarefa por completo, são desenvolvidos os chamados veículos híbridos não tripulados.

Veículos híbridos não tripulados ou *HUVs* (do inglês, *Hybrid Unmanned Vehicles*) são plataformas que unem vantagens e desvantagens de tipos distintos de veículos (aéreos, terrestres, aquáticos ou espaciais), por isso o uso do termo híbrido. Dessa forma, o HUV adquire a capacidade de locomoção e atuação nos dois ambientes distintos, assim como a necessidade de portar sensores e atuadores específicos para cada um dos meios de atuação.

## 1.1 Motivação

Ao longo da história, diversos veículos híbridos foram idealizados, embora em grande parte os objetivos tenham sido restritos a aplicações militares. Porém, conforme mostraram Drews, Neto e Campos (2014), Yang et al. (2015) e Maia, Soni e Diez-Garias (2015), o interesse na utilização desses HUVs para outros tipos de aplicação tem crescido nas últimas décadas. Dessa forma, o desenvolvimento desses veículos torna-se cada vez mais importante. Três ramos de aplicações são vistas com grande potencial para o emprego do trabalho aqui desenvolvido, são elas: inspeção e manutenção, mapeamento e coleta de dados, e também, vigilância, busca e resgate.

Aplicações de inspeção e manutenção são demandadas em plataformas de petróleo, navios e em todas as estruturas que se localizam em ambientes marinhos ou aquáticos. Essas estruturas necessitam de constantes reparos, devido a corrosão causada pela água ou pelo próprio tempo. Hoje em dia, ROVs são usados para as inspeções subaquáticas dessas estruturas, já a manutenção geralmente fica a cargo de um mergulhador. Para a parte de fora d'água utilizam-se drones para inspeções e operários para manutenções. Outra situação interessante, onde existe a necessidade de inspeção, são os gasodutos em regiões alagadiças da floresta amazônica, responsáveis por levar o gás através grandes distâncias

através da floresta, pântanos e rios. Sendo assim, parte dos gasodutos estão em localidades de difícil acesso, outra parte está submersa, ou então ambas as situações ocorrem ao mesmo tempo. Isto faz com que as operações de inspeção e manutenção sejam muito difíceis e caras na região, o que torna favorável o uso de um veículo híbrido capaz de operar nesses ambientes.

Aplicações de mapeamento e coleta de dados são geralmente demandadas por pesquisadores ou empresas que tenham interesse em explorar determinadas regiões ou ambientes. Se a necessidade de mapeamento e coleta de dados for em dois ambientes diferentes é mais interessante fazer uso de um veículo que possa operar nestes dois ambientes, ao invés de usar dois veículos distintos, um em cada meio. Uma situação, onde existe esse interesse de uso de veículos híbridos, é a própria floresta amazônica, onde seu mapeamento é de interesse de muitos pesquisadores e instituições, na busca de novas plantas, elementos e substâncias. Em outro caso há também a Antártida, continente coberto por gelo e neve, onde sua costa está derretendo e se soltando no oceano, aumentando seu nível, situação crítica para vários países costeiros que buscam por soluções e estudos mais aprofundados a respeito.

Como aplicações de vigilância, busca e resgate, podem ser considerados auxílio aos salva-vidas nas praias e buscas por embarcações naufragadas ou objetos em recifes. Recentemente houve o caso de meninos que ficaram presos em uma caverna na Tailândia devido as fortes chuvas que ocorreram após eles entrarem na caverna. Essas chuvas alagaram a caverna e bloquearam partes do trajeto, impedindo os meninos de saírem. O grupo de resgate teve dificuldade para localizá-los, devido a várias ramificações internas da caverna e passagens estreitas. Para esse caso, um veículo híbrido com capacidade de voo e mergulho teria sido de grande ajuda.

Além das nobres aplicações, como resgates e salvamentos, é possível notar que existe um grande mercado em potencial para veículos híbridos. Sendo assim, é uma questão de tempo até que se vejam vários deles realizando operações e ajudando pessoas em seus trabalhos.

## **1.2 Problema**

Todas essas aplicações apresentadas possuem um grande problema, que dificulta o emprego de veículos híbridos. O tempo necessário para a realização dessas tarefas é geralmente longo, em contrapartida ao tempo de operação que estes veículos possuem. A autonomia destes veículos está ligada diretamente a alguns fatores: peso (do próprio veículo e eventual carga carregada), aerodinâmica, hidrodinâmica, capacidade de armazenamento da bateria (quanto maior for a capacidade, mais pesada ela será) e o funcionamento e a eficiência sistema propulsor.

Veículos fabricados com materiais mais novos, com maior tecnologia já estão reduzindo o peso final dos veículos híbridos, assim como baterias com maior densidade de energia também estão sendo constantemente desenvolvidas. Isso ocorre, pois são tecnologias empregadas em diversas áreas, não só em veículos não tripulados, tendo assim maiores investimentos em suas pesquisas e desenvolvimento. Porém, o mesmo não ocorre com os sistemas de propulsão, devido ao fato de que cada tipo de veículo possui um sistema de propulsão específico. Sendo assim, um importante problema destes veículos consiste em encontrar uma configuração de veículo que seja capaz de reunir aerodinâmica, hidrodinâmica com um bom funcionamento do sistema propulsor.

### 1.3 Objetivos

Como objetivo principal, este trabalho visa desenvolver um veículo híbrido do tipo ar-água, capaz de operar nos dois ambientes. Além disso, o desenvolvimento terá como foco a maximização do desempenho e da eficiência. Para isso, neste trabalho será realizado um estudo sobre os UAVs e UUVs, buscando as melhores combinações entre as características aéreas e aquáticas. Dessa forma, o objetivo é gerar um veículo híbrido não tripulado do tipo aéreo subaquático ou HUAUV, (do inglês, *Hybrid Unmanned Aerial Underwater Vehicle*), com maior eficiência e desempenho em ambos os ambientes. O que, consequentemente lhe dará melhor capacidade para a realização de tarefas.

Para facilitar o entendimento e desenvolvimento do trabalho, o objetivo do trabalho é dividido em três partes:

- Definir os melhores hélices a serem utilizados no veículo;
- Encontrar a configuração de veículo híbrido com maior eficiência energética;
- Definir um modelo de cápsula hermética, que permita no futuro desenvolver e testar um modelo real de veículo.

### 1.4 Contribuições

O presente trabalho apresenta duas principais contribuições:

- A primeira é um estudo sobre o comportamento de diversos tipos de hélices tanto no ar quanto na água.
- A segunda é a proposta de veículo, Fig. 1.1. A proposta possui 4 hélices aéreas e 4 hélices aquáticas, porém 2 dos hélices aquáticos são posicionados de forma diferente das configurações contrarrotativas comumente encontradas. Nesse caso, o eixo de

rotação desses hélices estão defasados em  $90^{\circ}$  com relação aos hélices aéreos. No Capítulo 5 é apresentado maiores detalhes e informações a respeito da proposta e como ocorreu a sua formulação, bem como apresentados resultados em simulação da operação e da construção do veículo.

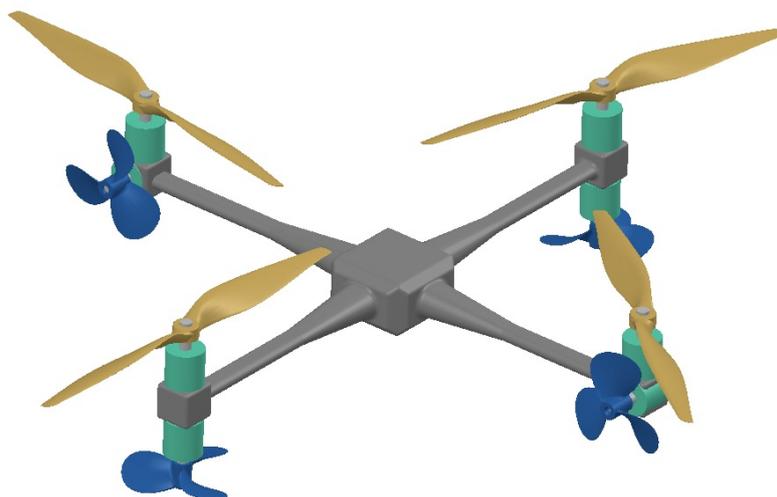


Figura 1.1: Veículo híbrido não tripulado proposto e detalhado no Capítulo 5.

## 1.5 Organização do Trabalho

O restante do presente trabalho está organizado da seguinte forma:

- Capítulo 2 - uma síntese do que há de mais atual sobre veículos híbridos aéreos e subaquáticos não tripulados, além das linhas de pesquisas que estão sendo conduzidas;
- Capítulo 3 - apresentação de conceitos e um estudo sobre os aspectos construtivos de veículos não tripulados: modelagem matemática, software, hardware, cápsula e sistema de propulsão;
- Capítulo 4 - apresentação dos testes e dos experimentos realizados baseados nos estudos do capítulo anterior, dos quais os resultados servem como base para a proposição de veículo apresentada;
- Capítulo 5 - fundamentação de uma proposta de veículo visando menor consumo de energia em sua movimentação com a explicação dos passos para se chegar nesta proposta, por fim uma simulação é realizada para comparação o modelo proposto;
- Capítulo 6 - conclusão sobre as maiores contribuições obtidas com a realização do trabalho e apresentação de ideias e possíveis continuações do trabalho.

## 2 ESTADO DA ARTE

Há muito tempo, veículos híbridos são idealizados para a realização de diversas missões, em sua maioria militares. Exemplos disto são os projetos de aviões e helicópteros submarinos, cujo histórico pode ser visto nos trabalhos de Drews, Neto e Campos (2014) e Yang et al. (2015). Nesses trabalhos, são destacados as primeiras ideias e tentativas de construções desses veículos híbridos, como também os maiores avanços realizados nos últimos anos. Além do histórico da pesquisa em veículos híbridos, Drews, Neto e Campos (2014) apresentam uma análise qualitativa e um estudo comparativo entre os tipos de veículos aéreos e aquáticos já desenvolvidos, elencando suas vantagens e desvantagens. Dessa forma, fica definido o quadrirrotor como a plataforma mais aconselhável para ser usada no desenvolvimento de um veículo híbrido, cuja forma mais clássica pode ser vista na Fig. 2.1.

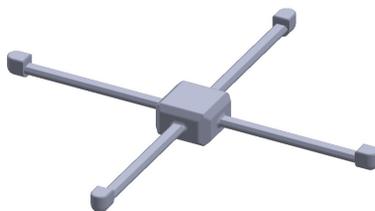


Figura 2.1: Exemplo de plataforma tipo quadrirrotor composta por uma cápsula central e 4 braços com motores nas suas extremidades.

Atualmente existem poucos trabalhos sobre HUAUVs, de tal forma que fica fácil dividi-los em dois temas: veículos bioinspirados e veículos baseados em estrutura de quadrirrotores. Dentro dos trabalhos baseados em quadrirrotores ainda é possível realizar uma subdivisão em três segmentos distintos: os que tratam do modelo e configuração mecânica do veículo ou seu projeto, os que apresentam arquiteturas e métodos de controle e os trabalhos que analisam a eficiência e desempenho dos HUAUVs. Para fundamentar este trabalho, uma análise comparativa do estado da arte dos veículos híbridos do tipo quadrirrotor desenvolvidos nos últimos anos é realizada neste capítulo, alinhando assim, o desenvolvimento um novo veículo visando obter maior eficiência e melhor desempenho.

## 2.1 Modelos de HUAUVs Bioinspirados

Veículos bioinspirados são plataformas que imitam ou apenas se inspiram em movimentos de animais. No caso de veículos ar-água, os animais utilizados como exemplos são geralmente patos e mergulhões. Deles, são copiados tanto a forma como o comportamento, um exemplo seria voo constante intervalado por mergulhos rápidos.

Stewart et al. (2018) apresentam um veículo híbrido não tripulado, do tipo VTOL *Tailsitter* de asa fixa (Fig. 2.2), inspirado em um pássaro aquático, e cuja locomoção é feita por um sistema de propulsão diferente para cada meio. Foram realizados testes em um ciclo de operação, demonstrando o funcionamento do sistema. O ciclo de operação consistiu no veículo sair da água, voar, voltar a água e se locomover dentro dela, sendo elas as quatro etapas de operação de um veículo híbrido do tipo ar-água. Ao final do trabalho, os autores apresentam os conceitos bioinspirados implementados no veículo.



Figura 2.2: HUAUV apresentado em Stewart et al. (2018).

Moore, Fein e Setzler (2018) desenvolveram um veículo de asa fixa composto por apenas um hélice, muito similar a um avião (vide Fig. 2.3). Esse veículo possui flutuabilidade positiva, o que o auxilia na transição água-ar. Os autores alegam tratar-se de um veículo mecanicamente simples, mais eficiente que os quadricópteros e com maior tempo de operação.

Tan, Siddall e Kovac (2017) introduzem um HUAUV também de asa fixa (Fig. 2.4), o *AquaMAV Aquatic Micro Aerial Vehicle*. Esse sistema faz uso de um único sistema de propulsão, tanto para o ar como para a água. Buscando operar com maior eficiência nos dois meios, o veículo possui um redutor de velocidades para alterar sua velocidade de rotação e torque em cada meio de operação. O veículo foi testado e teve seu protótipo validado pelos autores.

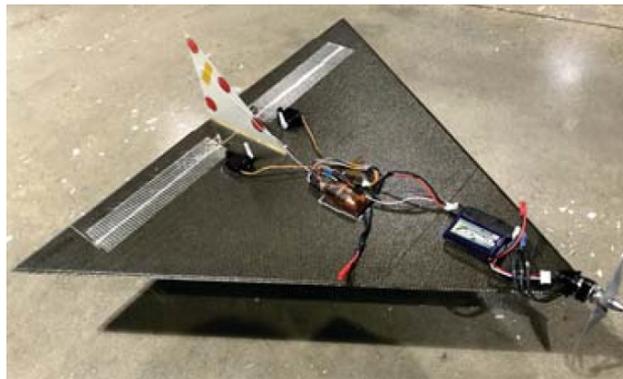


Figura 2.3: HUAUV apresentado em Moore, Fein e Setzler (2018).

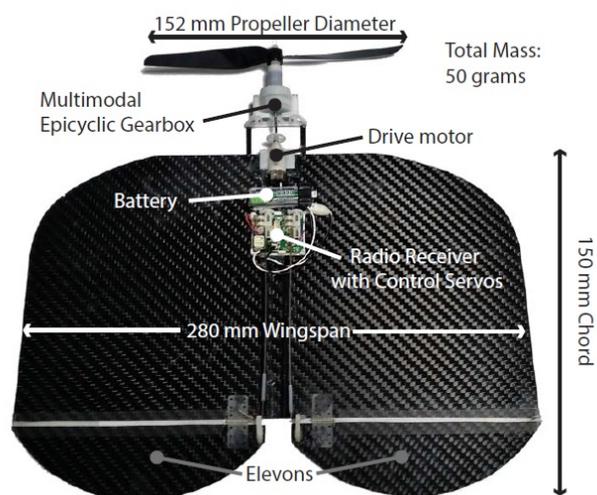


Figura 2.4: HUAUV apresentado em Tan, Siddall e Kovac (2017).

## 2.2 Modelos de HUAUVs baseados em Multirrotores

Alguns modelos de HUAUVs tem sido desenvolvidos nos últimos anos e, por mais diferenças que apresentem entre si, ainda possuem algumas características similares. Todos eles possuem configuração de quadricóptero, conforme Fig. 2.1, a parte eletrônica fica protegida por uma cápsula hermética e todos possuem pelo menos quatro hélices aéreas no sistema de propulsão. A combinação dessas características permite que o veículo paire no ar e transite entre o ar e a água sem a necessidade de mudança na configuração mecânica. Dessa forma, todas as restrições de projeto definidas para esse estudo são atendidas por esses trabalhos.

Drews, Neto e Campos (2014) apresentaram uma proposta de veículo híbrido do tipo quadricóptero com cápsula hermética, sistema de propulsão composto por 4 hélices aéreas e 4 hélices aquáticas dispostos em pares coaxiais contrarrotativos, conforme Fig. 2.5. Dessa forma, no meio aéreo, os propulsores aéreos entram em ação, enquanto que em ambiente aquático os propulsores aquáticos fazem o trabalho. Para chegar a esse modelo

de veículo, os autores realizaram um levantamento sobre os mais diversos tipos de veículos aéreos e aquáticos estudados e desenvolvidos desde o início do século XX. Com isso, fizeram uma classificação qualitativa com relação as características de interesse em um veículo híbrido, chegando assim ao modelo que melhor se adapta para operações em dois ambientes.

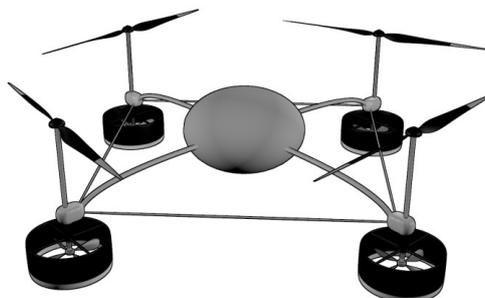


Figura 2.5: HUAUV apresentado em Drews, Neto e Campos (2014).

Ma, Feng e Yang (2018) seguiram na mesma ideia, também apresentaram um veículo com 4 hélices aéreas e 4 aquáticas, tendo em cada um dos braços dispostos no mesmo eixo uma hélice de cada tipo, conforme Fig. 2.6.



Figura 2.6: HUAUV apresentado em Ma, Feng e Yang (2018).

Em seus trabalhos, Maia, Soni e Diez-Garias (2015), Mercado, Maia e Diez (2017) e Maia, Mercado e Diez (2017) apresentaram uma proposta de veículo muito similar aos anteriores, diferindo apenas nas hélices. Em vez de fazer uso de quatro hélices aquáticas e quatro aéreas, os HUAUVs desenvolvidos contam com 8 hélices aéreas apenas, sendo utilizados tanto para propulsão aérea como aquática. O veículo proposto por Maia, Soni e Diez-Garias (2015) é mostrado na Fig. 2.7 e a proposta de apresentada por Mercado, Maia e Diez (2017) e também por Maia, Mercado e Diez (2017) na Fig. 2.8.

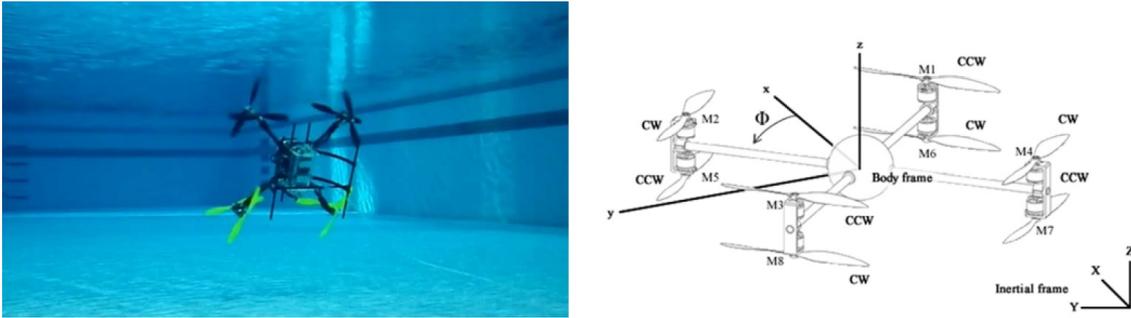


Figura 2.7: HUAUV apresentado em Maia, Soni e Diez-Garias (2015).

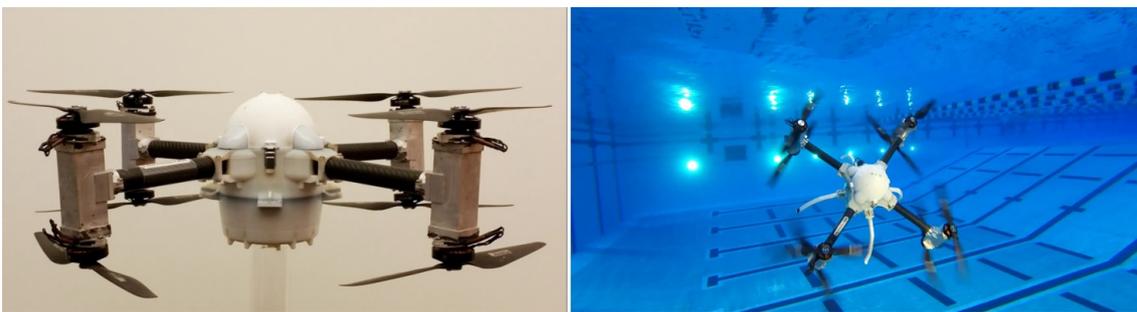


Figura 2.8: Naviator, HUAUV apresentado em Mercado, Maia e Diez (2017).

Um terceiro tipo de veículo, menos parecido com os outros, é apresentado por Alzu'bi, Mansour e Rawashdeh (2017) (Fig. 2.9). Esse HUAUV conta com um conjunto de 4 rotores e um lastro para ajudar no controle de flutuabilidade e na variação de profundidade. Esse lastro é um reservatório de água, que é enchido de água por uma bomba d'água quando o veículo mergulha, assim alterando seu centro de gravidade e modificando a posição neutra do veículo. Ainda nessa figura, em seu lado esquerdo, é possível ver a posição neutra do veículo para operação aérea, lastro vazio, no lado direito o veículo se encontra em operação subaquática, com a posição neutra horizontal, lastro cheio d'água.



Figura 2.9: Loon Copter, HUAUV apresentado em Alzu'bi et al. 2017.

Tabela 2.1: Levantamento dos veículos e análise de suas características.

HUAUV	Hélices aéreos	Hélices aquáticos	Lastro
Drews, Neto e Campos (2014)	4	4	não
Ma, Feng e Yang (2018)	4	4	não
Maia, Soni e Diez-Garias (2015)	8	0	não
Mercado, Maia e Diez (2017)	8	0	não
Alzu'bi, Mansour e Rawashdeh (2017)	4	0	sim

Interessante ressaltar que todos esses HUAUVs possuem o mesmo comportamento em funcionamento aéreo, igual ao de quadrirrotores convencionais, Gheorghită et al. (2015). Porém, cada um deles possui um funcionamento aquático particular, a ser detalhado na Seção 3.5. Em resumo, atualmente existem 5 veículos híbridos do tipo ar-água diferentes sendo desenvolvidos, passíveis de serem classificados da seguinte forma:

- 8 hélices - 8 aéreos;
- 8 hélices - 4 aquáticos e 4 aéreos;
- 4 hélices - 4 aéreos e lastro.

### 2.3 Estado da Arte sobre o Desempenho de HUAUVs

Alzu'bi et al. (2015) realizaram experimentos comparando o funcionamento de hélices aéreas em operação no ar e na água. Para a avaliação eles desenvolveram uma plataforma de medição para medir o empuxo gerado por cada um dos hélices, Fig. 2.10. Além disso, selecionaram alguns hélices de 8 polegadas de diâmetro e passo fixo, o valor dos passos utilizados foram de 3 polegadas à 4,75 polegadas, com variações de 0,25 polegadas entre cada hélice. Chegaram a conclusão que as hélices aéreas também funcionam embaixo d'água com baixas rotações.

Maia, Soni e Diez-Garias (2015) apresentaram uma pequena análise do funcionamento do sistema propulsor utilizado, tanto no ambiente aéreo como no ambiente aquático. No caso desse trabalho, o hélice utilizado possuía o diâmetro de 0,3 metros. O gráfico da performance do hélice apresentado pelos autores é mostrado na Fig. 2.11.

Villegas et al. (2017) desenvolveram uma metodologia para avaliar e selecionar componentes para um veículo híbrido. Dessa forma, a distância e o tempo de operação do veículo podem ser determinados. Para essa avaliação, a carga e o peso do veículo devem ser determinados e os hélices, motores e baterias entram como variáveis na metodologia. Apenas resultados teóricos são apresentados ao final do trabalho.

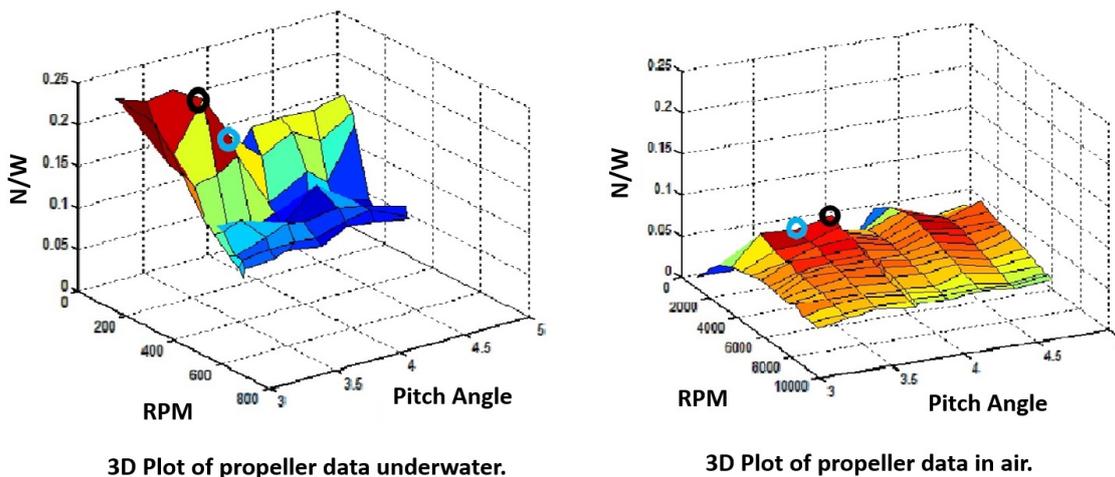


Figura 2.10: Gráficos 3D de eficiência dos hélices. Adaptado de Alzu'bi et al. (2015).

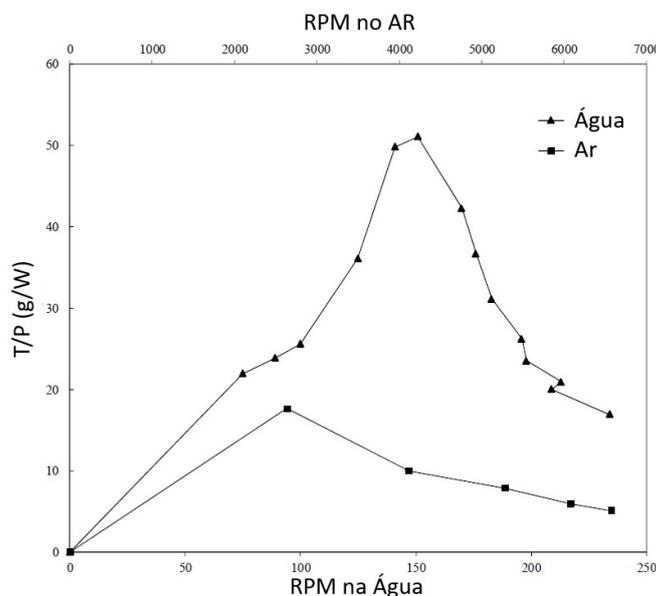


Figura 2.11: Gráfico de desempenho do hélice no ar e na água. Adaptado de Maia, Soni e Diez-Garias (2015).

Alzu'bi, Mansour e Rawashdeh (2017), além de apresentarem uma proposta de veículo, também avaliaram alguns hélices operando tanto no ar como na água (Fig. 2.12). Segundo eles o rendimento máximo de hélices aéreas no ar ocorre por volta de 4000 RPM, a partir desta velocidade o rendimento começa a cair. Na água, o rendimento vai aumentando até atingir 180 RPM, quando começa a reduzir e por volta de 200 RPM alguns hélices começam a apresentar o fenômeno de cavitação. Nesse trabalho os autores também afirmam que pequenos passos de hélice tem um melhor rendimento dentro d'água e que passos maiores tem maior rendimento no ar.

Como percebe-se pela revisão bibliográfica, as avaliações feitas limitam-se a alguns

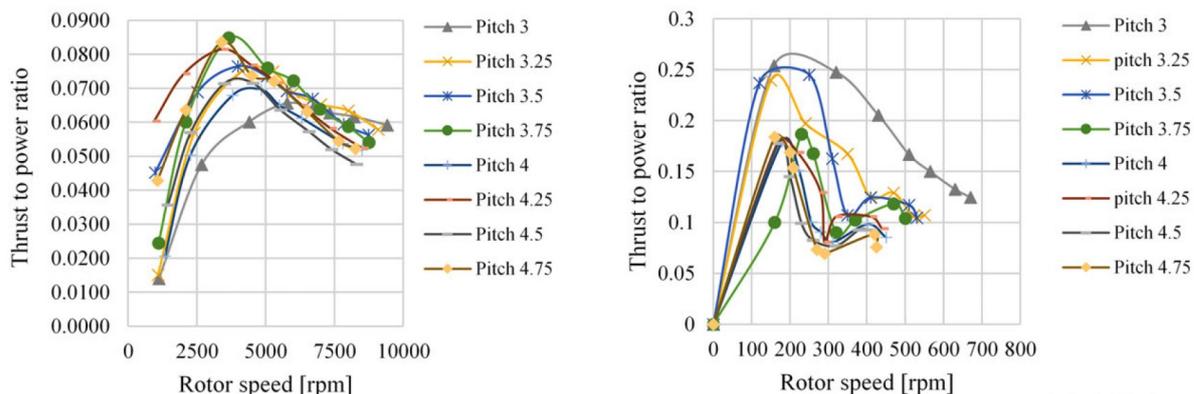


Figura 2.12: Gráficos comparativos dos hélices no ar e na água. Fonte: Alzu'bi, Mansour e Rawashdeh (2017).

hélices aéreas. Nenhum dos trabalhos avaliou hélices aquáticas, o sistema contrarrotativo e as possíveis configurações do sistema propulsor. Portanto, por entender ser a eficiência um dos pontos mais importantes no desenvolvimento de um UV. Um estudo sobre a eficiência energética, a configuração do sistema de propulsão e a forma de funcionamento dos veículos é desenvolvido neste trabalho, buscando propor um HUAUV com melhor eficiência e desempenho do que os apresentados até então.

### 3 METODOLOGIA

Para desenvolver um veículo não tripulado com ênfase na eficiência energética, este trabalho realiza um estudo entre UUVs, UAVs e com os HUAUVs do tipo quadrrrotor. Esse estudo busca a melhor forma de combinar as características aéreas e aquáticas necessárias para operações nos dois ambientes, minimizando as indesejadas e maximizando as vantajosas. Dessa forma, gerando um veículo híbrido mais eficiente com melhor desempenho, dando a ele melhor capacidade para realização de tarefas.

Como apresentado no Cap. 2, é possível notar que existe uma variedade de veículos híbridos do tipo ar-água. Entretanto, este trabalho restringe sua análise com os seguintes requisitos para o veículo:

- capacidade de voo pairado (*hovering*);
- capacidade de operação nos dois ambientes sem alterações mecânicas;
- simplicidade (configuração de quadrrrotor).

Para simplificar o estudo do veículo e facilitar o entendimento do presente trabalho, o desenvolvimento do HUAUV é dividido nas seguintes partes: modelagem matemática, *software*, *hardware*, cápsula hermética e sistema de propulsão. Nessa perspectiva, este capítulo trata de cada um destes itens, demonstrando como eles constituem o veículo, suas funções e para algumas situações, estudos e propostas de melhorias.

A seção de modelagem matemática diz respeito ao estudo da física do veículo. Para isso, um equacionamento do veículo é gerado, representando sua dinâmica em forma matemática. Isto permite que o veículo seja controlado autonomamente, ou que o operador tenha um auxílio para o seu controle e acionamento.

A seção de *software* aborda as questões relativas a inteligência do veículo, onde estão seus sistemas responsáveis pela execução de suas tarefas e modos de operação. É no *software* do veículo onde a modelagem matemática e as arquiteturas de controle são inseridas. Além disso, esta seção também trata do gerenciamento dos sensores e atuadores do veículo. Na seção do *hardware* são apresentados todos os componentes eletrônicos necessários para o funcionamento do veículo.

A seção da cápsula hermética são apresentadas propostas de encapsulamento para a proteção do hardware do veículo, necessário para os casos de operações subaquáticas. Na parte de sistema propulsor aborda-se os conjuntos de motores e hélices utilizados para a movimentação do UV, bem como suas configurações em relação ao veículo.

### 3.1 Modelagem Matemática do Veículo

Para que se possa fazer o veículo funcionar é necessário que se entenda a física do veículo e a traduza para linguagem matemática. Através dessa modelagem é possível entender o comportamento do UV, suas velocidades, acelerações e como a alteração de uma variável afeta a sua movimentação. Também por meio da modelagem é possível que se realize o controle do veículo, permitindo que ele se comporte e realize tarefas da maneira esperada no ambiente.

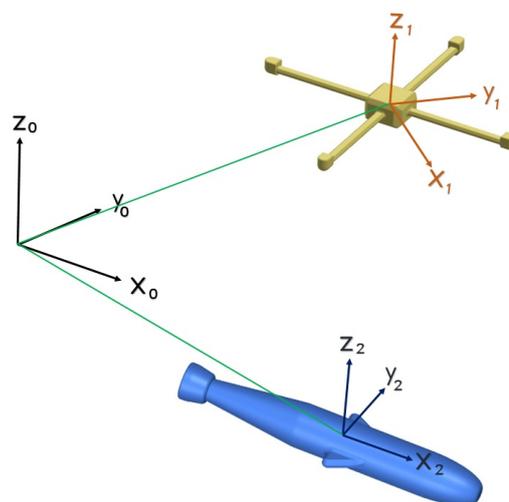


Figura 3.1: Sistemas de coordenadas.

A Fig. 3.1 mostra a representação do sistema de coordenadas inercial  $(X_0, Y_0, Z_0)$  e dos sistemas de coordenadas de cada um dos veículos UAV  $(X_1, Y_1, Z_1)$  e UUV  $(X_2, Y_2, Z_2)$ . Esses sistemas de coordenadas são importantes para definir os sistemas de referências para a modelagem dos veículos.

Existem muitos trabalhos que tratam da modelagem de veículos não tripulados. Este estudo usa como referência os trabalhos de Tavares (2003) e Valavanis e Vachtsevanos (2015). Nota-se que a modelagem dos veículos é igual em estrutura, tanto para veículos aéreos como para veículos aquáticos, diferindo-se apenas nos valores das constantes das matrizes e vetores presentes na equação. Os modelos dos veículos são apresentadas a seguir.

### 3.1.1 Transição Ar $\longleftrightarrow$ Água

Outro ponto importante do comportamento veículo é funcionamento da sua transição entre os ambientes. A transição que está sendo implementada neste veículo segue os seguintes passos, ilustrados pela Fig. 3.2.

1. O veículo detecta qual a transição irá ocorrer: ar  $\rightarrow$  água ou água  $\rightarrow$  ar. Isto é feito através dos sensores de meio, que detectam o ambiente em que o veículo está;
2. O veículo move-se até a superfície de transição;
3. Sensores de meio detectam se o veículo está em posição para fazer a transição de meio;
4. O veículo troca de meio;
5. O software troca o modo operação para operar no novo meio.

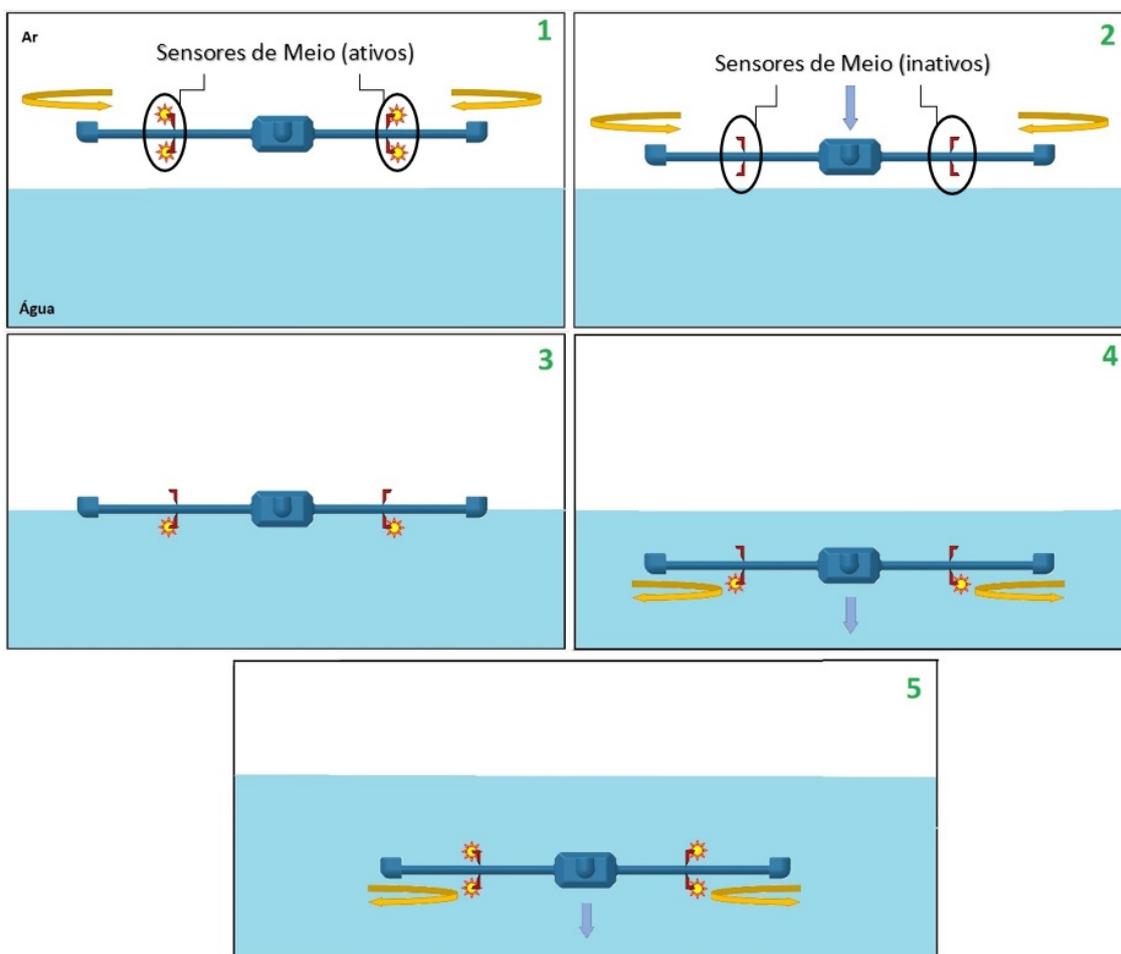


Figura 3.2: Transição entre ambientes.

### 3.1.2 Modelagem dinâmica do sistema

Existem muitos trabalhos que tratam da modelagem de veículos aéreos e aquáticos não tripulados. Aqui, usa-se como referência Tavares (2003). Além disso, o sistema de atuação do robô baseia-se na configuração descrita pela Fig. 3.3, onde as setas verdes representam as forças  $f_{\rho i}$  geradas pelos propulsores aéreos, enquanto que as setas azuis representam as forças  $f_{\rho i}$  produzidas pelos propulsores aquáticos. Todas estas forças são apresentadas na Eqs. 3.10 à 3.13.

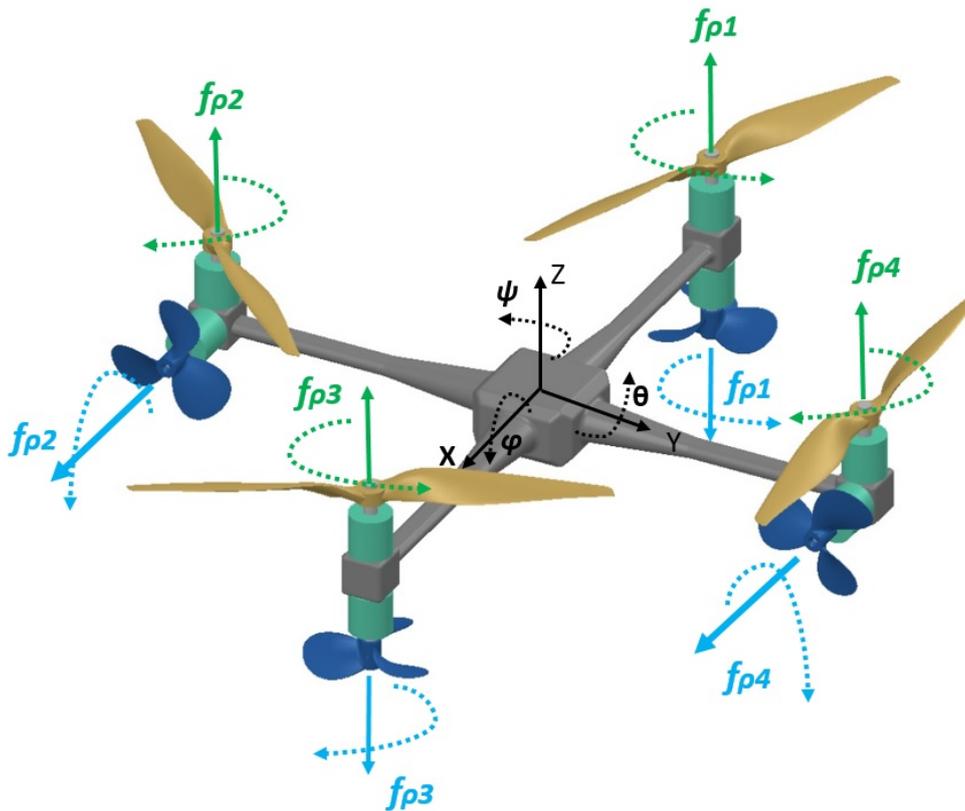


Figura 3.3: Forças e momentos gerados na proposta de veículo híbrido.

As equações que modelam a dinâmica e cinemática do veículo são apresentadas nas Eqs. 3.1 e 3.2:

$$\left( M_V + M_A \right) \dot{\nu} + \left( C_V(\nu) + C_A(\nu) \right) \nu + D(\nu)\nu + G(\vartheta) = \tau, \quad (3.1)$$

$$\dot{\vartheta} = J(\vartheta_2)\nu, \quad (3.2)$$

onde:

- $M_V$  é a matriz de inércia do veículo;
- $M_A$  é a matriz de inércia da massa adicional;
- $C_V(\nu)$  é a matriz Coriolis e Centrípeta do veículo;

- $C_A(\nu)$  é a matriz Coriolis e Centrípeta da massa adicional;
- $D(\nu)$  é a matriz de arrasto e sustentação;
- $G(\vartheta)$  é o vetor de forças e momentos restauradores;
- $\tau$  é o vetor de forças e momento dos propulsores;
- $J(\vartheta_2)$  é a matriz de transformação dos ângulos de Euler;
- $\nu$  é o vetor das velocidades no referencial do corpo ( $\nu = [u, v, w, p, q, r]^T$ );
- $\dot{\nu}$  é o vetor das acelerações no referencial do corpo ( $\dot{\nu} = [\dot{u}, \dot{v}, \dot{w}, \dot{p}, \dot{q}, \dot{r}]^T$ );
- $\vartheta$  é o vetor de posição e orientação no referencial inercial ( $\vartheta = [x, y, z, \phi, \theta, \psi]^T$ );
- $\dot{\vartheta}$  é o vetor das velocidades no referencial inercial ( $\dot{\vartheta} = [\dot{x}, \dot{y}, \dot{z}, \dot{\phi}, \dot{\theta}, \dot{\psi}]^T$ ).

A forma expandida da matriz de inércia do veículo é apresentada pela Eq. (3.3):

$$M_V = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 & m z_G & -m y_G \\ 0 & m & 0 & -m y_G & 0 & m x_G \\ 0 & 0 & m & m y_G & -m x_G & 0 \\ 0 & -m z_G & m y_G & I_X & -I_{XY} & -I_{XZ} \\ m z_G & 0 & m x_G & -I_{XY} & I_Y & -I_{XZ} \\ -m y_G & -m x_G & 0 & -I_{XZ} & -I_{YZ} & I_Z \end{bmatrix}. \quad (3.3)$$

Caso a origem do sistemas de coordenadas inerciais do veículo coincida com o centro de massa do veículo e os eixos coordenados sejam paralelos aos eixos principais de inércia do veículo, todos os elementos fora da diagonal principal da matriz de inércia são nulos. A matriz de massa adicional para um veículo que possui três planos de simetria é apresentada abaixo, Eq. 3.4, onde  $m_{A_{ij}}$  representa os coeficientes de massa adicional:

$$M_A = \begin{bmatrix} m_{A_{11}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_{A_{22}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_{A_{33}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_{A_{44}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & m_{A_{55}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & m_{A_{66}} \end{bmatrix}. \quad (3.4)$$

A determinação das massas adicionais, tanto para a matriz de inércia quanto para a matriz Coriolis e Centrípeta pode ser feita através de equações ou por forma geométricas

tabeladas, conforme apresentado por Newman (1977) e por Fossen (1994).

$$C_V = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & m(y_G q + z_G r) & -m(x_G q - w) & m(x_G r + v) \\ 0 & 0 & 0 & -m(y_G p + w) & m(z_G r + x_G p) & -m(y_G r - u) \\ 0 & 0 & 0 & -m(z_G p - v) & -m(z_G r - v) & m(x_G p + y_G q) \\ -m(y_G q + z_G r) & m(y_G p + w) & m(z_G p - v) & 0 & -I_{yz} q - I_{xz} p + I_z r & I_{yz} r + I_{xy} p - I_y q \\ m(x_G q - w) & -m(z_G r + x_G p) & m(z_G p + u) & I_{yz} q + I_{xz} p - I_z r & 0 & -I_{xz} r - I_{xy} q + I_x p \\ m(x_G r + v) & m(y_G r - u) & -m(x_G p + y_G q) & -I_{yz} r - I_{xy} p + I_y q & I_{xz} r + I_{xy} q - I_x p & 0 \end{bmatrix}. \quad (3.5)$$

A matriz Coriolis e Centrípeta do veículo permite diferentes parametrizações, uma delas é apresentada acima pela Eq. 3.5, nessa forma ela resulta em um matriz anti-simétrica. Dessa mesma forma, a matriz Coriolis-centrípeta da massa adicional também permite diferentes parametrizações e também é anti-simétrica, Eq. 3.6. Uma destas parametrizações é apresentada a seguir:

$$C_A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & m_{A33} w & -m_{A22} v \\ 0 & 0 & 0 & -m_{A33} w & 0 & m_{A11} u \\ 0 & 0 & 0 & m_{A22} v & -m_{A11} u & 0 \\ 0 & m_{A33} w & -m_{A22} v & 0 & m_{A66} r & -m_{A55} q \\ -m_{A33} w & 0 & m_{A11} u & -m_{A66} r & 0 & m_{A44} p \\ m_{A22} v & -m_{A11} u & 0 & m_{A55} v & -m_{A44} u & 0 \end{bmatrix}. \quad (3.6)$$

Por simplicidade de equacionamento, a matriz da força de arrasto leva apenas em consideração os termos quadráticos do arrasto, desconsiderando os ângulos de ataque e o acoplamento de movimentos, conforme Eq. 3.7.

$$D(\nu) = -\frac{\rho}{2} \begin{bmatrix} \nabla^{\frac{2}{3}} C_u & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \nabla^{\frac{2}{3}} C_v & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \nabla^{\frac{2}{3}} C_w & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \nabla^{\frac{5}{3}} C_p & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \nabla^{\frac{5}{3}} C_q & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \nabla^{\frac{5}{3}} C_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} |u| \\ |v| \\ |w| \\ |p| \\ |q| \\ |r| \end{bmatrix}. \quad (3.7)$$

O vetor de forças e momentos restauradores matriz, é basicamente composto por duas forças: o peso ( $F_P$ ) e o empuxo ( $F_E$ ), conforme Eq. 3.8.

$$G(\vartheta) = \begin{bmatrix} (F_P - F_E) s\theta \\ -(F_P - F_E) c\theta s\phi \\ -(F_P - F_E) c\theta c\phi \\ -(y_G F_P - y_E F_E) c\theta c\phi + (z_G F_P - z_E F_E) c\theta s\phi \\ (z_G F_P - z_E F_E) s\theta + (x_G F_P - x_E F_E) c\theta c\phi \\ -(x_G F_P - x_E F_E) c\theta s\phi - (y_G F_P - y_E F_E) s\theta \end{bmatrix}. \quad (3.8)$$

Por fim, o vetor de forças e momentos dos propulsores são dados conforme Eq. 3.9.

$$\tau = \begin{bmatrix} J(\vartheta_2) f \\ l \omega \end{bmatrix}, \quad (3.9)$$

onde, no ar:

$$f = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \sum_{i=1}^4 f_{\rho i} \end{bmatrix} \mathbf{e} \quad (3.10)$$

$$\omega = \begin{bmatrix} f_{\rho 2} - f_{\rho 4} \\ f_{\rho 3} - f_{\rho 1} \\ -\sum_{i=1}^4 (-1)^i f_{\rho i} \end{bmatrix}, \quad (3.11)$$

e na água:

$$f = \begin{bmatrix} f_{\rho 2} + f_{\rho 4} \\ 0 \\ f_{\rho 1} + f_{\rho 3} \end{bmatrix} \mathbf{e} \quad (3.12)$$

$$\omega = \begin{bmatrix} 0 \\ f_{\rho 3} - f_{\rho 1} \\ f_{\rho 2} - f_{\rho 4} \end{bmatrix}, \quad (3.13)$$

sendo  $l$  o tamanho do braço do quadricóptero (distância entre o motor e o centro de massa do veículo). Já a força de cada propulsor é dados por  $f_{\rho i} = \zeta_M \rho n^2$ , sendo  $\zeta_M$  um ganho do motor,  $\rho$  a densidade do meio (ar ou água) e  $n$  a velocidade de rotação da hélice.

A forma expandida da eq. (3.2) é:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \\ \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c\psi c\theta & c\psi s\theta s\phi - s\psi c\phi & c\psi c\phi s\theta + s\psi s\phi & 0 & 0 & 0 \\ s\psi c\theta & s\psi s\theta s\phi + c\psi c\phi & s\psi c\phi s\theta - c\psi s\phi & 0 & 0 & 0 \\ -s\theta & c\theta s\phi & c\theta c\phi & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & s\phi t\theta & c\phi t\theta \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c\phi & -s\phi \\ 0 & 0 & 0 & 0 & s\phi/c\theta & c\phi/t\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \\ p \\ q \\ r \end{bmatrix}. \quad (3.14)$$

A modelagem matemática do veículo em atuação no ar e na água são muito similares, a diferença está apenas nos parâmetros referentes à densidade do meio. No ar os fatores do arrasto, massa adicional e empuxo são grandezas muito pequenas. Desta forma, sendo geralmente desconsiderados no comportamento aéreo. Já dentro d'água, estas grandezas tem grande influencia sobre veículo, sendo indispensáveis para melhor representação do comportamento dinâmico no ambiente aquático.

### 3.2 Software

O software escolhido para o desenvolvimento do veículo é o ArduPilot. Trata-se de um sistema de piloto automático *open source*, que é muito utilizado por diversos desenvolvedores, de maneira que é constantemente atualizado e melhorado. Ele é capaz de controlar uma ampla faixa de veículos não tripulados que existem no mercado hoje. Além disso, o ArduPilot é capaz de coletar e armazenar dados de diversos sensores, permitindo aumento de sua capacidade. Executa ainda o gerenciamento dos atuadores, que no presente trabalho eles seriam os motores *brushless*.

A principal razão que resultou na escolha deste software foi o seu caráter *open source*, que permite que alterações ou adaptações sejam executadas. Dessa forma, possibilita ao veículo maior flexibilidade e especificidade. O ArduPilot já possui implementados em seu sistema tanto o modo de operação para AUVs como para UUVs, porém ainda não há para HUAUVs. Dessa forma, para o funcionamento completo do veículo híbrido é preciso implementar um modo para a transição entre os meios.

### 3.3 Hardware

O hardware do HUAUV é composto pelos componentes eletrônicos necessários ao funcionamento adequado do veículo. No desenvolvimento deste HUAUV o hardware necessário é composto por: uma placa controladora de voo, controladores eletrônicos de velocidade ou ESCs (do inglês, *eletronic speed controller*), um para cada motor, e sensores.

A placa controladora de voo é o cérebro do UV, ela é a responsável por todo o processamento embarcado do veículo, desde os valores lidos pelos sensores, até a determinação de qual velocidade cada um dos motores deve girar. A placa escolhida para o desenvolvimento do veículo é a Pixhawk, Fig. 3.4, obtida em (PIXHAWK, 2018). A Pixhawk possui alguns sensores embarcados, necessários ao seu controle de voo, são eles: giroscópio, acelerômetro, magnetômetro e barômetro. Além disso, a placa é perfeitamente compatível com o software ArduPilot.



Figura 3.4: Pixhawk, versão 2.4.8. Fonte: (PIXHAWK, 2018).

Os ESCs são os componentes que gerenciam e comandam a rotação dos motores. Esses equipamentos recebem da placa controladora de voo a informação de qual velocidade o motor deve girar, com isso, efetuam a regulagem da velocidade do motor. Para a alimentação do motor, os ESCs possuem três terminais de potência, chaveados durante o seu funcionamento dois a dois e invertendo suas polaridades. Dessa forma, permitindo que os motores *brushless* sejam acionados em velocidade proporcional a este chaveamento. Para emprego no desenvolvimento deste veículo foi escolhido o Afro ESC - 30A (Fig. 3.5) (HOBBYKING, 2018).



Figura 3.5: Afro ESC - 30 A. Fonte: (HOBBYKING, 2018).

Os sensores usados nestes veículos no geral podem ter três finalidades. A primeira funcionalidade é auxiliar na movimentação, que é o caso do acelerômetro, giroscópio, barômetro, bússola e do sistema de posicionamento global, GPS (do inglês, *Global Position System*). A segunda funcionalidade é auxiliar na atuação, como um sensor de força, um sensor de distância ou um sensor de tensão na bateria. A terceira finalidade seria auxiliar no monitoramento, esses é o caso das câmeras e sensor de temperatura.

Além desses, um sensor muito importante para um veículo híbrido é sensor de meio, ou mais tecnicamente de água. Esse sensor tem a função de identificar o ambiente em que está inserido. Seu funcionamento é bastante simples, similar a uma chave aberta, ou seja possui dois terminais com diferença de tensão, quando é imerso em água este contato se “fecha” e o sensor identifica que está em ambiente aquático. No veículo híbrido são utilizados 8 destes sensores, dois por braço, um na parte superior e outro na parte inferior, alguns podem ser vistos na representação feita na Fig. 3.2.

### 3.4 Cápsula Hermética

Nos casos de operações aquáticas, é necessário que o hardware do veículo esteja protegido, evitando assim falhas por curto circuito e deteriorações por corrosão. Para dar essa proteção ao hardware, uma cápsula com capacidade de comportar todos os componentes e impedir a entrada de água é desenvolvida. A cápsula, por ser o maior componente do veículo em volume, é o principal responsável pelo empuxo gerado. Sendo assim, seu dimensionamento de fundamental importância para o funcionamento adequado do veículo. Além de funcionar como proteção, ainda tem a função de acoplar os braços que sustentam o sistema de propulsão.

A fabricação da cápsula é feita por uma impressora 3D. Dessa forma, obtêm-se uma produção fácil, barata e rápida, aumentando a agilidade dos testes e da validação dos modelos projetados. Para evitar possíveis poros ou micro falhas na impressão, que possibilitem a infiltração de água, é depositado um revestimento de resina epóxi líquida nas superfícies da cápsula, que ao secar gera maior estanqueidade aumentando a proteção da cápsula.

#### 3.4.1 Modelo de Cápsula

A cápsula desenvolvida para a construção do protótipo possui cinco elementos básicos, desses, três estão representados na Fig. 3.6: a base, a tampa e o anel de fixação. A base é a parte inferior, onde são dispostos todo o hardware, ou seja, possui seu formato e volume proporcionais aos componentes que serão comportados. A tampa simplesmente tem a função de fechar e proteger estes componentes. Entre eles é disposta a junta de

vedação, cuja função é impedir a entrada de água na interface tampa-base. Ao redor da cápsula, uma película de resina reveste o conjunto de forma a aumentar sua estanqueidade. E por fim, um anel, que possui a função de auxiliar na fixação mecânica dos braços.

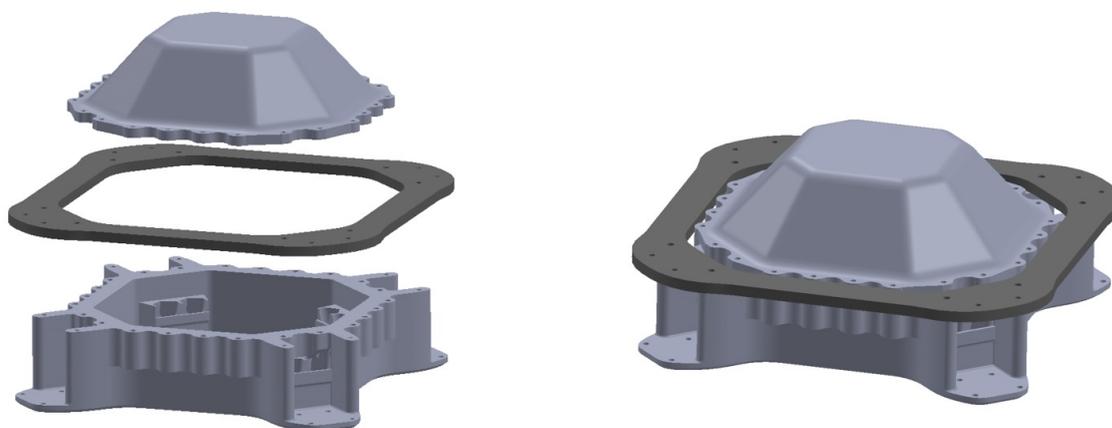


Figura 3.6: Modelo padrão das cápsulas fechadas.

A maneira como os componentes da cápsula são montados é muito importante. Dessa forma, existem quatro subseções abaixo, cada uma delas explicando o processo de montagem de um dos diferentes pontos crítico da montagem do corpo do veículo.

#### 3.4.1.1 *Fixação da Tampa*

Para fixação da tampa com a sua parte inferior são utilizados parafusos inoxidáveis, de maneira a evitar o processo de corrosão. Como cada parafuso consegue apenas garantir estanqueidade em uma pequena área em sua volta, vários parafusos são distribuídos regularmente por todo o perímetro. Dessa forma, se consegue garantir uma pressão homogênea no aperto da tampa. Na tampa, os furos por onde passam os parafusos estão representados na cor vermelha e na base, destacados na cor azul, Fig. 3.7.

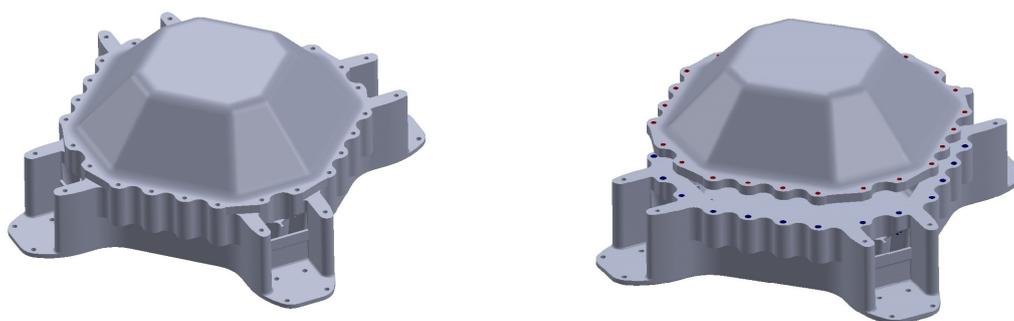


Figura 3.7: Fixação entre a tampa e a base.

### 3.4.1.2 Vedação da Tapa-Base

Embora os parafusos possuam uma área de pressão a sua volta, apenas isso não é suficiente para garantir a estanqueidade da cápsula. Para haver uma vedação segura entre a tampa e a base, dois modelos de cápsulas são desenvolvidos para serem testados experimentalmente, a fim de garantir maior confiança na sua funcionalidade.

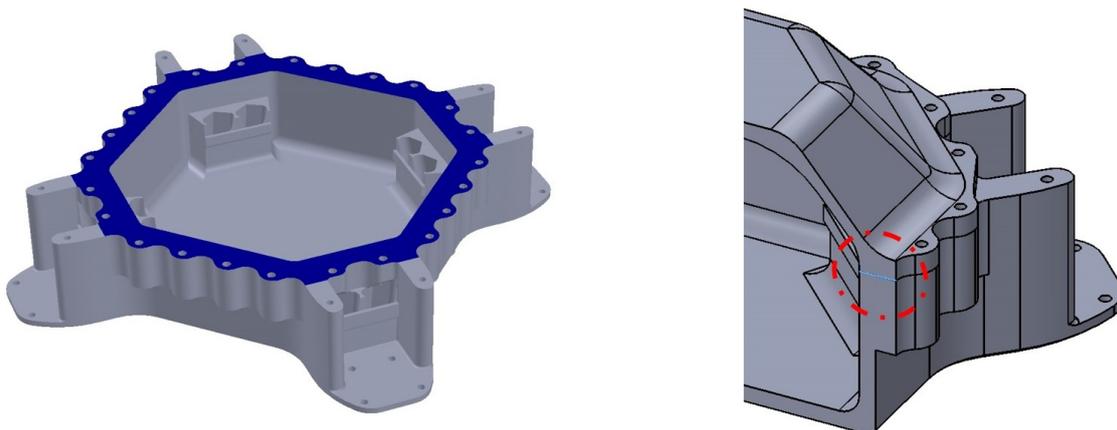


Figura 3.8: Vedação entre base e tampa - Modelo A.

O primeiro modelo, *modelo A*, utiliza uma junta hidráulica, que é posicionada entre os dois componentes e fica pressionada no aperto dos parafusos. Essa junta hidráulica possui o formato idêntico ao da superfície da cápsula, detalhe em azul na Fig. 3.8. O segundo modelo, *modelo B*, possui uma ranhura, onde é posicionada uma massa de vedação. Ao se fechar a cápsula a tampa pressiona essa massa contra a base, gerando assim a vedação, detalhe em azul Fig. 3.9.

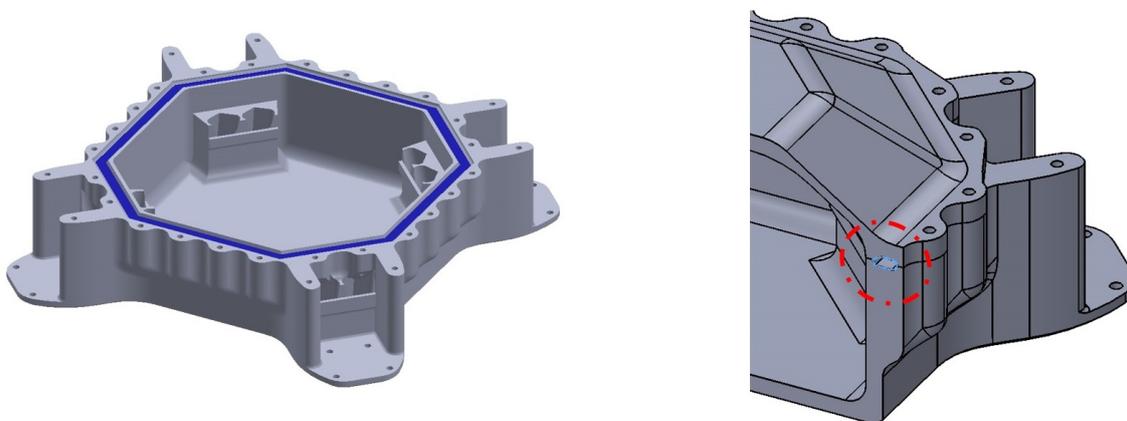


Figura 3.9: Vedação entre base e tampa - Modelo B.

### 3.4.1.3 *Fixação dos Braços*

Os braços do veículo, também chamados de hastes, são os elementos responsáveis por sustentar o sistema de propulsão e mantê-los afastados da cápsula para que os hélices tenham espaço suficiente para rotacionar, evitando colisões entre os hélices ou com a própria cápsula. Para reduzir sua interferência no funcionamento dos hélices, os braços devem ser o menor possível, ou seja, ter um tamanho mínimo, no qual possua resistência para suportar as forças, torques e vibrações gerados pelo sistema de propulsão.

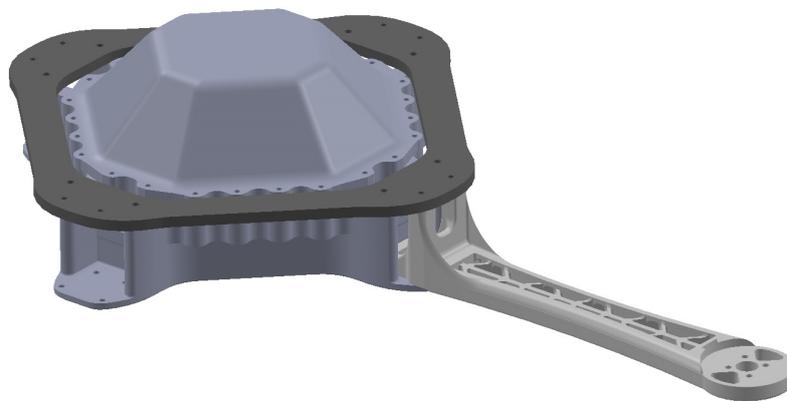


Figura 3.10: Fixação dos braços.

Os braços são fixados apenas na base da cápsula. Isso é feito, para evitar que as forças, torques e vibrações gerados sejam transferidos a tampa, causando perda da estanqueidade. Para garantir uma fixação adequada dos braços, o anel faz a união de todos os braços em sua parte superior e fixando-os à base, juntando todas as quatro hastes e garantindo uma maior rigidez ao sistema. A Fig. 3.10 apresenta um braço e o anel em suas posições.

### 3.4.1.4 *Canais de conexão interior-exterior*

Todo o hardware do veículo fica protegido dentro da cápsula, porém os ESCs precisam acionar os motores e a Pixhawk precisa comunicar-se com os sensores de meio. Para permitir a conexão entre os controladores do lado interno com os sensores e atuadores do lado externo da cápsula, foram criados 8 canais para a passagem dos cabos e fios. Após sua colocação, esses canais são preenchidos com resina epóxi líquida, que consegue penetrar e preencher os espaços vazios, ao solidificar-se realiza a vedação, garantindo a hermeticidade dos canais da cápsula. A Fig. 3.11 mostra estes canais destacados na cor azul escuro.

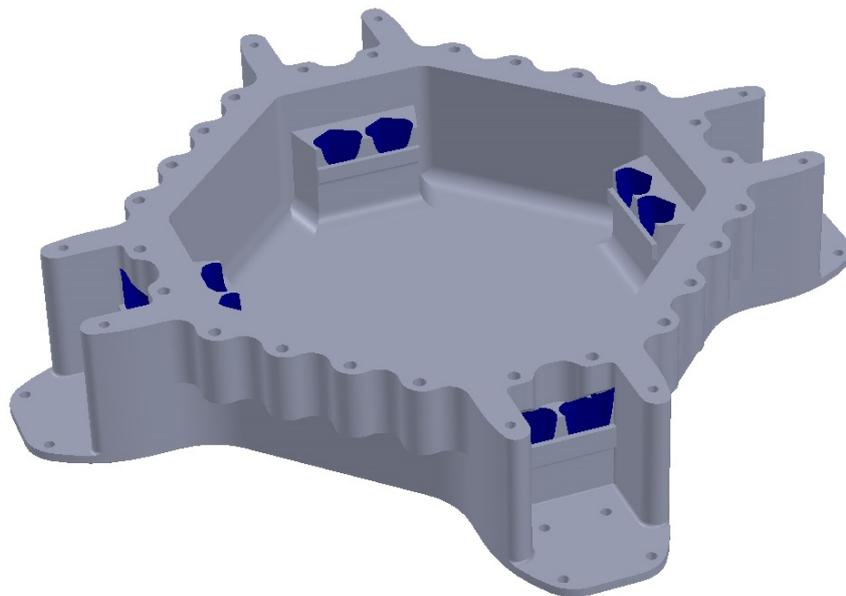


Figura 3.11: Canal de conexão interior-exterior.

### 3.5 Sistema Propulsor

Após a apresentação da modelagem matemática, do software, do hardware e da cápsula, resta a apresentação das diferentes formas de sistemas propulsores usados nos veículos. Sendo assim, para um melhor entendimento define-se o termo *sistema propulsor* utilizado neste trabalho como sendo o conjunto formado pelo par motor e hélice. Esse sistema é o responsável pela movimentação e sustentação do veículo. Para isso, realiza a transformação da energia elétrica armazenada nas baterias em energia mecânica, gerando as forças de sustentação e locomoção do veículo.

Na grande maioria dos veículos não tripulados, tanto AUVs, quanto UUVs e também os HUAUVs, os motores empregados no sistema propulsor são do tipo *brushless* ou BLDC (termo em inglês, que significa sem escovas). Dessa forma, este trabalho também utilizará este tipo de motor para o desenvolvimento do veículo híbrido.

Os hélices, também chamados de propulsores, são os componentes que mais mudam de um veículo para outro. Isto ocorre, devido ao fato que cada hélice deve ser projetado de acordo com o empuxo que deverá gerar e com o meio em que irá atuar. Sendo assim, cada veículo deve ser estudado para que o sistema propulsor apresente a melhor eficiência e desempenho possíveis. Objetivando isso, esta seção apresenta uma análise completa das configurações e funcionamento do sistemas propulsores utilizados atualmente, além de algumas possíveis combinações baseadas nestas já empregadas.

### 3.5.1 Hélices

Tanto os hélices aéreos como os aquáticos possuem o mesmo princípio de funcionamento, rotação para criar um diferencial de pressão entre os lados das pás. Essa diferença de pressão é responsável por criar a força que movimenta o veículo em uma dada direção. Fisicamente, ela ocorre devido à diferença de velocidade que o fluido passa em cada lado das pás, sendo que esse efeito ocorre devido a geometria das pás, que apresentam curvaturas diferentes em cada um dos seus lados. A Fig. 3.12 apresenta exemplos de cada um dos tipos de hélices, na esquerda, um hélice aéreo e, na direita, um hélice aquático.



Figura 3.12: Hélices aéreo e aquático.

Apesar de possuírem o mesmo princípio de funcionamento, os hélices aéreos e aquáticos são fisicamente diferentes um do outro. A principal causa dessa grande diferença é a massa específica do meio onde cada um deles opera. Sendo a massa específica da água aproximadamente  $1000 \text{ kg/m}^3$  e a massa específica do ar de aproximadamente  $1,22 \text{ kg/m}^3$ , quase 1000 vezes menor. Para ilustrar essa diferença, é possível considerar a seguinte situação. Ao se analisar as massas específicas, nota-se que a força necessária para deslocar  $1 \text{ m}^3$  de água é maior que a força necessária para a mover mesma quantidade de ar. Logo, a resistência mecânica do propulsor também precisa ser diferente.

Devido à sua geometria complexa, os hélices apresentam comportamento físico muito difícil de ser estimado e previsto apenas com teoria e equações. Sendo assim, indispensável que sejam estudados experimentalmente através da medição de algumas de suas grandezas, como empuxo, potência torque e rotação, por exemplo.

Por serem elementos mecânicos cuja principal função é a conversão de energia, os hélices tem a eficiência ( $\eta$ ) como uma das suas características mais importantes de serem determinadas. Para o seu cálculo, como apresentado na Eq. (3.18), é necessário a estimativa de três parâmetros: o coeficiente de avanço ( $J$ ), o coeficiente de empuxo ( $K_T$ ) e o coeficiente de potência ( $K_P$ ). Eles são apresentados por Carlton (2007) e Seddon e

Newman (2011) da seguinte forma:

$$J = \frac{v_a}{n \varnothing}, \quad (3.15)$$

$$K_T = \frac{T}{\rho n^2 \varnothing^4}, \quad (3.16)$$

$$K_P = \frac{P}{\rho n^2 \varnothing^5}, \quad (3.17)$$

$$\eta = \frac{J K_T}{2 \pi K_P}. \quad (3.18)$$

onde:

- $J$  é o coeficiente de avanço;
- $v_a$  é a velocidade de avanço do hélice com relação ao fluído;
- $n$  é a velocidade de rotação do hélice;
- $\varnothing$  é o diâmetro do hélice;
- $K_T$  é o coeficiente de empuxo;
- $K_P$  é o coeficiente de potência;
- $T$  é o empuxo ou a força gerada pelo hélice;
- $P$  é a potência consumida pelo hélice;
- $\rho$  é a massa específica do meio;
- $\eta$  é o rendimento.

Tendo os dados de entrada dessas equações, é possível traçar os gráficos característicos dos hélices, visualizando o comportamento e a eficiência dos propulsores em função do seu coeficiente de avanço.

Na Fig. 3.13 Fox, Pritchard e Mcdonald (2010) apresentam o comportamento característico dos hélices, onde o coeficiente de avanço  $J$  é a variável independente, Eq. (3.15). O coeficiente de empuxo  $K_T$ , Eq. (3.16), o coeficiente de potência  $K_P$ , Eq. (3.17) e a eficiência  $\eta$  são variáveis dependentes, Eq. (3.18). Ainda é possível notar que a maior eficiência ocorre quando o coeficiente de avanço  $J \simeq 0,8$  e  $K_P = K_T$ .

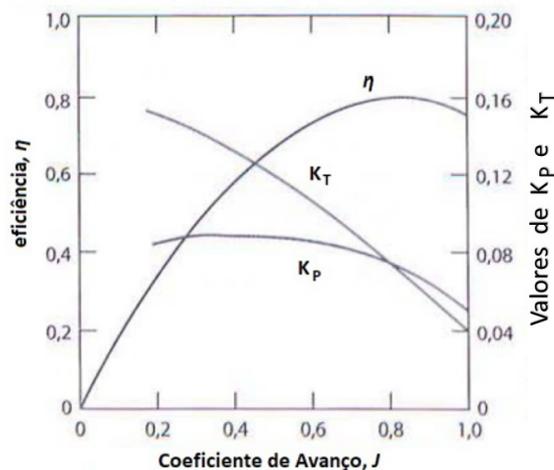


Figura 3.13: Gráfico característico de hélices. Fonte: Fox, Pritchard e Mcdonald (2010).

### 3.5.2 Sistemas de propulsão utilizados em HUAUVs

Por definição, um veículo híbrido tem a capacidade de operar em mais de um ambiente, no caso deste trabalho, ar e água. Como solução desse problema, cada um dos trabalhos apresentados no Capítulo 2 propõem uma solução diferente. Dessa maneira, uma organização geral das possíveis formas de se fazer a locomoção é necessária para que seja possível uma análise comparativa de desempenho e eficiência.

Os sistemas de propulsão, embora sejam formados pelos mesmos elementos, são diferentes combinações entre: motores, acoplamentos e hélices. Neste trabalho o termo acoplamento se refere a um mecanismo que faz o chaveamento da transmissão de movimento do motor para um dos hélices ou ambos. Um sistema propulsor não necessita de um acoplamento obrigatoriamente, porém em alguns casos são utilizados para que um motor consiga acionar dois hélices diferentes. A forma da seleção do hélice seria feita por algum tipo de mecanismo interno do acoplamento, porém não é abordado no escopo deste trabalho. Afim de organizar e exemplificar, na subseção a seguir são apresentadas as mais recorrentes formas, nas quais o sistema propulsor é combinado nos braços dos HUAUVs.

Para facilitar a visualização e entendimento das figuras, cada um dos elementos que pode compor o sistema propulsor está desenhado com uma cor diferente:

- Amarelo - hélices aéreos;
- Azul - hélices aquáticos;
- Verde - motores;
- Laranja - acoplamentos;
- Cinza - outros componentes (braços, eixos e suportes).

### 3.5.2.1 Combinações do sistema de propulsão

- **Combinação A - Hélice aérea acionado por um motor**

Essa é a combinação mais simples e mais comumente utilizada em UAVs, composta por um motor e um hélice aérea (Fig. 3.14). Possui um funcionamento bastante simples, onde o empuxo é gerado na direção do eixo Z. É o empregado por Alzu'bi et al. (2017).

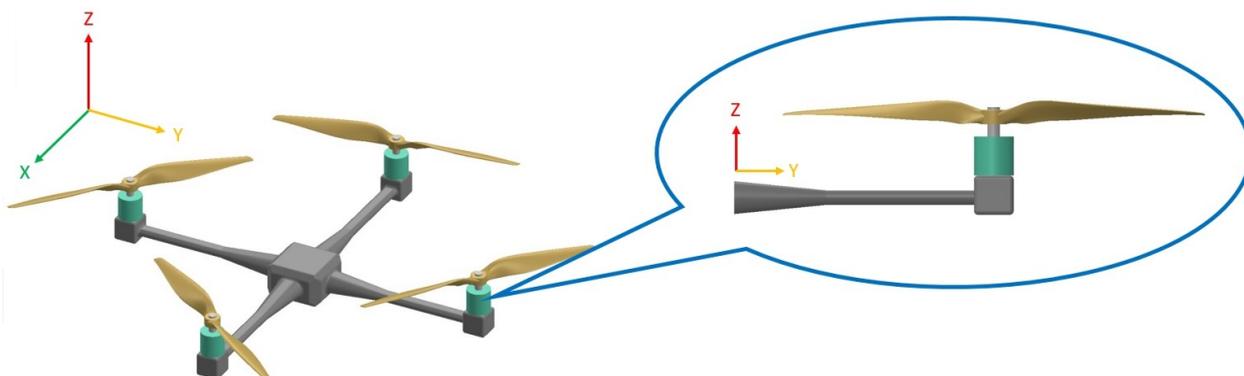


Figura 3.14: Hélice aérea único acionado por um motor.

- **Combinação B - Par de hélices aéreas acionados por dois motores**

Assim com a primeira combinação, essa também é encontrada em UAVs, composta por dois motor e dois hélices aéreas em disposição coaxial e funcionamento contrarrotativo (Fig. 3.15). Seu funcionamento gera o empuxo dos dois hélices também na direção do eixo Z. Essa combinação é a mesma empregada por Maia, Soni e Diez-Garias (2015), Mercado, Maia e Diez (2017) e Maia, Mercado e Diez (2017).

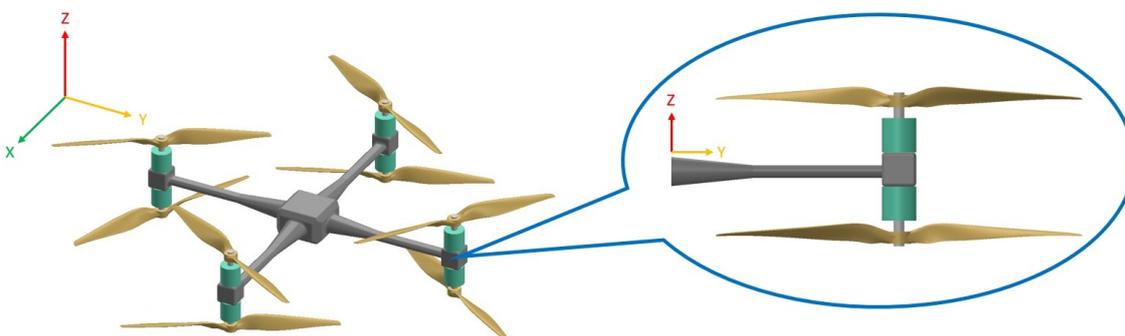


Figura 3.15: Hélices aéreas acionados por dois motores.

- **Combinação C - Hélices aérea e aquático acionados por dois motores**

Nesta combinação, cada um dos hélices é acionado por um motor, permitindo que em ambiente aéreo apenas o hélice aérea seja acionada e dentro d'água apenas o hélice aquático (Fig. 3.16). Alguns HUAUVs também utilizam o acionamento de

ambos os motores dentro d'água. Seu funcionamento gera o empuxo dos dois hélices também na direção do eixo Z. Essa combinação é a utilizada por Ma, Feng e Yang (2018).

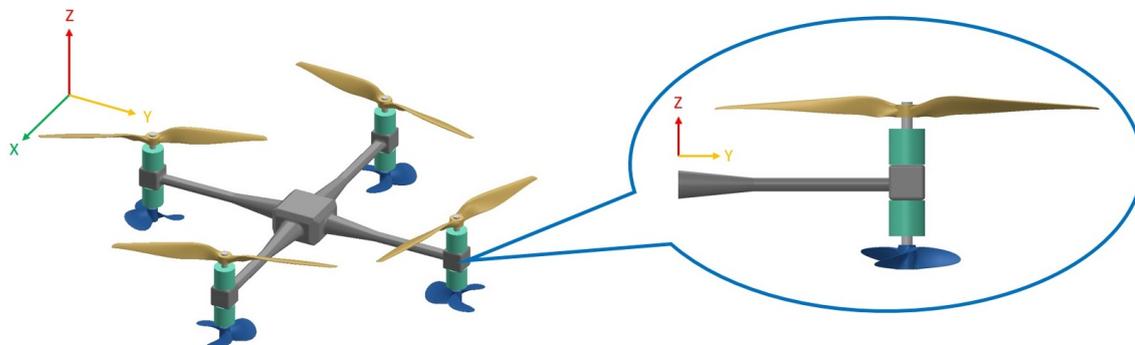


Figura 3.16: Hélices aéreo e aquático acionado por motores diferentes.

- **Combinação D - Hélices aéreo e aquático acionados por um motor com acoplamento**

Esta combinação possui um hélice para cada meio, porém apenas um motor para acioná-los (Fig. 3.17). Possui um acoplamento para efetuar o troca de acionamento entre os hélices. O empuxo gerado pelos dois hélices são no direção do eixo Z. Esta combinação é a usado por Drews, Neto e Campos (2014) no seu trabalho.

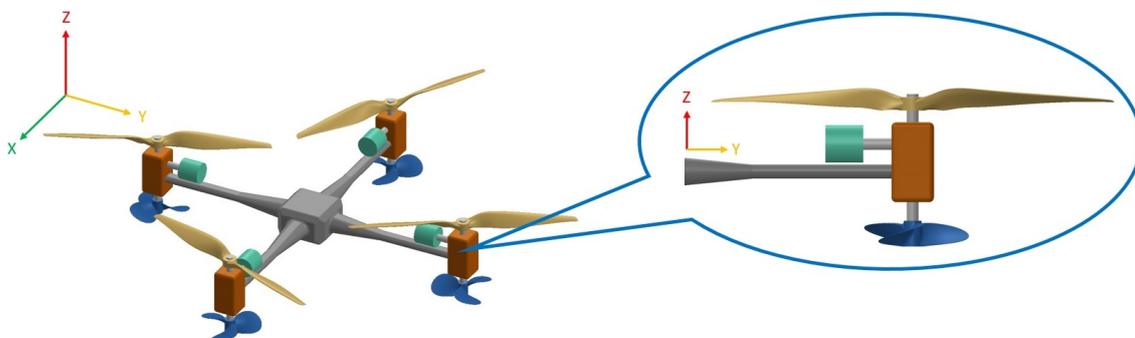


Figura 3.17: Hélices aéreo e aquático acionados por um motor com acoplamento.

- **Combinação E - Hélices aéreo e aquático a 90° acionados por dois motores**

Combinação muito similar a combinação C, porém com o hélice aquático posicionado a 90° em relação ao hélice aéreo (Fig. 3.18). Isto permite que o veículo execute uma movimentação fora do eixo Z, neste caso o empuxo gerado pelo hélice aquático é na direção do eixo X.

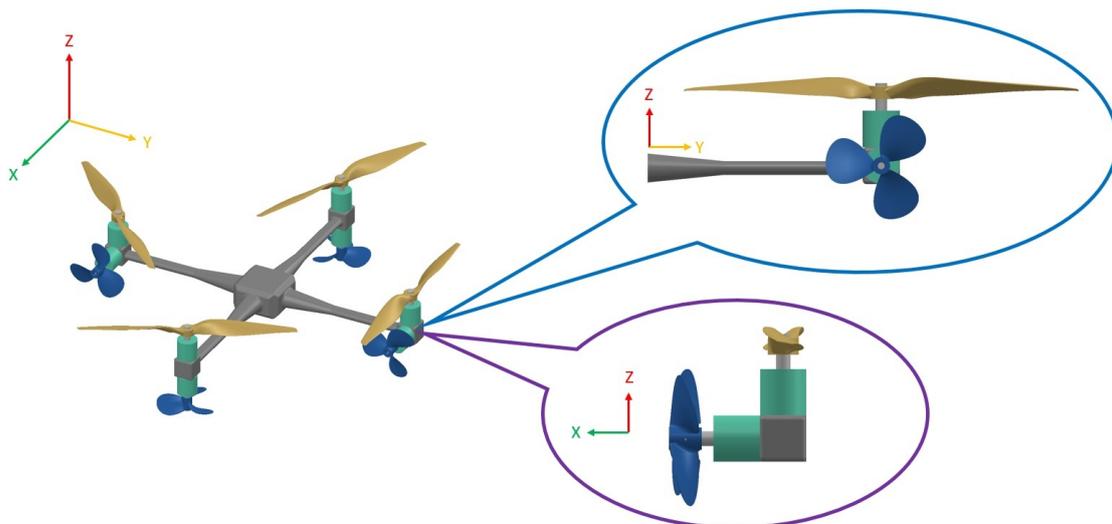


Figura 3.18: Hélices aéreo e aquático a  $90^\circ$  acionado por motores diferentes.

- **Combinação F - Hélices aéreo e aquático acionados por um motor e um acoplamento**

Combinação muito similar a combinação E, porém ao invés de utilizar um motor para cada hélice, faz uso do acoplamento que acionam o hélice desejado (Fig. 3.19).

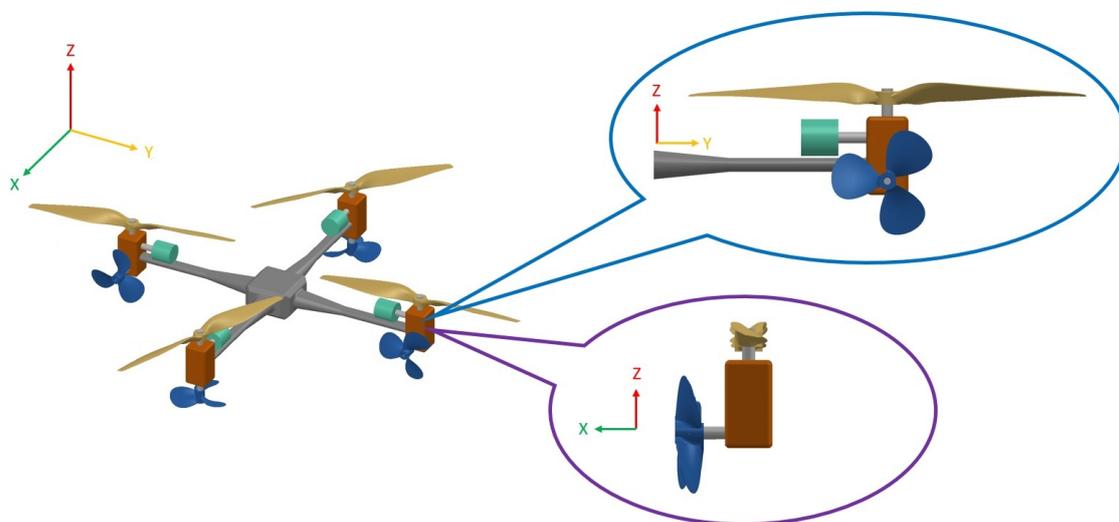


Figura 3.19: Hélices aéreo e aquático a  $90^\circ$  acionado por um motor com acoplamento.

Importante ressaltar, que a Combinação B não possui uma variante com a utilização de um único motor e um acoplamento. Isto não foi feito aqui pois, entende-se que ao se rotacionar os dois hélices aéreas ao mesmo tempo, pode ser necessário um controle de velocidades individuais, que não seria possível com um acoplamento simples.

Além dessas combinações, outras também são possíveis. Como exemplo, poderia se adicionar hélices aquáticas no sentido do eixo Y, isso permitiria mais graus de liberdade

ao veículo. Porém, a complexidade do sistema começaria a aumentar, fugindo ao escopo do trabalho.

### 3.5.3 Física do Sistema de Propulsão

O funcionamento do sistema de propulsão e como ele se configura mecanicamente no veículo são aspectos muito importantes a serem estudados, pois assim é possível melhorar a eficiência e o desempenho do HUAUV. Dessa forma, é apresentado aqui as formas mais comuns encontradas nos veículos estudados e alguns variações.

#### 3.5.3.1 Funcionamento Aéreo

Por ter como base a plataforma de um quadricóptero, o funcionamento do sistema de propulsão em ambiente aéreo é igual em todos os HUAUVs analisados neste trabalho. Os hélices aéreas geram o empuxo para cima, sustentando o peso do veículo, proporcionando ao veículo a capacidade de pairar no ar. Para o deslocamento no plano horizontal uma diferença entre as rotações de hélices opostas do veículo é gerada. Para rotação no plano horizontal um par de hélices opostas é acelerado o outro par é desacelerado, o efeito Z. Essa forma de funcionamento é idêntica para um veículo com oito ou com quatro hélices.

As setas verde e vermelha representam respectivamente a força gerada por cada um dos motores e o peso total do veículo, já as setas circulares representam o sentido e a velocidade de rotação. Dentre as setas tracejadas que estão junto ao empuxo, a seta vermelha representa a componente do empuxo que anula a força peso e a seta verde representa a componente do empuxo responsável pelo deslocamento horizontal do veículo. As setas tracejadas junto a rotação representam o empuxo gerado por cada um dos hélices, o somatório deles resulta no empuxo central.

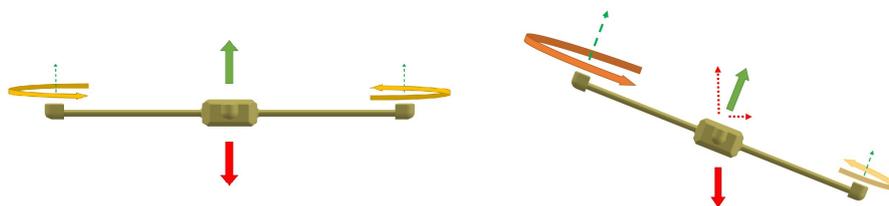


Figura 3.20: Sustentação e movimentação aérea, 4 hélices.

Nas figuras 3.20 e 3.21 estão representados os veículos com 4 e 8 propulsores. No lado esquerdo das figuras é representado o veículo, estabilizado, em estado parado, ou pairando no ar. No lado direito da figura é representado seu deslocamento no plano horizontal.

Na Fig. 3.22 o veículo é representado por uma vista superior. No lado esquerdo é

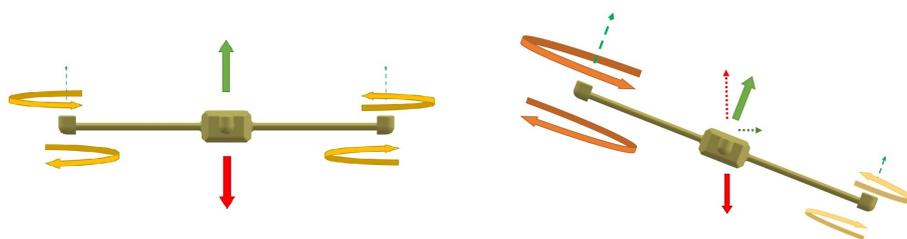


Figura 3.21: Sustentação e movimentação aérea, 8 hélices.

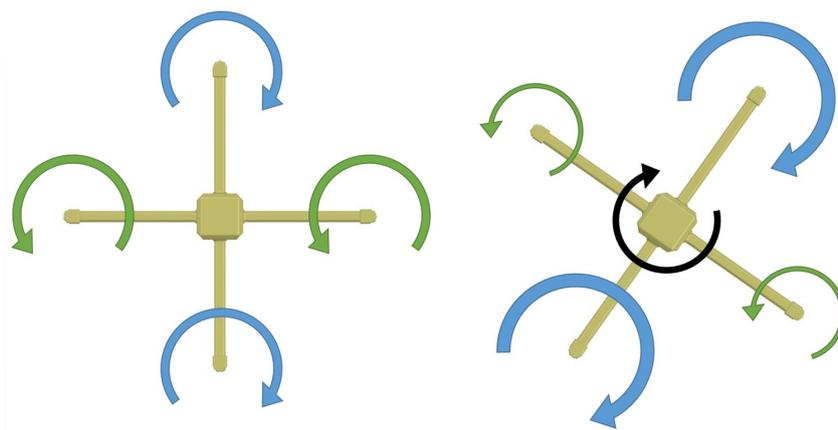


Figura 3.22: Rotação no eixo vertical.

representado o estado em que o veículo está parado no ar, e no lado direito a variação na rotação para gerar o movimento de rotação no eixo Z.

### 3.5.3.2 *Funcionamento aquático*

Para explicar o funcionamento dos veículos atuando no meio aquático, é necessário explicar alguns conceitos e forças que regem o comportamento dos corpos dentro d'água. Na Fig. 3.23 estão representadas o centro de massa (CM), centro de empuxo (CE), força de empuxo ( $F_E$ ) e força peso ( $F_P$ ). A força peso age no centro de massa do corpo, já a força de empuxo atua sobre o centro de empuxo do veículo. A força de empuxo é a força que faz os corpos boiarem, sua magnitude é igual ao peso do volume de água deslocado pelo corpo do HUAUV, para sua determinação basta multiplicar o volume do corpo que está submerso pelo peso específico da água.

Se o centro de massa e o centro de empuxo do veículo estão alinhados, ele deve ficar dentro d'água em posição igual a da Fig. 3.23. Ao sofrer uma inclinação (Fig. 3.24 lado esquerdo) esse veículo sofre o efeito de um binário de forças equivalente à soma da força peso e da força de empuxo, multiplicado pela distância entre elas ( $d$ ). Este binário origina o torque restaurador do veículo, que faz com o veículo retorne a sua posição original. Isto está representado no lado direito da figura abaixo.

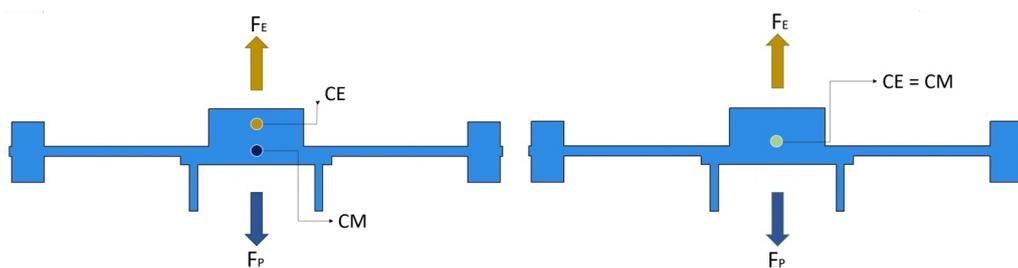


Figura 3.23: Posições do CE e CM.

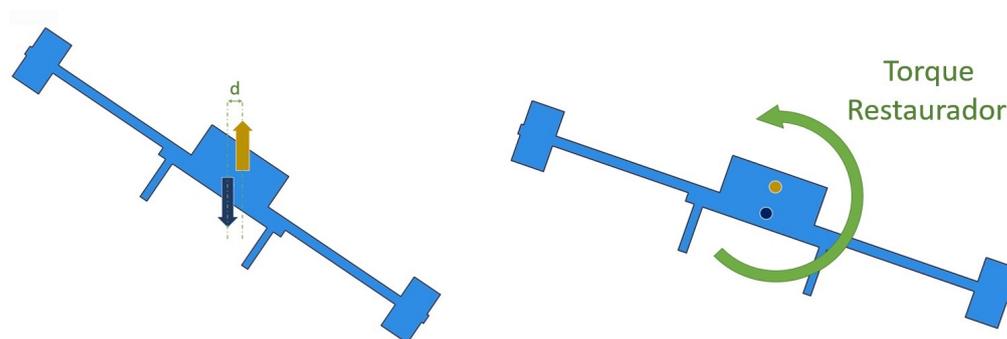


Figura 3.24: Forças e torque restaurador.

Uma situação muito particular e difícil de se encontrar é o centro de massa e o centro de empuxo estarem localizados sobre o mesmo ponto. Se isso ocorrer, não existirão forças restauradoras, pois como as forças empuxo e peso atuam no mesmo ponto, não há formação de um binário. Dessa forma, em qualquer orientação que o veículo pare, ele irá ficar estabilizado, porém essa situação é muito difícil de se obter na prática. Esta situação é exemplificada na Fig. 3.25.

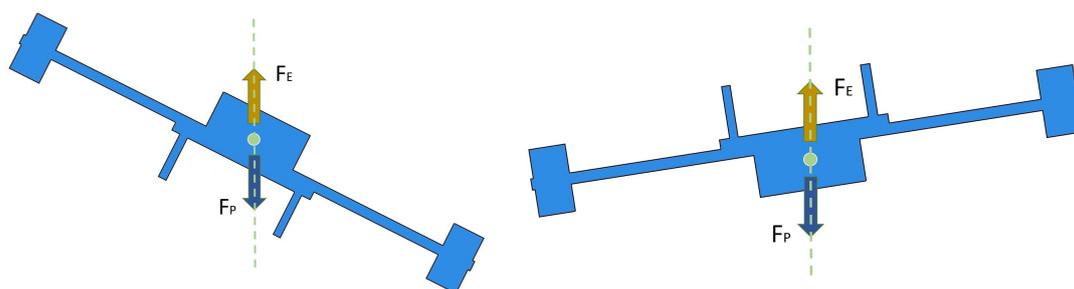


Figura 3.25: Equilíbrio em qualquer orientação.

Um conceito importante, que irá ser base para alguns tipos de funcionamento, é a flutuabilidade. Ela nada mais é do que a condição resultante das forças peso e de empuxo. Caso o vetor resultante da soma das duas forças seja para baixo, fazendo com que o veículo afunde, se diz que a flutuabilidade é negativa. Caso o vetor resultante seja para cima, fazendo com que o veículo emerja, a flutuabilidade é positiva. E em um terceiro caso, onde as forças são iguais com vetor resultante nulo, a flutuabilidade é neutra, condição impossível de se obter na prática.

### 3.5.3.3 *Funcionamento aquático com flutuabilidade positiva*

O funcionamento aquático de um veículo com flutuabilidade positiva se comporta como um espelho ao funcionamento aéreo. Isto é, no ar o veículo tem o peso que o puxa para baixo, dentro d'água ele possui a flutuabilidade positiva que o desloca para cima, em ambos os casos o sistema de propulsão deve estar em constante funcionamento para manter o veículo em posição. Para se deslocar no plano horizontal, a velocidade de rotores opostos deve ser desbalanceada gerando um vetor com componente horizontal, fazendo o veículo se mover nessa direção.

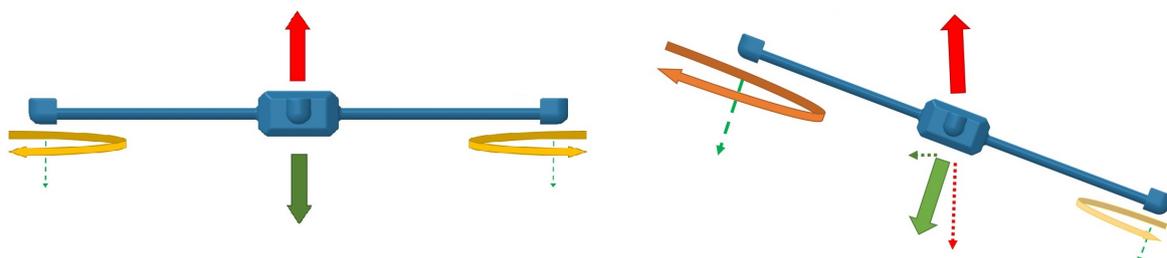


Figura 3.26: Física do veículo de 4 hélices com flutuabilidade positiva.

Este funcionamento ocorre tanto em veículos que utilizam 4 hélices no meio, como com veículos que utilizam 8 hélices, conforme ilustrado nas figuras 3.26 e 3.27. Entre os trabalhos estudados, o que usou esse princípio de funcionamento no seu HUAUV foi o desenvolvido por Drews, Neto e Campos (2014). Esse tipo de flutuabilidade é muito empregada em veículos subaquáticos por segurança. Pois caso haja uma falha, eles se movem naturalmente até a superfície, onde podem ser resgatados.

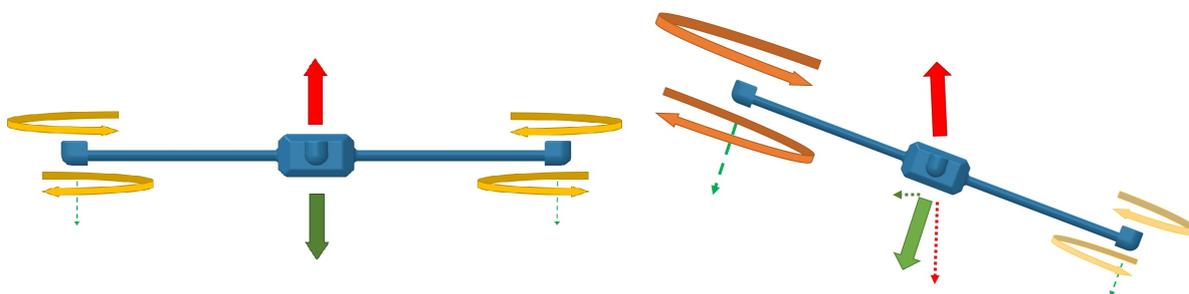


Figura 3.27: Física do veículo de 8 hélices com flutuabilidade positiva.

### 3.5.3.4 *Funcionamento aquático com flutuabilidade negativa*

Veículos com flutuabilidades negativa, tem seu funcionamento aquático igual ao seu funcionamento aéreo. Sendo assim, operando tanto no ar como na água os rotores precisam

trabalhar para vencer o peso e manter um posição desejada. Este funcionamento ocorre tanto para os veículos que usam 4 hélices como para os que usam 8 hélices trabalhando simultaneamente. Este funcionamento é representado pelas figuras 3.28 e 3.29. Dentre os trabalhos analisados, o desenvolvido por Ma, Feng e Yang (2018) utilizou esse princípio de funcionamento.

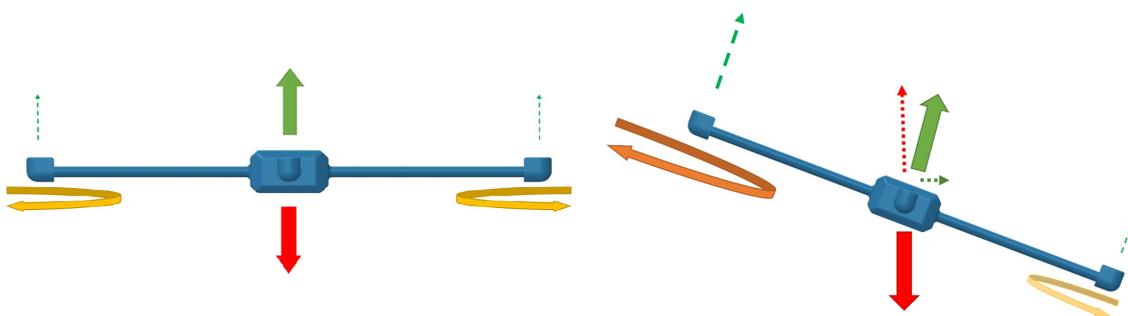


Figura 3.28: Física do veículo de 4 hélices com flutuabilidade negativa.

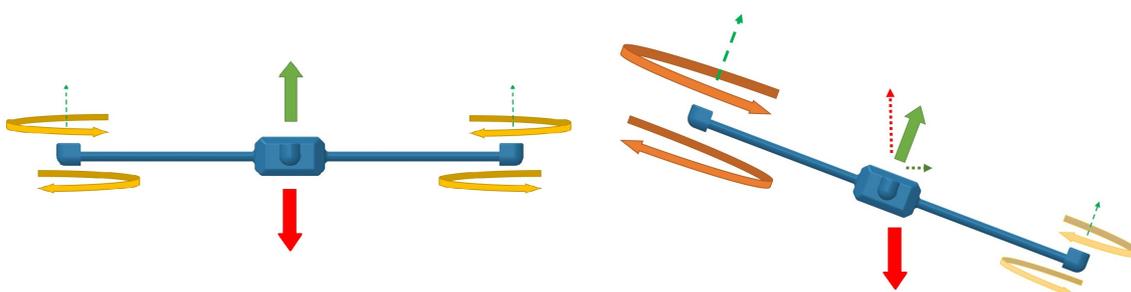


Figura 3.29: Física do veículo de 8 hélices com flutuabilidade negativa.

### 3.5.3.5 Funcionamento Aquático com Flutuabilidade Neutra

O desenvolvimento do veículo com flutuabilidade neutra permite três formas de funcionamento diferentes. A primeira delas com o centro de massa e centro de empuxo localizados no mesmo ponto do veículo. A segunda possibilidade é a utilização do centro de empuxo e centro de massa em pontos diferentes do HUAUV. A terceira possibilidade de funcionamento é utilizar um reservatório como lastro, permitindo alterar o centro de massa do veículo.

Na Fig. 3.30 está representado o funcionamento do veículo que possui o seu CE e CM localizados no mesmo ponto. Este fato faz com que não hajam forças restauradoras atuando sobre o veículo, ou seja, em qualquer orientação o veículo fica em equilíbrio, parado. Sendo assim, para se deslocar veículo precisa apenas desbalancear a velocidade de seus motores para acertar sua orientação e depois acioná-los homogeneamente para

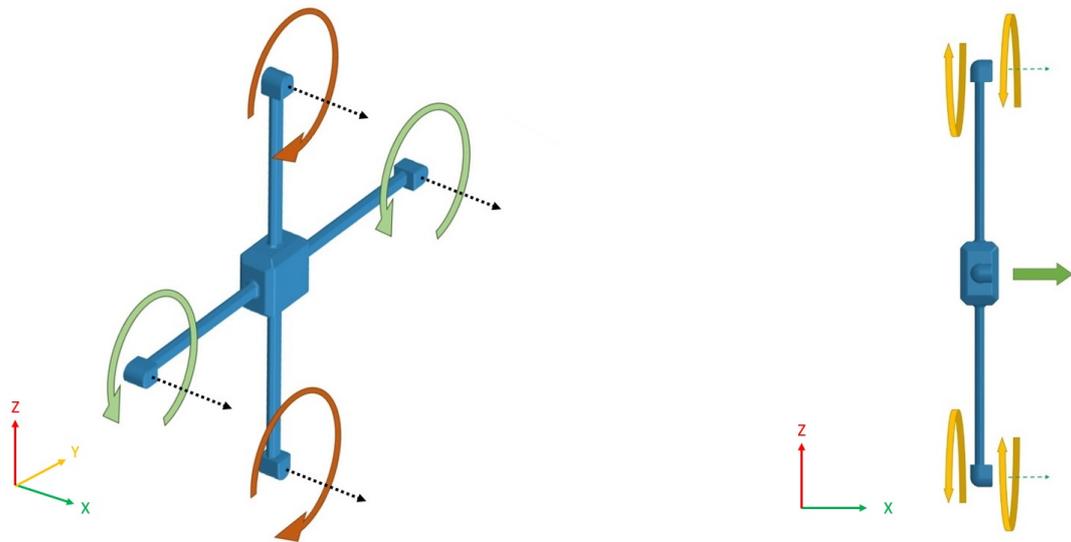


Figura 3.30: Flutuabilidade neutra e  $CE = CM$ .

se mover até a posição desejada. Este tipo de funcionamento possui a vantagem de não precisar compensar os torques restauradores para executar um determinado movimento ou operação. Porém, esta configuração é muito difícil de se atingir na prática.

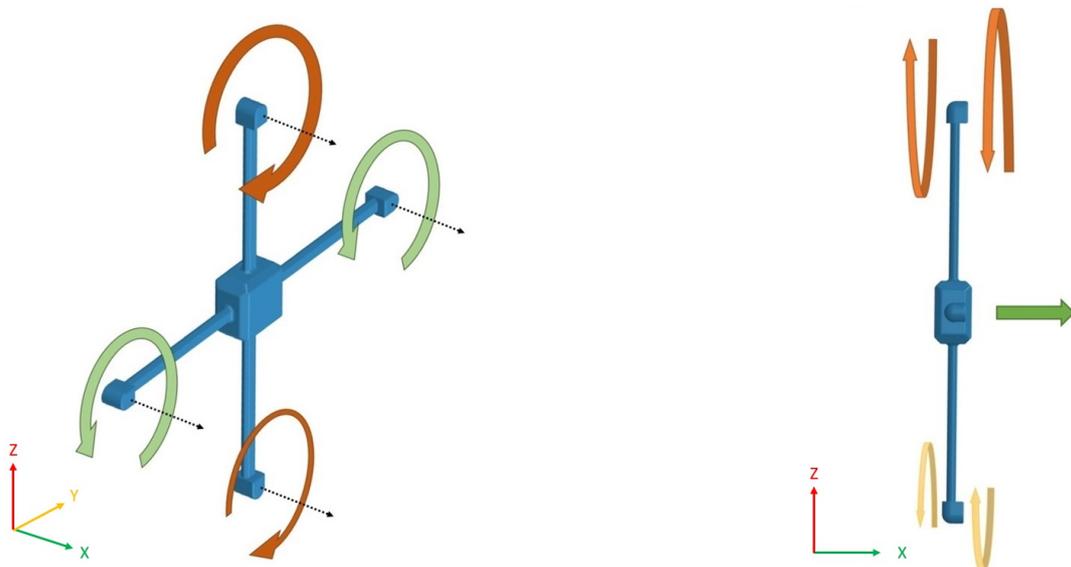


Figura 3.31: Flutuabilidade neutra e  $CE \neq CM$ .

Na Fig. 3.31 está representado o funcionamento do HUAUV que possui os centros de massa e empuxo localizados em diferentes pontos, configuração mais realista. Como é possível ver na figura, o veículo precisa ter a rotação diferente entre os hélices superior e inferior, para compensar assim o torque restaurador. Fora isso, este funcionamento é similar ao anterior. Dentre os trabalhos analisados, os trabalhos desenvolvidos por Maia, Soni e Diez-Garias (2015), Mercado, Maia e Diez (2017) e Maia, Mercado e Diez (2017) utilizaram este princípio de funcionamento.

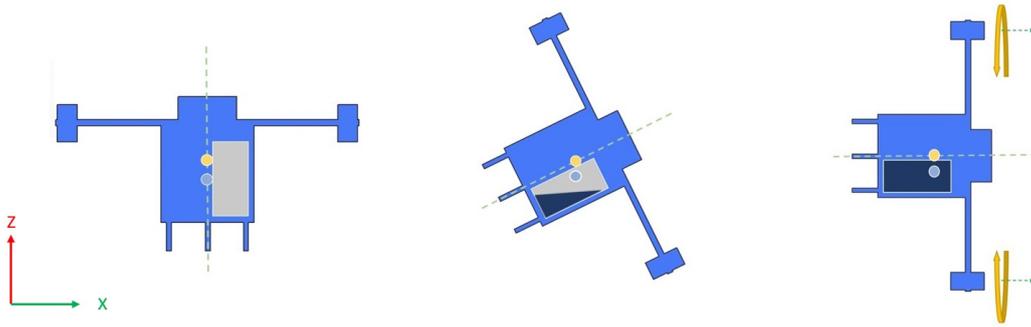


Figura 3.32: Flutuabilidade neutra com lastro variável.

A terceira possibilidade é a utilização de um lastro variável, os veículos com essa configuração são os que mais se diferem dos demais, devido ao número de componentes diferentes para operar o sistema. O lastro é preenchido para modificar a orientação do veículo, inclinando o veículo na maneira que lhe seja mais conveniente operar. Para isso, o veículo possui um sistema que controla a quantidade de água (lastro) dentro do reservatório. Dessa forma, o centro de massa do veículo vai se alterando conforme o peso da quantidade de água presente no lastro, modificando também sua orientação e flutuabilidade. A Fig. 3.32 exemplifica este efeito. O trabalho que faz uso deste tipo de funcionamento foi apresentado em Alzu'bi, Mansour e Rawashdeh (2017).

#### 3.5.3.6 *Funcionamento Aquático com Hélices a 90°*

Todas as configurações apresentadas até aqui foram criadas com as combinações A, B, C e D do sistema de propulsão. Porém, além destes ainda existe as combinações que apresentam os hélices aquáticos dispostos a 90° dos hélices aéreos. Este são uma configuração particular, ou uma pequena variação das configurações e funcionamentos apresentados até aqui.

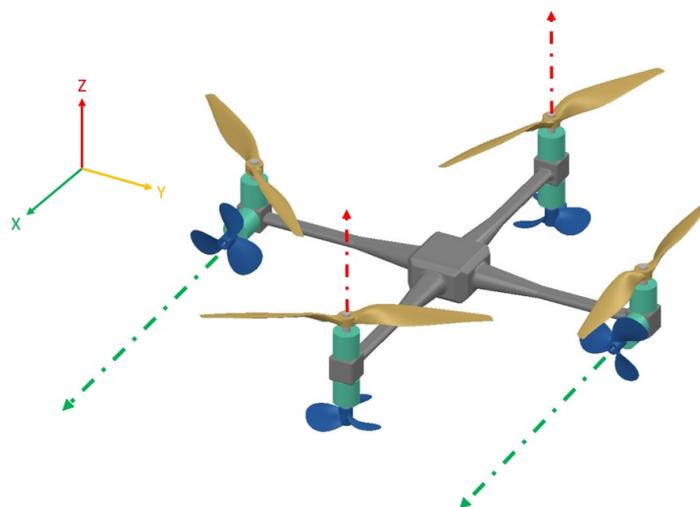


Figura 3.33: Configuração com combinação à 90°.

Os quadricópteros que fazem uso de hélices a  $90^\circ$  utilizariam a combinação E ou F do sistema de propulsão. Dessa forma um veículo que tem hélices a  $90^\circ$ , também possui hélices no sentido vertical, a representação desta ideia é apresentada na Fig. 3.33.

Os veículos com essa configuração possuem vantagens nos deslocamentos no plano horizontal, no sentido do eixo **X** do seu sistema de coordenadas. A explicação para isso é que a área do veículo, no sentido transversal ao movimento, é menor do que que na direção do eixo **Z**, que é utilizada para a movimentação nas outras combinações. Detalhamento de como isso ocorre e motivos são apresentados na subseção 5.1.2. A movimentação no sentido do eixo **Z**, permanece como nos outros veículos, apenas com dois hélices a menos.

## 4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Neste trabalho são realizados experimentos para avaliação de duas diferentes partes que compõe o veículo híbrido proposto, são elas: a cápsula e o sistema de propulsão. Com base neles é possível propor um veículo com melhor desempenho e maior confiabilidade. Dessa forma, a avaliação das possibilidades apresentadas no Capítulo 3 são divididas em:

- **Teste de Estanqueidade** - Neste experimento as cápsulas serão avaliadas quando a sua hermeticidade, garantindo a vedação ou não para cada uma das situações propostas.
- **Teste do Sistema de Propulsão** - Este experimento tem como objetivo avaliar os diferentes tipos de sistemas de propulsão apresentados, bem como o rendimento de diferentes hélices em cada um dos dois ambientes.

### 4.1 Testes de Estanqueidade da Cápsula

Para a avaliação de estanqueidade das cápsulas propostas, dois testes diferentes foram realizados. O primeiro teste teve como objetivo avaliar a vedação de cada uma das cápsulas em movimento dentro d'água. No segundo teste avaliou-se o efeito da pressão hidrostática, no qual as cápsulas foram submetidas a pressão de uma coluna de água.

#### 4.1.1 Teste de Movimento

Esse teste tem como objetivo avaliar se a cápsula em movimentação dentro d'água mantém sua estanqueidade. Para a realização desse teste, utilizou-se a cápsula montada com dois braços e com o anel. A movimentação da cápsula foi feita por uma haste presa às extremidade dos braços, na mesma posição onde são fixados os motores. Essa fixação gera um efeito de força nos braços similar ao que é gerado pela ação dos motores. Dessa maneira, aproximando-se de uma situação real de operação do veículo.

A Fig. 4.1 apresenta um desenho representativo de como é a realização do experimento. Na figura estão destacados a cápsula, os braços, o anel, a haste de movimentação e

o sentido de movimentação utilizado nos experimentos.

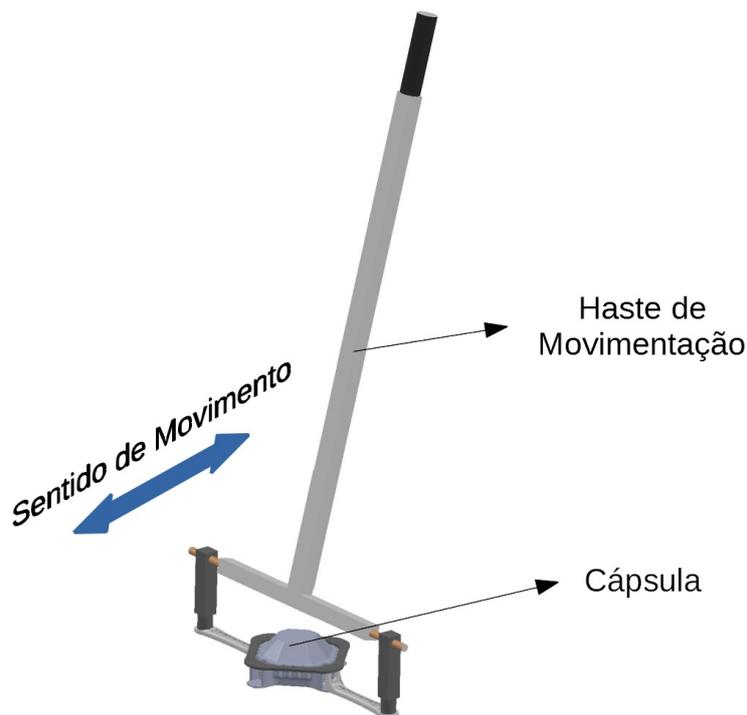


Figura 4.1: Representação teste de movimento.

A realização dos testes ocorreu em uma piscina de 1,6 metros de profundidade, porém como o veículo não se encontrava rente ao fundo, a profundidade utilizada para anotação dos dados foi de 1,5 metros. O procedimento dos experimentos foi movimentar as cápsulas embaixo d'água no sentido apresentado durante 30 minutos, tempo equivalente a duração média das cargas das baterias utilizadas nesse tipo veículo. Os resultados obtidos foram considerados satisfatórios, pois os dois modelos se mantiveram estanques.

#### 4.1.2 Teste Hidrostático

O objetivo do teste hidrostático é verificar se os modelos de cápsula resistem a uma determinada pressão de coluna d'água. Em aplicações reais, seria a verificação, se a cápsula se mantém estanque em uma determinada profundidade.

Para avaliação da pressão hidrostática da estanqueidade da cápsula desenvolveu-se uma estrutura própria. Essa é constituída por um vaso, de onde sai uma tubulação de 5 metros de comprimento na direção vertical, o comprimento da tubulação gera coluna de pressão de água. Para a realização do experimento, as cápsulas são colocadas individualmente no vaso, então esse é fechado e toda a estrutura é preenchida com água. O teste teve uma duração de 24 horas.

A Fig. 4.2 apresenta um desenho esquemático da estrutura utilizada para realização do experimento. Na figura estão destacados a cápsula no fundo do vaso e a tubulação com 5 metros de coluna d'água.

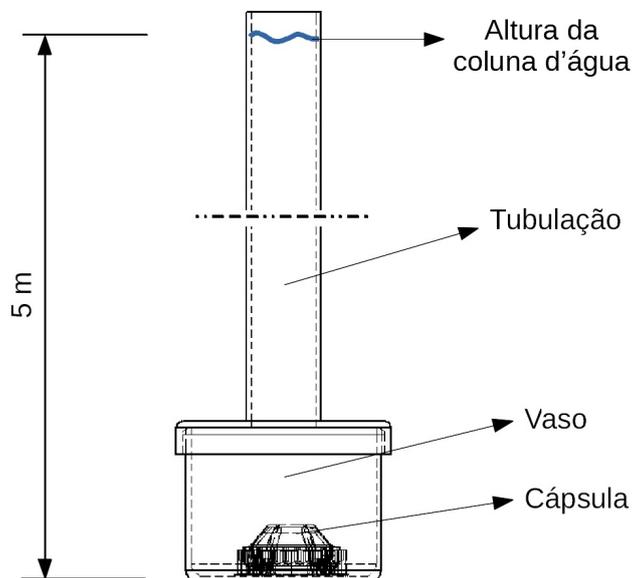


Figura 4.2: Representação teste hidrostático.

Após a realização dos experimentos com cada uma das cápsulas, verificou-se que a cápsula do modelo B não manteve a estanqueidade no teste. Já a cápsula do modelo A conservou-se hermética, mantendo a sua vedação, tornando-se o modelo a ser utilizado no protótipo.

Abaixo, a Fig. 4.3 apresenta as cápsulas preparadas para o teste hidrostático.

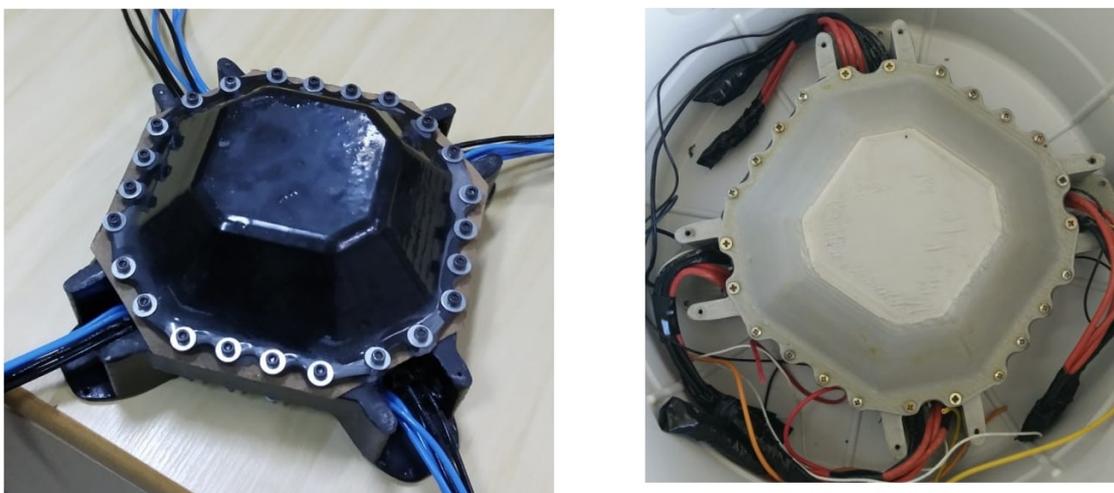


Figura 4.3: Cápsulas após o teste hidrostático.

### 4.1.3 Resultados dos testes

Os testes de estanqueidade realizados são testes simples, não recomendados para aplicações profissionais, porém, garantem uma funcionalidade básica ao protótipo. Dessa forma, é possível garantir uma segurança mínima para o hardware em operações subaquáticas.

Tabela 4.1: Resultados dos testes de estanqueidade

<b>Cápsula</b>	<b>Movimentação ( 1,5 m - 30 min)</b>	<b>Hidrostático ( 5 m - 24 hs)</b>
Modelo A	ok	ok
Modelo B	ok	Falhou

A Tabela 4.1 apresenta os resultados dos dois modelos de cápsula em cada um dos testes. Como é possível notar, as duas cápsulas mantiveram a estanqueidade no teste de movimentação por 30 minutos a 1,5 metros de profundidade. Porém, apenas o modelo A resistiu a pressão de 5 metros de coluna d'água por 24 horas.

## 4.2 Testes do Sistemas de Propulsão

Para avaliação e comparação entre diferentes tipos de combinações e hélices do sistema propulsor são realizados experimentos. Esses experimentos ocorreram tanto no ar como na água. Para sua realização foram utilizados os motores Gatt 3508 700 KV (Fig. 4.4), hélices aéreas variando de 7 à 12 polegadas de diâmetro e os hélices aquáticos de 30 mm até 70 mm de diâmetro. Como instrumentação utilizada para a coleta dos dados gerados durante os experimentos utilizou-se o arcabouço apresentando por Horn et al. (2018), descrito na seção 4.2.1.



Figura 4.4: Motor brushless Gartt 3508 700 KV.

Nos testes aéreos serão testadas três diferentes combinações apresentadas na seção 3.5.2, são elas: a combinação que apresenta um hélice simples, a que apresenta hélices contrarrotativos e hélice simples porém com sistema propulsor à 90°. Nos testes aquáticos também são testadas três combinações, são elas: hélice simples aérea, hélice simples aquática e hélices contrarrotativos. Maiores explicações são apresentadas nas seções de cada um dos testes.

### 4.2.1 Instrumentação Utilizada nos Testes

O arcabouço utilizado tem capacidade para medir quatro grandezas referentes ao sistema de propulsão, são elas: corrente elétrica, tensão elétrica, rotação do motor e a força/empuxo gerada. Através dessas grandezas é possível estima-se a eficiência e alguns parâmetros do sistema propulsor, conforme apresentado no Capítulo 3 pelas Eqs. 3.15 à 3.18. A Fig. 4.5 apresenta duas fotos dessa instrumentação.



Figura 4.5: Arcabouço utilizado para a coleta dos dados experimentais.

Para análise de desempenho do sistema, as grandezas de interesse são a potência consumida pelo sistema de propulsão e a força gerada por ele. A obtenção da força ocorre através da medição da deformação imposta a célula de carga, porém a potência ( $P$ ) precisa ser calcula por meio de outras duas grandezas. Neste caso, a determinação é feita através dos valores de corrente ( $I$ ) e tensão medidas ( $V$ ), segundo a Eq. 4.1.

$$P = V I \quad (4.1)$$

### 4.2.2 Experimento no Ar

Os experimentos realizados no ar utilizaram apenas três combinações (A, B e E) dos sistemas de propulsão apresentados no Cap. 3, montadas em quatro configurações diferentes, como apresentado pela Fig. 4.6, detalhadas e explicadas no tópico 3.5.2.1. A **Combinação A** gerou duas montagens diferentes: **Combinação A Superior** - hélice fixo na parte de cima do braço e **Combinação A Inferior** - hélice posicionado no lado de baixo do braço. **Combinação B** - hélices estão dispostos no que seria configuração contrarrotativa, na qual cada hélice gira em sentido contrário tentando reaproveitar a velocidade de rotação do fluxo de ar para gerar mais força, conforme Bell et al. (2010). **Combinação E** - o hélice posicionado na parte superior do braço e ao lado esta fixado o sistema propulsor à  $90^\circ$ . Essa combinação permite analisar o efeito do sistema propulsor à  $90^\circ$  no comportamento do sistema aéreo. O hélice aquático utilizado para a interferência foi o de  $70\text{ mm}$ , caso de maior obstrução. Para facilitar o entendimento, os eixos  $X$ ,  $Y$  e  $Z$  nas Figs. 4.6 e 4.7 estão orientados de acordo com a subseção 3.5.2, referente as

combinações dos sistemas de propulsão, e as distâncias “**d**” representam 10 *cm*.

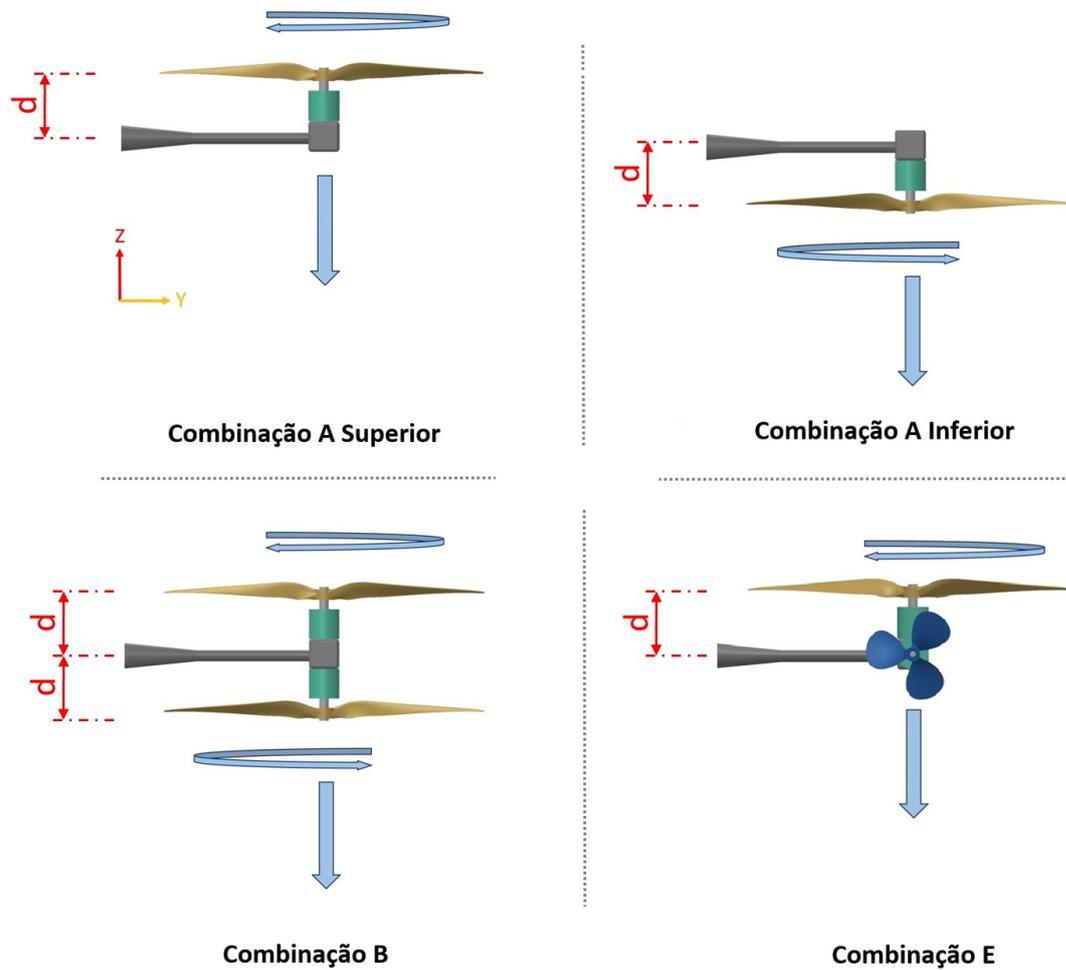


Figura 4.6: Combinações utilizadas nos experimentos no ar.

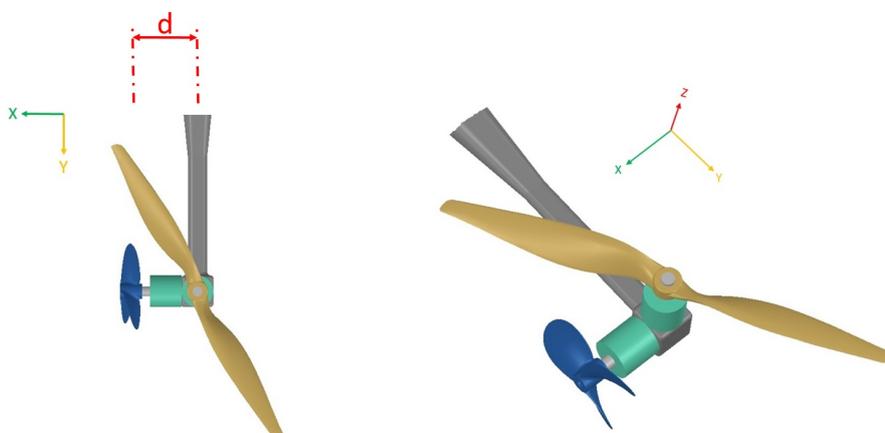


Figura 4.7: Detalhe da assimetria na **Combinação E**.

A Fig 4.7 apresenta uma imagem para melhor entendimento do teste da **Combinação E**. Nela é possível notar como o sistema propulsor à 90° ocupa uma área considerável sob o hélice, o que pode ocasionar em instabilidades ao sistema. Como

é possível perceber, o braço e o sistema de propulsão à 90° não ficam simetricamente distribuídos embaixo do hélice, gerando assim uma pressão diferencial entre cada uma das pás. Isso torna esse teste muito importante ao trabalho.

As outras três combinações (C, D e F) dos sistemas de propulsão, apresentados no Cap. 3, não foram experimentados no Ar. A **Combinação C** não foi experimentada pois para o ar, trata-se de uma particularização da **Combinação A Superior** com um hélice aquático na parte inferior, o que do ponto de vista prático não gerou diferença nos resultados. Além disso, os hélices aquáticos quando acionados no ar não produziram força. As **Combinações D e F** fogem ao escopo de análise deste trabalho por fazerem uso de algum tipo de acoplamento ou mecanismo para transmissão de movimento.

A Fig. 4.8 apresenta uma foto com todos os hélices utilizados nos testes aéreo.



Figura 4.8: Hélices de 12, 10, 8 e 7 polegas.

Na Tabela 4.2 é apresentada uma lista em quais das combinações cada um dos hélices foi testados experimentalmente.

Hélice	Combinação A Superior	Combinação A Inferior	Combinação B	Combinação E
750 pol.	✓	✓	✓	✓
838 pol.	✓	✓	✓	✓
1045 pol.	✓	✓	✓	✓
1245 pol.	✓	✓	✓	✓

Tabela 4.2: Hélices utilizados nos experimentos aéreos.

Os resultados finais apresentados nos gráficos das Figs. 4.9 à 4.12 são uma média de várias medições realizadas em cada uma das configurações testadas, garantindo assim uma maior confiabilidade nos resultados. Os gráficos mostrados apresentam a relação  $F/P$  [N/W], força gerada pela potência consumida, em função da força,  $F$  [N]. Esses gráficos são particularmente interessantes, pois para escolher o sistema de propulsão, a informação básica, que geralmente se tem, é a força que o sistema precisa fornecer. Dessa forma, com o auxílio dos gráficos é possível verificar para uma determinada força, qual é a configuração que apresenta a melhor eficiência energética.

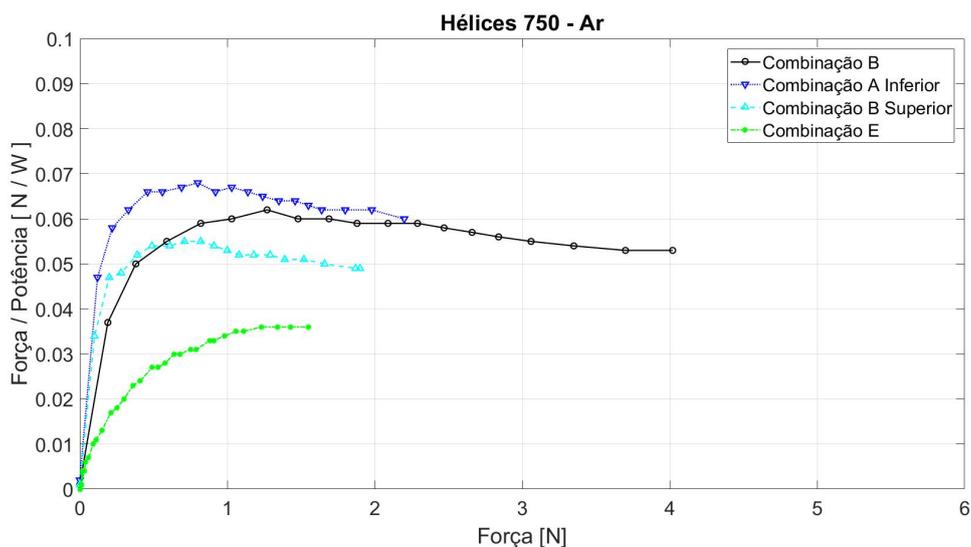


Figura 4.9: Rendimento do hélice de 7 polegadas no ar.

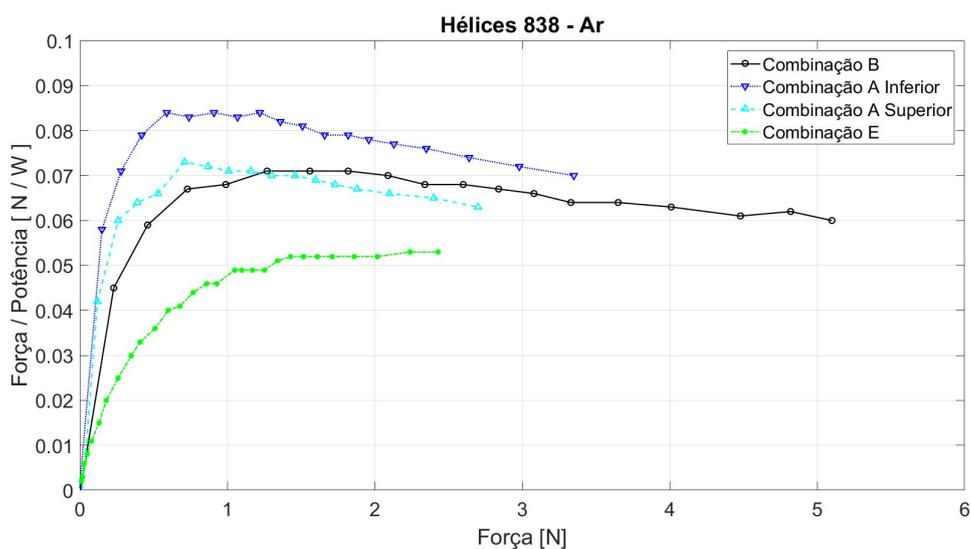


Figura 4.10: Rendimento do hélice de 8 polegadas no ar.

Nos gráficos são apresentadas as curvas de cada uma das configurações. Cabe ressaltar dois pontos importantes a respeito do fluxo de ar nessas configurações, os “caminhos” de entrada e saída de ar. Na **Combinação A Superior**, com o sistema de propulsão na parte de cima do braço, a entrada do fluxo de ar está livre, porém na saída existem alguns obstáculos como o próprio braço. A **Combinação A Inferior**, na qual o hélice se encontra na parte de baixo, o fluxo de ar é parcialmente bloqueado pelo braço em sua entrada, porém ao passar pelo hélice não há mais obstrução em seu caminho. Já a **Combinação B** é uma mescla entre estes dois anteriores. A **Combinação E** é semelhante a **Combinação A Superior**, porém apresenta mais obstrução na saída, pois além do braço ainda possui o sistema propulsor posicionado à 90°.

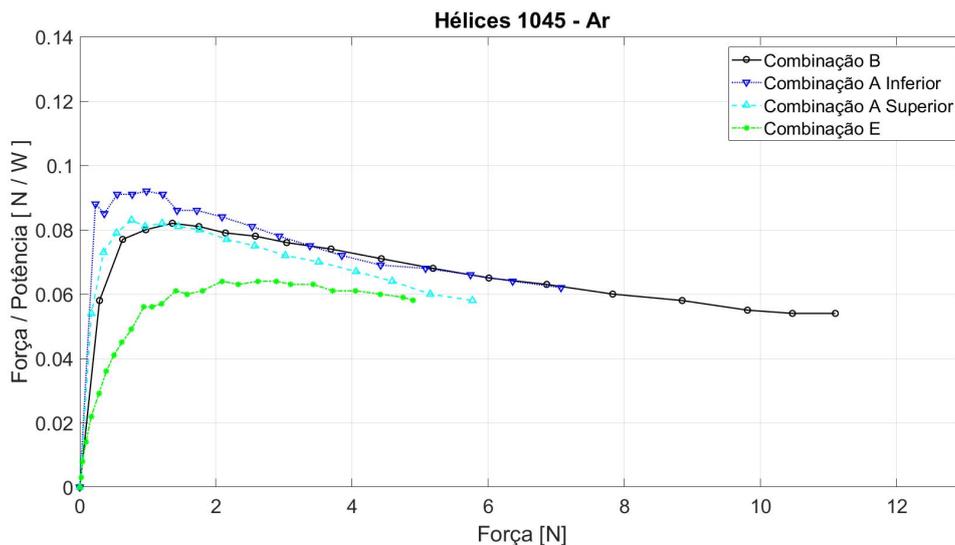


Figura 4.11: Rendimento do hélice de 10 polegadas no ar.

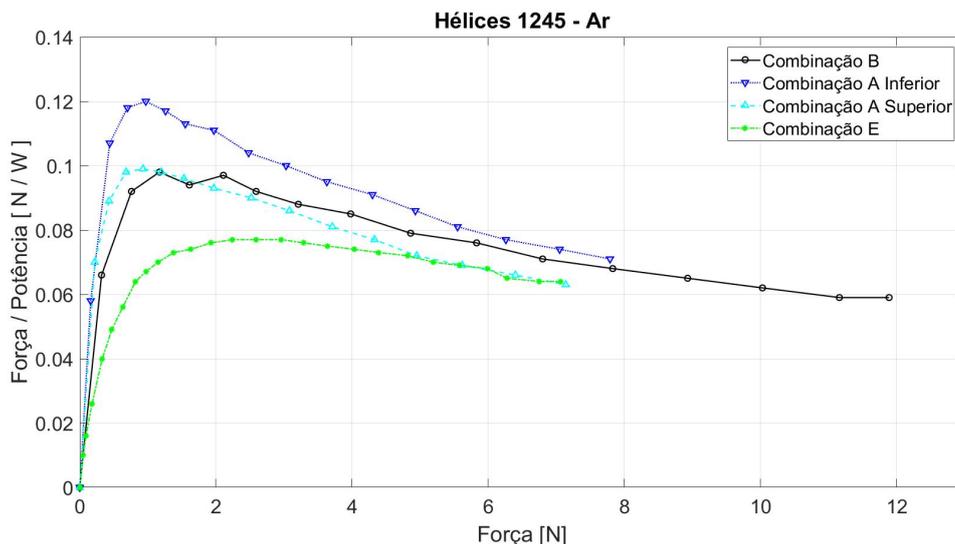


Figura 4.12: Rendimento do hélice de 12 polegadas no ar.

Para facilitar a comparação entre os gráficos, cada uma das configurações testadas possui uma cor que se repete em todos os gráficos. Dessa forma, ao analisá-los, a primeira coisa que é possível perceber, que existe uma grande semelhança entre todas as configurações. Os quatro gráficos começam subindo rapidamente e apresentam seu pico de máxima eficiência logo no início da sua curva, em valores de forças relativamente baixas comparadas com a máxima desenvolvida. Além disso, também pode-se notar que é no entorno do ponto de maior rendimento, que se apresentam as maiores diferenças na eficiência entre cada uma das configurações.

Plotando os dados das **Combinações A e B** em um único gráfico, Fig. 4.13, é possível ver as semelhanças entre as curvas. Da mesma forma, é possível visualizar a semelhança dos sistemas de propulsão na **Combinação E** num mesmo gráfico, Fig. 4.14.

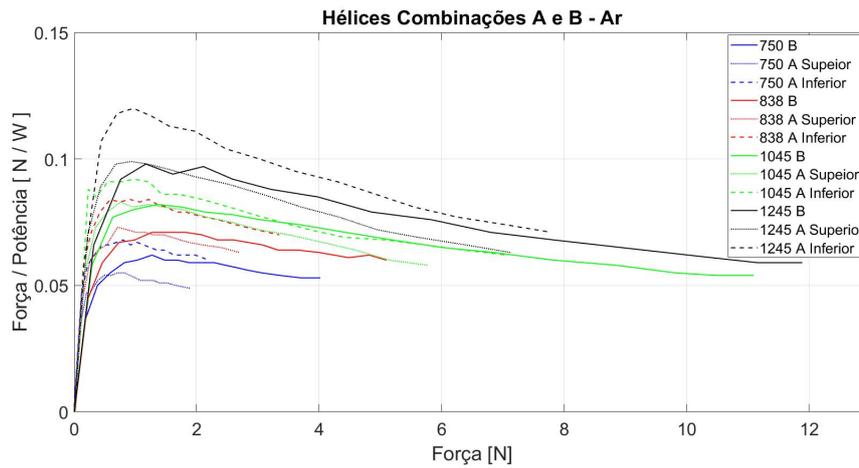


Figura 4.13: Gráfico comparativo entre os hélices nas **Combinações A e B** no ar.

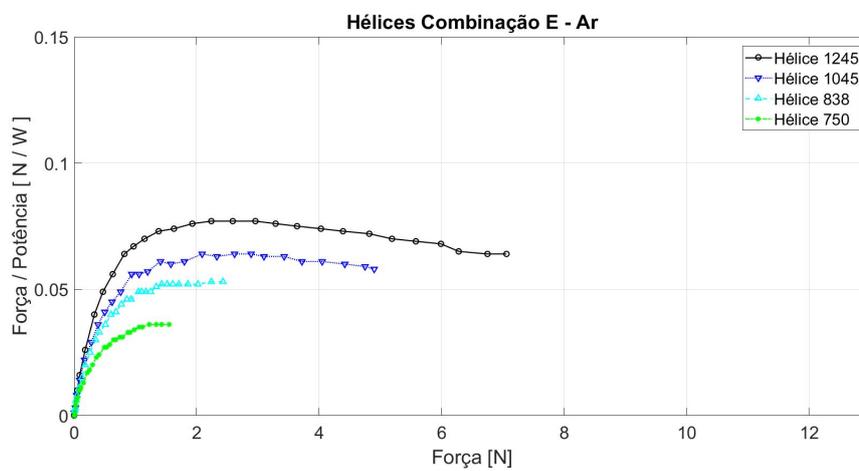


Figura 4.14: Gráfico comparativo entre os hélices na **Combinação E** no ar.

A Fig. 4.15 mostra uma foto da realização dos experimentos aéreos. Para o caso em destaque, os hélices em teste são os de 10 polegadas.



Figura 4.15: Realização dos experimentos.

### 4.2.3 Experimento Água

Os experimentos realizados na água, assim como ar, utilizaram apenas três combinações dos sistemas de propulsão apresentados no Cap. 3ve detalhadas e explicadas no tópico 3.5.2.1. Porém as combinações usadas foram A, B e C, montadas em quatro configurações diferentes, como apresentado pela Fig. 4.6, onde as distâncias “*d*” representam 10 *cm*. A **Combinação A** gerou duas montagens diferentes: **Combinação A Superior** - hélice fixo na parte de cima do braço e **Combinação A Inferior** - hélice disposto no lado de baixo do braço. **Combinação B** - hélices estão dispostos no que seria configuração contrarrotativa. **Combinação C** - o hélice aéreo está posicionado na parte superior do braço e o hélice aquático fixado na parte inferior. Nessa configuração será testado apenas o funcionamento do hélice aquático. Para facilitar o entendimento, os eixos *Y* e *Z* estão dispostos na mesma orientação apresentada na subseção 3.5.2, referente as configurações dos sistemas de propulsão.

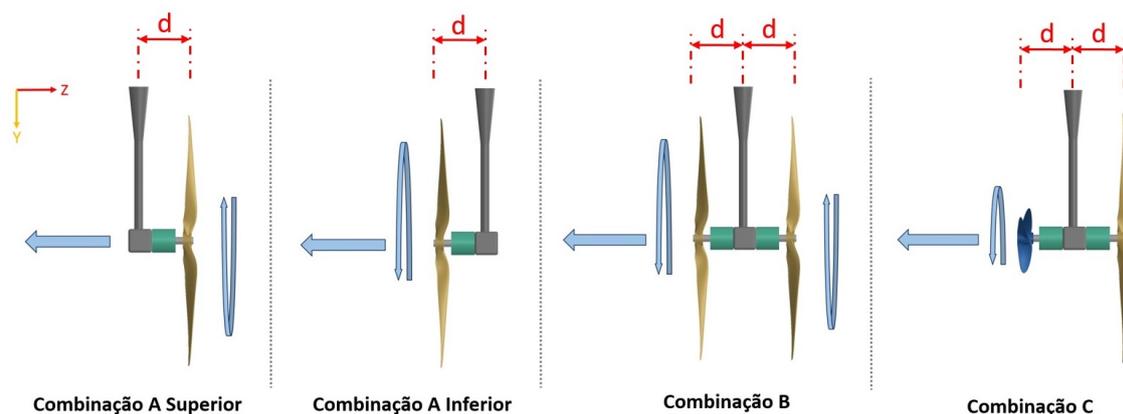


Figura 4.16: Configurações dos experimentos na água.

Na Tabela 4.3 é apresentada uma lista em quais das combinações cada um dos hélices foi testados experimentalmente na água.

Hélice	Combinação A Superior	Combinação A Inferior	Combinação B	Combinação C
30 mm	—	—	—	✓
45 mm	—	—	—	✓
58 mm	—	—	—	✓
70 mm	—	—	—	✓
838 pol.	✓	✓	✓	—
1147 pol.	✓	✓	✓	—

Tabela 4.3: Hélices utilizados nos experimentos aquáticos.

Na Fig. 4.17 são exibidos os hélices experimentados nos ensaios em água.



Figura 4.17: Hélices utilizados nos experimentos aquáticos.

As **Combinações D e F** fogem ao escopo de análise deste trabalho por fazerem uso de algum tipo de acoplamento ou mecanismo para transmissão de movimento, dessa forma não foram experimentados na água. A **Combinação E** foi experimentada e constatou-se que o desempenho era quase idêntico ao da **Combinação C**, isso se deve ao fato de os hélices aquáticos possuírem um diâmetro muito pequeno, e conseqüentemente o fluxo de água gerado por eles não muito prejudicado pelo sistema de propulsão aéreo. Desta forma são apresentados apenas os resultados da **Combinação C**.

As Figs. 4.18 e 4.19 mostram os gráficos das médias obtidas nos experimentos com os hélices aéreos de 8 e 11 polegadas dentro d'água. Estes gráficos são semelhantes aos dos testes aéreos, porém o pico de máxima eficiência não ocorre tão cedo como no ar. Cada uma das combinações testadas mantém as mesmas cores empregadas anteriormente. Algumas observações importantes a serem feitas a respeito desses experimentos:

- A faixa de operação é limitada pela dificuldade de acionamento dos ESCs, não se conseguindo acionar para pequenas forças. Os hélices só partem de aproximadamente 100 RPM;
- Em altas rotações identificou-se o começo do processo de cavitação;
- Em rotações medianas, quando acionados próximos a superfície da água, geram pequenos vórtices ou redemoinhos que acabam interferindo no funcionamento do sistema.

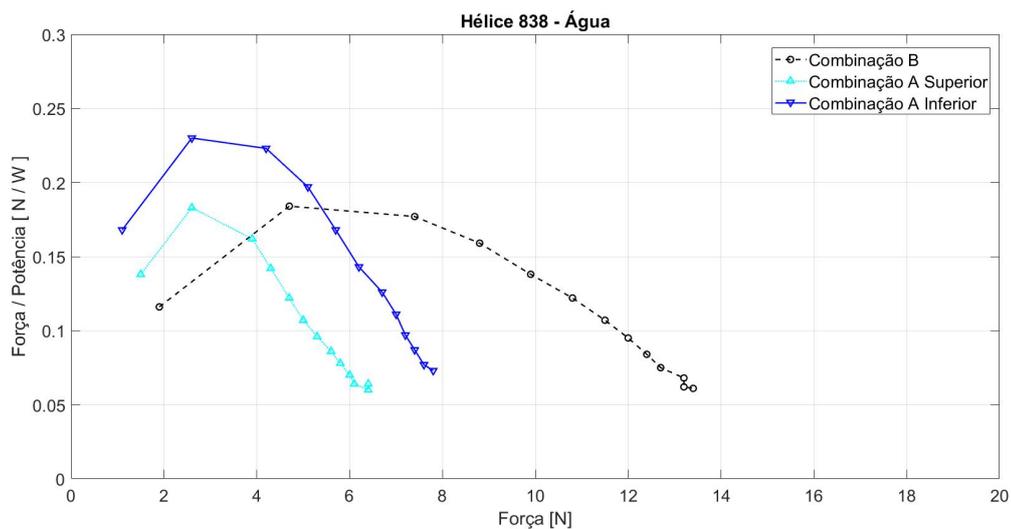


Figura 4.18: Rendimento do hélice de 8 polegadas na água.

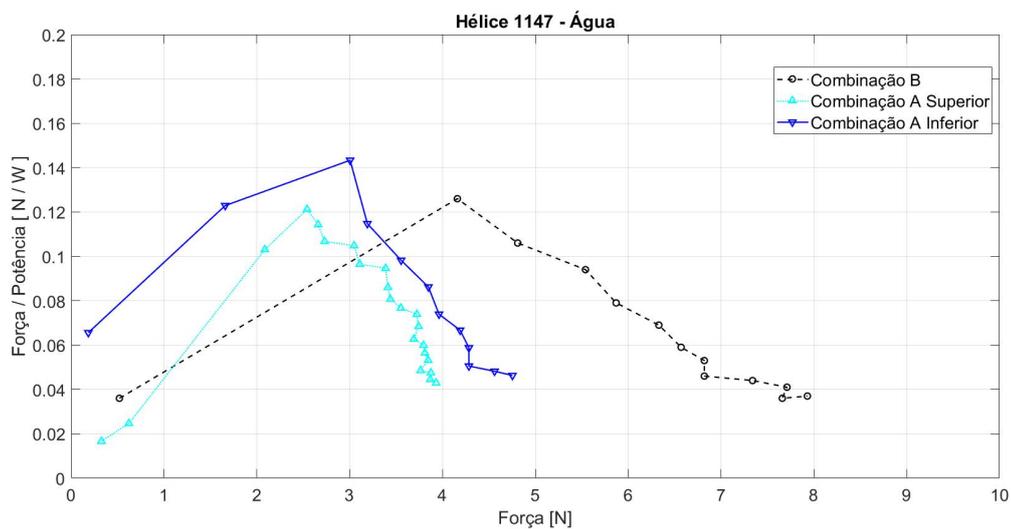


Figura 4.19: Rendimento do hélice de 11 polegadas na água.

Na Fig. 4.20 estão apresentadas as curvas da eficiência dos hélices aquáticos. Nota-se que eles possuem grande semelhança entre si, apenas com variação de escala entre os tamanhos de hélices. Além disso, se parecem também com os gráficos dos hélices aéreos operando no ar, pico de eficiência logo no início com uma redução rápida com o aumento da força produzida.

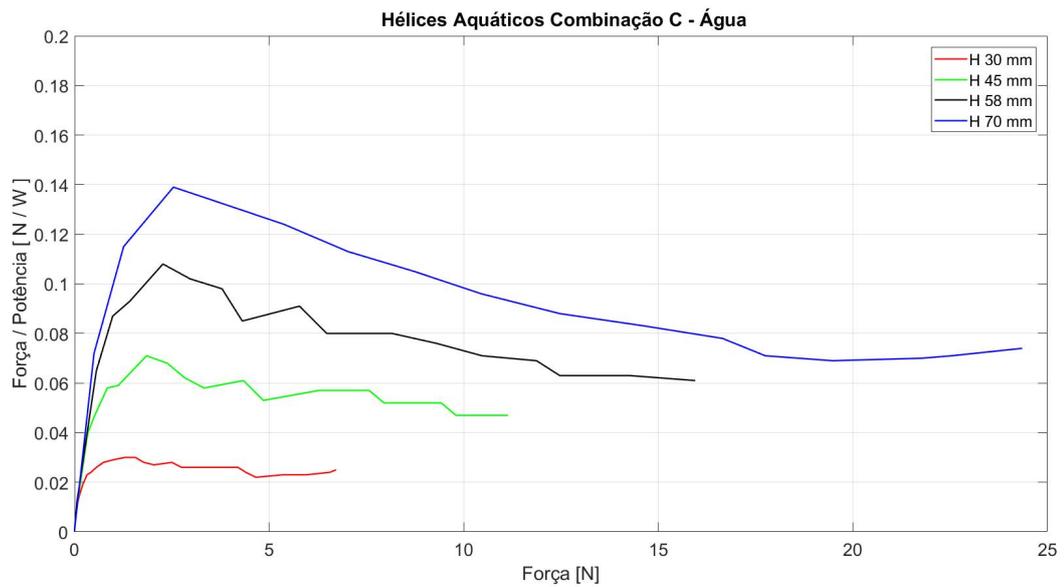


Figura 4.20: Rendimento dos hélices aquáticos.

Um gráfico contendo todos os hélices e combinações testados dentro d'água é mostrado na Fig.4.21. Nele é possível comparar as eficiências dos hélices aéreos com os aquáticos.

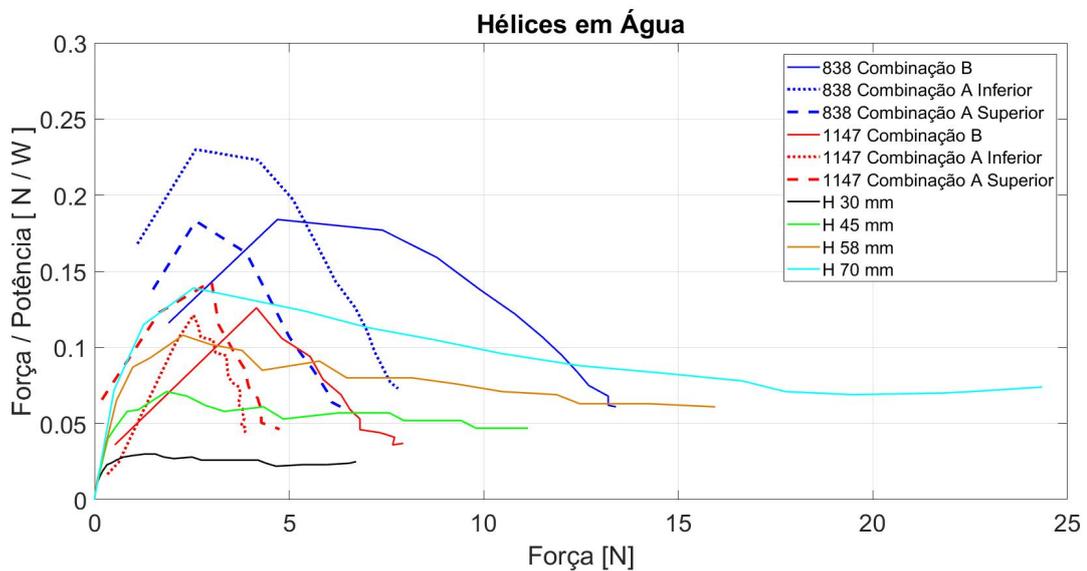


Figura 4.21: Curvas de todos os hélices experimentados na água.

#### 4.2.4 Análise dos Experimentos

Analisando-se os resultados dos experimentos realizados chega-se a três conclusões sobre o sistema de propulsão.

- O funcionamento do tipo contrarrotativo se mostrou com menor eficiência para todos os hélices testados, tanto operando no ar, como operando em água. A teoria de reaproveitamento de energia estudada por Bell et al. (2010) não se concretiza nos casos aqui estudados. Acredita-se que isso tenha ocorrido por dois motivos:
  1. Quanto mais próximos estiverem os hélices maior será a recuperação de energia, nos teste realizados esta distância foi de 15 cm;
  2. O braço gera um obstáculo ao fluxo de ar ou de água, criando assim turbulências no escoamento. Analisou-se a diferença nos picos de máxima eficiência de cada um dos hélices utilizados, e as diferenças entre a configuração contrarrotativa para a hélice funcionando na parte de baixo do braço ficou na faixa entre 9 à 23% menor.
- Os hélices que estavam posicionados na parte inferior dos braços (**Combinação A Inferior**) apresentaram em todos os casos maior eficiência energética do que aqueles que estavam em cima (**Combinação A Superior** e **Combinação E**). Também é possível notar, que o sistema propulsor nas combinações em que existem obstruções na saída do fluido, não conseguem desenvolver a mesma força que nas outras configurações. Dessa forma, conclui-se que um obstáculo na saída do fluxo de ar ou água interfere mais do que um obstáculo na entrada do fluxo.
- Ao analisar-se todos os resultados obtidos em um mesmo gráfico, é possível perceber, que para o conjunto de equipamentos utilizados nos experimentos, os hélices aéreos tem uma eficiência energética dentro d'água melhor que os aquáticos, Fig. 4.21.

## 5 PROPOSTA DE VEÍCULO HÍBRIDO

Para o desenvolvimento do veículo híbrido não tripulado, é necessária a integração de 5 partes: modelagem matemática, *software*, *hardware*, cápsula hermética e sistema de propulsão. Desses, apenas o *hardware* e o *software* foram definidos no Cap. 3 para o desenvolvimento do protótipo.

Para completar a proposta de veículo híbrido não tripulado, nas seções a seguir serão apresentados a concepção do sistema de propulsão, o encapsulamento e a modelagem matemática do veículo. Além disso, resultados em simulação do veículo são apresentados.

### 5.1 Sistema de Propulsão da Proposta

#### 5.1.1 Funcionamento Aéreo

Como pré-requisito para o desenvolvimento do veículo, sua estrutura deve ser a de um quadricóptero. Todos os HUAUVs estudados apresentam no ar o mesmo funcionamento, logo o veículo aqui desenvolvido também seguirá esse princípio de funcionamento, optando-se pela utilização da combinação de 4 hélices aéreas.

Como observa-se nos resultados dos testes, as configurações do tipo contrarrotativo não são eficientes. Dessa forma, a proposta de veículo não fará uso dessa configuração, empregando a configuração de hélices simples. Como o peso do veículo é aproximadamente 1,5 kg, no estado de voo pairado (*hovering*), ele precisa sustentar tal peso nos 4 motores, logo cada motor deverá gerar uma força de 3,75 N, ou 0,35 g. Ao se analisar a Fig. 4.13 a melhor eficiência nessa faixa de força é o hélice 1245, que apresenta em torno de 0,1 N/W.

#### 5.1.2 Funcionamento Aquático

Para a determinação do sistema de propulsão da proposta de veículo são consideradas as análises apresentadas no Cap. 3 e os resultados obtidos nos experimentos mostrados no Cap. 4. Dessa maneira, fundamenta-se a parte aquática da proposição de veículo híbrido.

Considerando os casos em que os veículos apresentam flutuabilidade positiva ou negativa, é possível perceber, que assim como no ar, eles estão constantemente consumindo energia para manter sua posição vertical. Por consequência, um veículo com flutuabilidade neutra não consome energia para ficar parado, logo mostra ser mais eficiente energeticamente. Porém, por segurança operacional, é interessante que o veículo possua uma flutuabilidade positiva, para em caso de problema, ele emerja à superfície. Considerando-se esses dois pontos apresentados, uma flutuabilidade com uma pequena intensidade positiva, mas muito próxima à neutra, é a condição ideal para o veículo.

Outra característica importante a ser analisada é a posição dos centros de massa e empuxo. Nos HUAUVs que possuem CM e CE em pontos diferentes, momentos restaurativos surgem quando os dois centros não estão alinhados verticalmente. Isso faz com que o veículo precise acionar seus atuadores para compensar esse torque restaurador, consumindo assim energia extra para alterar ou manter sua orientação. Dessa forma, outra característica do veículo visando sua eficiência energética, seria ter a posição do CE coincidente com a do CM. Porém, devido a grande dificuldade de se conseguir essa condição na prática, o desenvolvimento é feito de forma que estes centros estejam o mais próximos possível.

Sobre o tipo de hélice a ser utilizado na água, apesar dos resultados mostrarem que os hélices aéreos tiveram um melhor rendimento, o hélice escolhido foi o hélice aquático de 70 mm. Escolheu-se esse, devido as dificuldades de controle dos hélices aéreos em baixas rotações, baixas forças geradas, e as instabilidades que ocorrem em funcionamentos próximos a superfície, devido aos vórtices criados.

#### *5.1.2.1 Análise Hidrodinâmica*

Dentro d'água os fatores mais relevantes ao funcionamento do veículo são a massa adicional e o coeficiente de arrasto. Estes fatores dependem diretamente da forma e da área projetada do veículo perpendicular ao sentido de movimento. Sendo assim, uma análise destas características é muito importante para a melhoria da eficiência e desempenho do HUAUV.

A determinação de formatos complexos, que permitam um melhor escoamento, é de difícil estudo e obtenção, sendo assim necessárias análises simplificadas. Dessa forma, Fox, Pritchard e McDonald (2010) apresentam para o formato exibido na Fig. 5.1, uma relação de 0,25 entre comprimento e a espessura, o qual resulta na menor força de arrasto.

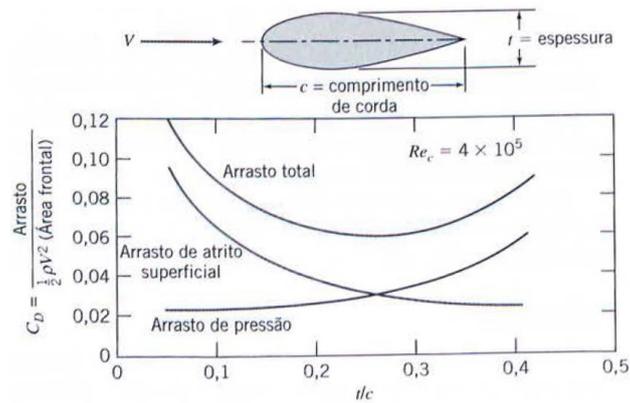


Figura 5.1: Formato hidrodinâmico para melhor escoamento. Fonte: Fox, Pritchard e Mcdonald (2010).

Na Fig. 5.2 é possível visualizar qual das duas formas de funcionamento se encaixa melhor ao formato mais hidrodinâmico. Forma de funcionamento representada pela letra “a” seria com hélices a  $90^\circ$  e a forma de funcionamento representada pela letra “b” seria com as configurações tradicionais, sem hélices a  $90^\circ$ .

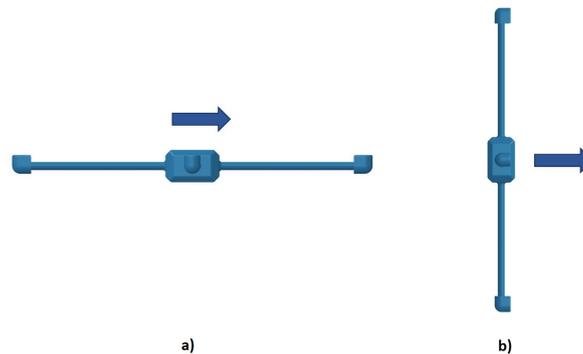


Figura 5.2: Comparação do arrasto hidrodinâmico entre as formas de funcionamento.

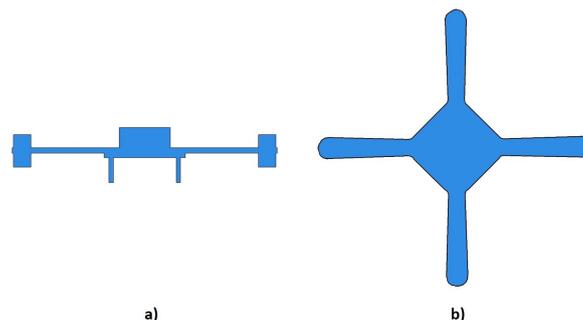


Figura 5.3: Comparação das áreas projetadas entre as formas de funcionamento.

Segundo Tavares (2003) o arrasto e a massa adicional, que surgem operando em baixo d'água, dependem da área projetada do veículo na direção do movimento. Dessa forma, ao comparar a área projetada em cada uma das formas de funcionamentos, conforme apresentadas na Fig. 5.3, foi calculado que a área projetada do veículo operando com hélices à 90°, é de 40% do tamanho da área projetada dos outros modos de operação. Além disso, com a massa adicional e os arrastos minimizados, o veículo consegue operar de forma mais ágil, desempenhando melhor suas operações e consumindo menos energia na realização das mesmas tarefas.

#### 5.1.2.2 *Configuração de Veículo*

Conforme analisado, para que o veículo obtenha maior eficiência e desempenho, ele deve possuir as seguintes características:

- Flutuabilidade positiva, porém muito próxima a neutra;
- CE coincidente com o CM;
- Deve possuir um sistema de propulsão aquática, que apresente um par de hélices na horizontal, à 90° com os hélices aéreos.

Dessa forma, a configuração e funcionamento final proposto aqui neste trabalho são idênticos aos descritos pela a Fig. 3.33, representada novamente abaixo (Fig. 5.4).

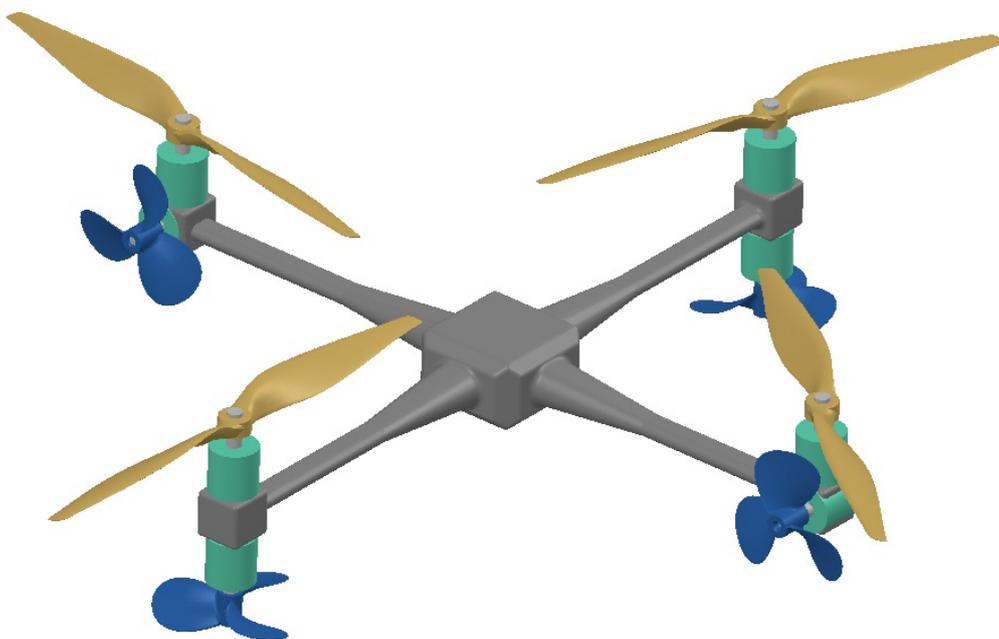


Figura 5.4: Modelo de veículo híbrido proposto.

Baseado nos resultados obtidos no Cap. 4, as obstruções embaixo dos hélices devem ser minimizadas para se obter o desempenho máximo do sistema. Dessa forma, a área dos braços deve ser a menor possível e o sistema propulsor à  $90^\circ$  deve ser posicionado de forma a reduzir a sua área projetada no sentido do fluxo gerado pelos hélices aéreos. Isso é feito neste trabalho de acordo com a Fig. 5.5, com a minimização da distância  $d$ .

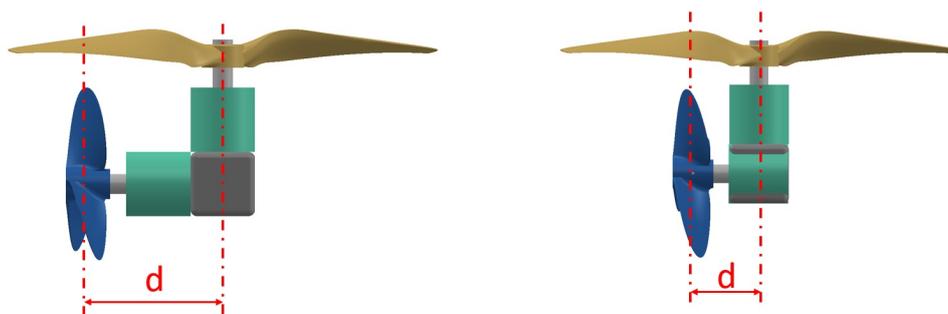


Figura 5.5: Minimização da obstrução gerada pelos propulsores à  $90^\circ$ .

## 5.2 Modelo de Cápsula

Após a realização dos testes com os dois modelos de cápsulas, aquela que apresentou maior hermeticidade nos testes foi a do modelo A, conforme os resultados apresentados na tabela 4.1. O detalhe da vedação da cápsula escolhida é mostrado na Fig. 5.6.

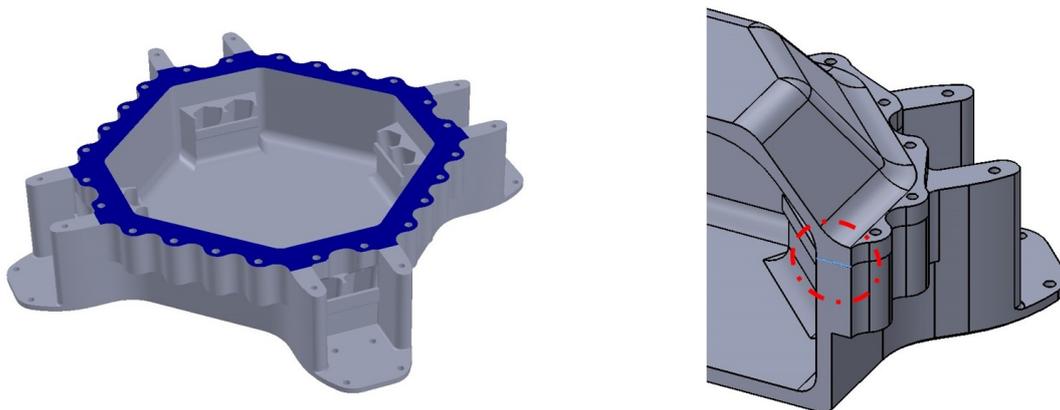


Figura 5.6: Detalhe da vedação da cápsula escolhida.

Com essa definição, foi construído o modelo de veículo proposto, chamado de Hydrone, com origem nos termos em inglês *Hybrid* e *Drone*. A Fig. 5.7 apresenta uma foto desse modelo construído. Nos lados da imagem, é possível ver os hélices aquáticos dispostos a  $90^\circ$ .



Figura 5.7: Protótipo do modelo proposto, Hydrone.

### 5.3 Modelo Dinâmico

O modelo dinâmico do veículos, como já apresentado no Cap. 3 é aplicação dos valores reais das grandezas nas equações apresentadas anteriormente. Para isso, duas tabelas são apresentadas, uma para os hélices e motores e outra para o corpo do veículo e as grandezas que o circundam.

Na tabela a seguir (Tab. 5.1) são apresentados os parâmetros dos hélices utilizados no veículo. Um aéreo que pode operar tanto no ar como na água e um aquático que só é utilizado dentro d'água.

Tabela 5.1: Parâmetros do hélices e motores utilizados

Hélice	Meio	$\rho \zeta_M$	$\rho \eta_M$
1245 pol.	Ar	$2.45 \times 10^{-7}$	$5 \times 10^{-11}$
1245 pol.	Água	$2.55 \times 10^{-7}$	$5 \times 10^{-7}$
70 mm	Água	$1.62 \times 10^{-6}$	$1 \times 10^{-8}$

Após toda a análise desenvolvida neste capítulo, o modelo dinâmico do Hydrone é apresentado através de seus parâmetros, compilados na Tabela 5.2.

Dos valores apresentados na Tabela 5.2, todos eles são calculados em função das dimensões do veículo proposto, com exceção dos parâmetros de arrasto ( $D(uvw)$  e  $D(pqr)$ ) e dos parâmetros relacionados a massa adicional ( $m_A$  e  $J_A$ ). Os parâmetros de arrasto do veículo são aproximados para valores de geometrias padrão, definidas experimentalmente conforme apresentado em Fox, Pritchard e Mcdonald (2010). Os parâmetros referentes a massa adicional também tem seus valores aproximados a formas padronizadas, que são previamente calculadas ou experimentalmente adquiridas, conforme apresentado por Fossen (1994).

Tabela 5.2: Parâmetros do modelo do veículo proposto

Variável	Valores	Variável	Valores
$m$ [kg]	1,3	$g$ [ $m/s^2$ ]	[0 0 9,78]
$l$ [m]	0,27	$J_V$ [ $kg\ m^2$ ]	$\begin{bmatrix} 1,45 & 0,02 & -0,08 \\ 0,02 & 2,88 & -0,01 \\ -0,08 & -0,01 & 1,54 \end{bmatrix} \times 10^{-2}$
$d_{GE}$ [m]	0,02	$D(uvw)$ [ $kg/s$ ]	$\rho\ diag [1,25, 1,25, 4,99] \times 10^{-2}$
$\nabla$ [ $m^3$ ]	$1,6 \times 10^{-3}$	$D(pqr)$ [ $kg\ m/s$ ]	$\rho\ diag [1,25, 1,25, 4,99] \times 10^{-2}$
<b>Ar</b> ( $\rho = 1,29\ kg/m^3$ )			
$m_A$ [kg]	1,29	$J_A$ [ $kg\ m^2$ ]	$\begin{bmatrix} 1,45 & 0,02 & -0,09 \\ 0,02 & 2,88 & -0,011 \\ -0,09 & -0,11 & 1,54 \end{bmatrix} \times 10^{-2}$
<b>Água</b> ( $\rho = 1000\ kg/m^3$ )			
$m_A$ [kg]	1,93	$J_A$ [ $kg\ m^2$ ]	$\begin{bmatrix} 1,56 & 0,14 & 0,04 \\ 0,14 & 3,00 & 0,11 \\ 0,04 & 0,11 & 1,66 \end{bmatrix} \times 10^{-2}$

## 5.4 Resultados de Simulações do Veículo

Para avaliar o veículo híbrido desenvolvido, duas simulações computacionais foram realizadas. Na primeira simulação foi realizada uma simples missão, na qual o veículo seguiu um teste

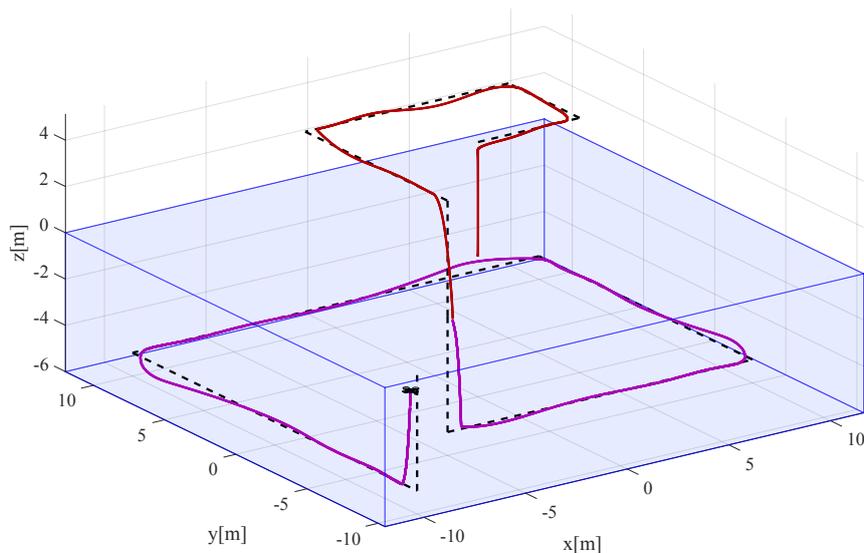


Figura 5.8: Trajetória percorridas pelos veículos na simulação.

A Fig. 5.8 mostra uma imagem da primeira simulação, onde o veículo percorre a trajetória pré-estabelecida, composta por uma série de pontos e representada na figura pela

linha preta tracejada. A estratégia de controle utilizada na simulação foi a mesma utilizada por Drews, Neto e Campos (2014). Para iniciar o movimento, o Hydrone encontra-se na superfície da água, de onde voa até uma altura de 5 metros e descrevendo o caminho no ar representado pela linha vermelha. Para indicar a troca de ambientes durante o trajeto, o caminho percorrido embaixo d'água é representado na cor roxa.

A segunda simulação foi realizada para demonstrar o desempenho subaquático do Hydrone. Para isso, comparou-se o veículo com outros tipos quadrirrotores híbridos do estado da arte mostrados no Capítulo 2. Nessa avaliação de desempenho, três características foram consideradas: o deslocamento total, a velocidade média e a energia consumida. Essa simulação consistiu em uma simples medição da energia consumida pelo veículo em uma movimentação em linha reta sobre o eixo x. Esta movimentação foi feita em velocidade máxima para frente e teve a duração de 30 segundos.

A Tabela 5.3 apresenta os dados obtidos pela segunda simulação. Desta forma, são mostrados a distância total, a velocidade média, a energia total consumida e a relação distância percorrida por energia de cada um dos veículos. Na realização desta simulação em ambiente aéreo observou-se que o comportamento de todos os veículos foi praticamente o mesmo. A diferença nos resultados ocorreu apenas quando estes veículos operaram em água. Como é possível verificar nos dados da tabela, o Hydrone destacou-se em todos os quesitos, principalmente na distância total percorrida, que foi quase duas vezes maior que o segundo veículo nesse quesito.

Tabela 5.3: Comparativo entre os resultados das simulações.

<b>Veículo</b>	<b>Distância [m]</b>	<b>Velocidade média [m/s]</b>	<b>Energia consumida [kJ]</b>	<b>Distância/Energia [m/kJ]</b>
Hydrone	<b>39,77</b>	<b>1,33</b>	1,84	<b>21,60</b>
Drews-Jr <i>et al.</i> , 2014	21,60	0,73	<b>1,37</b>	15,88
Maia <i>et al.</i> , 2017	14,36	0,48	2,47	5,83
Alzu'bi <i>et al.</i> , 2018	13,91	0,46	2,45	5,67

Cabe ressaltar aqui, que a proposta do Hydrone é muito similar ao veículo proposto por Drews, Neto e Campos (2014), diferindo apenas quanto a orientação de dois dos seus hélices aquáticos. Sendo assim, em uma comparação direta entre os dois modelos, nota-se que uma das principais contribuições deste trabalho, resultou em uma melhoria significativa de desempenho nos testes realizados para deslocamento horizontal, o mais comum para aplicações subaquáticas como inspeção e mapeamento. Dentre os resultados, destaca-se a distância percorrida e a velocidade média, nos quais o desempenho do Hydrone foi quase duas vezes melhor.

## 6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

### 6.1 Conclusões

Neste trabalho, foram realizados estudos referentes a eficiência de diferentes configurações do sistema propulsor, com diferentes tipos de hélices operando tanto no ar como na água. Também realizou-se teste de hermeticidade da cápsula, para verificar sua estanqueidade para operações subaquáticas.

No teste de hermeticidade, foi verificado que não houve infiltração alguma de água dentro do modelo de cápsula A, nos dois testes realizados. Dessa forma, existe segurança para o hardware na realização de operações subaquáticas de pequenas profundidades.

Com os resultados obtidos através dos testes realizados com os sistemas de propulsão, foi possível identificar que hélices operando em configuração contrarrotativa apresentaram uma redução de 9 à 23% nos picos de eficiência máxima, quando comparados com a configuração de um único hélice fixado na parte inferior do braço. Na comparação do hélice preso na parte superior com relação ao fixo no lado inferior, verificase que há uma perda variando de 6 à 40% na eficiência e com uma redução média de aproximadamente 18%, quando analisadas todas as faixas de operação dos hélices testados. Essa análise leva em consideração tanto os dados do ar como da água. Além desses, no ar os experimentos com o sistema propulsor à 90° no fluxo dos hélices aéreos (**Combinação E**), apresentou uma redução média de 17% comparado aos hélices na parte superior do braço. Apesar disso, neste trabalho optou-se pela utilização dos hélices aéreos na parte superior dos braços, pois essa forma simplifica o processo de transição entre os ambientes e facilita projeto mecânico do veículo, quanto a simetria em relação aos seus eixos principais de inércia e a aproximação dos centros de massa e empuxo.

Os hélices aquáticos apresentaram eficiência energética menor que os aéreos dentro d'água. Porém, os hélices aéreos apresentam pontos críticos para serem utilizados com o conjunto escolhido (ESC e motor). Eles possuem faixa de controle muito estreita e são bem difíceis de se controlar para baixas solicitações de força. Além disso, eles podem gerar vórtices quando operam próximos a superfície da água e podem criar cavitação em rotações um pouco mais elevadas.

Com a mudança de orientação dos propulsores, houve um grande acréscimo na eficiência do veículo, simplesmente pela redução da força de arrasto sobre o veículo e da massa adicional que ele carrega. Com essa modificação o veículo conseguiu percorrer quase o dobro da distância que seu equivalente sem hélices à 90°, e desenvolveu uma velocidade 80% maior, para as condições testadas.

## 6.2 Trabalhos Futuros

Como trabalhos futuros, existem uma série de pesquisas que podem ser desenvolvidas a partir desse ponto. A mais urgente é avaliar o protótipo do Hydrone em condições reais, obtendo assim dados verdadeiros sobre a sua eficiência ao movimento.

Um resultado descoberto por este trabalho, que não entrou na proposta do Hydrone, foi a utilização dos hélices na parte inferior dos braços. Configuração essa, que deixa a saída do fluxo desobstruída, aumentando ainda mais os ganhos de eficiência aqui apresentados. Poderia ser desenvolvida uma nova proposta de veículo utilizando essa configuração. Junto a isso, criar um veículo com um design que também permita reposicionar os hélices à 90° de maneira a evitar a interferência no fluxo de ar no funcionamento aéreo.

Outro exemplo, seria o emprego de estratégias de controle autônomo para a estabilização do veículo, especialmente relativo à transição entre os ambientes. Leis de controle robustas à mudança do ar para água, ou vice-versa, auxiliam o veículo em uma navegação mais eficiente durante uma missão.

Através das estratégias de controle, poderia se estudar a automatização do veículo tornando-o de fato um robô híbrido. Juntamente a isso, seria possível acoplar um manipulador para interações mais pontuais com o ambiente, o que auxiliaria em algumas coletas de dados e inspeções mais precisas.

Outro ponto interessante, também seria tratar da questão do planejamento de movimentos de alto nível do sistema, considerando-se as vantagens e desvantagens de navegação em cada meio, visando otimizar características da missão como tempo de conclusão e energia gasta. Ainda sobre a navegação, a inserção de sensores exteroceptivos embarcados podem auxiliar na interação com ambientes povoados por obstáculos, típicos em ambientes submersos.

## REFERÊNCIAS

AHN, J. et al. An optical image transmission system for deep sea creature sampling missions using autonomous underwater vehicle. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, p. 1–12, 2018. ISSN 0364-9059.

ALZU'BI, H. et al. Evaluation of an aerial quadcopter power-plant for underwater operation. In: *2015 10th International Symposium on Mechatronics and its Applications (ISMA)*. [S.l.: s.n.], 2015. p. 1–4.

ALZU'BI, H.; MANSOUR, I.; RAWASHDEH, O. Loon copter: Implementation of a hybrid unmanned aquatic–aerial quadcopter with active buoyancy control. *Journal of Field Robotics*, v. 35, n. 5, p. 764–778, 2017. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/rob.21777>.

BELL, J. et al. Development of a test-rig for exploring optimal conditions of small unmanned aerial vehicle co-axial rotor systems. In: ICMES. *International Conference on Manufacturing Engineering Systems*. [S.l.], 2010. p. 439–444.

CARLTON, J. *Marine propellers and propulsion, 2 edn, 2007*. [S.l.]: Elsevier, Oxford, 2007.

CUMMINGS, M. L. et al. Task versus vehicle-based control paradigms in multiple unmanned vehicle supervision by a single operator. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, v. 44, n. 3, p. 353–361, June 2014. ISSN 2168-2291.

DREWS, P. L. J.; NETO, A. A.; CAMPOS, M. F. M. Hybrid unmanned aerial underwater vehicle: Modeling and simulation. In: *2014 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. [S.l.: s.n.], 2014. p. 4637–4642. ISSN 2153-0858.

FOSSSEN, T. *Guidance and Control of Ocean Vehicles*. [S.l.]: Wiley, 1994.

FOX, R.; PRITCHARD, P.; MCDONALD, A. *Introdução à mecânica dos fluidos*. [S.l.]: LTC, 2010. ISBN 9788521617570.

GHEORGHITĂ, D. et al. Quadcopter control system. In: *2015 19th International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC)*. [S.l.: s.n.], 2015. p. 421–426.

HOBBYKING. *HobbyKing, Afro Esc 20 A*. HobbyKing, 2018. Disponível em: [https://hobbyking.com/pt-pt/afro-20a-hv-multitrotor-esc-high-voltage-3-8s.html?\\_&\\_&\\_store=pt-pt](https://hobbyking.com/pt-pt/afro-20a-hv-multitrotor-esc-high-voltage-3-8s.html?_&_&_store=pt-pt). Acesso em: 17 nov. 2018.

HORN, A. C. et al. Um arcabouço experimental para estimação de parâmetros de um veículo de asas rotativas. In: *Seminário e Workshop em Engenharia Oceânica*. [S.l.: s.n.], 2018.

MA, Z.; FENG, J.; YANG, J. Research on vertical air–water trans-media control of hybrid unmanned aerial underwater vehicles based on adaptive sliding mode dynamical surface control. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, v. 15, n. 2, p. 1729881418770531, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/1729881418770531>.

MAIA, M. M.; MERCADO, D. A.; DIEZ, F. J. Design and implementation of multicopter aerial-underwater vehicles with experimental results. In: *2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. [S.l.: s.n.], 2017. p. 961–966. ISSN 2153-0866.

MAIA, M. M.; SONI, P.; DIEZ-GARIAS, F. J. Demonstration of an aerial and submersible vehicle capable of flight and underwater navigation with seamless air-water transition. *CoRR*, abs/1507.01932, 2015. Disponível em: <http://arxiv.org/abs/1507.01932>.

MCLEOD, D.; JACOBSON, J. Autonomous uuv inspection — revolutionizing undersea inspection. In: *OCEANS’11 MTS/IEEE KONA*. [S.l.: s.n.], 2011. p. 1–4. ISSN 0197-7385.

MERCADO, D. A.; MAIA, M. M.; DIEZ, F. J. Aerial-underwater systems, a new paradigm in unmanned vehicles. In: *2017 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*. [S.l.: s.n.], 2017. p. 1690–1695.

MIRANDA, M. et al. Homing an unmanned underwater vehicle equipped with a dusbl to an unmanned surface platform: A feasibility study. In: *2013 OCEANS - San Diego*. [S.l.: s.n.], 2013. p. 1–10. ISSN 0197-7385.

MOORE, J.; FEIN, A.; SETZLER, W. Design and analysis of a fixed-wing unmanned aerial-aquatic vehicle. In: *IEEE. 2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. [S.l.], 2018. p. 1236–1243.

NEWMAN, J. *Marine hydrodynamics*. The MIT Press, 1977.

PIXHAWK. *Pixhawk Flight Controller (Pixhawk 2.4.8)*. 2018. Disponível em: [https://docs.px4.io/en/flight\\\_controller/mro\\\_pixhawk.html](https://docs.px4.io/en/flight/_controller/mro\_pixhawk.html). Acesso em: 15 nov. 2018.

POWERS, C. W. et al. Coordinated sampling of microorganisms over freshwater and saltwater environments using an unmanned surface vehicle (usv) and a small unmanned aircraft system (suas). *Frontiers in microbiology*, Frontiers Media SA, v. 9, 2018.

RASTGOFTAR, H.; ATKINS, E. M. Unmanned vehicle mission planning given limited sensory information. In: *2017 American Control Conference (ACC)*. [S.l.: s.n.], 2017. p. 4473–4479. ISSN 2378-5861.

SEDDON, J. M.; NEWMAN, S. *Basic helicopter aerodynamics*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2011. v. 40.

SHEN, X.; FAN, J.; WANG, H. Design and simulation of eight-rotor unmanned aerial vehicle based on hybrid control system. *International Journal of Aerospace Engineering*, Hindawi, v. 2018, 2018.

STEWART, W. et al. Design and demonstration of a seabird-inspired fixed-wing hybrid uav-uuv system. *Bioinspiration & biomimetics*, IOP Publishing, v. 13, n. 5, p. 056013, 2018.

TAN, Y. H.; SIDDALL, R.; KOVAC, M. Efficient aerial–aquatic locomotion with a single propulsion system. *IEEE Robotics and Automation Letters*, IEEE, v. 2, n. 3, p. 1304–1311, 2017.

TAVARES, A. Um estudo sobre a modelagem eo controle de veículos subaquáticos não tripulados. *Master's thesis, Engenharia Oceânica, Fundação Universidade Federal do Rio Grande*, 2003.

VALAVANIS, K. P.; VACHTSEVANOS, G. J. Future of unmanned aviation. In: *Handbook of unmanned aerial vehicles*. [S.l.]: Springer, 2015. p. 2993–3009.

VILLEGAS, A. et al. Analysis of key elements to evaluate the performance of a multirotor unmanned aerial–aquatic vehicle. *Aerospace Science and Technology*, v. 70, p. 412 – 418, 2017. ISSN 1270-9638. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1270963817302766>).

YANG, X. et al. Survey on the novel hybrid aquatic–aerial amphibious aircraft: Aquatic unmanned aerial vehicle (aquauav). *Progress in Aerospace Sciences*, v. 74, p. 131 – 151, 2015. ISSN 0376-0421. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0376042114001122>).