

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO



Alocação de Forças para um Sistema de Propulsão Híbrido de um Veículo Autónomo de Superfície

Jorge Manuel Moreira Antunes

MESTRADO EM ENGENHARIA ELECTROTÉCNICA E DE COMPUTADORES

Orientador: Nuno Alexandre Lopes Moreira da Cruz

October 23, 2023

Alocação de Forças para um Sistema de Propulsão Híbrido de um Veículo Autónomo de Superfície

Jorge Manuel Moreira Antunes

MESTRADO EM ENGENHARIA ELECTROTÉCNICA E DE
COMPUTADORES

October 23, 2023

Resumo

Com o rápido desenvolvimento do campo das embarcações autônomas de superfície, os tipos de missões realizados por estes veículos tornam-se cada vez mais exigentes, principalmente no que toca a operações em zonas não convencionais, caracterizadas por apresentarem diversas adversidades ao bom funcionamento da embarcação. Deste modo, existem certos fatores no desenvolvimento destes veículos que necessitam de uma particular atenção, sendo um deles, uma alocação de força pelos propulsores eficaz e que procure reduzir o consumo de potência do veículo, já que isto influencia bastante o seu modo e tempo de operação.

Assim, neste trabalho, procurou-se projetar um veículo com dois sistemas de propulsão, um deles submerso e outro aéreo, resultando assim numa embarcação com um sistema de propulsão híbrido cujo design e configuração dos propulsores fosse de encontro à operação em zonas não convencionais e cujos métodos de alocação de forças pelos seus sistemas de propulsores procurassem minimizar a potência total consumida pelo mesmo.

Para isso, foram desenvolvidos três métodos de distribuição de força: dois métodos para a utilização isolada de cada tipo de sistema de propulsão, ou seja, que efetuassem a distribuição de força apenas pelos propulsores submersos ou aéreos conforme aqueles que se pretendiam utilizar, e um que realizasse uma distribuição da força total por ambos os sistemas de propulsão para que depois, recorrendo aos outros dois métodos se fizesse a distribuição final pelos propulsores. Este último método tem a grande vantagem de efetuar a distribuição com base numa análise realizada offline o que depois facilita o processo de alocação de força por cada sistema de propulsão em tempo real.

Abstract

With the fast development of autonomous surface vessels field, the types of missions required by these vehicles become increasingly demanding, especially regarding operations in unconventional areas, characterized by presenting various adversities to the proper functioning of the vehicle. In this way, there are certain factors in the development of these vehicles that need particular attention, one of them being an efficient thruster allocation that seeks to reduce the vehicle's power consumption, since this greatly influences its way and time of operation.

Thus, in this work, we sought to design a vehicle with two propulsion systems, one of them submerged and the other aerial, resulting in a vessel with a hybrid propulsion system whose design and configuration of the thrusters would meet the operation in unconventional zones and whose methods of allocating forces through their propulsion systems aimed to minimize the total power consumed by them.

To this end, three force distribution methods were developed: two methods for the isolated use of each type of propulsion system, i.e., that carried out the force distribution only between the submerged or aerial thrusters depending on those intended to be used, and one to carry out a distribution of the total force across both propulsion systems so that, by using the other two methods, the final distribution could be made across the thrusters. This last method has the great advantage of making the distribution based on an analysis carried out offline, which then facilitates the process of force allocation for each propulsion system in real time.

Agradecimentos

Em primeiro lugar, queria agradecer à minha família, sobretudo aos meus pais, que eu considero serem os principais agentes por detrás do meu sucesso e da conclusão desta etapa tão importante da minha vida. Sem o seu apoio, motivação e ajuda tanto nos melhores como nos piores momentos, certamente que este percurso teria sido muito mais atribulado e difícil de completar. Graças aos valores, princípios e lições que me foram dadas ao longo da minha vida por eles, sei que daqui para a frente, independentemente do sucesso profissional, serei uma pessoa preparada para enfrentar qualquer desafio que me seja colocado.

Gostaria também de agradecer aos meus amigos, a outra família que me acompanhou durante este árduo percurso. Desde as primeiras aulas teóricas até às noitadas a estudar para exames, desde os primeiros cafés até aos jantares festivos, desde as saídas à noite até às manhãs trágicas a que estes levavam, orgulho-me em dizer que todos vocês me marcaram e que levam em mim um amigo para aquilo que der e vier. 5 anos parece muito tempo mas não me importava de viver mais 5 sabendo que ia estar ao vosso lado, portanto, apesar de este ser o fim de uma etapa, espero que as nossas amizades perdurem por muitos anos.

“I am ready to face any challenges that are foolish enough to face me”

Dwight Schrute, The Office

Conteúdos

1	Introdução	1
1.1	Contexto	1
1.2	Motivação	2
1.3	Objetivos	3
2	Revisão Bibliográfica	5
2.1	ASV's com meios de propulsão submersos	5
2.2	ASV's com meios de propulsão aéreos	7
2.3	Configuração de propulsores e Design de Embarcações	8
2.4	Algoritmos de Thruster Allocation	10
3	Design da embarcação e configuração dos propulsores	15
3.1	Design da embarcação	15
3.2	Configuração dos Propulsores	17
3.3	Modelo de Simulação do ASV	25
3.3.1	Movimento recorrendo apenas aos propulsores aéreos	30
3.3.2	Movimento recorrendo aos propulsores aéreos e submersos	33
4	Alocação de força pelos propulsores	37
4.1	Alocação de força para os propulsores submersos	37
4.1.1	Algoritmo de distribuição de forças pelos propulsores submersos	42
4.1.2	Distribuição de forças em caso de falha de um propulsor submerso	49
4.2	Alocação de forças para os propulsores aéreos	52
4.3	Alocação da força para utilização simultânea dos propulsores aéreos e submersos	58
5	Conclusões e Trabalho Futuro	71
5.1	Conclusões	71
5.2	Trabalho Futuro	73
	References	75

Lista de Figuras

3.1	Esboço do funcionamento dos braços necessários para baixar os propulsores aéreos	17
3.2	Configuração escolhida para os propulsores aéreos	18
3.3	Configuração em 'X' dos propulsores submersos e aéreos	19
3.4	Configuração em '+' dos propulsores submersos e em 'X' dos propulsores aéreos	19
3.5	Ângulo em função da direção do movimento pretendida	21
3.6	Força total gerada pelos motores para a configuração em 'X' (curva laranja) e para a configuração em '+' (curva azul)	21
3.7	Potência consumida para as diferentes direções de movimento: configuração em 'X' a azul e em '+' a vermelho	23
3.8	Configuração final dos propulsores aéreos e submersos	24
3.9	Esboço de veículo final visto de frente	25
3.10	Graus de liberdade de um AUV	26
3.11	Referencial das NED das coordenadas locais do veículo	26
3.12	Modelo de Simulink que realiza a cinemática e dinâmica do veículo	28
3.13	Constituição do bloco "Velocidade"	29
3.14	Constituição do bloco "Posição"	29
3.15	Constituição do bloco "Jacobiana"	30
3.16	Teste 1 - Movimentação recorrendo aos propulsores aéreos	31
3.17	Teste 2 - Movimentação recorrendo aos propulsores aéreos	32
3.18	Teste 3 - Movimentação recorrendo aos propulsores aéreos	32
3.19	Teste 1 - Movimentação recorrendo a ambos os sistemas de propulsão	34
3.20	Teste 2 - Movimentação recorrendo a ambos os sistemas de propulsão	34
4.1	Potência em função da força gerada pelo motor para uma tensão de operação de 20V Robotics (2023a)	38
4.2	Potência em função da força para motor a atuar em <i>reverse</i>	39
4.3	Potência em função da força para motor a atuar em <i>forward</i>	39
4.4	Diagrama que ilustra o algoritmo utilizado para descobrir a distribuição de forças ótima pelos motores submersos	43
4.5	Caso 1 - Execução do algoritmo de alocação pelos propulsores submersos	45
4.6	Caso 2 - Execução do algoritmo de alocação pelos propulsores submersos	46
4.7	Caso 3 - Execução do algoritmo de alocação pelos propulsores submersos	46
4.8	Caso 4 - Execução do algoritmo de alocação pelos propulsores submersos	47
4.9	Forças dos propulsores, componentes de τ e potência consumida	51
4.10	Curva de potência em função da força para o motor MN4116-KV450 e respetiva equação	52
4.11	Diagrama que demonstra o processo de alocação de forças para os dois sistemas de propulsão	59

4.12	Potência consumida em função da percentagem de alocação das forças para os propulsores submersos	61
4.13	Potência consumida em função da força para atuação isolada dos propulsores aéreos (vermelho), propulsores submersos (azul) e atuação simultânea dos dois tipos de propulsores (verde)	63
4.14	Curvas de alocação em função da força pretendida para cada sistema de propulsão e respectivas equações	64
4.15	Utilização de cada sistema de propulsão em função da força pretendida	65
4.16	Potência consumida em função da percentagem de alocação de binário para os propulsores submersos	66
4.17	Potência consumida em função do binário para atuação isolada dos propulsores aéreos (vermelho), propulsores submersos (azul) e atuação simultânea dos dois tipos de propulsores (verde)	68
4.18	Curvas de alocação em função do binário pretendido para cada sistema de propulsão e respectivas equações	69
4.19	Utilização de cada sistema de propulsão em função do binário pretendido	70

Lista de Tabelas

3.1	Parâmetros Hidrodinâmicos	30
4.1	Diferença entre a potência consumida com a primeira solução obtida e potência consumida com a solução obtida após a execução do algoritmo	47
4.2	Tempo de execução e número de iterações	48
4.3	Forças e orientações dos propulsores aéreos em função dos movimentos pretendidos	54
4.4	Tempo médio de execução e desvio padrão para a alocação nos propulsores aéreos	57
4.5	Comparação do consumo de potência para a utilização isolada de cada sistema de propulsão	58
4.6	Percentagem de alocação da força pretendido para cada sistema de propulsão . .	63
4.7	Percentagem de alocação do binário pretendido para cada sistema de propulsão .	67

Abreviaturas

ADMM	Alternating Direction Method of Multipliers
ASV	Autonomous Surface Vessel
AUV	Autonomous Underwater Vehicle
DP	Dynamic Programming
ESC	Electronic Speed Controllers
FCA	Fast Control Allocation
GPS	Global Positioning System
MP	Moore-Pensore
NED	North-East-Down
QP	Quadratic Programming
UAUV	Unmanned Aerial Underwater Vehicles
UAV	Unmanned Aerial Vehicle

Chapter 1

Introdução

1.1 Contexto

Com o rápido progresso das tecnologias de automação que se vive nos dias atuais, pode-se dizer que todas as áreas da ciência sofreram alterações significativas no que diz respeito às ferramentas e metodologias que utilizam. A área da exploração marítima não foi exceção, estando nela presente, uma das mais inovadoras e promissoras tecnologias da área da robótica, os veículos de superfície autônomos, mais vulgarmente designados na nomenclatura internacional por Autonomous Surface Vessels (ASV). Estes veículos têm captado a atenção da comunidade científica e até de empresas tecnológicas devido ao potencial que estes têm de revolucionar certas atividades marítimas como é o caso da monitorização ambiental, atividades piscatórias, exploração marítima, entre outros.

Como o próprio nome indica, ASV são embarcações autônomas, geralmente de pequeno porte, que operam à superfície da água, ao contrário dos AUV (Autonomous Underwater Vehicles) que operam submersos. Devido ao seu fácil transporte, longos períodos de operação, pouca manutenção e eliminação da necessidade de uma equipa de operadores humanos, não é de estranhar que estes veículos tenham ganho uma grande notoriedade. Assim, foi possível ver um desenvolvimento rápido e crescente de novos e inovadores veículos que, de uma forma simples e segura, permitem a execução de tarefas, que seriam complicados de realizar apenas com intervenção humana.

No que diz respeito às zonas de atuação destes veículos, estas podem ser divididas em zonas convencionais e zonas não convencionais. As zonas convencionais são caracterizadas por apresentarem poucas adversidades ao movimento e operação da embarcação, ou seja, zonas cuja a presença de obstáculos tanto debaixo de água como à superfície é quase nula, permitindo assim uma navegação sem grande risco de dano para a embarcação. Alguns exemplos destas zonas são lagos, oceanos, rios e grandes superfícies de água no geral.

Já as zonas não convencionais são assim designadas por possuírem um conjunto de adversidades, como por exemplo fortes correntes, condições climáticas instáveis e presenças de obstáculos, que tornam a operação do veículo mais complexa. Assim, embarcações que operem em zonas costeiras, zonas de águas rasas, pântanos, situações de calamidade, entre outras, necessitam

de um particular cuidado no seu projeto assim como um constante estudo e desenvolvimento de tecnologias que tornem as missões realizadas nestes ambientes mais seguras e eficientes. Face a estas adversidades, os desenvolvimentos que têm sido feitos nestes veículos são vastos, podendo incidir sobre os mais diversos componentes que estes possuem, como acontece com a criação de veículos com várias sistemas de propulsão, os quais se podem designar de veículos com sistema de propulsão híbrido. Contudo, considera-se que o design, configuração dos propulsores e alocação da força pelos propulsores são aqueles que são mais relevantes para o desenvolvimento de uma embarcação que opere em zonas não convencionais, devido à grande influência que estes têm na boa movimentação do veículo e no seu consumo energético.

1.2 Motivação

O trabalho desenvolvido procura sobretudo incidir em ASV's que têm como objetivo operar em zonas consideradas não convencionais, cujas características foram descritas em 1.1. Mais especificamente, pretende-se incidir sobretudo em três componentes dos ASV que se consideram cruciais para operar nestes meios, sendo estas o design da embarcação, a configuração dos seus propulsores e a alocação da força pelos propulsores.

Relativamente ao design, este tem um impacto direto e importante na hidrodinâmica, estabilidade e performance geral da embarcação. A escolha devida da forma e material que compõem o casco da embarcação ajudam a reduzir significativamente o *drag* a que este está sujeito, que por sua vez se traduz num movimento mais eficiente. Isto também leva a um tempo de operação mais longo, permitindo assim a execução de mais tarefas por parte do veículo.

Já a configuração dos propulsores refere-se ao arranjo que estes possuem. Estas configurações podem variar conforme as necessidades da embarcação, os meios onde se pretende que esta opere e também do tipo de propulsores escolhidos para a mesma. No caso de operação em zonas não convencionais, a configuração escolhida tem que ser uma que, acima de tudo, garanta uma boa manobrabilidade do veículo de modo a que seja possível mudanças de direções rápidas e movimentos eficientes em todas as direções, permitindo evitar obstáculos que possam ser encontrados pelo veículo enquanto este opera. Para isto, é também necessário ter em consideração uma configuração que permita maximizar a utilização dos propulsores disponíveis levando a uma distribuição uniforme da força pelos mesmos. Também a resistência a fatores externos como fortes correntes, vento e situações climáticas instáveis, é influenciada pela configuração, garantido assim uma maior estabilidade e controlo no movimento desejado. Consequentemente, com essa maior resistência surge um movimento mais fluido e uniforme da embarcação, ajudando assim na execução das tarefas requeridas durante a sua operação. Tendo em conta que se estão a considerar operações em zonas de grande risco para o bom funcionamento do veículo há que também considerar uma configuração que traga alguma redundância e tolerância a erros, isto é, uma configuração que, face à avaria de um propulsor por exemplo, permita que o veículo continue a sua operação sem qualquer tipo de restrição no seu movimento.

Emparelhado com o design e configuração dos propulsores, a alocação de forças pelos propulsores dos veículos é outro factor bastante relevante considerando os tipos de ambientes onde se pretende que estes operem. Isto porque, grande parte do consumo energético dos ASV é devido aos propulsores que o compõem, ou seja, se esta alocação não for eficiente pode levar a um grande consumo de potência, que por sua vez aumenta os requisitos energéticos do veículo e compromete o seu tempo de operação, podendo também resultar numa navegação mais instável. Assim, uma alocação que faça uma distribuição uniforme da força pelos propulsores levando assim a uma minimização do consumo de potência é crucial para o bom funcionamento de um ASV.

Contudo, com a evolução destes veículos, a tarefa de alocação tem-se tornado cada vez mais desafiante, dado que a grande maioria das embarcações é sobre-atuada, isto é, possui mais atuadores do que graus de liberdade. Esta sobre-atuação traz uma melhoria bastante significativa na robustez e resiliência destes veículos, dado que a redundância promovida pela existência de mais propulsores do que aqueles que seriam necessários para os graus de liberdade, permitem uma navegação mais segura da embarcação e mais tolerante a falhas.

Ainda assim, apesar de trazer vantagens, a sobre-atuação torna o problema de alocação mais complexo, dado que a existência de mais atuadores do que graus de liberdade leva muitas vezes a métodos não lineares de alocação de força que, por sua vez, podem ser bastante dispendiosos a nível computacional e difíceis de implementar em tempo real. Deste modo, é essencial que os métodos de alocação implementados dependam de algoritmos que realizem cálculos simples e que sejam facilmente replicáveis e implementados no hardware do veículo, que normalmente tem um poder computacional menor.

1.3 Objetivos

Após uma melhor compreensão dos pontos e fatores principais a ter em consideração para o desenvolvimento de um ASV que opere em zonas não convencionais, é então possível traçar um conjunto de objetivos do trabalho a ser desenvolvido:

- Projetar o modelo de uma embarcação autónoma capaz de realizar um movimento holonómico.
- Desenvolver um design para o veículo e uma configuração dos propulsores de modo a que o conjunto resulte num ASV adequado para operar em zonas hídricas não convencionais.
- Desenvolver e testar algoritmos que realizem a distribuição das forças pelos diversos propulsores do veículo de modo a minimizar a potência consumida pelo mesmo para uma maior eficiência de operação.

Chapter 2

Revisão Bibliográfica

Neste capítulo, o principal objetivo consiste em abordar trabalhos e projetos já feitos, que estão fortemente relacionados com as problemáticas descritas no primeiro capítulo. A análise destes projetos é fundamental não só para perceber os avanços que já foram realizados nos campos de interesse mas também para, com base nos resultados que estes fornecem, perceber quais os melhores métodos e ferramentas que se podem aplicar no trabalho a desenvolver.

Deste modo, para simplificar análise dos artigos, estes irão ser abordados com base em diferentes tópicos, todos eles relacionados com componentes fundamentais que constituem a embarcação e que se pretendem aprofundar com este trabalho. São os tópicos os seguintes: propulsores submersos em ASV's, propulsores aéreos em ASV's, design e configuração dos propulsores e algoritmos de alocação de forças pelos propulsores.

2.1 ASV's com meios de propulsão submersos

Estes tipos de propulsores são os mais comumente utilizados em ASV's, sendo que estes podem variar em design e modo de atuação.

Um dos propulsores que se insere neste campo e tem ganho alguma popularidade é o propulsor do tipo *water-jet*. Como o próprio nome indica, este tipo de sistema de propulsão, produz um jato de água para realizar, na maioria dos casos, a movimentação do veículo no ambiente em que este se insere ([Shen et al., 2016](#)) ([Xing et al., 2018](#)) ou para que este possa realizar um tipo de movimento específico como um salto ([Mo et al., 2019](#)). Existem também várias formas que procuram otimizar este tipo de sistema de propulsão conforme o veículo que estes vão integrar ([Odetti et al., 2019](#)) ([Jiao et al., 2019](#)).

Em ([Odetti et al., 2019](#)) os investigadores propuseram desenvolver um propulsor *water-jet* azimuthal do tipo *pump-jet*. Segundo os autores, este tipo de sistema de propulsão permite operar em águas extremamente superficiais (com uma profundidade de cerca de 50 mm) uma vez que o objetivo é que este se encontre totalmente envolvido no casco da embarcação o que faz com que a resistência a que a embarcação está sujeita no seu movimento seja reduzida. Com a utilização do motor Maxon Ec-4pole para a válvula, que opera a 36 V com uma fonte alimentação de 120 W, e

o motor azimutal Faulhaber 2232-BX, o sistema de propulsão apresentou uma força de propulsão nominal de 12.3 N e uma potência nominal de 95 W.

No caso de (Shen et al., 2016) foi desenvolvido um destes propulsores, onde se integrou o impulsor e o rotor de ímã permanente de forma conjunta, como meio de propulsão para um AUV. O propulsor desenvolvido apresentava uma velocidade nominal de rotação de 220 *rpm* levando a uma potência nominal de 970 W.

Uma característica bastante vantajosa destes tipos de propulsores é a capacidade de aceleração que estes trazem à embarcação. No trabalho desenvolvido em (Mo et al., 2019) essa aceleração é bastante notável uma vez que é utilizado nitrogénio líquido para criar pressão no tanque do propulsor e dessa forma ejetar a água. Este método permite gerar uma força máxima de propulsão de cerca de 530 N num espaço de tempo de 178 *ms*. Também a velocidade que estes propulsores proporcionam pode ser vantajosa principalmente em veículos de resgate como acontece no caso do Dolphin 1 Oceanalpha (2023), que consegue atingir uma velocidade máxima de 12 km/h. Contudo, para esta velocidade, vem um maior consumo de potência e consequentemente um tempo de operação mais reduzido, sendo esta de cerca de 30 minutos para o Dolphin 1.

Apesar de a utilização dos propulsores do tipo *water-jet* conferir uma grande capacidade de aceleração assim como um design que os torna menos suscetíveis a danos durante a operação em zonas não convencionais estes possuem consumos de potência algo elevados para as forças geradas, como se pode verificar pelos exemplos apresentados. Este consumo leva a que os tempos de operação do veículo fiquem significativamente reduzidos o que é um factor que se considera fundamental durante a operação em zonas não convencionais.

Outro tipo de sistema de propulsão que se insere no campo de propulsores submersos, sendo este o mais popularmente utilizado, não só por ASV's mas também por veículos marítimos no geral, é aquele que envolve a rotação de uma ou mais hélices para efetuar a movimentação da embarcação (Simetti and Indiveri, 2022) (Nguyen et al., 2022). No caso de (Simetti and Indiveri, 2022), o ASV em questão utiliza dois propulsores Torqeedo Cruise 2R com uma potência de 2 kW e uma eficiência de cerca de 50% cada um, assim como uma propulsão estática de 512 N.

Também é possível utilizar este tipo de propulsores de forma híbrida, isto é, aliado com outros sistemas de propulsão, como por exemplo propulsores *water-jet* (Li et al., 2022) ou no caso em que estes são simultaneamente usados como propulsores na água e em terra (Moore et al., 2018). No que toca à eficiência, os resultados dos testes aos quais o veículo foi submetido em (Li et al., 2022) mostraram que o propulsor baseado em hélice apresentou eficiências no intervalo de [41,53]% dependendo dos fatores variantes que os testes apresentavam, sendo esta eficiência maior do que aquela obtida para os *water-jet*.

Apesar de ser comum a existência de ASV's que recorrem à utilização de duas hélices como meio de propulsão, dado que a utilização de duas hélices permite uma propulsão diferencial, outra configuração possível é a utilização de uma hélice em conjunto com um leme (Kinaci et al., 2021) sendo que este último auxilia na mudança de direção do veículo, o que corresponde a uma opção mais simples e barata quando comparada à primeira apresentada. Contudo, este tipo de utilização

possui uma desvantagem que surge do feito que a rotação da hélice tem na força lateral exercida na embarcação. No caso de (Kinaci et al., 2021) esta força lateral correspondia a 3-4% da força de propulsão, que, segundo o autor é um valor baixo, podendo no entanto aumentar caso o comprimento do veículo fosse maior. É importante referir que tanto na utilização de dois propulsores em hélice lado a lado como na utilização de um propulsor em hélice em conjunto com um leme a mudança de direção de forma rápida e o movimento em *sway* ficam bastante comprometidos.

Outra aplicação deste tipo de propulsores é em veículos que operam em zonas submersas como no caso de (Cely et al., 2022). Neste exemplo, os autores escolheram os quatro propulsores T-200 da empresa BlueRobotics (Robotics, 2023a) como meios de propulsão para o veículo. Com uma máxima propulsão, para uma tensão de 20 V, de cerca de 65.9 N no sentido *forward* e uma de 49.4 N no sentido *reverse*, consumindo para esses valores uma potência de 62.4 W e 645.3 W, respetivamente, os motores mostraram uma grande eficácia nas operações realizadas pelo veículo.

Apesar destes tipos de propulsores serem mais suscetíveis a danos dado o seu formato quando comparados com os propulsores do tipo *water-jet*, verifica-se que estes têm um menor consumo de potência para a propulsão que proporcionam o que por sua vez se traduz numa maior eficiência e num tempo de operação mais longo o que é uma característica desejado em operações em zonas não convencionais. Ainda assim, é necessário ter um particular cuidado no número de propulsores em hélice a utilizar assim como na sua configuração de modo a que certos movimentos da embarcação não fiquem comprometidos.

2.2 ASV's com meios de propulsão aéreos

Apesar de os propulsores submersos serem os mais comuns em ASV, existem também exemplos deste tipo de veículos onde os propulsores usados são aéreos (da Silva et al., 2020). Estes tipos de propulsores podem ser bastante úteis, no sentido em que há um risco menor de colisões e de danos aos propulsores quando o veículo se encontra a operar em zonas costeiras ou situações de calamidades.

Para além de ASV que utilizam meios de propulsão aéreos para operar apenas em meio aquático, também se verifica a existência de ASV's híbridos (Tsai et al., 2022) (Tétreault et al., 2020) (Zufferey et al., 2019) que permitem realizar operações tanto em terra ou ar como em meio aquático ou que simplesmente usam o ar como forma de ultrapassar obstáculos. No caso de (Tsai et al., 2022) foi desenvolvido um destes casos, onde o veículo consegue alternar a sua configuração e propulsores de modo a funcionar como um ASV ou um UAV. Para que tal aconteça, o veículo possui um invólucro recolhível de material resistente à água que envolve todo o veículo quando este se encontra em meio aquático, e, possui também dois propulsores aéreos adicionais cujos eixos de rotação se ligam aos eixos dos propulsores aéreos utilizados para o veículo operar no ar permitindo deste modo uma transferência bastante eficaz de potência e um menor consumo de bateria.

Já em (Tétreault et al., 2020) o propulsor aéreo é utilizado de modo a realizar uma descolagem vertical do veículo para quando este se encontra na água a recarregar a bateria. Com um peso

total de 865 g, o veículo limita-se a usar um propulsor de 300 W e uma bateria 3S-1000 mAh para conseguir fazer a descolagem vertical e fazer a sua deslocação aérea, conseguindo atingir uma propulsão de cerca de 11 N em aproximadamente 2.5 segundos e uma altitude de 20 metros em 15 segundos.

De forma semelhante, em (Zufferey et al., 2019) o SailMAV foi projetado para conseguir atingir as zonas de missão designadas e ultrapassar obstáculos por meio aéreo, utilizando para isso duas baterias de lítio (uma em cada casco conectadas em paralelo) de quatro células e 300 mAh que fornecem uma tensão de 16 V e dois propulsores que, em meio aquático, operam a baixa velocidade e em meio aéreo operam a velocidades mais altas como seria de esperar. Para auxiliar na descolagem e na navegação do veículo tanto no ar como em água, este utiliza duas "asas" cuja configuração muda conforme o meio em que este se encontra.

Além de ASV híbridos também os Autonomous Underwater Vehicles (AUV) híbridos, vulgarmente designados por Unmanned Aerial-Underwater Vehicles (UAUV) (Tan and Chen, 2020) (Lu et al., 2019) (Zha et al., 2019) utilizam este tipo de propulsores para efetuar o seu movimento tanto em ar como debaixo de água.

Em (Tan and Chen, 2020) o veículo utiliza quatro propulsores T-MOTOR F20II-3700KV emparelhado com os Electronic Speed Controllers (ESC) T-MOTOR F35 A para efetuar a sua deslocação. Separadamente, o motor T-MOTOR F20II-3700KV possui uma máxima propulsão de 532 g (cerca de 5 N) tendo uma eficiência de 1.70 g/W para esse valor. Apesar do valor da propulsão máxima parecer baixo, este é suficiente para o peso do veículo.

Já em (Zha et al., 2019) o autor procurou sobretudo desenvolver um UAUV de pequenas dimensões (peso total de cerca de 200 g) capaz de realizar uma rápida transição entre o meio aquático e o meio aéreo e também de se aproximar de uma superfície aquática calma sem necessitar de suportes mecânicos adicionais. Para tal, foram utilizados quatro motores EMAX 7500KV juntamente com os ESC DYS 18ABLHeli S. O motor EMAX 7500 KV consegue produzir uma propulsão máxima de cerca de 330 g, que foi suficiente para o autor atingir os seus objetivos.

Como se pode verificar pelos exemplos apresentados, apesar de a maioria dos ASV e AUV utilizar exclusivamente propulsores submersos para realizar o seu movimento, a combinação destes tipos de propulsores com propulsores aéreos (criando assim um sistema de propulsão híbrido) é cada vez mais comum dada a redundância e capacidade que estes trazem de efetuar movimentos que não seriam possíveis recorrendo aos propulsores submersos. Assim, esta combinação pode ser vantajosa para um veículo que pretenda atuar em zonas não convencionais.

2.3 Configuração de propulsores e Design de Embarcações

Sendo a operação em zonas hídras não convencionais o principal obstáculo a ultrapassar com este trabalho, entende-se que a configuração dos propulsores da embarcação é um dos pontos mais importantes na projeção da mesma. Assim, procuraram-se encontrar trabalhos cuja configuração dos motores do ASV teve resultados promissores no sentido de não danificar os mesmos quando

estes se encontram no ambiente destino.

Um dos exemplos encontrados é o AERO4River, o veículo do tipo catamarã com um sistema de propulsão aéreo azimutal desenvolvido em (da Silva et al., 2020). O sistema de propulsão desta embarcação é composto por quatro hélices cuja posição angular é controlada por servo-motores de forma independentes e cujo o eixo de rotação se encontra paralelo à água, garantindo deste modo uma maior manobrabilidade na navegação.

Apesar da sua configuração robusta e alguma complexidade no que toca aos seus componentes, a embarcação, quando submetida a testes de trajetória em *open field* conseguiu cumprir as mesmas com precisão. Estes testes foram realizados num lago, pelo que a resiliência da embarcação para navegar em ambientes mais adversos não foi propriamente testada, no entanto, considera-se que a escolha de propulsores aéreos pode trazer grandes vantagens principalmente em ambientes caracterizados por águas rasas, zonas costeiras e zonas com bastantes obstáculos submersos.

Outro dos veículos cujo desenvolvimento foi particularmente feito para missões em ambientes adversos é o Shallow Water Autonomous Multi-Purpose Platform desenvolvido (Odetti et al., 2020), vulgarmente conhecido por SWAMP. Trata-se de uma embarcação constituída por dois cascos projetados para incluir quatro propulsores azimutes (dois por cada casco) do tipo Pump-Jet 360°. Uma das características interessantes desta embarcação é que cada casco foi concebido para funcionar como uma embarcação própria, isto é, cada casco contém os seus próprios propulsores, sistema de navegação, sistema de Global Positioning System (GPS) e sistema de controlo o que faz com que eles funcionem quase como dois ASV's independentes. Isto também permite que, caso haja uma falha num dos sistemas de um casco, o outro possa assumir o controlo da embarcação ainda que de forma não tão eficiente.

Outra configuração de motores bastante comum em ASV consiste na utilização de dois motores na traseira do veículo (Li et al., 2019) (Simetti and Indiveri, 2022). Tanto em (Li et al., 2019) como em (Simetti and Indiveri, 2022) a embarcação em questão não possuía um leme, portanto, a direção da embarcação é controlado por um mecanismo de direção diferencial que requer como *inputs* a velocidade de rotação de cada hélice. Deste modo, se a embarcação quiser alterar a sua direção, a velocidade de rotação de cada hélice terá que ser diferente.

Apesar do sistema de propulsão destas embarcações ser mais simples e requerer menos motores, estas apresenta uma clara desvantagem no que toca à movimentação lateral do veículo. Outra grande desvantagem desta configuração está relacionada com o facto de que a utilização de hélices afeta o movimento e mudanças de direção da embarcação devido ao "paddle wheel effect" (Simetti and Indiveri, 2022). Este fenómeno faz com que a embarcação se desloque na direção de rotação das hélices, sendo que este efeito pode ser exacerbado quando se têm duas hélices a girar no mesmo sentido. Isto faz com que seja mais complicado controlar o veículo quando, por exemplo, o objetivo é mantê-lo numa posição estacionário ou quando se quer que esta se movimente contra correntes.

Já em (Frank et al., 2016) é possível verificar que a embarcação possui quatro propulsores com hélice, estando estes configurados em forma de 'X', ou seja, dois propulsores na parte da

frente do veículo, lado a lado, e os outros dois na parte de trás também lado a lado. Para além desta configuração, outra particularidade é o ângulo fixo de 45° que os propulsores apresentam face a *surge*. Segundo (Frank et al., 2016), a utilização de quatro propulsores aliado com as orientações que estes apresentam traz uma maior manobrabilidade ao veículo e também uma maior redundância, permitindo que o ASV tenha manobrabilidade mesmo em caso de falha de um dos propulsores.

De uma forma semelhante à embarcação em (Frank et al., 2016), o HEKTOR (Kapetanović et al., 2021), que é composto por três subveículos, sendo um deles um ASV (Korkyra), utiliza quatro propulsores com hélice T200 numa configuração em X que conferem uma velocidade entre 1 a 2 nós ao veículo, e um outro propulsor Minn Kota RT 55 EM cujo o principal objetivo é conferir algum 'boost' na velocidade do veículo elevando esta mesmo até as 3-4 nós. Contudo, apesar das semelhanças com (Frank et al., 2016), todos os propulsores utilizados pelo Korkyra apresentam uma orientação normal, isto é, de 0° face a *surge*. No ASV são também utilizadas doze baterias de 14.8 V, 18 Ah que permitem uma autonomia entre 4-5 horas, o que pode ser vantajoso em ambientes adversos.

Outra característica importante para estes veículos é facto de estes terem que possuir um design propício à navegação em ambientes não convencionais (Sanfilippo et al., 2021), mais especificamente, em águas rasas ou que possuem diversos obstáculos submersos. No caso de (Sanfilippo et al., 2021), o veículo apresenta dimensões bastante reduzidas (360mm de comprimento, 285mm de largura e 135mm de altura) quando comparado com a maioria dos outros ASV's já mencionados, sendo que uma das características que o torna interessante é o facto de este só se encontrar submerso cerca de 50mm em água e ter um peso de 3kg tornando-o bastante fácil de transportar.

Pelos exemplos apresentados, é possível concluir que a utilização de várias propulsores que leve a um veículo sobre-atuado é vantajosa, dado que traz consigo uma maior manobrabilidade à embarcação e sobretudo uma redundância que resulta num veículo mais tolerante a falhas. Quanto à configuração dos propulsores, a configuração em 'X' mostrou não trazer nenhum entrave ao movimento em qualquer grau de liberdade dos veículos, sendo que se esta estiver aliada com uma orientação de 45° dos propulsores pode trazer uma grande eficiência de movimento ao veículo.

2.4 Algoritmos de Thruster Allocation

Um dos principais desafios que é encontrado no desenvolvimento de veículos autónomos consiste na boa gestão do consumo de potência de modo a melhorar a autonomia e eficiência dos mesmos.

Para além da escolha do material das baterias e motores a serem utilizados serem essenciais, também os algoritmos que realizam a distribuição das forças pelos diversos motores dos veículos de forma rápida, com pouco despesa computacional e de modo a minimizar o máximo possível o consumo energético representam um fator muito importante, até porque podem futuramente, serem aplicados em veículos de dimensões bastante superiores.

Há também que considerar que estes algoritmos não são apenas aplicados a ASV ou AUV mas podem ser também estendidos para veículos terrestres (East and Cannon, 2019) (East and Cannon, 2018) e veículos aéreos (Smith, 2017).

No trabalho desenvolvido em (East and Cannon, 2018) os autores procuraram abordar o problema de gestão de energia de um veículo elétrico a partir de um algoritmo conhecido como Alternating Direction Method of Multipliers (ADMM). Este algoritmo, procura abordar o problema de otimização convexa, que tem como objetivo encontrar o mínimo de uma função convexa sujeita a certas restrições, de forma a que esta seja dividido em parcelas independentes umas das outras. Isto permite atingir a solução ótima do problema de forma mais fácil e rápida. Quando comparado com um algoritmo semelhante que utiliza técnicas de Dynamic Programming (DP), o ADMM convergiu para uma solução ótima após 1.5 s, enquanto que o algoritmo de DP, para obter uma solução com o mesmo nível de precisão demorou 115.8 s, o que se traduz numa diferença de duas ordens de magnitude.

Já em (East and Cannon, 2019), procurou-se também desenvolver um método de gestão de energia de um veículo elétrico, sendo que neste caso o algoritmo desenvolvido baseia-se na técnica do Ponto Interior, cuja função é também resolver problemas de otimização convexa. Neste caso, o algoritmo parte de uma solução inicial viável e utiliza uma função de barreira logarítmica para modelar as restrições do problema. De seguida este segue iterativamente um caminho central dentro da região viável, minimizando a função de barreira. A cada iteração, é aplicado o método de Newton para atualizar a solução atual, levando a uma aproximação da solução ótima. As iterações continuam até que os critérios de convergência sejam atendidos, fornecendo, por fim, a solução ótima para o problema original. Os autores decidiram testar o desempenho deste algoritmo comparando-o ao método desenvolvido em (East and Cannon, 2018) assim como a outro software de otimização convexa CFX. Os resultados obtidos mostraram que, quando os algoritmos foram submetidos aos mesmos tipos de testes, o algoritmo de ADMM apresentou tempos de convergência a rondar os 0.5 s enquanto que o algoritmo de ponto interior teve tempos de convergência todos próximos dos 6 s, demonstrando assim uma diferença de uma ordem de magnitude. Já o software de otimização convexa CFX apresentou tempos de convergência perto dos 100 s, o que é uma diferença bastante significativa quando comparado aos tempos de convergência dos outros dois métodos. Ainda assim, apesar de possuir um tempo de convergência mais lento, o algoritmo de ponto interior apresentou mais precisão nos seus resultados que o ADMM.

Também nos casos descritos em (Wang et al., 2017) e (Klintberg and Gros, 2016) se utilizou um método semelhante ao Ponto Interior, descrito pelos autores como *Primal-dual Interior-point Method*. Este algoritmo provém do método do Ponto Interior e é sobretudo utilizado para resolver problemas de programação linear. O algoritmo envolve explicitamente o problema dual e visa reduzir a *dual gap*. Este problema dual envolve a formulação de uma nova função objetivo, chamada função dual, que está associada às restrições impostas na função objetivo. A ideia passa por encontrar os melhores multiplicadores para as restrições da função objetivo. Já a *dual gap* indica a diferença entre as soluções atuais para a função objetivo e para a função dual. Assim, Se se tiver $dual\ gap > 0$, então a solução obtida não é ótimo, podendo existir melhorias nos valores encon-

trados tanto para a função objetivo como para a função dual, no entanto, se se tiver uma *dual gap* muito próximo de 0 significa que a solução atual satisfaz tanto as condições impostas pela função objetivo como as da função dual considerando-se assim que se encontrou a solução ótima para o problema de otimização. No caso de (Wang et al., 2017) este método foi utilizado para otimizar a distribuição de energia de um sistema híbrido de armazenamento de energia, tendo sido possível atingir valores de *dual gap* muito próximos de 0, após 40 iterações.

Em (Santos et al., 2022) os autores desenvolveram um algoritmo ao qual estes chamaram de Fast Control Allocation (FCA) que procurou dividir o problema de otimização não linear descrito, em parcelas lineares acopladas entre si, permitindo assim uma resolução com cálculos mais simples e que recorre a menos recursos computacionais. Quando submetido a testes e comparado com o Interior Point Algorithm, o FCA apresentou uma convergência para a solução ótima que foi, em média, cerca de 130 vezes mais rápida que o Interior Point Algorithm. Relativamente à precisão da solução obtida, também o FCA apresentou melhores resultados do que o Interior Point Algorithm, tendo um erro quadrático médio na ordem de 10^{-20} enquanto que o último teve na ordem dos 10^{-10} .

Para além de realizarem uma distribuição eficiente da força pelos propulsores do veículo, estes algoritmos podem também ter um papel importante para casos onde possam existir possíveis falhas nos propulsores (Baldini et al., 2018) (Lin et al., 2018). No caso de (Baldini et al., 2018) a equação matricial que representava as forças de cada grau de liberdade em função das forças de cada propulsor era dada por:

$$\tau = Bu \quad (2.1)$$

onde τ representa o vetor das forças de cada grau de liberdade, u é o vetor que representa as forças geradas pelos propulsores e B é a matriz dos coeficientes que caracteriza o sistema. Contudo, para ter em conta as possíveis falhas nos propulsores, os autores adicionaram à equação 2.1 a seguinte matriz:

$$W = \text{diag}\{w_1, w_2, w_3, w_4\} \quad (2.2)$$

onde se tem que $w_i \in]0, 1]$, para $i = 1, \dots, 4$ dado que existem quatro propulsores. Com isto tem-se que:

$$w_i = \begin{cases} 0 < w_i < 1 & \text{se o propulsor } i \text{ tiver uma falha} \\ 1 & \text{se o propulsor } i \text{ não tiver uma falha} \end{cases} \quad (2.3)$$

Isto leva a que a equação 2.1 seja reescrita da seguinte forma:

$$\tau = BWu \quad (2.4)$$

Assim, caso haja uma falha no propulsor i , o peso correspondente da variável w_i leva a que haja um ajuste na maneira como a força é distribuída pelos propulsores, procurando na mesma fazer esta distribuição da maneira mais eficiente possível.

Chapter 3

Design da embarcação e configuração dos propulsores

Neste capítulo, procurou-se sobretudo determinar qual o melhor design para o casco da embarcação assim como qual a melhor maneira de distribuir os propulsores de modo a tornar a operação do veículo mais eficiente. Assim, fatores como holonomia, força máxima atingida com base nos propulsores utilizados e consumo de potência foram analisados para que, no final, recorrendo às equações de cinemática e dinâmica do veículo, se procedesse à modelação do mesmo. Desenvolvido o modelo, efetuaram-se várias simulações de forma a testar se parâmetros como velocidade linear, velocidade angular, posição e posição angular se comportavam conforme o esperado face às forças que cada propulsor gerava.

3.1 Design da embarcação

Face aos problemas apresentados, um dos principais focos quando se desenvolve estes veículos é certificar que o design do mesmo vai de encontro aos requisitos necessários para que este possa operar em zonas não convencionais, isto é, o design do veículo deve ser concebido de modo a minimizar a possibilidade de este ter algum tipo de problema enquanto estiver a operar. Para isso, fatores como altura, peso, configuração dos motores, forma do casco e os parâmetros hidrodinâmicos, como por exemplo os coeficientes de atrito do veículo devem-se ter em consideração.

Um dos veículos cuja arquitetura se mostra adequado para zonas não convencionais é H2Omni-X desenvolvido pela empresa croata H2O Robotics [Robotics \(2023b\)](#). Uma das características que torna este veículo interessante para as aplicações mencionadas é o facto de este possuir uma altura de apenas 385mm, sendo que, se se considerar que apenas metade do veículo se encontra verdadeiramente submerso, então, em situação de operação este tem uma altura de 193 mm. Para além desta baixa altura conferir uma grande facilidade à embarcação em passar por baixo de obstáculos, há que também ter em consideração que apenas 192mm da mesma se encontra verdadeiramente submerso, permitindo deste modo a operação do veículo em zonas costeiras ou

zonas caracterizados por águas rasas. Assim, irá-se considerar que o veículo que se pretende projetar, possui um design semelhante ao do H2Omni-X, ou seja, com um formato circular e achatado, semelhante a um disco, uma vez que estas características assentam melhor para o tipo de missões que se pretendem realizar. Também, tal como no caso do H2Omni-X, considerar-se-á que estes possui quatro propulsores submersos fixos que efetuam o movimento do veículo. É importante referir que apesar do design da embarcação estar bastante relacionada com o H2Omni-X, este tipo de análise poderia ser feita para outros tipos de ASV's desde que as suas características favoreçam operações em zonas não convencionais.

Outro factor a considerar para o desenvolvimento de um veículo deste tipo são os seus parâmetros hidrodinâmico uma vez que estes têm uma grande influência no seu funcionamento, sendo que os principais a ter em conta neste caso são os coeficientes de atrito para os movimentos de translação, quer frontal quer lateral, e o movimento de rotação do veículo sobre o seu eixo. Estes coeficientes são designados na literatura como X_u , Y_v e N_r , respetivamente.

Devido à forma circular que se está a considerar para o veículo pode-se facilmente concluir que, independentemente do movimento ser na direção frontal ou lateral, o arrasto ou *drag* será o mesmo, pelo que se pode assumir que os coeficientes X_u e Y_v são aproximadamente iguais. Esta igualdade não só facilita a implementação da dinâmica e das equações de movimento do veículo como faz com que o movimento do mesmo seja mais fluido e uniforme, uma vez que as forças necessárias para a movimentação lateral e frontal serão as mesmas.

Apesar das vantagens já referidas do design que se está a considerar é importante referir que apenas se estão a considerar propulsores submersos para a deslocação do veículo. Mesmo estando estes a pouca profundidade permitindo, como já mencionado, operar em águas rasas, existe sempre a possibilidade de colisão com obstáculos submersos, entrada de pequenos galhos ou pedras nos propulsores se este operar em zonas pantanosas, entre outras adversidades, que podem levar a um mau funcionamento do veículo que por sua vez pode comprometer a operação do mesmo.

Assim o objetivo passa agora por encontrar uma solução para estas adversidades sem que esta ponha em causa todas as outras vantagens a nível de design já mencionadas. Visto que o formato do veículo é favorável para operar em zonas não convencionais, a solução encontrada passa pela adição de propulsores. Uma vez que a adição de propulsores submersos ao veículo não iria resolver os problemas apresentados, a solução proposta passa pela adição de quatro propulsores aéreos ao veículo considerado, semelhantes aos existentes em (da Silva et al., 2020), criando assim uma embarcação híbrida, que resulta essencialmente da junção de um ASV de forma circular cuja a operação dependia exclusivamente de propulsores submersos, com um ASV cuja a operação dependia exclusivamente de propulsores aéreos, criando assim, um ASV cuja propulsão pode ser efetuado por cada um destes sistemas individualmente ou pelos dois sistemas em simultâneo. Da mesma forma que em (da Silva et al., 2020), os quatro propulsores iriam possuir a capacidade de alterar a sua orientação em função do movimento pretendido, levando assim a uma maior manobrabilidade no veículo.

Esta solução permite, não só minimizar os riscos aos quais os motores submersos são expostos, como também auxiliar na deslocação, rapidez e manobrabilidade da embarcação quando estes se

encontram a operar.

Ainda que a adição dos propulsores aéreos venha resolver o problema de operação em águas rasas, este traz uma agravante consigo. Se se considerar um sistema de propulsores aéreos semelhantes ao apresentado em (da Silva et al., 2020) é fácil verificar que existe um acréscimo significativo na altura da embarcação, o que por sua vez pode-se apresentar como um desafio em certas missões onde, por exemplo, seja necessário passar por debaixo de um obstáculo ou entrar numa gruta numa zona costeira.

Deste modo, seria interessante, para ultrapassar esta adversidade, a possibilidade de, quando os propulsores aéreos não se encontrarem em funcionamento, baixar os "braços" aos quais estes se encontram ligados, como está representado na figura 3.1, reduzindo assim a altura total do veículo o que facilita as missões nas situações descritas. A adição deste novo recurso, exigia obviamente a utilização de quatro servo-motores que provocariam a descida dos propulsores aéreos.

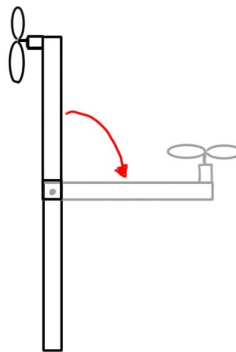


Figura 3.1: Esboço do funcionamento dos braços necessários para baixar os propulsores aéreos

Deste modo, o veículo proposto seria composto por oito propulsores, quatro submersos e quatro aéreos, sendo que os propulsores submersos possuem uma orientação fixa enquanto que os aéreos conseguem alterar a sua orientação. Estes dois sistemas de propulsores podem funcionar de forma isolada ou em conjunto, existindo ainda a possibilidade de quatro atuadores adicionais que permitissem baixar os propulsores aéreos diminuindo a altura total do veículo, tornando-o desta forma mais preparado para operar em zonas de risco.

3.2 Configuração dos Propulsores

Um dos desafios apresentados para o desenvolvimento deste veículo assentava na configuração dos seus propulsores. Este problema foi apenas explorado para os propulsores submersos uma vez que, por uma questão de simplicidade e devido à existência de servo-motores que permitem a mudança de direção nos quais os propulsores aéreos atuam, optou-se por considerar que a configuração destes últimos é igual à apresentada em (da Silva et al., 2020). Ou seja, no veículo proposto os propulsores aéreos, quando vistos de cima, teriam uma configuração semelhante à apresentada em

3.2, em que as cruzes vermelhas representam esses mesmos propulsores e f_1 , f_2 , f_3 e f_4 são as notações escolhidas para cada propulsor.

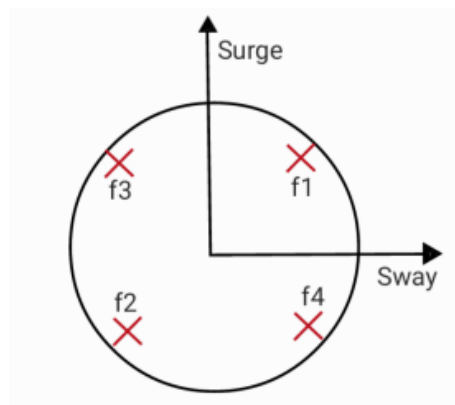


Figura 3.2: Configuração escolhida para os propulsores aéreos

Face a isto, procurou-se analisar duas soluções para a configuração dos propulsores submersos. Na primeira configuração, considerou-se que os propulsores se encontravam no mesmo eixo, isto é, alinhados com os propulsores aéreos, levando assim a uma configuração em forma de 'X' como é demonstrado pela figura 3.3. As circunferências azuis representam os propulsores submersos do veículo e f_5 , f_6 , f_7 e f_8 são as notações consideradas para cada propulsor submerso. As cruzes vermelhas representam, mais uma vez, os propulsores aéreos. Da mesma maneira que acontece no H2Omni-X, considera-se que estes propulsores possuem uma orientação fixa, o que leva a que, nesta configuração, estes estejam orientados segundo um ângulo de 45° face a *surge*, gerando assim as forças que se encontram representadas na figura 3.3 pelas setas verdes e vermelhas. As setas verdes representam as forças geradas pelo modo de atuação positivo (*forward*) do motor, enquanto que as vermelhas representam as setas geradas pelo modo de atuação negativo do motor (*reverse*). Isto leva a concluir que caso o veículo queira efetuar apenas movimentos de translação da forma mais eficiente possível, terá que ter sempre dois motores atuar em *forward* enquanto que os outros dois atuam em *reverse*. Os motores a atuar em *forward* ou *reverse* variam conforme o movimento pretendido.

Já no segundo caso considerou-se que os propulsores submersos se encontravam desfasados 45° relativamente aos aéreos ficando deste modo em eixos diferentes, assumindo assim uma configuração em forma de '+', como se pode verificar pela figura 3.4. Nesta configuração os dois propulsores laterais f_5 e f_7 encontram-se orientados segundo *surge* enquanto que os propulsores f_6 e f_8 encontram-se orientados segundo o eixo *sway*.

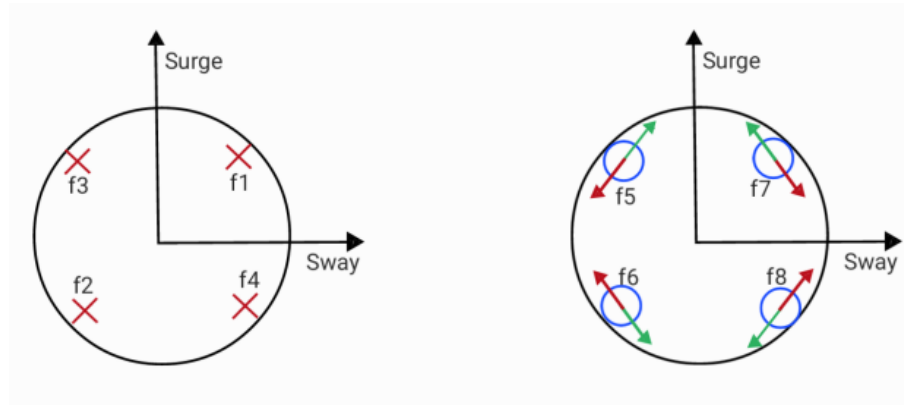


Figura 3.3: Configuração em 'X' dos propulsores submersos e aéreos

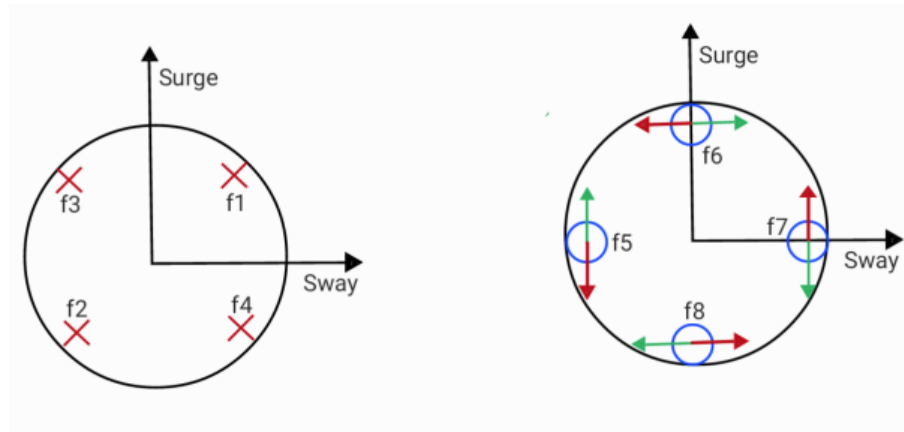


Figura 3.4: Configuração em '+' dos propulsores submersos e em 'X' dos propulsores aéreos

Quanto aos critérios de seleção para a melhor configuração, optou-se por selecionar os dois fatores mais relevantes para o tipo de missões que se pretende realizar com o veículo, sendo estes a velocidade e o consumo de potência do mesmo.

Relativamente à velocidade do ASV, a análise é bastante simples, sendo apenas necessário recorrer às equações que caracterizam cada grau de liberdade para as diferentes configurações para perceber qual é que seria aquela que permitia que o veículo atingisse uma maior velocidade.

Se se considerar que em ambos os casos, os propulsores estão a fornecer a máxima força para atuar em *surge* ou em *sway* então tem-se que no caso da configuração em 'X' a máxima força é dada por:

$$F_{X/Ymax} = (f_{max} + f_{max} + f_{max} + f_{max}) \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} \Leftrightarrow F_{X/Ymax} = 2 \cdot f_{max} \cdot \sqrt{2} \quad (3.1)$$

Em que o factor $\frac{\sqrt{2}}{2}$ surge devido à orientação de 45° que os propulsores têm.

No caso da configuração em '+' essa mesma máxima força é dada por:

$$F_{X/Ymax} = f_{max} + f_{max} \Leftrightarrow F_{X/Ymax} = 2 \cdot f_{max} \quad (3.2)$$

Daqui, é possível concluir que, no que toca a movimentos que não envolvem a rotação do veículo sobre o seu próprio eixo, ou seja, movimentos retilíneos, a configuração em 'X' é a que garante uma maior força e consequentemente uma maior velocidade.

Já para efetuar o movimento de rotação sobre o seu eixo, ou seja, atuar em *yaw*, e considerando mais uma vez que os propulsores se encontram a operar com a máxima força, a equação para a configuração em 'X' é dada por:

$$F_{yawMax} = (f_{max} + f_{max} + f_{max} + f_{max}) \cdot l \Leftrightarrow F_{yawMax} = 4 \cdot f_{max} \cdot l \quad (3.3)$$

Na configuração em '+' essa força é dada por:

$$F_{yawMax} = (f_{max} + f_{max} + f_{max} + f_{max}) \cdot l \Leftrightarrow F_{yawMax} = 4 \cdot f_{max} \cdot l \quad (3.4)$$

Nas equações acima apresentadas l representa a distância do ponto de aplicação da força até ao centro de rotação do veículo. No caso do ASV em questão tem-se que l é igual ao raio do veículo uma vez que se considera que os propulsores atuam nas extremidades da embarcação.

Também por estas equações, facilmente se conclui que a velocidade de rotação do veículo é igual independentemente da configuração escolhida para os motores submersos, pelo que apenas as velocidades lineares, isto é, as velocidades em *sway* e *surge*, devem ser consideradas para decidir qual a melhor configuração possível.

Para uma visualização gráfica do que representam as equações apresentadas, decidiu-se analisar a variação da força máxima que o veículo consegue gerar para cada direção de movimento, sendo que estas direções são definidas por ângulos dentro do intervalo $[0^\circ, 360^\circ]$ onde para um ângulo igual a 0° o veículo atua em *surge* no sentido positivo (North), e para um ângulo de 90° este atua em *sway* no sentido positivo (East) também. A figura 3.5 representa de forma simples o ângulo em função da direção do veículo:

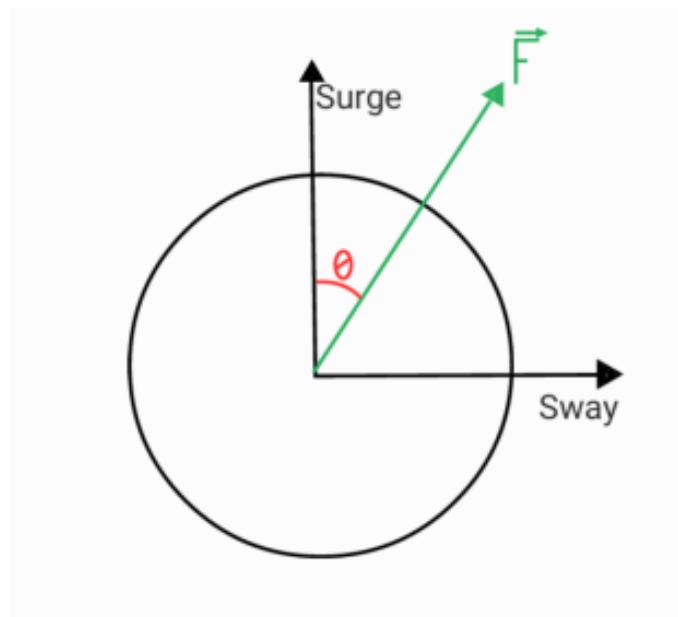


Figura 3.5: Ângulo em função da direção do movimento pretendida

Para tal considerou-se que a força máxima que cada propulsor consegue fornecer é de 50 N. Os resultados obtidos estão representados na figura 3.6:

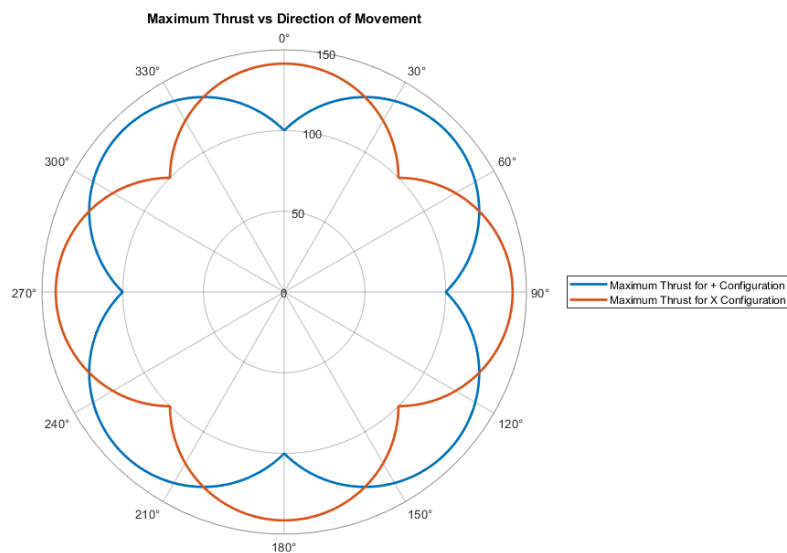


Figura 3.6: Força total gerada pelos motores para a configuração em 'X' (curva laranja) e para a configuração em '+' (curva azul)

Pelo gráfico da figura 3.6, verifica-se um desfasamento de 45° entre as duas curvas. Esse desfasamento pode ser facilmente explicado pelo facto de que na configuração em 'X' os propulsores apresentarem também um desfasamento de 45° face à configuração em '+'. Isto leva a que, quando

o veículo atua em *surge* por exemplo, ele utilize os quatro propulsores na configuração em 'X' enquanto que na configuração em '+' utiliza apenas dois propulsores. Naturalmente, isto leva a que se consiga gerar uma maior força com a configuração em 'X'. Da mesma maneira, se o veículo se quiser deslocar segundo uma orientação de 45° , a configuração em '+' irá agora gerar uma maior força uma vez que neste caso utilizaria os quatro propulsores, enquanto que com a configuração em 'X' utilizaria apenas dois. Com este gráfico é também possível validar a lógica por detrás das equações obtidas uma vez que para a configuração em 'X' verifica-se que, para um $\theta = 0^\circ$, a força total obtida é superior à força total obtida na configuração em '+' por um factor de $\sqrt{2}$ (cerca de 30%). Essa mesma superioridade na força total obtida acontece para a configuração em '+' quando se tem que $\theta = 45^\circ$, como já seria de esperar. Esta grande diferença na força total gerada traduz-se também numa grande diferença na velocidade que o veículo pode atingir que, tal como já foi referido, é um factor relevante para o bom funcionamento do mesmo. Deste modo, devido ao valor de força significativamente superior obtido para a configuração em 'X' quando o veículo atua em *surge* e *sway* pode-se dizer que esta é a melhor quando se tem em consideração a velocidade do mesmo. Outra grande vantagem da configuração em 'X' assenta no facto de que, apesar de os propulsores utilizados serem fixos, a sua orientação de 45° leva a que se consiga atingir a mesma máxima força na deslocação lateral e frontal como demonstrado pelo gráfico da figura 3.6. Sendo este tipo de deslocações aquelas que são predominantes neste tipo de veículos, é possível afirmar que esta orientação de 45° em propulsores fixos, traz uma homogeneidade e uniformidade no movimento e rapidez do veículo que não conseguiria ser atingida com a configuração em '+' ou com uma orientação diferente da proposta.

Quanto à potência consumida, sabe-se que para a atuação em *yaw* esta será sempre igual para ambas as configurações pelo que não será um fator a considerar para a escolha da configuração. Contudo, para movimentos retilíneos em diferentes direções o consumo de potência sofre variações devido às diferentes forças geradas pelos propulsores para realizar esses mesmos movimentos. Deste modo, decidiu-se fazer a mesma análise que se fez para a máxima força que o veículo consegue gerar mas desta vez para o consumo de potência do veículo para cada direção de movimento. Para tal, considerou-se uma força total de $\vec{F}=25\text{ N}$, onde, consequentemente se tem que a força em x é dada por $F_x = F \cdot \cos(\theta)$ e a força em y é dada por $F_y = F \cdot \sin(\theta)$. Os resultados obtidos encontram-se na figura 3.7:

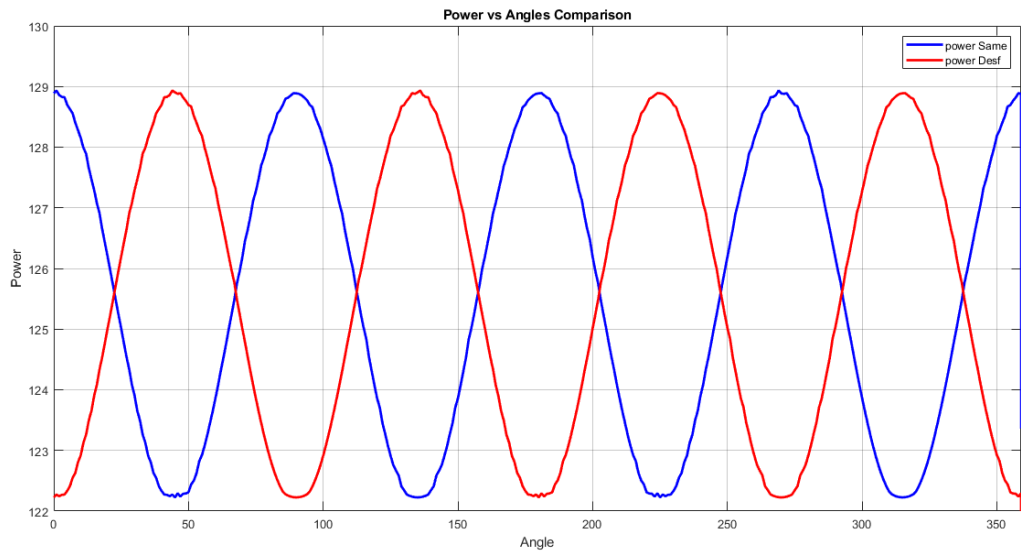


Figura 3.7: Potência consumida para as diferentes direções de movimento: configuração em 'X' a azul e em '+' a vermelho

Analisando primeiro a configuração dos motores em 'X' verifica-se que o consumo de potência é mais elevado para θ mais próximos dos 0° , 90° , 180° , 270° e 360° enquanto que para θ próximos de 45° , 135° , 225° , 315° o consumo atinge valores mais baixos. Este fenómeno pode ser explicado devido ao facto de que para o primeiro conjunto de valores de θ o veículo utiliza os quatro propulsores submersos, dois a atuar em *reverse* e dois a atuar em *forward*, para realizar o seu movimento, como se pode verificar no esquema da figura 3.3, fazendo uma distribuição mais ou menos uniforme das forças por cada motor, pelo que, com a utilização de quatro motores espera-se que a potência consumida seja maior. Também a orientação de 45° dos propulsores contribui para este maior consumo uma vez que é necessário estes gerarem uma maior força para que o veículo se mova frontalmente e lateralmente. Já para o segundo conjunto de valores de θ , é possível observar também pelo esquema da figura 3.3, que o movimento de veículo depende quase exclusivamente de dois motores, um a atuar em *reverse* e outro a atuar em *forward*, que por sua vez se encontram orientados na direção pretendida, pelo que se espera que a potência consumida seja menor.

Relativamente à curva obtida para a configuração dos motores em '+', esta apresenta um desfasamento de 45° face à curva obtida para a configuração em 'X' pelo que agora os picos são atingidos para valores de θ mais próximos de 45° , 135° , 225° e 315° enquanto que os valores mais baixos são obtidos para valores de θ mais próximos de 0° , 90° , 180° , 270° e 360° . Este desfasamento de 45° era expectável e é facilmente explicado pelo facto de na configuração em 'X' os propulsores apresentarem também um desfasamento de 45° face aos propulsores na configuração em '+'. Assim, da mesma maneira que na configuração em 'X' se utilizavam os quatro propulsores para se realizar o movimento para um θ próximo de 0° e praticamente dois motores para um θ próximo de 45° , esse mesmo fenómeno irá acontecer agora para a configuração em '+' mas para

valores de θ mais próximos de 45° e 90° , respetivamente.

Face a estes resultados pode-se concluir que para a atuação do veículo em *surge* e em *sway* a configuração em 'X' é efetivamente mais dispendiosa a nível do consumo de potência do que a configuração em '+' pelo que se podia afirmar que esta última seria a melhor configuração visto que a movimentação do veículo nestas duas direções é bastante importante e provavelmente será aquela que eles mais vezes irá realizar.

Ainda assim, pelo gráfico da figura 3.7 verifica-se que esta diferença no consumo de potência não é assim tão significativa ao ponto de se descartar totalmente a configuração em 'X' uma vez que a diferença entre os valores máximos e mínimos é de cerca de 6%.

Concluindo, após a análise do consumo de potência e força total gerada pelo veículo, e atendendo à pouca diferença que existia no consumo de potência para as diferentes configurações em contraste com a diferença elevada que existia na força total obtida, principalmente nos casos de deslocação lateral e frontal, conclui-se que a configuração em 'X' é a melhor a utilizar para os motores submersos, ficando assim os motores submersos no mesmo eixo, ou seja alinhados, com os propulsores aéreos. As figuras 3.8 e 3.9 mostram o esboço final do veículo visto de cima e visto de frente, respetivamente:

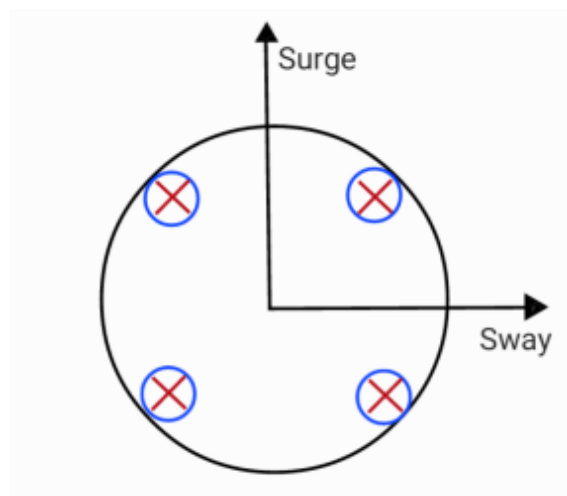


Figura 3.8: Configuração final dos propulsores aéreos e submersos

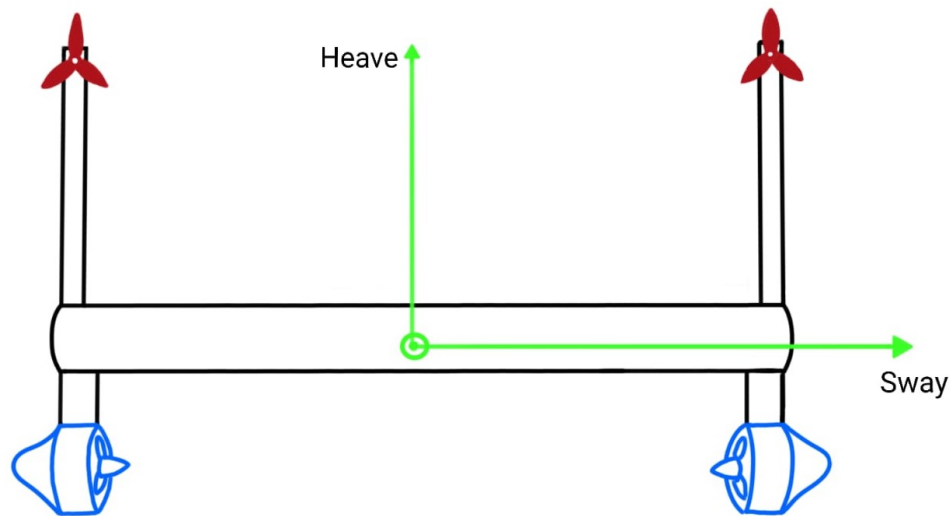


Figura 3.9: Esboço de veículo final visto de frente

3.3 Modelo de Simulação do ASV

Após decidir a configuração e design final do veículo, estavam reunidas as condições necessárias para se proceder ao desenvolvimento da cinemática e dinâmica do mesmo.

Tipicamente, quando se fala em AUV's, considera-se que estes possuem seis graus de liberdade, isto é, seis possibilidades de atuação, sendo estas designadas na nomenclatura habitual de *sway*, *surge*, *roll*, *pitch*, *yaw* e *heave*, como demonstrado pela figura 3.10. No entanto, visto que os ASV's, como o próprio nome indica, atuam à superfície da água, as possibilidades de atuação são mais reduzidas, sendo possível negligenciar os graus de liberdade *pitch*, *heave* e *roll*, o que leva a que a maioria dos ASV's possua dois ou três graus de liberdade. No caso da ASV considerado, devido à configuração escolhida para os propulsores submersos e à possibilidade que os propulsores aéreos têm de mudar a sua orientação, existe a possibilidade deste atuar em *surge*, *sway* e *yaw* o que leva à conclusão que este possui três graus de liberdade.

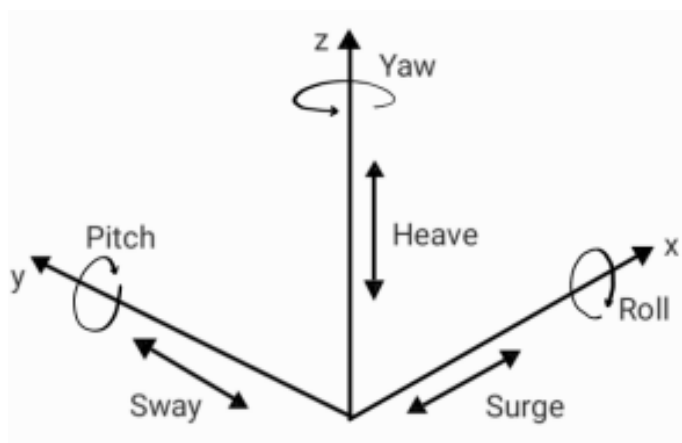


Figura 3.10: Graus de liberdade de um AUV

Para o referencial das coordenadas locais do veículo adotou-se o referencial NED (North East Down), representado na figura 3.11:

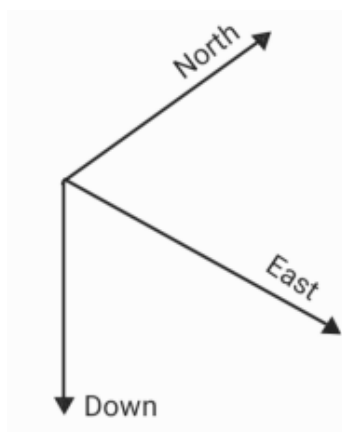


Figura 3.11: Referencial das NED das coordenadas locais do veículo

Deste modo, se se pretender que o veículo atue em *surge* com uma força total de $15N$ então sabe-se que este se encontra a atuar no sentido *North* que por sua vez corresponde ao sentido positivo da deslocação frontal. Da mesma maneira, se se pretender que o veículo atue em *sway* com uma força total de $-20N$, então este estaria a atuar no sentido *West* que corresponde ao sentido negativo da deslocação lateral. Relativamente, à atuação em *yaw*, segundo a notação NED, o sentido positivo de rotação é o sentido horário.

Dada a existência dos três graus de liberdade descritos, então pode-se dizer que os vetores de posição e velocidade do veículo são $\eta = [x, y, \psi]$ e $v = [u, v, r]$, respetivamente. Os valores x, y e ψ representam a posição inercial e angular do veículo, respetivamente, enquanto que os valores u, v, r representam as velocidades lineares e angular do veículo, respetivamente.

Com isto, e seguindo o trabalho desenvolvido por Thor I. Fossen ([Fossen, 1999](#)) onde são descritos as equações gerais de cinemática e dinâmica de veículos marítimos, estas mesmas equações para o nosso veículo são as seguintes:

$$M\dot{\mathbf{v}} + N(\mathbf{v})\mathbf{v} = \boldsymbol{\tau} \quad (3.5)$$

$$\dot{\boldsymbol{\eta}} = J(\boldsymbol{\eta})\mathbf{v} \quad (3.6)$$

onde $\mathbf{M} \in \mathbb{R}^3$ representa a matriz inercial, $N(\mathbf{v}) \in \mathbb{R}^3$ representa a matriz de amortecimento hidrodinâmico, $\boldsymbol{\tau} \in \mathbb{R}^3$ é o vetor de forças de cada grau de liberdade e $J(\boldsymbol{\eta}) \in \mathbb{R}^3$ é a matriz Jacobiana.

As matrizes e vetores mencionadas anteriormente são compostas pelos seguintes parâmetros:

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m - X_{\dot{u}} & 0 & 0 \\ 0 & m - Y_{\dot{v}} & 0 \\ 0 & 0 & I_Z - N_{\dot{r}} \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

$$J(\boldsymbol{\eta}) = \begin{bmatrix} \cos(\psi) & -\sin(\psi) & 0 \\ \sin(\psi) & \cos(\psi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

$$\boldsymbol{\tau} = \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ \tau_\psi \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

$$N(\mathbf{v}) = \begin{bmatrix} -X_u & 0 & 0 \\ 0 & -Y_v & 0 \\ 0 & 0 & -N_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -X_{|u|u}|u| & 0 & 0 \\ 0 & -Y_{|v|v}|v| & 0 \\ 0 & 0 & -N_{|r|r}|r| \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

onde se tem que m é a massa total do veículo, I_Z representa o momento de inércia do veículo, $X_{\dot{u}}$, $Y_{\dot{v}}$, $N_{\dot{r}}$ correspondem aos coeficientes de massa adicionada correspondentes aos três graus de liberdade do veículo *surge*, *sway* e *yaw*, respectivamente. Já os parâmetros $X_{|u|u}$, $Y_{|v|v}$ e $N_{|r|r}$ correspondem aos coeficientes de amortecimento não lineares na aproximação quadrática segundo os graus de liberdade *surge*, *sway* e *yaw*, respectivamente. Por fim, os parâmetros X_u , Y_v e N_r são os coeficientes de resistência que o ASV experencia quando se move segundo os graus de liberdade *surge*, *sway* e *yaw*, respectivamente.

No que toca à matriz $N(v)$, a primeira parcela representa as características lineares do fenómeno de amortecimento enquanto que a segunda representa as características não-lineares.

Assim, com as equações de cinemática do veículo já estabelecidas, foi possível desenvolver um modelo de simulação em Simulink que, face a uma entrada τ e resolvendo o sistema de equações 3.11, permite saber os valores de velocidade e posição da embarcação:

$$\begin{cases} \dot{v} = \int (M^{-1}(\tau - N(v)v)) dv \\ \dot{\eta} = \int (J(\eta)v) d\eta \end{cases} \quad (3.11)$$

Os componentes de τ , são gerados a partir de blocos do Simulink, onde, atribuindo valores para as forças e ângulos a que cada propulsor trabalha, se obtêm os valores F_x , F_y e τ_ψ .

Tendo esses valores de entrada, é possível, a partir do modelo de Simulink desenvolvido, chegar à posição e velocidade do veículo. Na figura 3.12 pode-se ver uma imagem do modelo desenvolvido:

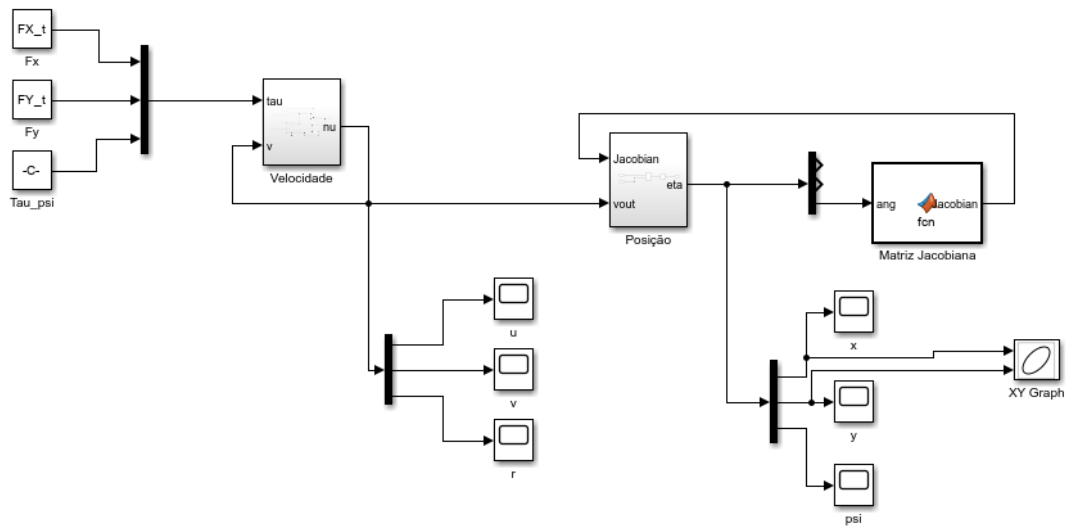


Figura 3.12: Modelo de Simulink que realiza a cinemática e dinâmica do veículo

Analisando mais detalhadamente o modelo, pode-se verificar que o bloco cuja descrição é "Velocidade" realiza o conjunto de operações que permite resolver a primeira parcela do sistema de equações 3.11 enquanto que o bloco cuja descrição é "Posição" em conjunto com o bloco "Matriz Jacobiana" (cuja única função é criar a matriz $J(\eta)$) realiza as operações necessárias para resolver a segunda parcela do mesmo sistema.

Nas figuras 3.13, 3.14 e 3.15 é pode-se ver a constituição destes respetivos blocos:

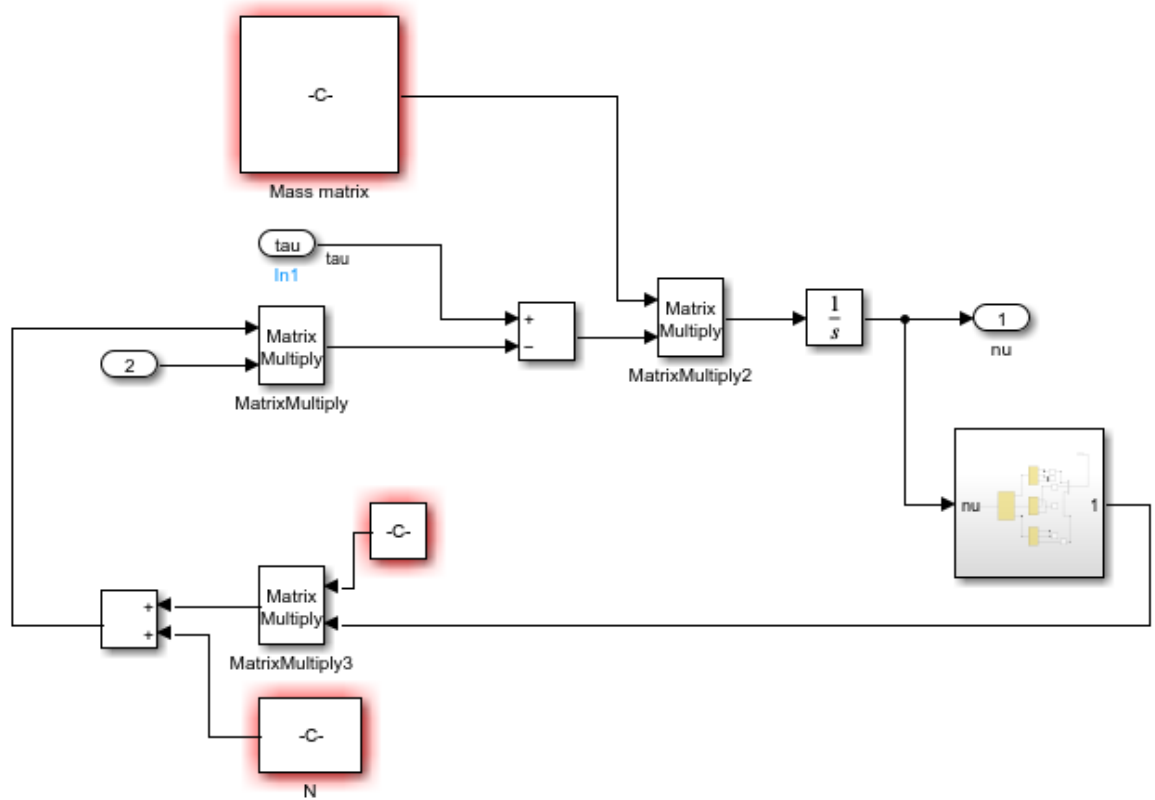


Figura 3.13: Constituição do bloco "Velocidade"

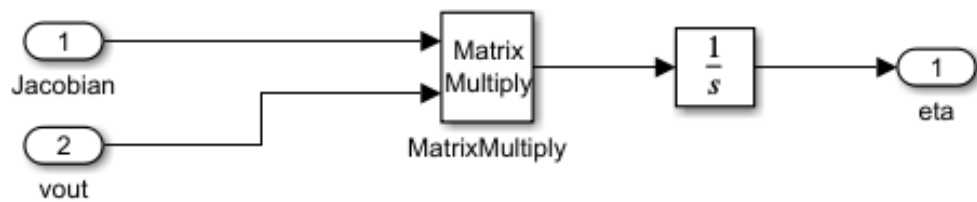


Figura 3.14: Constituição do bloco "Posição"

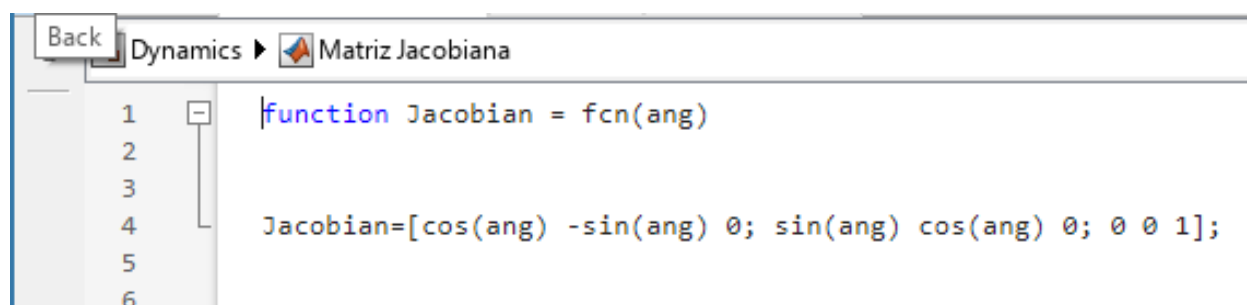


Figura 3.15: Constituição do bloco "Jacobiana"

É importante referir que o modelo desenvolvido pode ser adaptado para qualquer tipo de ASV, ou seja, partindo de outros parâmetros hidrodinâmicos e físicos do veículo, o modelo permite na mesma saber a posição e velocidade do mesmo. Isto é bastante vantajoso visto que independentemente do veículo que se pretende desenvolver o modelo permite perceber o comportamento que o mesmo irá ter quando este é submetido a determinadas forças geradas pelos seus propulsores. Neste caso, os parâmetros físicos e hidrodinâmicos foram escolhidos de acordo com o design descrito pelas figuras 3.9 e 3.8 e podem ser encontrados na tabela 3.1.

Tabela 3.1: Parâmetros Hidrodinâmicos

Parâmetro	Valor	Unidades
$X_{\dot{u}}$	-14	kg
X_u	-18,9	kg/s
X_{lulu}	-19,25	kg/m
$Y_{\dot{v}}$	-14	kg
Y_v	-18,9	kg/s
Y_{lvlv}	-19,25	kg/m
$N_{\dot{r}}$	-8,65	$kg \cdot m^2$
N_r	-13,2	$kg \cdot m^2/(s \cdot rad)$
$N_{lr lr}$	-6,6	$kg \cdot m^2/(rad^2)$

Assim, de forma a testar o modelo de simulação desenvolvido e perceber o comportamento da embarcação para determinadas situações foram realizados alguns testes nos quais se avaliavam se os valores dos vetores de velocidade e posição ($\eta = [x, y, \psi]$ e $v = [u, v, r]$, respetivamente) se encontram dentro do esperado face às forças τ que atuam no veículo. Os cenários de simulação exploravam a movimentação do veículo quando este recorre apenas aos propulsores aéreos e quando este recorre à utilização dos propulsores aéreos e submersos em simultâneo.

3.3.1 Movimento recorrendo apenas aos propulsores aéreos

Nesta fase de simulações, considerou-se que apenas os propulsores aéreos se encontravam em funcionamento. Neste caso considera-se que as forças que compõem o vetor τ são descritas pelo seguinte conjunto de equações:

$$\begin{cases} F_x &= f_1 \cos \theta_1 + f_2 \cos \theta_2 + f_3 \cos \theta_3 + f_4 \cos \theta_4 \\ F_y &= f_1 \sin \theta_1 + f_2 \sin \theta_2 + f_3 \sin \theta_3 + f_4 \sin \theta_4 \\ \tau_\psi &= (f_1(\sin \theta_1 - \cos \theta_1) + f_2(\cos \theta_2 - \sin \theta_2) \\ &\quad + f_3(\cos \theta_3 + \sin \theta_3) - f_4(\cos \theta_4 + \sin \theta_4))l \frac{\sqrt{2}}{2} \end{cases}$$

onde θ_1 , θ_2 , θ_3 e θ_4 representam as orientações dos propulsores f_1 , f_2 , f_3 e f_4 , respetivamente e l representa a distância entre o ponto de aplicação da força e o ponto de rotação do veículo, que neste caso é o seu centro de massa, pelo que temos que l é igual ao raio de veículo.

As forças f_n são geradas a partir de bloco geradores de ondas quadradas no Simulink, enquanto que os ângulos θ_n são gerados a partir de um script de Matlab.

Com estes testes pretende-se sobretudo gerar forças nos propulsores com as quais seja fácil prever o comportamento do veículo como é o caso da deslocação frontal e o movimento de rotação do veículo sobre o seu eixo, validando assim o modelo de simulação desenvolvido. Os resultados obtidos para cada teste foram os seguintes:

- **Teste 1** - Atuação em surge no sentido positivo (North))

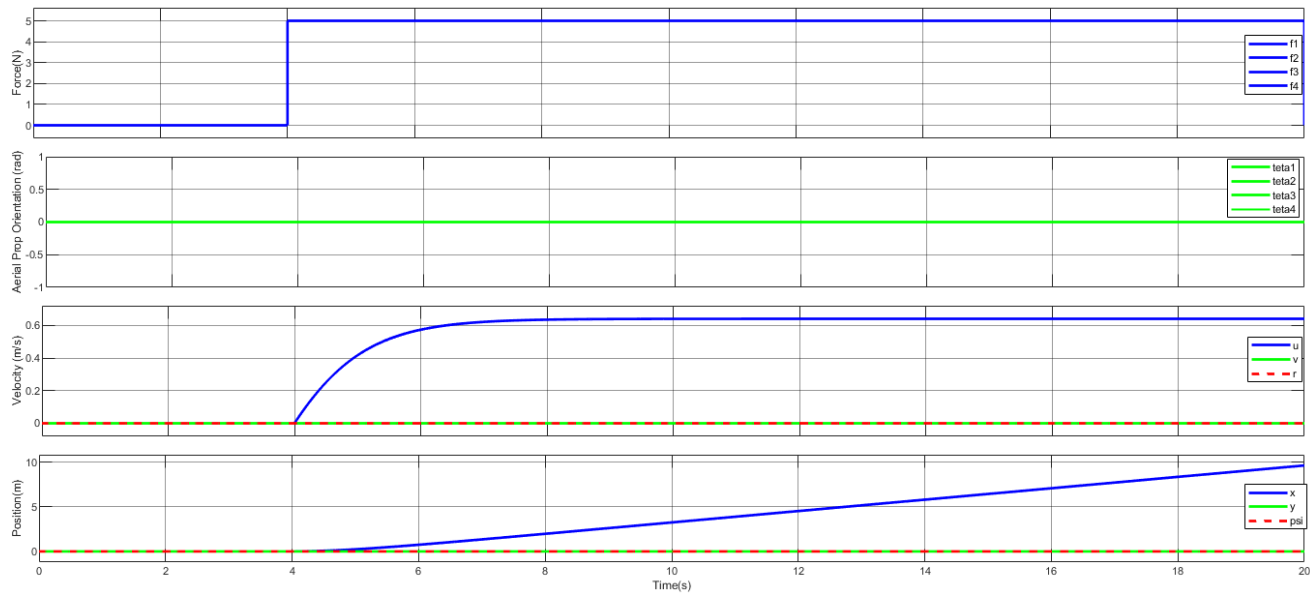


Figura 3.16: Forças geradas pelos motores, ângulos gerados pelos servo-motores, velocidade (u) posição (x)

- **Teste 2** - Atuação do veículo em yaw no sentido positivo (sentido horário)

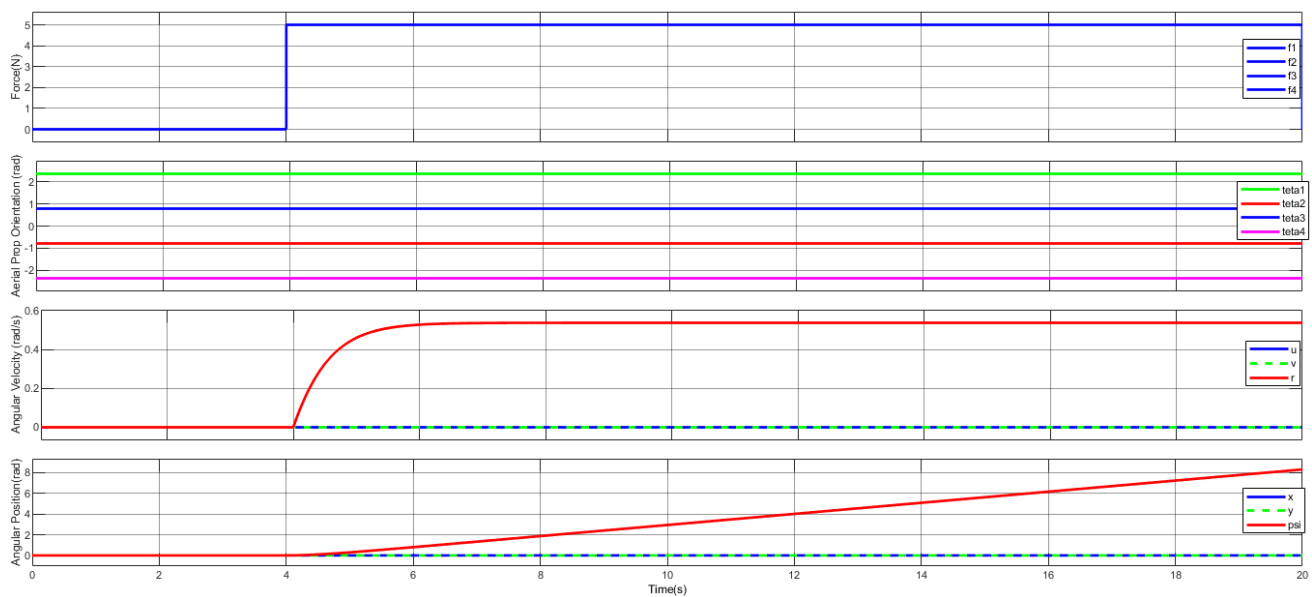


Figura 3.17: Forças geradas pelos motores, ângulos gerados pelos servo-motores, velocidade angular (r) posição angular (psi)

- **Teste 3** - Nesta situação os propulsores geraram todos a mesma força (5 Newtons) e possuíam todos o mesmo ângulo ($\frac{\pi}{4}$ radianos). Assim, espera-se ver uma trajetória do veículo na diagonal.

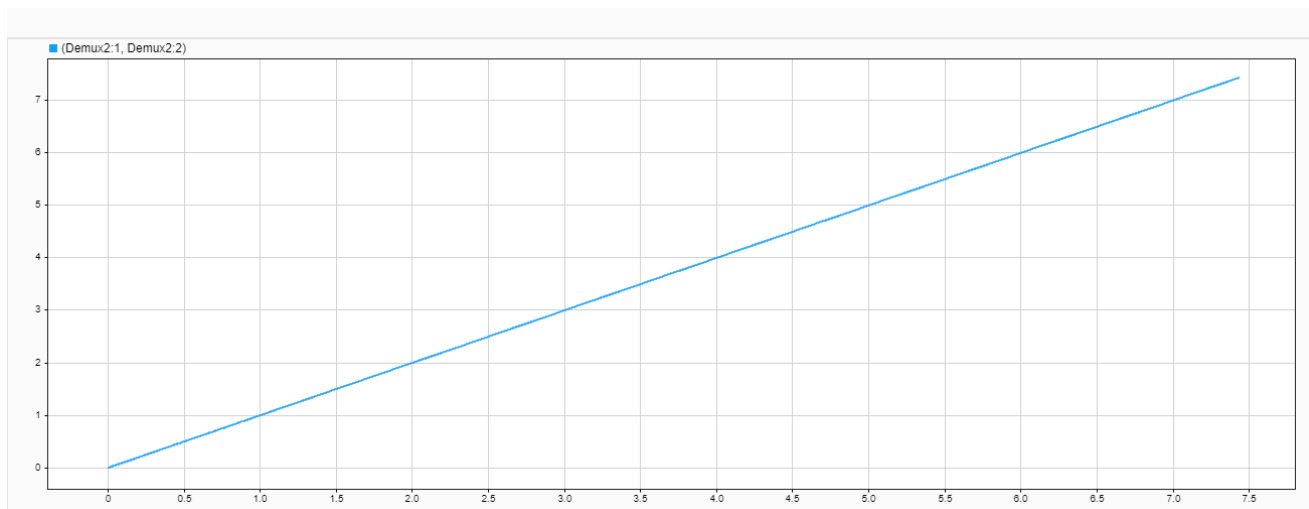


Figura 3.18: Trajetória efetuada pelo veículo, eixo vertical corresponde ao eixo Y (east, west) e eixo horizontal corresponde ao X (north, south)

Partindo dos resultados apresentados é possível concluir que em todos os testes os valores de posição e velocidade evoluíram de acordo com o esperado.

No caso do teste 1, dado que todos os propulsores se encontravam orientados segundo um ângulo de 0° , era de esperar que as componentes de posição y , ψ e as componentes de velocidade v, r fossem nulas enquanto que as componentes x e u evoluíssem da forma demonstrada na figura 3.16.

Para o teste 2, a situação é semelhante, mas aqui são as componentes ψ e r que não são nulas, dado que a orientação dos propulsores leva a que a embarcação efetue um movimento de rotação sobre o seu próprio eixo.

Por último, no teste 3, dado que todos os propulsores se encontravam orientados segundo um ângulo de $\frac{\pi}{4}$ radianos, era de esperar que o veículo efetuasse uma trajetória segundo essa orientação, ou seja na diagonal, como demonstrado pela figura 3.18. Outro factor importante a referir é que face ao formato circular do veículo, que consequentemente leva a uma igualdade nos parâmetros hídricos referentes aos eixos de atuação em *surge* e *sway*, os resultados obtidos no teste 1 seriam exatamente iguais caso o veículo se tivesse a movimentar segundo *sway*, sendo que a única diferença seria que neste último caso os parâmetros não nulos seriam v e y . Naturalmente, caso o sentido de movimentação fosse negativo, as curvas seriam iguais em magnitude mas os valores de velocidade e posição seriam negativos.

3.3.2 Movimento recorrendo aos propulsores aéreos e submersos

Nestes testes, considerou-se que tanto os propulsores submersos como os aéreos se encontravam em funcionamento para efetuar o movimento do veículo. Neste caso, o sistema de equações que caracteriza o vetor τ consiste na soma dos sistemas que caracterizam este mesmo vetor quando os propulsores aéreos e submersos atuam de forma isolada, resultando no seguinte sistema:

$$\begin{cases} F_x &= f_1 \cos \theta_1 + f_2 \cos \theta_2 + f_3 \cos \theta_3 + f_4 \cos \theta_4 + (f_5 - f_6 + f_7 - f_8) \frac{\sqrt{2}}{2} \\ F_y &= f_1 \sin \theta_1 + f_2 \sin \theta_2 + f_3 \sin \theta_3 + f_4 \sin \theta_4 + (f_5 + f_6 - f_7 - f_8) \frac{\sqrt{2}}{2} \\ \tau_\psi &= (f_1 (\sin \theta_1 - \cos \theta_1) + f_2 (\cos \theta_2 - \sin \theta_2) \\ &\quad + f_3 (\cos \theta_3 + \sin \theta_3) - f_4 (\cos \theta_4 + \sin \theta_4)) \frac{\sqrt{2}}{2} l + (f_5 - f_6 - f_7 + f_8) l \end{cases}$$

Da mesma forma que no caso anterior, as forças f_n são gerados por blocos geradores de ondas quadradas no Simulink e os ângulos θ_n são gerados a partir de um script de Matlab.

No que diz respeito aos testes desenvolvidas para este cenário, estes procuram sobretudo perceber o comportamento do veículo quando este utiliza os dois meios de propulsão simultaneamente principalmente no que toca à velocidade. Os resultados obtidos são os seguintes:

- **Teste 1** - Atuação em surge no sentido positivo (North)

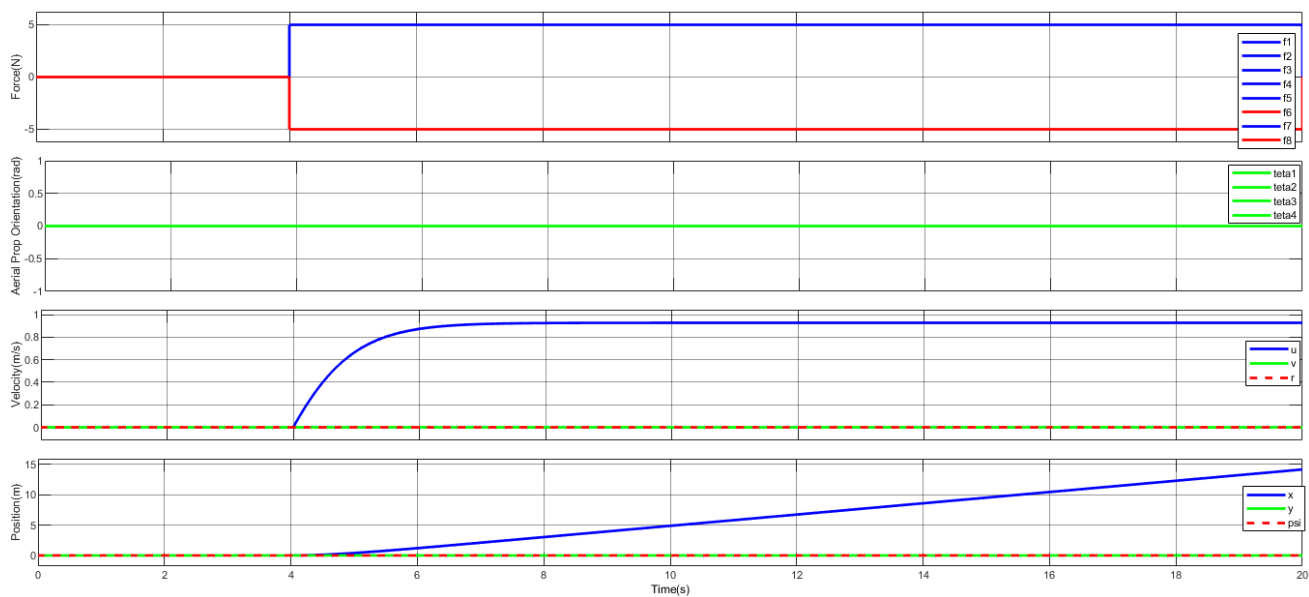


Figura 3.19: Forças geradas pelos motores, ângulos gerados pelos servo-motores, velocidade (u) posição (x)

• **Teste 2** - Atuação do veículo em yaw no sentido positivo (sentido horário)

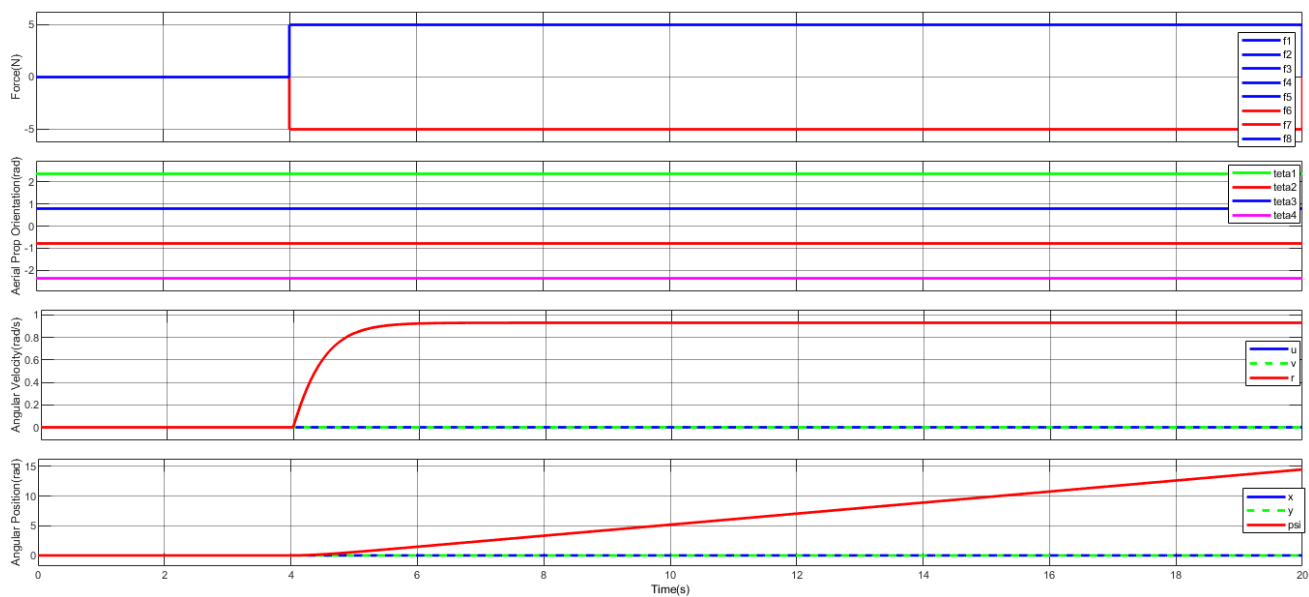


Figura 3.20: Forças geradas pelos motores, ângulos gerados pelos servo-motores, velocidade angular (r) posição angular (psi)

3.3.2.1 Análise de resultados

De forma similar aos dois primeiros testes apresentados no capítulo 3.3.1, os testes 1 e 2 mostram a atuação do veículo em *surge* e *yaw*, ambas no sentido positivo, para uma força de 5N (valor absoluto) para os oito propulsores, sendo que a evolução da curva de velocidade e posição em ambos os casos foi semelhante ao obtido nos dois primeiros testes do capítulo 3.3.1.

Outro factor relevante está relacionado com a velocidade atingida para estes casos. Erradamente, poderia-se assumir que a velocidade atingida pelo veículo seria igual à soma da velocidade que este obtém quando utiliza apenas os propulsores motores submersos com a velocidade atingida quando utiliza apenas os propulsores aéreos. Contudo, esse fenómeno não acontece precisamente devido aos parâmetros hidrodinâmicos que introduzem os efeitos de *drag* a que o veículo está sujeito, levando a que quanto maior for a sua velocidade que este atinge maior é a velocidade é a resistência ao seu movimento.

Chapter 4

Alocação de força pelos propulsores

Neste capítulo, pretende-se essencialmente abordar os métodos de alocação de forças desenvolvidos tendo em consideração os propulsores que compõem o veículo que se está a projetar e os seus três principais modos de operação, sendo estes: movimento recorrendo apenas a propulsores submersos, movimento recorrendo apenas a propulsores aéreos e movimento recorrendo aos dois tipos de propulsores.

Para tal, abordou-se este problema de uma maneira que, em primeiro lugar, se fez uma análise das curvas de potência em função da força dos propulsores escolhidos de modo a chegar às equações que as caracterizam. Partindo dessas equações, é então possível desenvolver os métodos de distribuição de força pelos propulsores que procurem minimizar a potência consumida sem nunca comprometer a força total exigida, isto é, a soma das forças geradas pelos propulsores deve manter-se constante e igual àquela que se pretende atingir para o veículo. Com isto também se pretende analisar qual dos meios de propulsão (somente com os submersos, somente com os aéreos ou recorrendo aos dois) é o mais eficiente para o veículo. Também se tem como objetivo que os algoritmos que levam a estes métodos executem na sua grande maioria cálculos simples cuja implementação possa ser fácil de executar num sistema cujos recursos computacionais são menores como é o caso dos ASV's.

Algo importante a reter é que, apesar de ao longo deste trabalho a análise se focar em propulsores específicos, esta metodologia pode ser aplicada a outros tipos de propulsores, sejam eles aéreos ou submersos.

4.1 Alocação de força para os propulsores submersos

Para esta análise, considerou-se que o ASV em questão utiliza, como sistema de propulsão submerso, quatro propulsores T-200 desenvolvidos pela empresa BlueRobotics [Robotics \(2023a\)](#).

Visto que o objetivo para esta alocação passa por minimizar o consumo de potência do veículo quando este utiliza somente os propulsores submersos, é importante saber a equação que caracteriza a curva de potência em função da força gerada por este motor.

Para isso, em [Robotics \(2023a\)](#) é disponibilizada uma folha de Excel com inúmeros dados que mostram a performance do motor relativo a vários parâmetros como eficiência, RPM e também consumo de potência.

Na figura 4.1 está representada a curva de consumo de potência em função de força para uma tensão de operação de 20 Volts. Esta curva pode ser encontrada em [Robotics \(2023a\)](#).

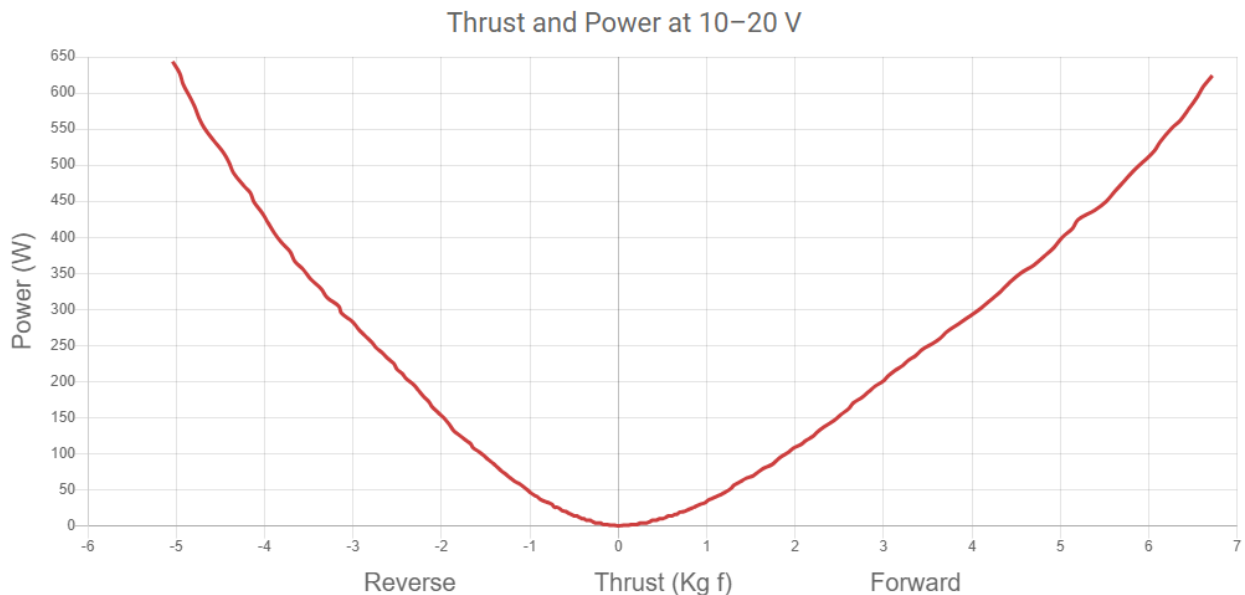


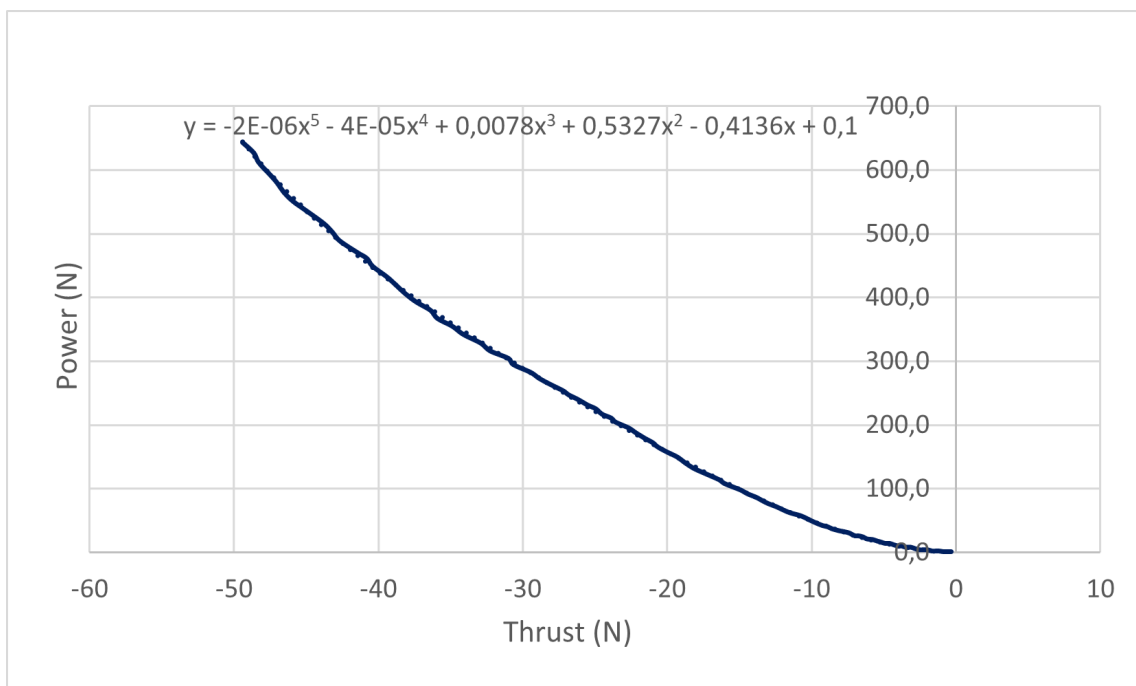
Figura 4.1: Potência em função da força gerada pelo motor para uma tensão de operação de 20V [Robotics \(2023a\)](#)

Uma das primeiras observações que se pode fazer, é o facto da curva não ser simétrica, isto é, a potência consumida pelo motor quando este atua em modo *forward* não é igual àquela consumida quando este atua no modo *reverse*. De facto, quando o motor atua em modo *reverse* este acaba por consumir mais potência para valores iguais de força, o que demonstra que neste modo de atuação ele é menos eficiente.

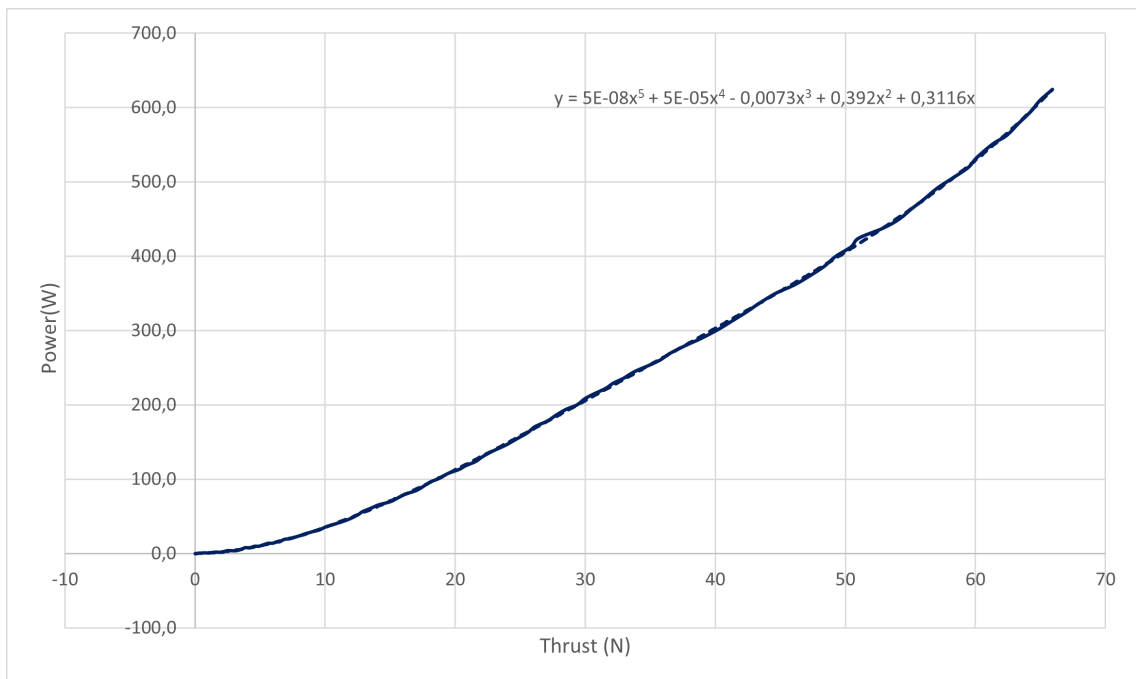
Outra característica importante está relacionada com propulsão máxima que o motor consegue fornecer. Segundo a curva e as especificações fornecidas na ficha técnica, o motor consegue fornecer uma força máxima de cerca de 65N quando atua no modo *forward* e de cerca de -49.5N quando atua no modo *reverse*. É importante conhecer estas limitações para que o algoritmo que realiza distribuição das forças por cada propulsor não gere valores que ultrapassem as mesmas.

Para obter a equação que caracteriza esta curva foi necessário recorrer aos dados contidos na folha de Excel e de seguida traçar uma linha de tendência que melhor se aproximasse da curva real. De modo a obter valores mais próximos da realidade possível decidiu-se dividir a curva em duas funções diferentes, uma para o modo *reverse* e outra para o modo *forward*, e de seguida, traçar as respetivas linhas de tendência que melhor caracterizem a curva real.

A curva e respetiva equação para o motor quando este atua em modo *reverse* encontram-se representadas na figura 4.2

Figura 4.2: Potência em função da força para motor a atuar em *reverse*

Para o motor a atuar no modo *forward* a curva e equação obtidas estão representadas na figura 4.3:

Figura 4.3: Potência em função da força para motor a atuar em *forward*

Assim, sabendo as equações que caracterizam a potência consumida pelo motor em ambos os modos, estavam reunidas as condições para proceder ao algoritmo de minimização do consumo de potência.

Analisando o sistema de propulsão submerso do ASV, verifica-se que este possui quatro propulsores para efetuar o seu movimento em três graus de liberdade (*surge*, *sway* e *yaw*). Isso faz com que o sistema que caracteriza os graus de liberdade do veículo quando este utiliza somente os propulsores submersos tenha três equações (3 graus de liberdade) e quatro variáveis (quatro propulsores) o que leva a uma infinidade de soluções para atingir os valores de τ pretendidos. A implementação do algoritmo implica que, em primeira lugar, seja encontrada uma dessas soluções. Os casos seguintes descrevem três situações particulares do movimento do veículo, assim como uma mais geral, e as diferentes métodos considerados para obter as forças que cada propulsor proporcionava. É importante salientar que as soluções obtidas a partir destes métodos não são as soluções ótimas, ou seja, não são ainda as soluções que geram um menor consumo de potência. Eis os casos:

- **Caso 1** - Movimentação do veículo em *surge*

Neste caso, tendo em conta que as componentes F_y e τ_ψ do vetor τ são nulas o sistema a resolver tem a seguinte forma:

$$\begin{cases} F_x &= (f_5 - f_6 + f_7 - f_8) \frac{\sqrt{2}}{2} \\ 0 &= (f_5 + f_6 - f_7 - f_8) \frac{\sqrt{2}}{2} \\ 0 &= (f_5 - f_6 - f_7 + f_8) l \end{cases} \quad (4.1)$$

Apesar de haver várias soluções para este sistema, a mais lógica, simples e uma das que gera um menor consumo de potência passa por dividir de igual forma as força total F_x pelos quatro propulsores. Deste modo tem-se que:

$$f_5 = f_7 = \frac{F_x}{4} \cdot \frac{2}{\sqrt{2}} \quad (4.2)$$

$$f_6 = f_8 = -\frac{F_x}{4} \cdot \frac{2}{\sqrt{2}} \quad (4.3)$$

A troca de sinais existente entre 4.2 e 4.3 é essencial pois garante que as forças geradas pelos propulsores são todas no mesmo sentido.

- **Caso 2** - Movimentação do veículo em *sway*

De forma semelhante ao caso 1, agora são as componentes F_x e τ_ψ que são nulas ficando o sistema da seguinte forma:

$$\begin{cases} 0 &= (f_5 - f_6 + f_7 - f_8) \frac{\sqrt{2}}{2} \\ F_y &= (f_5 + f_6 - f_7 - f_8) \frac{\sqrt{2}}{2} \\ 0 &= (f_5 - f_6 - f_7 + f_8) l \end{cases} \quad (4.4)$$

Mais uma vez, opta-se pela solução lógica de dividir igualmente a força total por cada propulsor ficando as forças da seguinte maneira:

$$f_5 = f_6 = \frac{F_y}{4} \cdot \frac{2}{\sqrt{2}} \quad (4.5)$$

$$f_7 = f_8 = -\frac{F_y}{4} \cdot \frac{2}{\sqrt{2}} \quad (4.6)$$

Aqui a igualdade existente entre as forças dos propulsores é diferente da apresentada no caso 1 uma vez que se pretende realizar uma deslocação lateral.

- **Caso 3** - Rotação do veículo sobre si mesmo (*yaw*)

Neste caso as componentes nulas de τ são F_x e F_y tendo o sistema a seguinte forma:

$$\begin{cases} 0 &= (f_5 - f_6 + f_7 - f_8) \frac{\sqrt{2}}{2} \\ 0 &= (f_5 + f_6 - f_7 - f_8) \frac{\sqrt{2}}{2} \\ \tau_\psi &= (f_5 - f_6 - f_7 + f_8) l \end{cases} \quad (4.7)$$

Mais uma vez, optou-se por seguir a solução mais simples de dividir a força total pelos quatro propulsores obtendo assim as seguintes igualdades:

$$f_5 = f_8 = \frac{\tau_\psi}{4 \cdot l} \quad (4.8)$$

$$f_6 = f_7 = -\frac{\tau_\psi}{4 \cdot l} \quad (4.9)$$

- **Caso 4** - Restantes movimentos possíveis

Estes são os casos para os quais existe mais do que uma componente não nula no vetor τ , isto é, todos os casos que não envolvam a movimentação exclusiva do veículo em *surge*, *sway* ou *yaw*. Aqui considera-se que o sistema de equações a resolver é o seguinte:

$$\begin{cases} F_x &= (f_5 - f_6 + f_7 - f_8) \frac{\sqrt{2}}{2} \\ F_y &= (f_5 + f_6 - f_7 - f_8) \frac{\sqrt{2}}{2} \\ \tau_\psi &= (f_5 - f_6 - f_7 + f_8) l \end{cases} \quad (4.10)$$

Considerando a equação geral de matrizes $Ax=B$, em que A é a matriz dos coeficientes do sistema, B o vetor de forças τ e x o vetor das forças dos propulsores, é possível escrever o sistema de equações 4.10 nessa mesma forma:

$$\begin{bmatrix} \frac{\sqrt{2}}{2} & -\frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} & -\frac{\sqrt{2}}{2} \\ \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} & -\frac{\sqrt{2}}{2} & -\frac{\sqrt{2}}{2} \\ l & -l & -l & l \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} f_5 \\ f_6 \\ f_7 \\ f_8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ \tau_\psi \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

Contudo, consegue-se perceber pelas dimensões da matriz A que o sistema 4.10 é indeterminado, pelo que não é possível resolvê-lo recorrendo à inversa da matriz A dado que ela não existe. Assim, foi necessário recorrer à matriz pseudo-inversa de A ($\text{pinv}(A)$), conhecida na nomenclatura como *Moore-Penrose Pseudoinverse*, para encontrar uma solução para o sistema como representado pela seguinte expressão:

$$\begin{bmatrix} f_5 \\ f_6 \\ f_7 \\ f_8 \end{bmatrix} = \text{pinv}(A) \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ \tau_\psi \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

4.1.1 Algoritmo de distribuição de forças pelos propulsores submersos

O fluxograma representado na figura 4.4 descreve de forma sucinta o algoritmo desenvolvido para a distribuição de forças de forma otimizada pelos propulsores submersos.

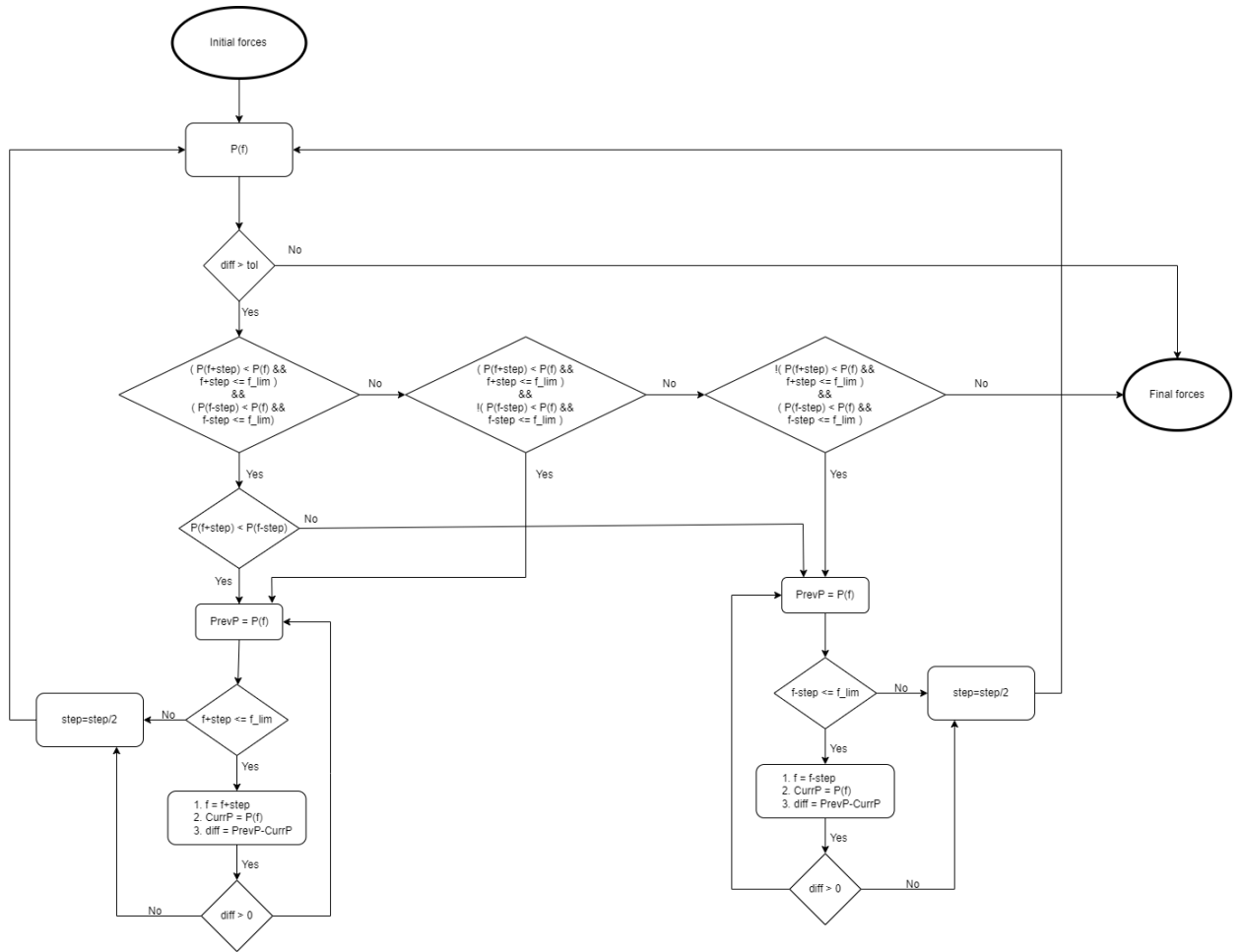


Figura 4.4: Diagrama que ilustra o algoritmo utilizado para descobrir a distribuição de forças ótima pelos motores submersos

Como já foi referido, o primeiro passo para encontrar a solução que minimiza o consumo de potência passa em primeiro lugar por encontrar uma solução que satisfaça o sistema 4.10. Essas soluções "iniciais" são aquelas determinadas segundo os casos descritos em 4.1.

Admitindo que a solução obtida é f , sendo que f é composta pelas forças f_5 , f_6 , f_7 e f_8 relativas a cada motor, então pode-se dizer que para esta solução existe uma determinada potência consumida $P(f)$. Esta potência é o resultado da soma das potências consumidas por cada motor, cuja o resultado é obtido a partir das equações de potência em função da força determinadas em 4.1.

Esta solução f , pode não necessariamente corresponder à solução que se traduz num menor consumo de potência, pelo que, é necessário determinar em que sentido é que esta deve "evoluir" para se obter a solução ótima.

Para isso, é necessário adicionar ou subtrair um $step$ à solução obtida de forma a determinar qual destas operações é que vai levar a uma $P(f)$ menor, ou seja, é necessário obter os valores de $P(f+step)$ e de $P(f-step)$. Partindo disto, existem três cenários possíveis: um em que

tanto $P(f+step)$ como $P(f-step)$ são menores que $P(f)$ atual, outro em que apenas um dos valores ($P(f+step)$ ou $P(f-step)$) é menor que $P(f)$ atual e por último o cenário onde nem $P(f+step)$ nem $P(f-step)$ são menores que $P(f)$ atual sendo que nesse caso considera-se que se encontrou a solução final.

No caso do primeiro cenário descrito, onde tanto a adição como a subtração resultaram em consumos de potência menores do que o consumo de potência da solução atual, comparam-se depois esses dois valores para que se possa decidir em que sentido é que o algoritmo deve evoluir. Assim, se o consumo de potência obtido com a adição for menor, então armazena-se o valor da potência consumida da solução anterior $PrevP$.

De seguida, verifica-se se a adição do *step* irá fazer com que os propulsores tenham que gerar forças que ultrapassem os seus limites físicos. No caso dessa condição não se verificar, procede-se então à adição do *step* às forças f_5 , f_6 , f_7 e f_8 obtidas na solução anterior. A adição (ou subtração) a todas as forças é de extrema importância uma vez que leva a que nenhum dos componentes do vetor τ se altere, mantendo assim a veracidade do sistema 4.10.

Feita a adição do *step*, existe agora um novo valor de consumo de potência, $CurrP$, para esta nova solução. De forma a entender se existiu de facto uma melhoria no consumo de potência com a adição do *step* realiza-se a operação $diff = PrevP - CurrP$, onde se tem que, caso $diff > 0$ então verifica-se que houve uma melhoria e pode-se voltar ao início do processo de adição. Caso se tenha que $diff < 0$, então é porque não se verificou uma melhoria o que por sua vez significa que o *step* adicionado foi demasiado elevado, pelo que se diminui o mesmo, retomando depois ao início do algoritmo. Isto também acontece caso se verifique que os forças geradas com a adição do *step* ultrapassem os limites físicos dos propulsores.

Caso se verifica-se que o consumo de potência obtido com a subtração era menor, o processo era exatamente o mesmo, mas em vez de se recorrer à adição seria à subtração.

Nos casos em que se verifica inicialmente que apenas uma das operações, adição ou subtração, é que leva a um menor consumo de potência então a comparação entre os dois valores de potência é desnecessária, o que faz com que se possa efetuar o processo já descrito conforme a operação que resultou num consumo menor.

Este algoritmo é repetido de forma iterativa enquanto se verificar que o valor $diff$ é menor que o valor absoluto de uma certa tolerância tol . A partir do momento que se verificar que $diff \leq tol$ então é porque a diferença entre o consumo de potência obtido com a solução atual e o obtido com a solução anterior é pouco significativa e torna-se desnecessário recorrer a mais iterações, considerando deste modo que se chegou a uma solução de distribuição de força pelos propulsores otimizada.

4.1.1.1 Resultados obtidos

Com o algoritmo implementado foram depois realizados alguns testes com o objetivo de observar a evolução do consumo de potência para cada iteração bem como as forças que cada propulsor gerava. Aqui, também se pretende avaliar se as componentes do vetor τ permanecem constantes

durante a execução do algoritmo uma vez que caso isso não se verifique as forças geradas não cumprem o sistema 4.10. Estes testes foram realizados para um *step* inicial igual a 1 e uma tolerância de 0.1 Watts. Os gráficos apresentados de seguida mostram, para cada iteração, os resultados obtidos para o consumo de potência, força de propulsores e valores do vetor τ :

- **Caso 1** - Movimento lateral do veículo no sentido negativo para um $\tau=[0;-30;0]$

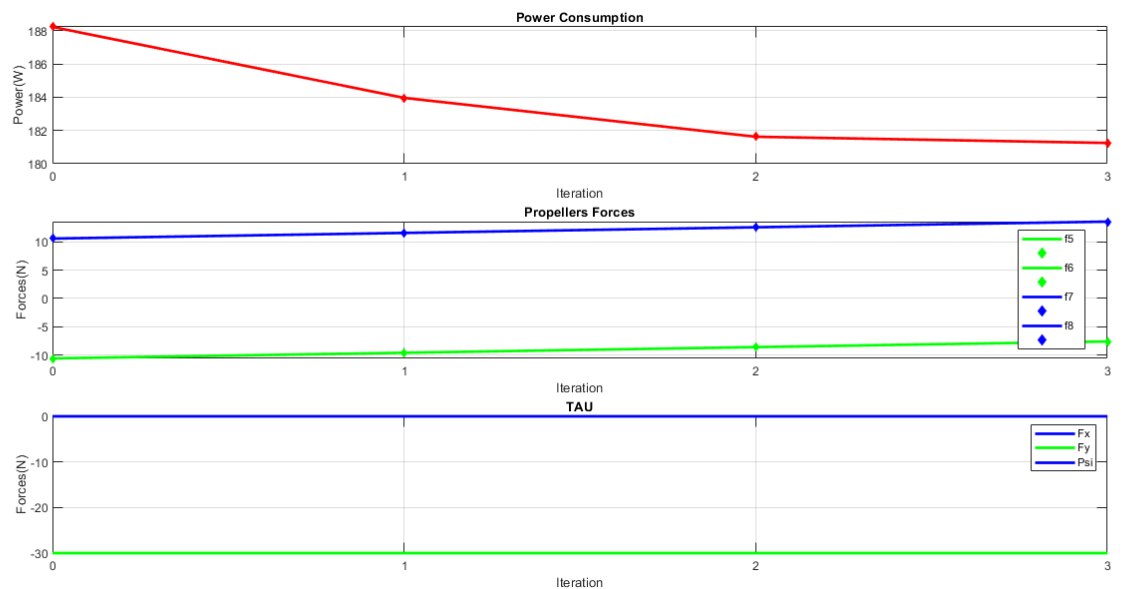


Figura 4.5: Evolução das forças dos propulsores, componentes do vetor τ e potência consumida durante a execução do algoritmo

- **Caso 2** - Rotação do veículo sobre o seu próprio eixo no sentido negativo para um $\tau=[0;0;-12]$

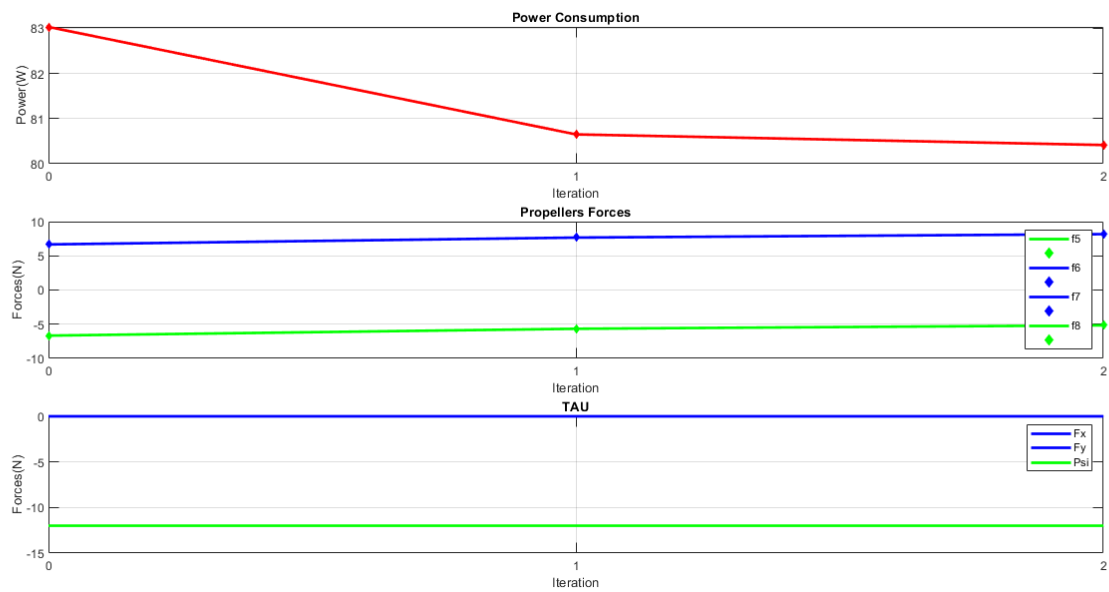


Figura 4.6: Evolução das forças dos propulsores, componentes do vetor τ e potência consumida durante a execução do algoritmo

- **Caso 3** - Movimento do veículo para um $\tau=[25.4;-21.2;9.4]$

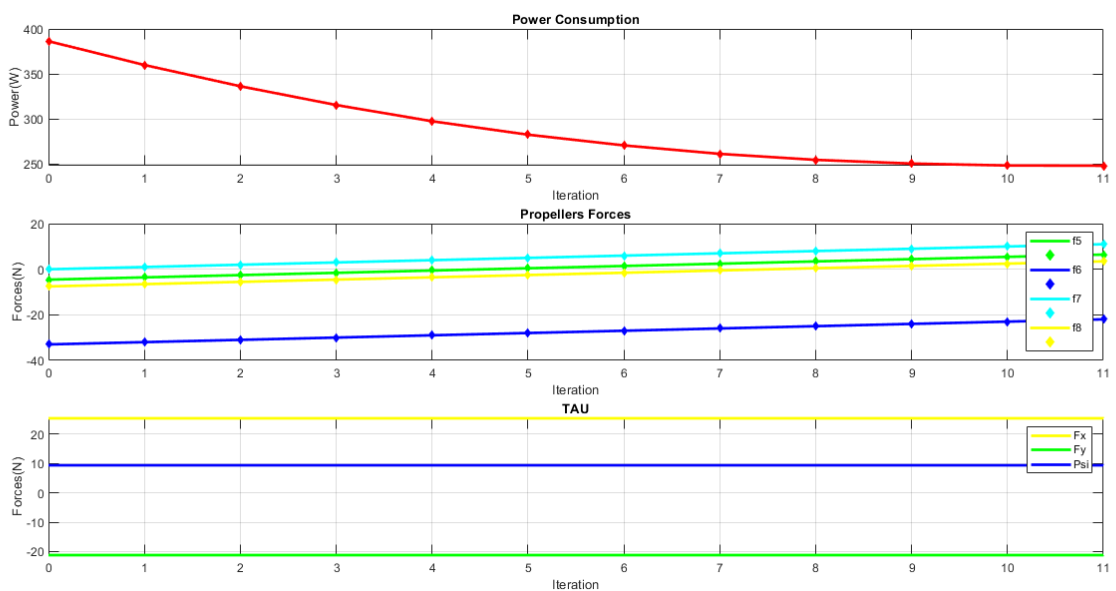


Figura 4.7: Evolução das forças dos propulsores, componentes do vetor τ e potência consumida durante a execução do algoritmo

- **Caso 4** - Movimento do veículo para um $\tau=[30.6;14.8;-5.5]$

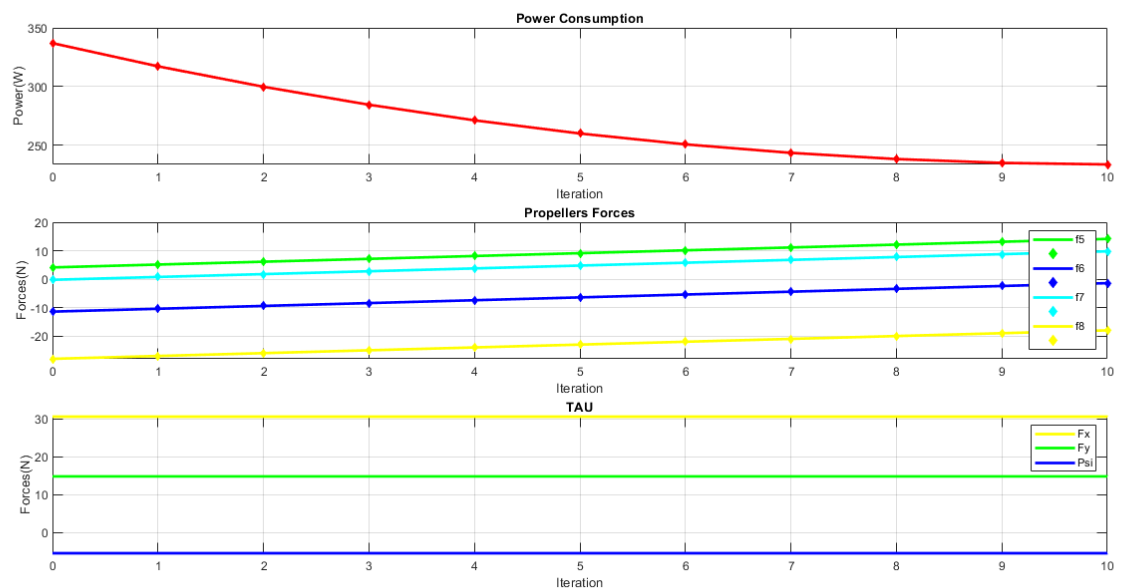


Figura 4.8: Evolução das forças dos propulsores, componentes do vetor τ e potência consumida durante a execução do algoritmo

Para uma melhor análise, a tabela seguinte apresenta o consumo de potência obtido para a solução inicial, o consumo de potência para a solução obtida após a execução do algoritmo e a diferença, em percentagem, entre estes dois valores:

Tabela 4.1: Diferença entre a potência consumida com a primeira solução obtida e potência consumida com a solução obtida após a execução do algoritmo

Potências Iniciais e Finais para cada caso			
Caso	Consumo de Potência inicial (W)	Consumo de Potência Final (W)	Decréscimo de Potência consumida (%)
Caso 1	188,2	181,2	3,7
Caso 2	83,0	80,4	3,2
Caso 3	386,4	248,1	35,8
Caso 4	329,2	233,7	29,0

Os resultados obtidos nos dois primeiros casos mostram que, apesar de a lógica levar a pensar que para movimentos unidirecionais ou para a rotação do veículo sobre ele mesmo a melhor opção passa por dividir a força que se pretende atingir de igual modo pelos quatro propulsores, essa opção não corresponde àquela que leva a um menor consumo energético. Isto deve-se ao facto de, como

já foi mencionado em 4.1, a curva de potência em função da força do propulsor T-200 não ser simétrica, tendo um consumo mais elevado para quando este atua em *reverse*.

Nos casos 3 e 4, fica bem ilustrado o grande decréscimo no consumo de potência (35.8% e 29.0%, respetivamente) que houve entre a primeira solução obtida e a solução após a execução do algoritmo. Também é de mencionar que, durante a execução do algoritmo, as componentes de força pretendidas (τ) mantiveram-se sempre constantes o que mostra que as condições de 4.10 são sempre cumpridas.

Outro factor importante a considerar é o tempo de execução do algoritmo, uma vez que, caso este seja muito elevado, torna-se difícil a sua implementação num sistema real, principalmente num que atue nas condições adversas que se estão a considerar. Para isso, para os casos considerados, realizaram-se 50 execuções do algoritmo para no final fazer uma média do tempo de execução assim como um desvio-padrão. Para este testes, utilizou-se um PC com um processador Intel i5-7200U e 8Gb de RAM. O PC utiliza o Windows 10 como sistema operativo. A tabela seguinte demonstra os resultados obtidos:

Tabela 4.2: Tempo de execução e número de iterações

Tempo de execução do algoritmo e número de iterações realizadas para um <i>step</i> inicial igual a 1			
Caso	Tempo de Execução médio(s)	Desvio-Padrão	Número de Iterações
Caso 1	0,0308	0,0043	3
Caso 2	0,0289	0,0033	2
Caso 3	0,0395	0,0091	11
Caso 4	0,0350	0,0065	11

Partindo dos resultados apresentados na tabela 4.2 podemos verificar que o algoritmo realiza um número relativamente baixo de iterações assim como tempos consideravelmente baixos para chegar à solução ótima.

Este número de iterações varia consoante os casos estudados e isso deve-se principalmente à "distância" a que a solução inicial se encontrava da solução ótima. Por exemplo, no caso 1, foram necessárias apenas três iterações para que se chegasse à solução ótima enquanto que no caso 3 foram necessárias onze. Quando comparamos as soluções inicialmente determinadas para estes dois casos tem-se que para o caso 1 obteve-se $f = [-10,61; -10,61; 10,61; 10,61]$ enquanto que no caso 3 obteve-se $f = [-3,7; -32,1; 0,8; -6,7]$. As soluções finais para cada um destes casos foram $f = [-6,61; -6,61; 14,61; 14,61]$ e $f = [7,3; -21,1; 11,8; 4,3]$, respetivamente. Assim, as soluções inicialmente encontradas para o caso 1 estavam muito mais próximas da solução ótima do que no caso 3, explicando assim o menor número de iterações.

Um dos fatores que pode influenciar esta variação no número de iterações, é o *step* que se considera inicialmente. Se o *step* inicial for muito baixo, então a convergência para a solução ótima leva a muito mais iterações, enquanto que se o *step* inicial for muito elevado leva a que a solução ótima seja muitas vezes "ultrapassada" o que por sua vez também leva a um maior número de iterações. Também a tolerância estabelecida tem influência visto que, logicamente, se esta tiver um valor mais elevado então o número de iterações será menor.

Ainda assim, apesar dos bons resultados apresentados, há que considerar que num sistema real os recursos computacionais podem ser mais limitados, podendo por sua vez levar a um tempo de execução mais elevado.

Este acréscimo no tempo de execução pode comprometer seriamente o movimento correto do veículo bem como a missão que este se encontra a realizar, uma vez que no momento no qual as forças são geradas pelos propulsores, os requisitos de força (τ) podem já ter mudado.

Outro factor a considerar está relacionado com os valores de decréscimo do consumo de potência apresentados na tabela 4.1 uma vez que estes mostram que, apesar de se ter verificado uma diminuição no consumo de potência, este foi bastante mais significativo para movimentos da embarcação que envolvem mais do que um grau de liberdade como demonstrado pelos casos 3 e 4. Isto pode ser explicado mais uma vez pelo facto de que nestes casos, a solução de alocação inicialmente encontrada está mais distante da solução ótima do que nos casos 1 e 2, levando assim a uma diferença no consumo de potência maior. Por outro lado, nos casos 1 e 2, apesar de se ter verificado uma diminuição no consumo de potência, este é pouco significativo, o que leva a ponderar se para movimentos que envolvam apenas um grau de liberdade é necessário encontrar a solução ótima ou se é mais favorável optar pela distribuição uniforme da força pelos propulsores.

Assim, num sistema real, seria necessário avaliar se de facto a implementação do algoritmo seria recompensadora no que toca à redução do consumo de potência, como ocorre nos casos 3 e 4, ou, se seria preferível optar por uma resposta mais rápida sem obter necessariamente a melhor solução relativa ao consumo energético como ocorre nos casos 1 e 2.

4.1.2 Distribuição de forças em caso de falha de um propulsor submerso

Devido ao tipo de condições e ambientes que se espera em que este veículo atue, existe uma forte possibilidade de haver momentos em que ocorre uma avaria num dos seus propulsores submersos, devido à presença de destroços, pedras ou outro tipo de obstáculos. Apesar de a operação apenas com três propulsores submersos ser menos eficiente e levar a um consumo energético maior, neste caso ainda é possível realizar todo o tipo de movimentos que envolvam os três graus de liberdade do veículo.

A prova disso, pode ser feita analisando mais uma vez o sistema 4.10. No caso normal, o sistema tem quatro variáveis e três equações levando a uma infinidade de soluções possíveis. Contudo, no caso de uma falha, isso já não se verifica. Se se considerar, por exemplo, que o propulsor f_8 teve uma avaria e não se encontra a funcionar, então o sistema de equações é o seguinte:

$$\begin{cases} F_x &= (f_5 - f_6 + f_7) \frac{\sqrt{2}}{2} \\ F_y &= (f_5 + f_6 - f_7) \frac{\sqrt{2}}{2} \\ \tau_\psi &= (f_5 - f_6 - f_7) l \end{cases} \quad (4.13)$$

Neste caso, temos um sistema que é caracterizado por ter três equações e três variáveis, pelo

que, apesar deste ter uma solução, essa solução é única. Essa solução, neste caso, passaria por resolver a seguinte expressão:

$$\begin{bmatrix} f_5 \\ f_6 \\ f_7 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{2}}{2} & -\frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} \\ \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} & -\frac{\sqrt{2}}{2} \\ l & -l & -l \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ \tau_\psi \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

Neste caso, não é possível implementar um algoritmo de distribuição de forças para minimizar o consumo de potência uma vez que, como já se mencionou, a solução obtida é única. Contudo, a solução obtida não deixa de ser viável, pelo que deve ser considerada pelo sistema para que a sua operação não fique comprometida.

Deste modo, decidiu-se testar o comportamento que o veículo teria, no que toca a alocação de forças por cada propulsor submerso, no caso em que um destes avaria.

4.1.2.1 Resultados obtidos

Aqui, o objetivo passou principalmente por observar o comportamento das forças geradas por cada propulsor no momento em que um destes falha. Naturalmente, espera-se ver mudanças nas forças geradas sem, no entanto, alterar os valores de τ pretendidos. Outro fator que se pretende analisar é a variação que ocorre no consumo de potência após a falha de um dos propulsores.

Deste modo, analisaram-se estes fatores inicialmente com os quatro propulsores a funcionar, sendo que depois, foi-se "desligando" um dos propulsores (equivalente a gerar uma força igual a 0) mantendo os outros três ativos. Isto foi feito para os quatro motores do veículo e para um $\tau = [10;20;5]$ levando aos seguintes resultados:

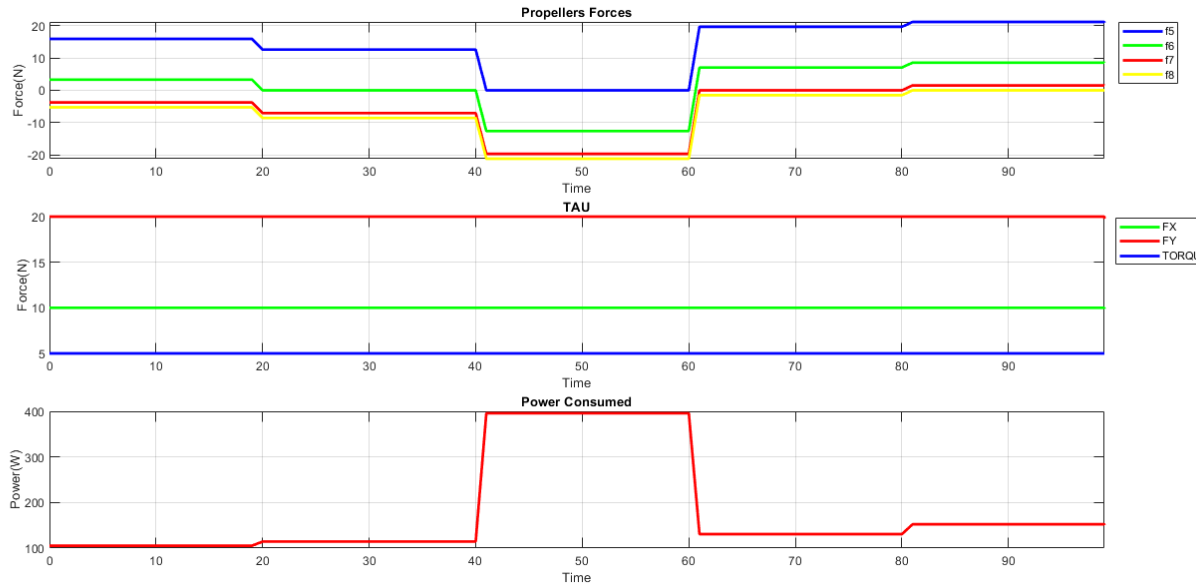


Figura 4.9: Forças dos propulsores, componentes de τ e potência consumida

Observando a figura 4.9 podemos verificar que durante o intervalo $t = [0;19]$ s o veículo encontrava-se com os quatro propulsores a funcionar, algo que também pode ser verificado pelo facto de nesse intervalo de tempo o consumo de potência ser o menor, uma vez que se recorre ao algoritmo de distribuição de forças.

Em $t = 19$ s verifica-se a falha no propulsor f_6 , pelo que existe uma compensação por parte dos outros três propulsores de forma a garantir que as componentes de força requisitadas são cumpridas, como se pode observar pelas linhas constantes do segundo gráfico. Naturalmente, o terceiro gráfico mostra-nos também que essa falha provocou um aumento no consumo de potência do veículo.

Essa falha e compensação de forças bem como o aumento no consumo de potência verificou-se para os intervalos de tempo seguintes, onde se testaram as falhas dos restantes propulsores.

Um intervalo de tempo que vale a pena destacar é o de $t=[40;60]$ s, onde existe a falha do propulsor f_5 . Neste período, o gráfico de potência mostra um crescimento muito mais acentuado que nos outros casos. Uma vez que se tinha que $\tau=[10;20;5]$, sabe-se que o motor f_5 era essencial para obter estas componentes de força visto que era o único cuja contribuição era positiva para todas as componentes. Assim, quando ocorreu a falha neste propulsor, a compensação necessária foi muito maior, como também se verifica no primeiro gráfico da figura, levando também a um elevado consumo de potência.

Contudo, o essencial a retirar do teste realizado foi a compensação bem realizada por parte dos outros propulsores no momento de falha de um deles, como se pode verificar pelos valores constantes de τ obtidos no segundo gráfico.

4.2 Alocação de forças para os propulsores aéreos

Nesta situação, o veículo recorre exclusivamente aos propulsores aéreos para efetuar o seu movimento. Como já foi referido, a utilização isolada deste tipo de propulsores pode ser conveniente durante operações em que a atuação dos propulsores submersos possa por em causa o bom funcionamento da embarcação.

Os motor escolhido para realizar esta análise dos propulsores aéreos é o MN4116-KV450 da linha MN desenvolvido pela empresa T-Motor [TMOTOR \(2023\)](#), sendo que este será o motor considerado para os quatro propulsores aéreos. De forma a analisar, de forma semelhante ao que se fez em 4.1 como varia o consumo de potência do motor, decidiu-se traçar a curva da potência consumida em função da força de modo a também obter a equação que a caracteriza.

Assim, recolhendo os dados fornecidos em [TMOTOR \(2023\)](#) e recorrendo ao Excel para traçar a curva, obteve-se o seguinte gráfico e equação:

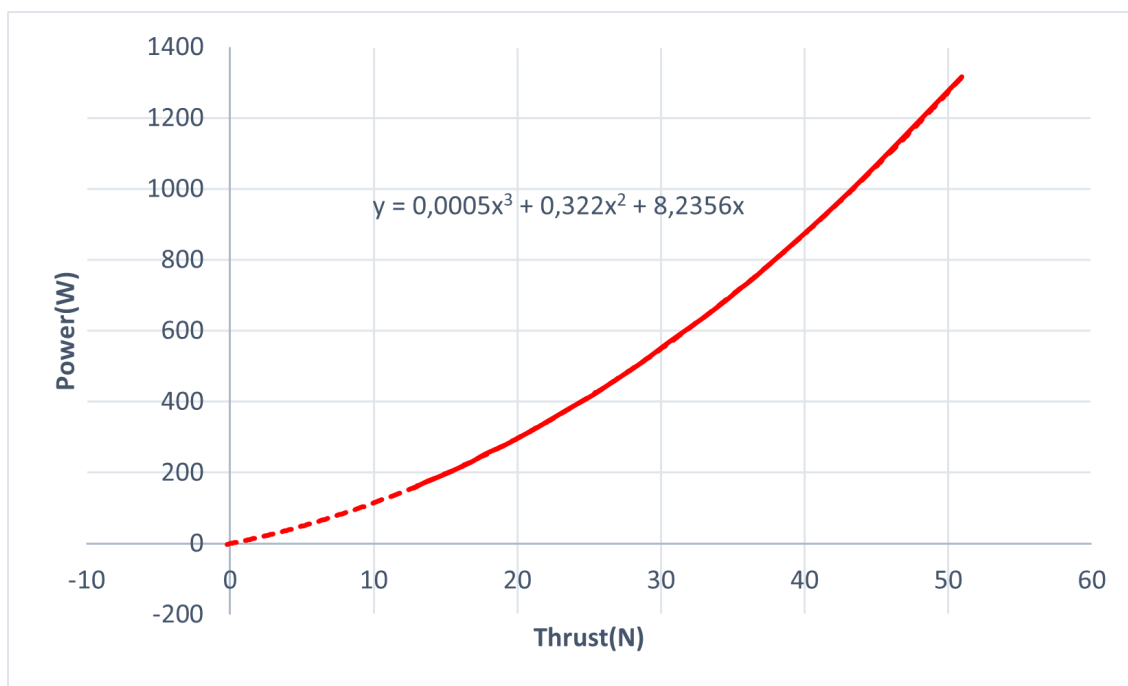


Figura 4.10: Curva de potência em função da força para o motor MN4116-KV450 e respetiva equação

Ao contrário da curva da figura 4.2 obtida para o propulsor T-200, neste caso considera-se que existem apenas forças positivas, visto que a direção do veículo é determinada pela orientação a que os propulsores aéreos se encontram. Assim, se se pretender que o veículo realize uma deslocação frontal mas no sentido negativo ($\tau = [-F_x; 0; 0]$) então a força gerada pelos propulsores seria positiva, no entanto estes teriam que ter uma orientação de 180°. Esta orientação dos propulsores é efetuada por meio de servo-motores. Por uma questão de simplicidade na análise do consumo energético e devido ao seu baixo consumo, considera-se que a atuação dos servo-motores não têm

qualquer consumo energético, sendo o único consumo considerado, aquele provocado pelos quatro motores dos propulsores aéreos.

Outra diferença que se verifica quando se compara esta curva à da figura 4.1, é o maior consumo de potência que este tem para as mesmas forças, o que leva a concluir que o motor MN4116-KV450 é menos eficiente do que o T-200. Esta análise é importante, principalmente quando se pretende que os dois tipos de propulsores, aéreos e submersos, trabalhem em simultâneo. Assim, conhecendo o consumo de potência do motor utilizado, pode-se compreender a melhor maneira de distribuição das forças pelos propulsores.

No caso da utilização isolada dos propulsores aéreos, a distribuição das forças pelos propulsores é mais simples, para certos movimentos, do que com a utilização isolada dos propulsores submersos.

Se consideramos os movimentos unidireccionais, como a deslocação frontal e lateral, e o movimento de rotação do veículo sobre o seu próprio eixo, então, a solução mais lógica e aquela que leva ao menor consumo de potência, passa por dividir de igual forma a força pretendida pelos quatro propulsores existentes. Por exemplo, se se pretender que o veículo ande em frente com uma força total $\vec{F} = 20N$ então a melhor solução passa por orientar os propulsores para um ângulo $\theta=0$ e gerar uma força de $5N$ ($\frac{20N}{4}$) em cada um. Esta solução é a melhor tanto para movimentos frontais, laterais, diagonais e movimentos de rotação do veículo sobre o seu próprio eixo. Naturalmente, dependendo do movimento que se pretende que o veículo efetue, é também necessário orientar devidamente os propulsores aéreos de forma a atingir a força pretendida.

Consideremos o caso em que se tem que $\tau=[20;20;0]$. Aqui, a força que cada propulsor irá gerar será a mesma, sendo esta dada por $\frac{\sqrt{20^2+20^2}}{4} = 5\sqrt{2}$. Contudo, uma vez que se tem as duas componentes de força F_x e F_y não nulas e estas são iguais, então os propulsores devem ser orientados segundo um ângulo de 45° , levando a que o veículo se movimente na diagonal.

A tabela 4.3, ilustra as forças e orientações que cada propulsor deve tomar, assim como a maneira de calcular estas componentes, para que seja realizados os movimentos mais simples e essenciais do veículo. É importante salientar novamente, que estas para além de serem as soluções mais simples de obter, são também as que levam a um menor consumo de potência:

Tabela 4.3: Forças e orientações dos propulsores aéreos em função dos movimentos pretendidos

Forças e orientações dos propulsores aéreos		
Movimento	Força	Orientação dos propulsores
Atuação em <i>surge</i> no sentido positivo	$f_1 = f_2 = f_3 = f_4 = \frac{ F_x }{4}$	$\theta_1 = \theta_2 = \theta_3 = \theta_4 = 0$
Atuação em <i>surge</i> no sentido negativo	$f_1 = f_2 = f_3 = f_4 = \frac{ F_x }{4}$	$\theta_1 = \theta_2 = \theta_3 = \theta_4 = 180$
Atuação em <i>sway</i> no sentido positivo	$f_1 = f_2 = f_3 = f_4 = \frac{ F_y }{4}$	$\theta_1 = \theta_2 = \theta_3 = \theta_4 = 90$
Atuação em <i>sway</i> no sentido negativo	$f_1 = f_2 = f_3 = f_4 = \frac{ F_y }{4}$	$\theta_1 = \theta_2 = \theta_3 = \theta_4 = -90$
Atuação em <i>yaw</i> sentido positivo (máximo binário)	$f_1 = f_2 = f_3 = f_4 = \frac{ \tau_\psi }{4I}$	$\theta_1 = 135$ $\theta_2 = -45$ $\theta_3 = 45$ $\theta_4 = -135$
Atuação em <i>yaw</i> sentido negativo (máximo torque)	$f_1 = f_2 = f_3 = f_4 = \frac{ \tau_\psi }{4I}$	$\theta_1 = -45$ $\theta_2 = 135$ $\theta_3 = -135$ $\theta_4 = 45$
Deslocação na diagonal	$f_1 = f_2 = f_3 = f_4 = \sqrt{F_x^2 + F_y^2}$	$\theta_1 = \theta_2 = \theta_3 = \theta_4 = \text{atan2}(F_x, F_y)$

Contudo, para movimentos que envolvam os três graus de liberdade (*surge*, *sway*, *yaw*), determinar uma solução pode ser uma tarefa mais difícil devido à maior complexidade e à não-linearidade do sistema 3.12. Essa tarefa fica ainda mais difícil quando se pretende procurar uma solução que minimize o consumo de potência do veículo.

A abordagem para resolver este problema, passou por aplicar o algoritmo desenvolvido em (da Silva et al., 2020) ao que os autores chamaram de FCA (Fast Control Allocation). O motivo que levou a esta escolha assenta no facto de os problemas apresentados serem muito semelhantes e deste ter demonstrado bons resultados quando comparado a outros algoritmos de minimização local.

Como descrito em (Santos et al., 2022) o algoritmo de FCA procura transformar o problema não linear de alocação de forças e dividi-lo em parcelas lineares cuja computação e processamento

seja mais fácil e cuja as soluções resultem num vetor $\hat{\tau}$ tal que $|\tau - \hat{\tau}|$ seja muito próximo de 0, demonstrando assim que as soluções obtidas satisfazem 3.12 com um erro aceitável.

Assim, como está descrito nos subcapítulos IV-C,D de (da Silva et al., 2020), no caso de movimentos que envolvam os três graus de liberdade mencionados, podemos considerar que a relação entre as componentes τ e u é caracterizado pelo sistema não linear:

$$\hat{\tau} = M(u) \quad (4.15)$$

onde $\tau \in \mathbb{R}^3$ é o vetor que contém as componentes de força que se pretendem alcançar e $u \in \mathbb{R}^8$ é o vetor cujas variáveis representam as forças (u_1) e ângulo de orientação (u_2) dos propulsores aéreos:

$$u = [u_1, u_2]^T \quad (4.16)$$

$$u_1 = [f_1, f_2, f_3, f_4]^T \quad (4.17)$$

$$u_2 = [\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4]^T \quad (4.18)$$

Desta forma, o problema formulado em 4.20 pode ser decomposto nas seguintes parcelas lineares:

$$\hat{\tau}_1 = M_1(u_2)u_1 \quad (4.19)$$

$$\hat{\tau}_2 = M_2(u_1)u_2 \quad (4.20)$$

Onde $\hat{\tau}_1$ e $\hat{\tau}_2$ representam as componentes de força exigidas para o movimento do veículo, ou seja, o vetor τ . As matrizes $M_1(u_2)u_1$ e $M_2(u_1)u_2$ representam as matrizes dos coeficientes dos sistemas 4.19 e 4.20. Dada a semelhança dos problemas, as diferenças das matrizes $M_1(u_2)$ e $M_2(u_1)$ apresentadas em (da Silva et al., 2020) e as desenvolvidas neste trabalho são mínimas, sendo que a primeira pode ser expressa da seguinte forma:

$$M_1(u_2) = \begin{bmatrix} c\theta_1 & c\theta_2 & c\theta_3 & c\theta_4 \\ s\theta_1 & s\theta_2 & s\theta_3 & s\theta_4 \\ l\frac{\sqrt{2}}{2}(s\theta_1 - c\theta_1) & l\frac{\sqrt{2}}{2}(c\theta_2 - s\theta_2) & l\frac{\sqrt{2}}{2}(c\theta_3 + s\theta_3) & l\frac{\sqrt{2}}{2}(-c\theta_4 - s\theta_4) \end{bmatrix} \quad (4.21)$$

Assim, partindo da matriz 4.21 é possível resolver o sistema 4.19 utilizando a seguinte expressão:

$$\begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ f_4 \end{bmatrix} = M_2(u_1)^\dagger \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ \tau_\psi \end{bmatrix} \quad (4.22)$$

onde $M_1(u_2)^\dagger$ representa matriz pseudoinversa de 4.21. Já os valores de u_2 não podem ser calculados de forma direta uma vez que estes se encontram expressos pelas funções não-lineares, seno e cosseno. Assim é necessário alterar o vetor 4.18 para o seguinte modo:

$$u_2^x = [c\theta_1, s\theta_1, c\theta_2, s\theta_2, c\theta_3, s\theta_3, c\theta_4, s\theta_4]^T \quad (4.23)$$

Onde as notações c e s , representam as funções cosseno e seno, respetivamente. Isto leva a que a matriz $M_2(u_1)u_2$ seja expressa da seguinte forma:

$$M_2(u_1) = \begin{bmatrix} f_1 & 0 & f_2 & 0 & f_3 & 0 & f_4 & 0 \\ 0 & f_1 & 0 & f_2 & 0 & f_3 & 0 & f_4 \\ -l\frac{\sqrt{2}}{2} & l\frac{\sqrt{2}}{2} & -l\frac{\sqrt{2}}{2} & -l\frac{\sqrt{2}}{2} & -l\frac{\sqrt{2}}{2} & l\frac{\sqrt{2}}{2} & -l\frac{\sqrt{2}}{2} & -l\frac{\sqrt{2}}{2} \\ c\theta_1 & s\theta_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & c\theta_2 & s\theta_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c\theta_3 & s\theta_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c\theta_4 & s\theta_4 \end{bmatrix} \quad (4.24)$$

Isto leva a que o sistema 4.20 seja expresso, no final, da seguinte maneira:

$$u_2^x = M_1(u_2)^\dagger [F_x, F_y, \tau_\psi, 1, 1, 1, 1]^T \quad (4.25)$$

É de referir que as quatro últimas linhas da matriz 4.24 são restrições matemáticas que forçam a propriedade $\sin^2\theta + \cos^2\theta = 1$.

Deste modo, tendo o método de resolução de cada um dos sistemas 4.20 e 4.19 é possível proceder à execução do algoritmo.

Este corresponde a um método iterativo, onde em cada iteração se resolvem as equações 4.20 e 4.19, respetivamente, utilizando os métodos já descritos. A resolução destas equações origina novos valores de u_1 e u_2 , os quais podemos designar de u_1^+ e u_2^+ , sendo que para isso é necessário recorrer aos valores de u_1 e u_2 que foram calculados na iteração anterior, aos quais podemos chamar u_1^- e u_2^- .

A cada iteração verifica-se que u_1^+ e u_2^+ se encontram dentro dos limites físicos do propulsor, que neste caso correspondem aos limites de força de cada propulsor (50.95 N) bem como a ori-

entação que estes podem apresentar ([0,360])). Também em cada iteração, após a resolução dos respetivos sistemas, é calculado o erro das soluções u_1^+ e u_2^+ encontradas de modo a testar se este já se encontra abaixo da tolerância definida.

Assim que os erros se encontrem todos abaixo da tolerância estabelecida, então chegou-se a uma solução e o ciclo iterativo pode parar.

Uma explicação mais detalhada do algoritmo, dos sistemas lineares a resolver, bem como um pseudo-código do algoritmo, pode ser encontrada nos capítulos IV-C,D de (da Silva et al., 2020).

Da mesma forma que para o algoritmo descrito no capítulo 4.1, também para o algoritmo de FCA, foi analisado o tempo de execução para os mesmos casos, ou seja para os mesmo valores de τ , apresentados em 4.1.1.1, sendo que para obter resultados mais fiáveis, foram efetuadas 50 execuções do algoritmo para cada caso. Os tempos de execução apresentados, correspondem a uma média desses valores de tempo, sendo que depois também se calculou o desvio-padrão. Os testes foram realizados num PC com um processador Intel i5-7200U e 8Gb de RAM. O PC utiliza o Windows 10 como sistema operativo. A tabela seguinte demonstra os resultados obtidos:

Tabela 4.4: Tempo médio de execução e desvio padrão para a alocação nos propulsores aéreos

Caso	Tempo médio de execução(s)	Desvio-Padrão
Caso 1	0,0622	0,0154
Caso 2	0,0602	0,0148
Caso 3	0,0559	0,0061
Caso 4	0,0557	0,0066

Como se pode verificar, apesar de um ligeiro aumento no tempo médio de execução quando comparado com os tempos médios obtidos na tabela 4.2, estes tempos continuam a ser relativamente baixos e constantes, dados os baixos valores para os desvios padrões obtidos. Outro factor a salientar é que não faz sentido apresentar um número de iterações para os casos 1 e 2, dado que as soluções obtidas não resultam de processos iterativos mas sim das expressões apresentadas na tabela 4.3. No entanto, para os casos 3 e 4, foram necessárias 5 iterações para obter a solução pretendida, dado que foi necessário recorrer ao algoritmo de FCA para se obter a solução.

Mais uma vez, há que ter em conta que, apesar dos bons desempenhos a nível temporal, num sistema real o poder computacional poderia ser menor, pelo que há que ter em conta que os métodos para obter estas soluções têm que depender de cálculos simples para serem viáveis de implementar.

Outra comparação importante a realizar, é a relativa ao consumo de potência obtida para cada caso utilizando os propulsores aéreos face à potência obtida para os mesmos casos mas utilizando os propulsores submersos. A tabela seguinte demonstra, para cada caso, os valores de potência consumida com a utilização dos propulsores submersos e com a utilização dos propulsores aéreos:

Tabela 4.5: Comparação do consumo de potência para a utilização isolada de cada sistema de propulsão

Caso	Potência Consumida com os Propulsores Submersos (W)	Potência Consumida com os Propulsores Aéreos (W)
Caso 1	181.2	320.4
Caso 2	80.4	277.4
Caso 3	248.1	981.0
Caso 4	233.7	1443.6

Como seria de esperar, a potência consumida com a utilização dos propulsores aéreos é significativamente mais dispendiosa do que aquela consumida com a utilização dos propulsores submersos. Este fenómeno é facilmente explicado pela maior eficiência do propulsor T-200 em relação ao motor MN4116-KV450, e é de extrema relevância para quando se pretende proceder à alocação de forças utilizando os dois tipos de sistemas de propulsores, aéreos e submerso.

4.3 Alocação da força para utilização simultânea dos propulsores aéreos e submersos

Tendo analisado os melhores métodos para realizar a distribuição de forças pelos propulsores quando estes atuam de forma isolada, isto é, somente propulsores aéreos ou somente propulsores submersos, pode-se agora fazer a análise da melhor maneira de alocação para quando estes dois sistemas atuam em simultâneo.

Podem ser vários os motivos pelos quais se quer recorrer à utilização conjunta dos dois tipos de propulsores, no entanto, considera-se que as principais razões que podem levar a esta utilização são a necessidade de obter uma força superior àquela que poderia ser proporcionada quando se usam os sistemas de forma isolada e também o facto desta trazer uma maior redundância e robustez na movimentação do veículo, dado que a existência de um maior número de propulsores para os três graus de liberdade leva a uma maior tolerância a falhas a nível dos propulsores. Contudo, com a utilização de um maior número de propulsores, surgem também mais combinações possíveis de alocação para efetuar o movimento do veículo. Assim, tal como nos casos da utilização isolada dos propulsores submerso e aéreos, o objetivo passa por, face a um valor de τ , encontrar uma solução de alocação que resulte num menor consumo de potência possível. É também importante perceber se de facto a utilização dos dois sistemas de propulsão é recompensadora, a nível de consumo de potência, quando comparada com a utilização isolada dos mesmos.

Para a alocação pelos dois tipos de propulsores, a metodologia utilizada passou por, em primeiro lugar, fazer uma análise offline de como se procederia a alocação, isto é, em vez de a embarcação efetuar a otimização da alocação em tempo real, dado que pode ser um processo complexo e demorado, é realizado anteriormente uma análise das curvas de distribuição da força por cada sistema de propulsão em função da força ou binário pretendidos. Obtendo essas curvas, é

possível depois determinar as equações que as regem que, por sua vez, podem ser utilizadas já em tempo real pelo software da embarcação para que este efetue a distribuição da força por cada sistema de propulsão. Realizada essa distribuição por cada sistema de propulsão, são depois aplicados os algoritmos já descritos em 4.1 e 4.2, que por sua vez geram as forças otimizadas para cada propulsor. Esta metodologia é ilustrada pelo seguinte diagrama:

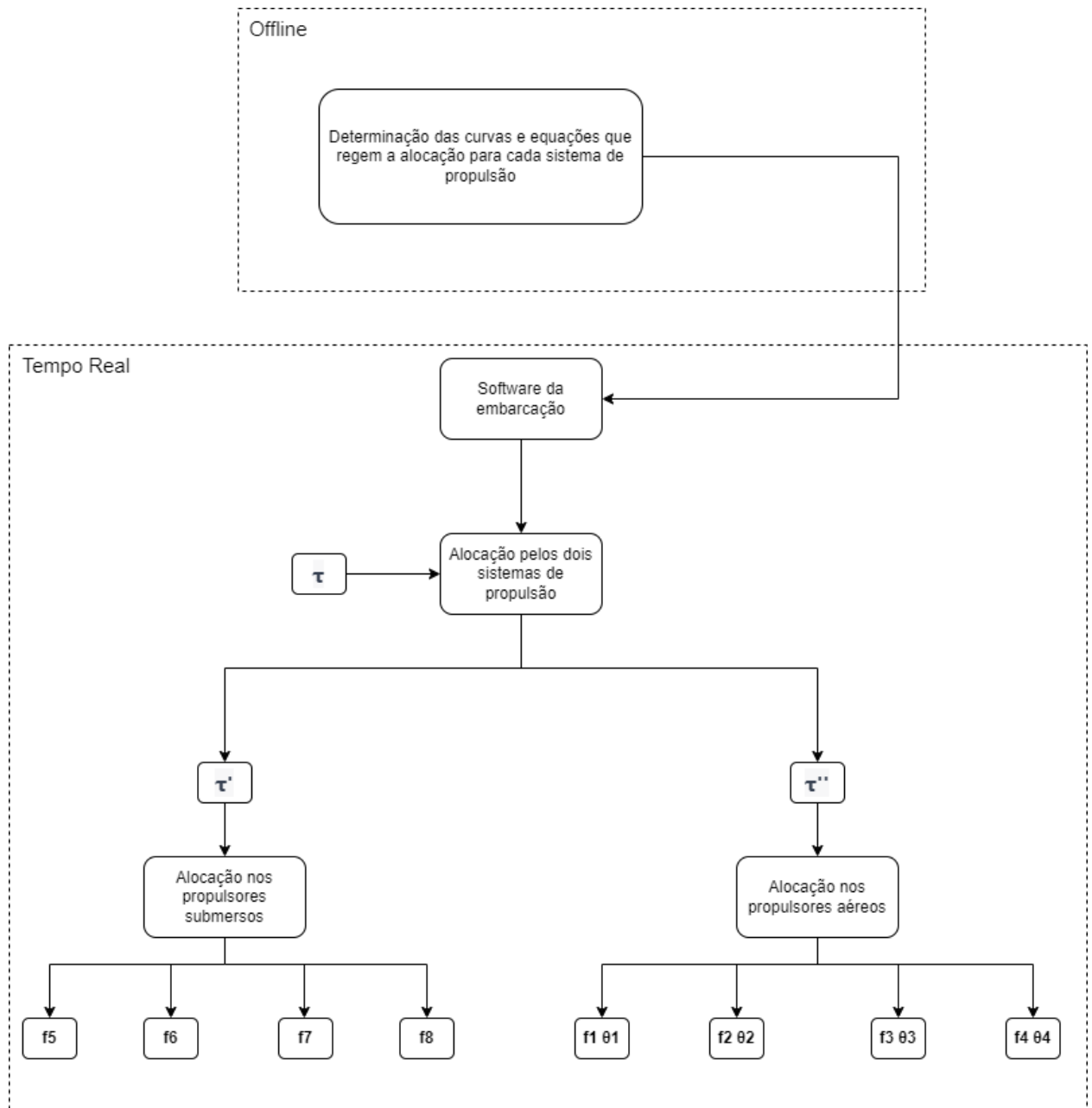


Figura 4.11: Diagrama que demonstra o processo de alocação de forças para os dois sistemas de propulsão

Deste modo, abordou-se este problema para os dois movimentos mais simples do veículo,

sendo estes o movimento de translação, que pode corresponder a uma movimentação lateral ou frontal, e para o movimento de rotação do veículo sobre o seu próprio eixo.

Consideremos, por exemplo, um caso no qual se tem $\tau=[30;0;0]$, ou seja, pretende-se que o veículo efetue uma deslocação frontal no sentido positivo. Então já se sabe que, neste caso, é possível obter duas soluções diferentes no que toca a distribuição de forças, sendo estas as soluções obtidas quando se utiliza somente os propulsores aéreos ou os submersos, tendo estas dois consumos energéticos diferentes. Contudo, no caso da utilização dos dois sistemas, é possível distribuir a força requerida, em termos percentuais, por cada um dos sistemas, de modo a tentar obter uma solução que melhore o consumo energético. No caso considerado, poderia ser possível alocar 20% da força pretendida aos propulsores aéreos, tendo agora estes que obter uma solução para um $\tau'=[6;0;0]$, e os restantes 80% da força seria alocada para os propulsores submersos, onde se teria que descobrir a solução para $\tau''=[24;0;0]$. Caso a soma das potências consumidas pelos dois propulsores resultasse num valor menor do aquele que se obteve utilizando os propulsores em separado, então, os valores de forças obtidos para cada propulsor seriam os utilizados para efetuar a deslocação do veículo.

Desta forma, para vários conjuntos de valores da forma $\tau=[F_x;0;0]$, foi realizada esta análise, na qual, inicialmente se alocava a força pretendida totalmente aos propulsores aéreos, e a cada iteração, ia-se reduzindo essa alocação em 0.1% e, paralelamente, aumentava-se alocação nos propulsores submersos em 0.1% também, levando a que na última iteração a força fosse totalmente alocada aos propulsores submersos. Esta análise pode também ser feita para a deslocação lateral do veículo, onde se tem que $\tau=[0;F_y;0]$, no entanto, os resultados iriam ser os mesmos devido ao design e configuração dos motores escolhida, pelo que a análise para a deslocação frontal é suficiente. Os resultados obtidos são os seguintes:

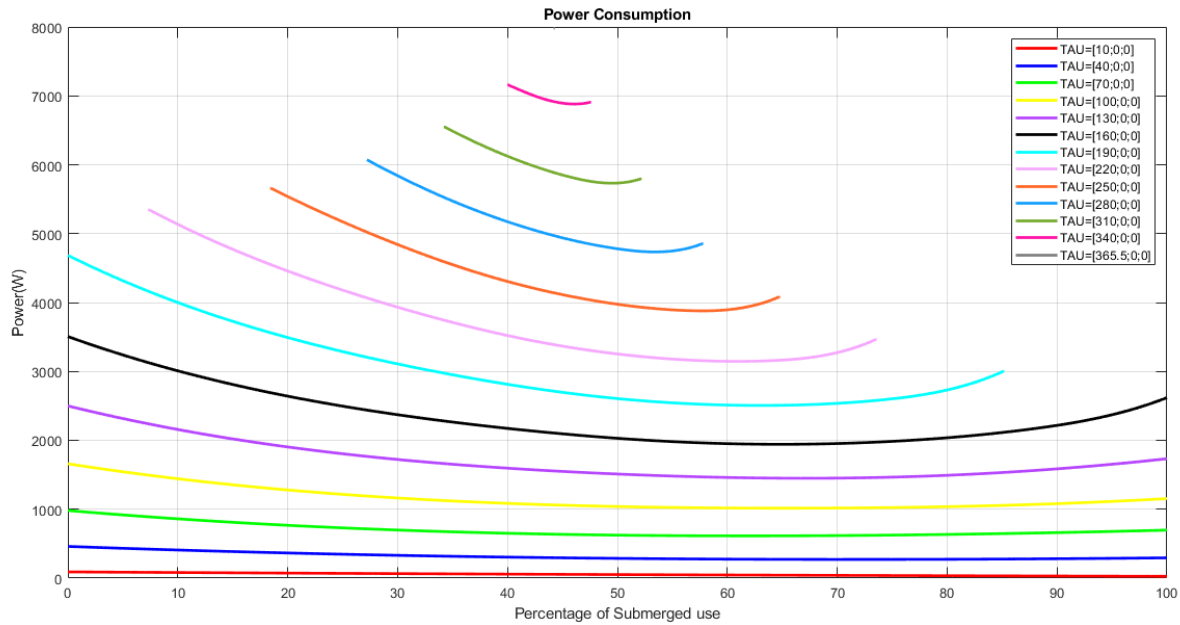


Figura 4.12: Potência consumida em função da percentagem de alocação das forças para os propulsores submersos

Como se pode verificar pelo gráfico obtido, para as cinco primeiras curvas, os valores de potência obtidos resultaram de uma alocação inicial de 0% para os propulsores submersos (100% para os aéreos) e acabaram numa alocação de 100% para os propulsores submersos (0% para os aéreos).

No entanto, para as restantes curvas, esta alocação isolada, ou seja, totalmente dependente dos propulsores aéreos ou submersos, não é possível. Este fenómeno ocorre devido às limitações de força que os propulsores submersos podem gerar.

Se considerarmos que o veículo se quer mover para a frente com o máximo de força possível utilizando apenas os propulsores submersos então tem-se que:

$$F_x/\max = (2 \cdot F_{\text{forward_max}} + 2 \cdot F_{\text{reverse_max}}) \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} \approx 162N \quad (4.26)$$

em que $F_{\text{forward_max}}$ e $F_{\text{reverse_max}}$ correspondem aos limites de propulsão do propulsor T200 para quando este atua em *forward* (64.92N) e *reverse* (-49.42N).

Da mesma maneira, se o veículo se quiser deslocar para a frente com a máxima força utilizando somente os propulsores aéreos então tem-se que:

$$F_x/\max = F_{\text{aerial_max}} \cdot 4 \approx 204N \quad (4.27)$$

em que $F_{\text{aerial_max}}$ corresponde à máxima força em Newtons (50.95N) que o motor MN4116-KV450 consegue fornecer.

Assim, verifica-se que a máxima força que se pode exigir do veículo quando este quer andar para a frente ou para o lado é de:

$$F_x/\text{maxTotal} = 203.8 + 161.7 \approx 366N \quad (4.28)$$

Estas equações mostram que, para determinadas valores de τ é mesmo necessário recorrer à utilização dos dois tipos de propulsores, para se atingir a força pretendida.

Consideremos, por exemplo, a curva laranja do gráfico da figura 4.12. Neste curva, pretendia-se obter uma valor total de força de 250N. Se se recorrer apenas aos propulsores aéreos, ou seja uma alocação de 100% para os mesmos, então torna-se impossível obter os 250N devido à condição expressa em 4.27. Da mesma maneira, se pretender alocar 90% da força aos propulsores aéreos e 10% aos submersos, então continua a ser impossível alcançar a força, uma vez que $90 \cdot 0.01 \cdot 250 = 225 > 203.8$. De facto, o primeiro valor da curva ocorre quando se tem uma percentagem de alocação de força para os motores submersos de 18.4%, o que significa que ocorre uma alocação de 81.6% para os propulsores aéreos, obtendo-se um força de $81.6 \cdot 0.01 \cdot 250 = 204N$ cujo valor já consegue ser obtido utilizando os propulsores aéreos. Já o último valor da curva, faz uma alocação de 64.8% da força para os propulsores submersos uma vez que, se se fizesse uma alocação de 64.9% então, resultava numa força total de $64.9 \cdot 0.01 \cdot 250 = 162.25N$ cujo valor já não consegue ser obtido recorrendo apenas aos propulsores submersos. No fundo, o intervalo [18.4%,64.9%] corresponde aos valores possíveis de alocação para os propulsores submersos onde se consegue obter uma força total de 250N.

Naturalmente, à medida que a força total exigida é maior, o intervalos de valores de alocação com os quais é possível obter essa mesma força é menor, levando a uma curva mais pequena como é demonstrado na figura 4.12.

A tabela seguinte, apresenta os valores de alocação, tanto para os propulsores submersos como para os aéreos, que resultaram num menor consumo de potência, ou seja, os valores mínimos de cada curva obtida em 4.12:

Tabela 4.6: Percentagem de alocação da força pretendido para cada sistema de propulsão

Força (N)	Alocação para os Propulsores Submersos (%)	Alocação para os Propulsores Aéreos (%)
10	100	0
40	70.4	29.6
70	62	38
100	65.4	34.6
130	66.6	33.4
160	64.8	35.2
190	63.1	36.9
220	60.9	39.1
250	57.8	42.2
280	53.4	46.6
310	49.5	50.5
340	46.1	53.9
365.5	44.3	55.7

De modo a verificar se o processo de alocação entre os dois sistemas é recompensador a nível do consumo de potência, decidiu-se também verificar qual seria o consumo caso estas forças fossem obtidas recorrendo apenas aos propulsores submersos ou apenas aos propulsores aéreos. Para isso obteve-se o seguinte gráfico:

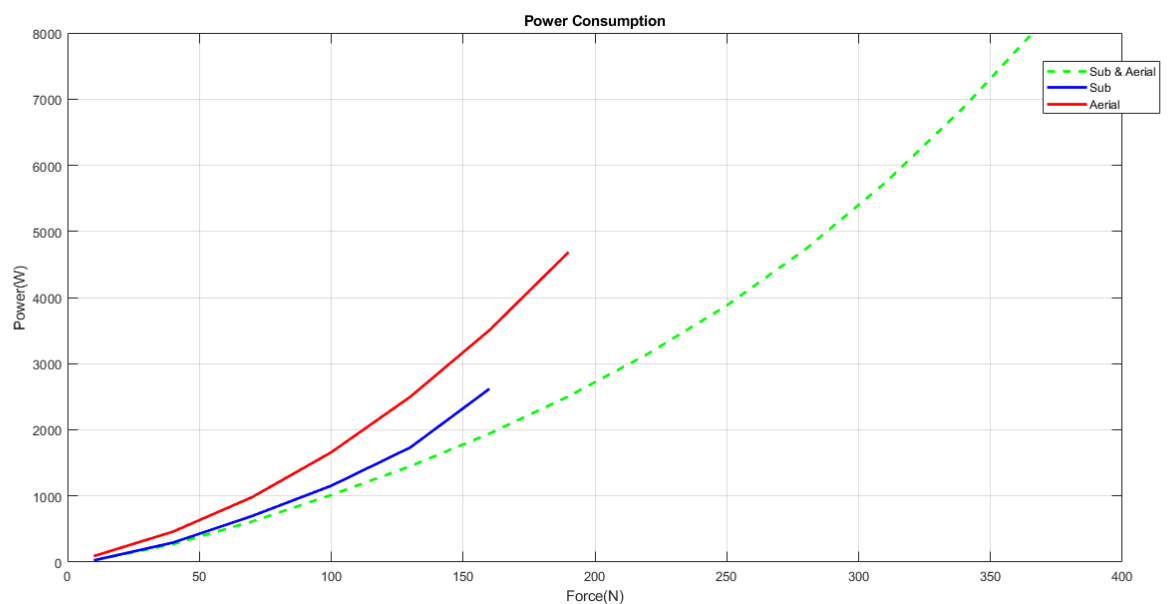


Figura 4.13: Potência consumida em função da força para atuação isolada dos propulsores aéreos (vermelho), propulsores submersos (azul) e atuação simultânea dos dois tipos de propulsores (verde)

Pelo gráfico, verifica-se que para valores pequenos de força (intervalo aproximado de [10 N, 50

N)), os valores de potência são bastante parecidos com aquelas que se obtinham caso se recorresse ao uso isolado dos propulsores submersos. Contudo, à medida que a força pretendida aumenta, é possível observar que o consumo de potência é menor quando se utilizam os dois sistemas de propulsão. Naturalmente que a curva a verde acaba por ultrapassar as outras duas curvas, uma vez que estas estão limitadas pelo máxima força que os sistemas conseguem gerar isoladamente. Este gráfico leva a concluir que, caso haja disponibilidade de usar os dois tipos de propulsores, então, é mais recompensador proceder à alocação da força pelos dois sistemas do que à utilização isolada dos mesmos.

Como já foi referido, na tabela 4.6 estão representados os valores que correspondem à melhor alocação possível no que toca ao consumo de potência. Estes valores tornam possível traçar as curvas de percentagem de alocação em função da força pretendida. Por conseguinte, obtendo essas curvas, é possível determinar as equações que as regem. Dado que a alocação otimizada das forças que cada propulsor gera pode ser uma tarefa complexa e demorada de executar em tempo real, então a análise destas curvas e determinação das suas equações é um processo vantajoso uma vez que pode ser efetuado offline, sendo que depois estas equações podem então ser usadas pelo software do veículo para, face a uma determinada força pretendida, realizar de forma imediata a alocação que minimiza o consumo de potência. As curvas obtidas e as respetivas equações que as caracterizam foram as seguintes:

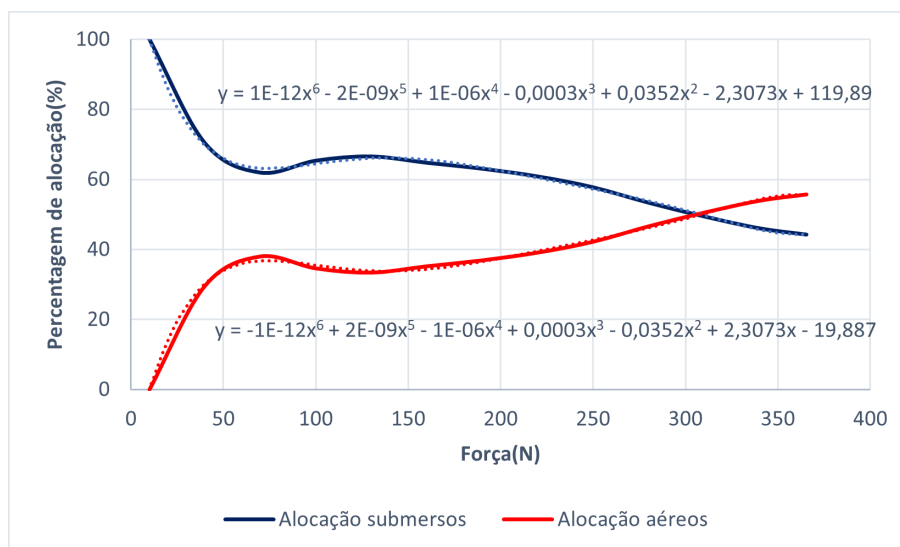


Figura 4.14: Curvas de alocação em função da força pretendida para cada sistema de propulsão e respetivas equações

Outro factor relevante a analisar consiste em perceber a percentagem de atuação que cada sistema de propulsores está a utilizar face à força máxima que cada um destes consegue fornecer. Assim, para os diferentes valores de τ analisados decidiu-se calcular essas percentagens e obteve-se o seguinte gráfico:

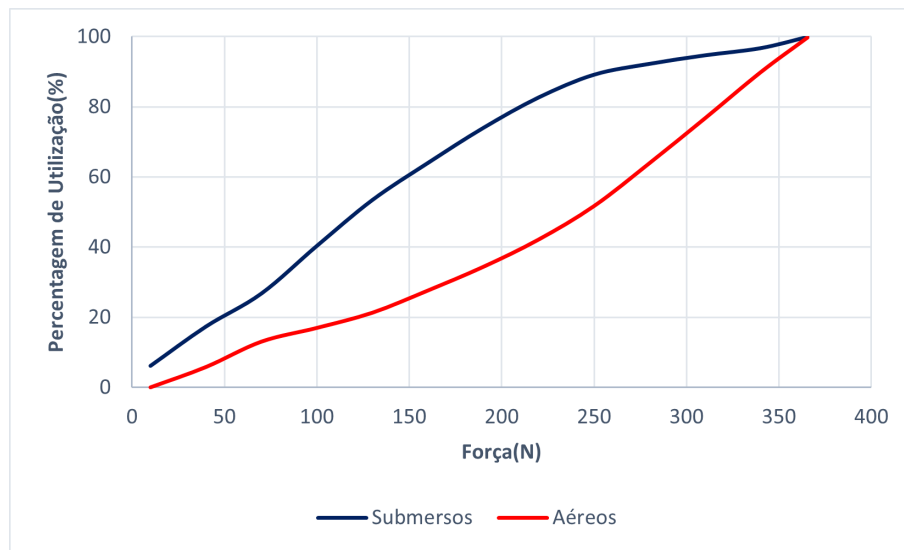


Figura 4.15: Utilização de cada sistema de propulsão em função da força pretendida

Como se pode verificar, a percentagem de utilização dos propulsores submersos é sempre superior à dos aéreos o que é facilmente explicado pela sua maior eficiência. Isto também leva à conclusão que, para forças superiores às máximas forças que podem ser geradas individualmente para cada sistema de propulsão, é mais recompensador ter os propulsores submersos numa percentagem de atuação mais elevado do que os propulsores aéreos. Obviamente, no caso em que se requer a força máxima que o veículo pode atingir, ambos os sistemas de propulsores têm que funcionar com a máxima força, levando a que ambas as curvas se intersectem no ponto que corresponde a 100% de atuação, como se pode verificar pela figura.

Realizada esta análise para o movimento de translação do veículo, mais concretamente para a sua deslocação frontal, foi efetuado o mesmo processo para o movimento de rotação do veículo sobre o seu próprio eixo. Desta maneira, realizou-se a mesma análise de alocação percentual que se fez para a translação, mas desta vez para vários valores de binário, ou seja, para valores de τ da forma $\tau=[0;0;\tau_\psi]$. As curvas obtidas para esta análise foram as seguintes:

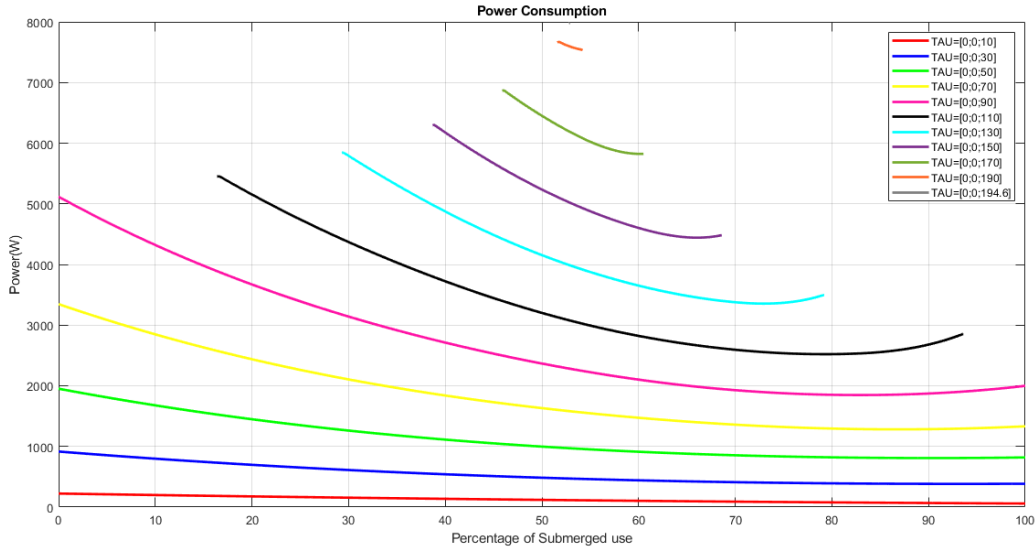


Figura 4.16: Potência consumida em função da percentagem de alocação de binário para os propulsores submersos

Mais uma vez, as curvas apresentadas mostram um fenómeno semelhante àquele demonstrado na figura 4.12 onde, a partir de determinados valores de binário, torna-se impossível para os propulsores aéreos ou submersos atingirem esses valores se trabalharem de forma isolada, sendo necessário recorrer à utilização de ambos os sistemas em simultâneo.

No caso do movimento de rotação, o valor máximo de binário que se pode obter com a utilização isolada dos propulsores submersos é dado por:

$$\tau_{\psi} = (2 \cdot F_{\text{forward_max}} + 2 \cdot F_{\text{reverse_max}}) \cdot l \approx 103Nm \quad (4.29)$$

onde se tem que $l=0.450m$ que por sua vez corresponde ao raio do veículo.

Já no caso dos propulsores aéreos, o máximo binário gerado é dado por:

$$\tau_{\psi} = 4 \cdot F_{\text{aerial_max}} \cdot l \approx 92Nm \quad (4.30)$$

Assim, o binário máximo que o veículo consegue gerar recorrendo aos dois sistemas de propulsão é dado por.

$$\tau_{\psi} = 92 + 103 \cdot l \approx 195Nm \quad (4.31)$$

Naturalmente, como acontece com a translação, à medida que o binário pedido é maior, os

intervalos de alocação para os quais se consegue obter o valor pretendido são menores. A tabela seguinte demonstra as percentagens de alocação obtidas para os dois sistemas de propulsão que minimizam o consumo de potência para os valores de binário analisados:

Tabela 4.7: Percentagem de alocação do binário pretendido para cada sistema de propulsão

Binário (Nm)	Alocação para os Propulsores Submersos (%)	Alocação para os Propulsores Aéreos (%)
10	100	0
30	93.2	6.8
50	90.7	9.3
70	86.8	13.2
90	82.8	17.2
110	79.2	20.8
130	72.9	27.1
150	66	34
170	60.2	39.8
190	54.2	45.8
194.6	52.8	47.2

Face aos valores de potência mínima obtidos, traçou-se um gráfico semelhante ao da figura 4.13 onde se comparavam estes valores, com os valores de potência mínimos obtidos com a utilização dos sistemas de propulsão de forma separada, ou seja, apenas com a utilização dos propulsores submersos e apenas com a utilização dos propulsores aéreos. Os resultados obtidos são os seguintes:

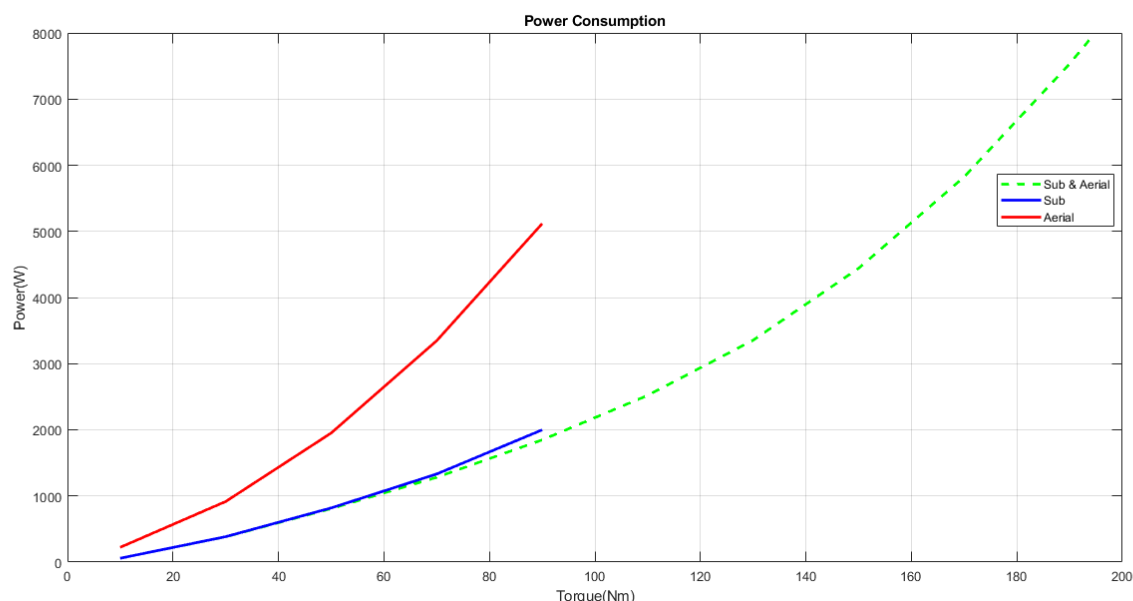


Figura 4.17: Potência consumida em função do binário para atuação isolada dos propulsores aéreos (vermelho), propulsores submersos (azul) e atuação simultânea dos dois tipos de propulsores (verde)

Neste gráfico, observa-se que a discrepância entre a curva relativa aos propulsores submersos e a obtida relativa aos propulsores aéreos é maior do que aquela apresentada na figura 4.13. Isto acontece porque, apesar da maior eficiência dos propulsores submersos face aos aéreos, quando se pretende efetuar a deslocação lateral ou frontal do veículo, existe um desperdício de força por parte dos propulsores submersos devido à sua orientação fixa de 45° em relação à direção pretendida, ou seja, é necessário uma força maior do que aquela que seria precisa caso estes tivessem uma orientação de 0° . Este aumento de força leva a um maior consumo de potência. Já no caso dos aéreos, devido à possibilidade que estes têm de se orientar conforme a direção pretendida, não existe este desperdício de força, visto que se se pretender que o veículo se desloque em frente, este propulsores apenas têm que se orientar segundo um ângulo de 0° .

Contudo, no caso do movimento de rotação, a orientação dos propulsores submersos, apesar de fixa, é a ideal e a mesma utilizada pelos propulsores aéreos para se obter o máximo de binário. Isto leva a que, ao contrário do que acontece na translação, toda a força gerada por cada propulsor submerso seja totalmente aproveitada o que, por sua vez, leva a que as forças necessárias para gerar um certo binário sejam menores. Consequentemente, a potência consumida para a rotação utilizando os propulsores submersos possui uma discrepância ainda maior face à utilização dos propulsores aéreos, do aquela que se verifica no caso do movimento de translação.

Assim, é normal que exista uma maior aproximação das curvas relativa aos propulsores submersos e aéreos no caso da deslocação frontal, como mostra a figura 4.13, do que no caso do movimento de rotação ilustrado pela figura 4.17.

Outra factor que difere entre ambas as figuras, é o facto de a curva que representa a utilização dos dois tipos de propulsores estar mais próxima da curva que representa os propulsores submersos em 4.17 do que em 4.13. Este fator é também validado pelos valores de alocação para os propulsores submersos expressos na tabela 4.7 onde se verifica que para binários até 50N a percentagem de alocação foi sempre superior a 90%. Naturalmente, à medida que o binário exigido aumentava, essa percentagem de alocação foi diminuindo gradualmente.

Daqui pode-se concluir que, apesar de a utilização dos dois tipos de sistema de propulsão resultar num menor consumo de potência à medida que o binário exigido é maior, este consumo não se traduz num decréscimo muito significativo do que aquele que seria obtido caso se recorresse apenas aos propulsores submersos, sendo que isto é para valores de binário que sejam possíveis de alcançar somente com a utilização dos propulsores submersos. Para valores superiores a esses, então é mesmo necessário recorrer à utilização dos dois tipos de propulsores.

Com os valores de alocação obtidos para os diferentes binários, traçou-se também as curvas de alocação em função da binário pretendido, tanto para os propulsores submersos como para os propulsores aéreos, cujas equações, tal como no caso da translação, foram determinadas offline e podem depois ser utilizadas pelo software do veículo para efetuar rapidamente a alocação pelos dos tipos de sistemas de propulsores em tempo real. As curvas e respetivas equações obtidas foram as seguintes:

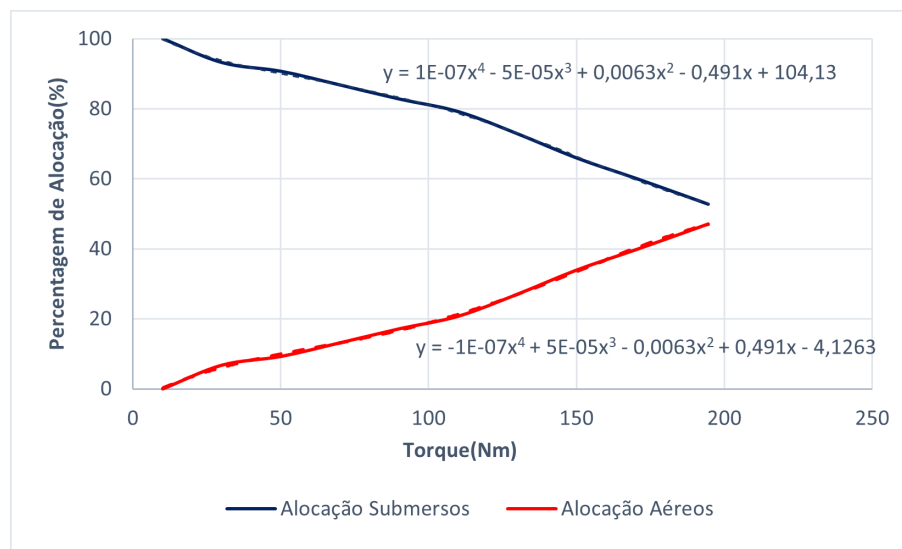


Figura 4.18: Curvas de alocação em função do binário pretendido para cada sistema de propulsão e respetivas equações

Quanto às curvas de percentagem de utilização que cada sistema de propulsores utiliza face ao binário máximo que cada um consegue gerar, obteve-se o seguinte gráfico:

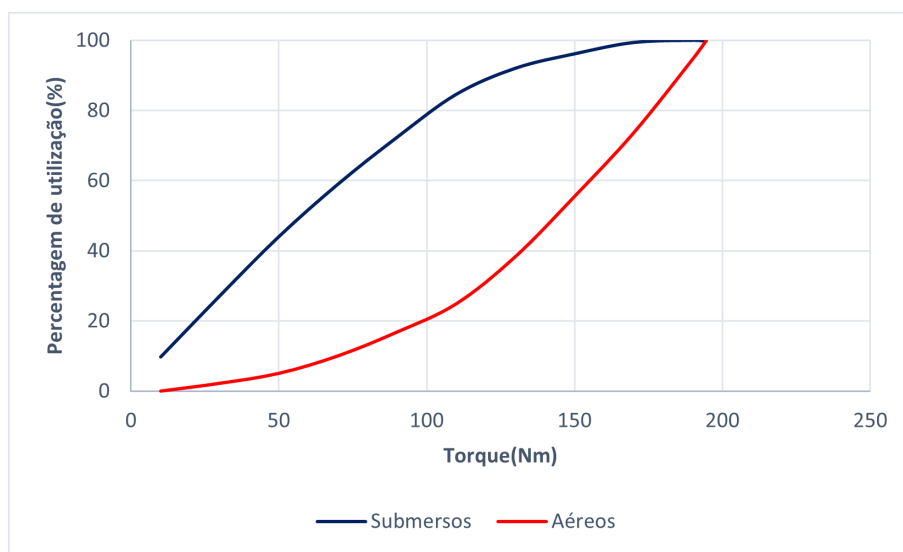


Figura 4.19: Utilização de cada sistema de propulsão em função do binário pretendido

Da mesma maneira que na figura 4.15, observa-se uma maior percentagem de utilização por parte dos propulsores submersos devido à sua maior eficiência, sendo que, a partir de valores de binário próximos dos $170Nm$ os propulsores submersos funcionam praticamente a 100%. Logicamente, para o binário máximo requerido para o veículo ambos os sistemas de propulsão se encontram a funcionar a 100%.

Mais uma vez, é importante referir que toda esta análise das curvas e a determinação das equações que as caracterizam é um processo que pode ser realizado offline, isto é, não tem que ser realizado pelo veículo em tempo real. Desta forma, recorrendo às equações obtidas, é extremamente simples e rápido para o software do veículo proceder à alocação de força, sendo apenas necessário determinar a percentagem de alocação para cada sistema de propulsão, recorrendo às equações obtidas, e de seguida utilizar os algoritmos apresentados nos capítulos 4.2 e 4.1 para que estes façam a devida alocação pelos propulsores que os compõem.

Chapter 5

Conclusões e Trabalho Futuro

5.1 Conclusões

Com o desenvolvimento deste trabalho, foi possível obter inúmeras conclusões relativas às soluções determinadas para os desafios apresentados.

Em primeiro lugar, quanto à configuração dos propulsores submersos, verificou-se que a configuração em 'X' apesar de ligeiramente menos eficiente a nível de consumo de potência (cerca de 6%), na atuação em *surge* e *sway*, do que a configuração em '+', esta permite obter uma máxima força, e consequentemente uma máxima velocidade, nestas direções significativamente maior, tendo sido obtido valores de força máxima cerca de 30% superiores do que os obtidos na configuração em '+'. Assim, dado que as diferenças obtidas entre as forças máximas que cada configuração proporciona são significativamente maiores quando comparadas com as diferenças obtidas para o consumo de potência, decidiu-se optar pela configuração em 'X' para os propulsores submersos.

Outro factor importante a considerar é o facto de na configuração em 'X' os propulsores submersos terem uma orientação de 45° face a *surge*. Esta orientação permite que, apesar de haver um desperdício da força aplicada em cada propulsor na atuação em *surge* e *sway*, a força e velocidades máximas sejam iguais para ambas as direções, conferindo uma maior eficácia no movimento.

Quanto ao modelo de simulação desenvolvido no capítulo 3.3 este mostrou-se útil no sentido que permite, com base nos parâmetros hidrodinâmicos do ASV que se pretende testar, perceber o comportamento da embarcação, no que diz respeito à velocidade e posição que esta atinge, face aos valores de força que cada propulsor gera.

Relativamente ao método desenvolvido para a alocação de força nos propulsores submersos, este apresentou resultados promissores tendo em conta o seu tempo de execução e redução no consumo de potência para a movimentação do veículo, obtendo-se reduções significativas de 35.8% e 29.0% nos casos 3 e 4 do capítulo 4.1.1.1, respetivamente. Ainda assim, há que reconsiderar para que casos de atuação é que o algoritmo é recompensador, uma vez que, nos casos 1 e 2, a diferença no consumo de potência entre a solução inicial e a solução final foi pouco significativa, sendo esta cerca de 3% para ambos os casos.

Para o caso de falha de um dos propulsores submersos observou-se uma redistribuição da força total pelos restantes propulsores ativos que, apesar de ter resultado num aumento significativo no consumo de potência, permitiu que o veículo efetuasse o movimento pretendido sem qualquer tipo de restrição.

No caso da utilização exclusiva dos propulsores aéreos, para os movimentos do veículo em *surge*, *sway*, *yaw* e deslocação na diagonal, a alocação de força pelos propulsores é simples e consiste essencialmente em dividir a força total pretendida pelos 4 propulsores e orientá-los devidamente. Contudo, para movimentos que envolvam mais do que um grau de liberdade, é necessário recorrer ao método de FCA, que por sua vez, apresentou bons resultados no que toca ao tempo de execução. Com a utilização exclusiva dos propulsores aéreos, quando submetidos aos mesmos testes que efetuou apenas utilizando os propulsores submersos, o veículo apresentou consumos de potência mais elevados, o que pode ser explicado pela maior eficiência destes últimos.

Para a utilização mútua dos dois tipos de sistema de propulsão, conclui-se que, no caso do ASV em questão, para movimentos em *surge* e *sway* que envolvam forças acima de cerca de 50N, é mais recompensador a nível de consumo recorrer a uma distribuição da força pelos dois tipos de propulsores. Para forças abaixo desse valor, a utilização exclusiva dos propulsores submersos mostra-se tão eficiente como a utilização dos dois tipos de propulsores pelo que, por uma questão de simplicidade, esta deve ser utilizada. Contudo, é importante salientar que estes resultados são influenciados pelos tipos de propulsores escolhidos para este trabalho, o que significa que num outro caso, a distribuição da força pelos dois sistemas de propulsão pode ser mais recompensadora a partir de outros valores de força.

Para movimentos em *yaw*, apesar de continuar a ser mais recompensador recorrer aos dois tipos de propulsores, a diferença no consumo de potência quando comparada à utilização isolada dos propulsores submersos é pouco significativa, pelo que mais uma vez, por uma questão de simplicidade, pode-se recorrer apenas a estes para efetuar o movimento.

Logicamente, para ambos os tipos de movimento, se se quiser atingir forças que ultrapassem os limites de força que cada sistema de propulsão consegue fornecer isoladamente, então, tem que se recorrer a ambos os propulsores.

O método desenvolvido que permitiu retirar estas conclusões relativamente à utilização dos dois tipos de sistemas de propulsão consiste numa análise que é realizada offline e que consiste em determinar as equações para a alocação em função da força/binário pretendidos. Naturalmente, este método pode ser aplicado para diferentes tipo de propulsores e meios de propulsão o que por sua vez irá levar a equações diferentes. A grande vantagem deste método é que é possível recorrer ao *software* do veículo para que este efetue a alocação em tempo real da força total pelos dois sistemas de propulsão com base nas equações que foram determinadas numa análise prévia offline, levando a uma maior simplicidade e rapidez no processo de alocação. Após efetuada esta alocação pelos dois sistemas de propulsão é apenas necessário recorrer aos métodos desenvolvidos em 4.1 e 4.2 para efetuar a distribuição final da força pelos propulsores.

5.2 Trabalho Futuro

Como desenvolvimento futuro deste trabalho, seria interessante testar os casos de avaria na utilização dos dois tipos de sistema de propulsão. Para isso, poderia-se recorrer ao método de FCA, sendo que nesse caso o processo iterativo descrito no capítulo 4.2 seria o mesmo, sendo apenas necessário alterar o número de atuadores disponíveis e consequentemente o número de variáveis representados pelos vetores u_1 e u_2 . Desde modo, caso não houvesse falhas em nenhum propulsor então tínhamos que $u_1 = [f_1, f_2, f_3, f_4, f_5, f_6, f_7, f_8]^T$ e $u_2 = [\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4]^T$, contudo, caso houvesse uma falha, por exemplo, no propulsor f_1 então já se teria que $u_1 = [f_2, f_3, f_4, f_5, f_6, f_7, f_8]^T$ e $u_2 = [\theta_2, \theta_3, \theta_4]^T$.

Também recorrendo ao método de análise offline já descrito, poderia ter sido efetuada a análise da alocação de força pelos dois sistemas de propulsão para movimentos que envolvessem mais do que um grau de liberdade, assim como a determinação das equações que caracterizassem as forças e binários pretendidos em função da alocação para cada sistema de propulsão.

References

- Alessandro Baldini, Antonio Fasano, Riccardo Felicetti, Alessandro Freddi, Sauro Longhi, and Andrea Moneriù. A constrained thrust allocation algorithm for remotely operated vehicles. *IFAC-PapersOnLine*, 51(29):250–255, 2018.
- Juan S Cely, Miguel Ángel Pérez Bayas, Marco Carpio, Cecilia Elisabet García Cena, Avishai Sintov, and Roque Saltaren. Control strategy of an underactuated underwater drone-shape robot for grasping tasks. *Sensors*, 22(22):8828, 2022.
- Mathaus Ferreira da Silva, Leonardo de Mello Honório, Murillo Ferreira dos Santos, Accacio Ferreira dos Santos Neto, Nuno Alexandre Cruz, Anibal CC Matos, and Luis Gustavo Fortes Westin. Project and control allocation of a 3 dof autonomous surface vessel with aerial azimuth propulsion system. *IEEE Access*, 9:5212–5227, 2020.
- Sebastian East and Mark Cannon. An admm algorithm for mpc-based energy management in hybrid electric vehicles with nonlinear losses. In *2018 IEEE Conference on Decision and Control (CDC)*, pages 2641–2646. IEEE, 2018.
- Sebastian East and Mark Cannon. Energy management in plug-in hybrid electric vehicles: Convex optimization algorithms for model predictive control. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 28(6):2191–2203, 2019.
- Thor I Fossen. Guidance and control of ocean vehicles. *University of Trondheim, Norway, Printed by John Wiley & Sons, Chichester, England, ISBN: 0 471 94113 1, Doctors Thesis*, 1999.
- Daniel Frank, Andrew Gray, Kevin Allen, Tess Bianchi, Kipling Cohen, Daniel Dugger, Jake Easterling, Matthew Griessler, Sylvie Hyman, Matthew Langford, et al. University of florida: Team navigator ams. In *RobotX Forum*, 2016.
- Weixuan Jiao, Li Cheng, Di Zhang, Bowen Zhang, Yeping Su, and Chuan Wang. Optimal design of inlet passage for waterjet propulsion system based on flow and geometric parameters. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2019:1–21, 2019.
- Nadir Kapetanović, Đula Nađ, and Nikola Mišković. Towards a heterogeneous robotic system for autonomous inspection in mariculture. In *OCEANS 2021: San Diego–Porto*, pages 1–6. IEEE, 2021.
- Omer Kemal Kinaci, Cihad Delen, Rahman Bitirgen, Afsin Bayezit, Ismail Bayezit, Deniz Ozturk, and Burak Gunguder. Free-running tests for dtc self-propulsion—an investigation of lateral forces due to the rudder and the propeller. *Applied Ocean Research*, 116:102877, 2021.
- Emil Klintberg and Sebastien Gros. A parallelizable interior point method for two-stage robust mpc. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 25(6):2087–2097, 2016.

- Chunying Li, Shuxiang Guo, and Jian Guo. Performance evaluation of a hybrid thruster for spherical underwater robots. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 71:1–10, 2022.
- Chunyue Li, Jiajia Jiang, Fajie Duan, Wei Liu, Xianquan Wang, Lingran Bu, Zhongbo Sun, and Guoliang Yang. Modeling and experimental testing of an unmanned surface vehicle with rudderless double thrusters. *Sensors*, 19(9):2051, 2019.
- Yongyi Lin, Jialu Du, Guibing Zhu, and Huazhen Fang. Thruster fault-tolerant control for dynamic positioning of vessels. *Applied Ocean Research*, 80:118–124, 2018.
- Di Lu, Chengke Xiong, Zheng Zeng, and Lian Lian. A multimodal aerial underwater vehicle with extended endurance and capabilities. In *2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pages 4674–4680. IEEE, 2019.
- Jixue Mo, Bing Li, Hailin Huang, and Ying Hu. Study of a novel amphibious water jet thruster for returnable jumping. In *2019 IEEE International Conference on Cyborg and Bionic Systems (CBS)*, pages 141–146. IEEE, 2019.
- Joseph Moore, Andrew Fein, and William Setzler. Design and analysis of a fixed-wing unmanned aerial-aquatic vehicle. In *2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pages 1236–1243. IEEE, 2018.
- Hung D Nguyen, Tien Q Nguyen, Yuanyuan Wang, Minh Q Tran, and Chuong Nguyen. Modelling and control of a model scaled surface vessel with twin propellers, single rudder and two side thrusters. In *2022 Australian & New Zealand Control Conference (ANZCC)*, pages 87–92. IEEE, 2022.
- Oceanalpha. Dolphin 1 | unmanned surface vehicleoceanalpha. <https://www.oceanalpha.com/product-item/dolphin1/>, July 2023. Accessed on July 25, 2023.
- Angelo Odetti, Marco Altosole, Gabriele Bruzzone, Massimo Caccia, and Michele Viviani. Design and construction of a modular pump-jet thruster for autonomous surface vehicle operations in extremely shallow water. *Journal of Marine Science and Engineering*, 7(7):222, 2019.
- Angelo Odetti, Gabriele Bruzzone, Marco Altosole, Michele Viviani, and Massimo Caccia. Swamp, an autonomous surface vehicle expressly designed for extremely shallow waters. *Ocean Engineering*, 216:108205, 2020.
- Blue Robotics. T200 thruster - blue robotics. <https://bluerobotics.com/store/thrusters/t100-t200-thrusters/t200-thruster-r2-rp/>, July 2023a. Accessed on July 25, 2023.
- H2O Robotics. H20 robotics. <https://h2o-robotics.com/h2omni-x/>, July 2023b. Accessed on July 25, 2023.
- Filippo Sanfilippo, Min Tang, and Sam Steyaert. The aquatic surface robot (answer), a lightweight, low cost, multipurpose unmanned research vessel. In *Intelligent Technologies and Applications: Third International Conference, INTAP 2020, Grimstad, Norway, September 28–30, 2020, Revised Selected Papers 3*, pages 251–265. Springer, 2021.
- MF Santos, LM Honório, António Paulo Gomes Mendes Moreira, Paulo Augusto Nepomuceno Garcia, MF Silva, and Vinícius Ferreira Vidal. Analysis of a fast control allocation approach for nonlinear over-actuated systems. *ISA transactions*, 126:545–561, 2022.

- Yang Shen, Pengfei Hu, Shuanbao Jin, Yingsan Wei, Rensheng Lan, Shuangjiang Zhuang, Hao Zhu, Siwei Cheng, Junquan Chen, Dong Wang, et al. Design of novel shaftless pump-jet propulsor for multi-purpose long-range and high-speed autonomous underwater vehicle. *IEEE transactions on magnetics*, 52(7):1–4, 2016.
- Enrico Simetti and Giovanni Indiveri. Control oriented modeling of a twin thruster autonomous surface vehicle. *Ocean Engineering*, 243:110260, 2022.
- Asher Smith. Optimized thruster allocation utilizing dual quaternions for the asteroid sample return mission (osiris-rex). 2017.
- Yu Heng Tan and Ben M Chen. Thruster allocation and mapping of aerial and aquatic modes for a morphable multimodal quadrotor. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 25(4):2065–2074, 2020.
- Étienne Tétreault, David Rancourt, and Alexis Lussier Desbiens. Active vertical takeoff of an aquatic uav. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 5(3):4844–4851, 2020.
- TMOTOR. Mn4116 - motors - tmotor. <https://store.tmotor.com/goods-1205-MN4116.html>, July 2023. Accessed on July 25, 2023.
- Chung Hsuan Tsai, Armagan Elibol, and Nak Young Chong. An unmanned aerial-surface vehicle hybrid outfitted with a transformable housing. In *2022 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)*, pages 683–688. IEEE, 2022.
- Rui Wang, Jun Peng, Yanhui Zhou, Hongtao Liao, and Zhiwu Huang. Primal-dual interior-point method based energy distribution optimization for semi-active hybrid energy storage system. *IFAC-PapersOnLine*, 50(1):14477–14482, 2017.
- Huiming Xing, Shuxiang Guo, Liwei Shi, Xihuan Hou, Shuxiang Su, Zhan Chen, Yu Liu, and Huikang Liu. Performance evaluation of a multi-vectored water-jet propellers device for an amphibious spherical robot. In *2018 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA)*, pages 1591–1596. IEEE, 2018.
- Jiaming Zha, Eric Thacher, Joseph Kroeger, Simo A Mäkiharju, and Mark W Mueller. Towards breaching a still water surface with a miniature unmanned aerial underwater vehicle. In *2019 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, pages 1178–1185. IEEE, 2019.
- Raphael Zufferey, Alejandro Ortega Ancel, Célia Raposo, Sophie Franziska Armanini, André Farinha, Robert Siddall, Ion Berasaluze, Haijun Zhu, and Mirko Kovac. Sailmav: Design and implementation of a novel multi-modal flying sailing robot. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 4(3):2894–2901, 2019.