



ESCOLA NAVAL

talant de biefaire



Pedro Dias de Melo

**Modelação, simulação e identificação de
parâmetros dinâmicos de um veículo autónomo
biomimético de subsuperfície**

Projeto e desenvolvimento do software

**Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Ciências Militares Navais, na especialidade de Engenharia
Naval Ramo de Armas e Eletrónica**



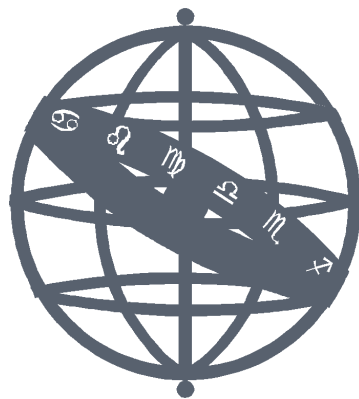
Alfeite

2022



ESCOLA NAVAL

talant de bi-faire



Pedro Dias de Melo

*Modelação, simulação e identificação de parâmetros
dinâmicos de um veículo autónomo biomimético de
subsuperfície*

Projeto e desenvolvimento do software

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Ciências Militares Navais, na especialidade de Engenharia Naval Ramo
de Armas e Eletrónica

Orientação de: Bruno Duarte Damas

Co-orientação de: Vítor Manuel Rodrigues Viegas

O Aluno Mestrando,

O Orientador,



Pedro Melo



Bruno Damas

Alfeite
2022

Put your work twenty times upon the anvil,
polish it ceaselessly, and polish it again.

Nicolas Boileau

Dedico esta dissertação aos meus pais, Pedro e Vicência, que sempre foram o meu apoio e sempre me ajudaram a ultrapassar as dificuldades.

Agradecimentos

Uma palavra de apressa ao meu orientador, Sr. Professor Bruno Damas, pela disponibilidade e ajuda em todos os aspectos da construção desta dissertação. Este que lutou sempre para que esta dissertação rumasse a bom porto.

Agradeço à instituição *Escola Naval* pela formação como militar e como pessoa. Uma escola e lição que levo para a vida. Todos os valores e mensagens passadas serviram para a minha formação pessoal e sempre me ajudaram a ultrapassar os desafios do dia a dia.

Resumo

Identificação de parâmetros dinâmicos de um BUV

Os veículos autônomos receberam nas últimas duas décadas a atenção de muitos investigadores e cientistas, o que fez com que a sua evolução fosse notória. Assim, tem ocorrido um largo desenvolvimento na área dos veículos autônomos submarinos o que leva a um aumento da complexidade e a um aproximar dos modelos matemáticos à realidade.

A criação de modelos matemáticos realistas ganhou muita preponderância, pois é possível a realização de testes em ambientes controlados sem ser necessária a utilização do veículo em si, diminuindo custos e riscos desnecessários. Os modelos matemáticos são muito diversos e estão dependentes dos graus de liberdade que os veículos possuem. Após uma verificação e aprovação do modelo matemático este é aplicado ao veículo.

Paralelamente ao desenvolvimento dos veículos autônomos no geral, também os veículos autônomos biomiméticos têm ganho destaque. Um estudo mais aprofundado da natureza e uma aproximação da mesma revela vários desafios na modelação destes veículos.

Um dos objetivos da dissertação é criar um simulador de um veículo autônomo biomimético e estudar o comportamento deste tendo em conta diferentes estímulos. A criação deste simulador reúne vários desafios e como tal a identificação de parâmetros dinâmicos surgiu como um desses desafios. Nesta dissertação é abordado um modelo de veículo autônomo biomimético e a respectiva identificação de parâmetros dinâmicos. A identificação de parâmetros desse modelo permite, a partir de dados reais, estimar os valores correspondentes de cada um desses parâmetros, tais como os hidrodinâmicos ou até mesmo os momentos de inércia.

Existem vários parâmetros importantes a retirar do movimento do veículo, sendo que para os obter os valores de posição, velocidade e aceleração são muito importantes pois são estes que “projetam” o veículo no espaço.

De forma a identificar estes parâmetros utilizou-se o método dos mínimos quadrados. De forma a aperfeiçoar o método de identificação de parâmetros, os valores dos parâmetros são conhecidos, permitindo assim calcular o erro entre o valor real e o valor obtido pela experiência de movimento. Em ambiente simulado são realizadas diversas experiências para validar o algoritmo de identificação.

Palavras-chave: UUV, BUUV, modelação, simulação, identificação

Abstract

Identification of dynamic parameters of a BUUV

The last decades have received in the last two decades and many researchers and researchers, which was with their notorious evolution. Thus, there has been a broad development in the area of autonomous underwater vehicles which leads to an increase in complexity and the approximation of mathematical models to reality.

The creation of realistic mathematical models has gained a lot of preponderance, because it would be possible to carry out tests in controlled environments without having to the use of the vehicle itself, reducing unnecessary costs and risks. The models mathematicians are very diverse and are dependent on the degrees of freedom that the vehicles have. After checking and approving the mathematical model, it is applied to the vehicle.

In parallel with the development of autonomous vehicles, vehicles also biomimetic autonomous glasses have gained prominence. A more in-depth study of nature and an approximation of it reveals several challenges in the modeling of these vehicles.

One of the objectives of the dissertation is to create a simulator of an automatic biomimetic tone and study its behavior taking into account different stimuli. The creation of this simulator brings together several challenges and as such the identification of dynamic parameters emerged as one of these challenges. In this dissertation it is addressed a biomimetic autonomous vehicle model and its identification of dynamic parameters. The identification of parameters of this model allows, from real data, estimate the corresponding values of each of these parameters, such as hydrodynamics or even moments of inertia.

There are several important parameters to take away from the vehicle movement, being that to obtain them the values of position, velocity and acceleration are very important and are these that "project" the vehicle in space.

In order to identify these parameters, the minimum method was used. squares. Initially, in order to improve the method of identifying parameters, the parameter values are known, thus allowing the calculation of the error between the real value and the value obtained by the movement experience. In simulated entity, several experiments are carried out to validate the algorithm of identification.

Keywords: UUV, BUV, modeling, simulation, identification

Índice

1	Introdução	1
1.1	Motivação	2
1.2	Inspiração biomimética	3
1.3	Objetivo da Dissertação	11
1.4	Estrutura	12
2	Estado da Arte	15
2.1	Aplicações militares	15
2.1.1	Contra-medida de minas	15
	Oceanografia	18
	Guerra Anti-Submarina	22
	Veículos Submarinos Biomiméticos (BUVs)	23
	Futuro	26
2.2	Contexto	28
3	Modelação	33
3.1	Teoria da Modelação	33
3.2	Locomoção biomimética	36
3.2.1	Coordenadas Geográficas (NED) Vs Coordenadas do Veículo	44
3.2.2	Forças e Momentos	46
3.3	Aplicação ao BUV	48
3.4	Resultados Experimentais	55
3.4.1	Experiência 1 - Movimento retilíneo (atuação da cauda) . . .	56
3.4.2	Experiência 2 - Movimento retilíneo (atuação da cauda e barbatanas laterais)	57
3.4.3	Experiência 3 - Movimento retilíneo (barbatanas laterais como “travão”)	58
3.4.4	Experiência 4 - Raios de giração (estibordo e bombordo) . .	59
3.4.5	Experiência 5 - Efeito da deflexão (barbatanas laterais) . . .	61

3.4.6	Experiência 6 - Compensação da flutuabilidade com a deflexão nas barbatanas laterais	62
3.4.7	Experiência 7 - Efeito da deflexão (cauda)	62
3.4.8	Experiência 8 - Comparação dos modelos de obtenção da força de propulsão	64
4	Identificação de Parâmetros	67
4.1	Métodos Existentes	67
4.1.1	Método utilizado	70
4.2	Aplicação a veículos submarinos	75
4.3	Resultados experimentais	79
4.3.1	Modelo básico de atrito linear	80
4.3.2	Modelo de atrito linear e atrito quadrático	87
4.3.3	Modelo com atrito linear, quadrático e efeito das barbatanas	97
4.3.4	Modelo com atrito linear, quadrático, efeito das barbatanas e diferença entre o centro de gravidade e o centro de impulsão	108
	Conclusão	114
	Bibliografia	117

Lista de Figuras

1.1	Esquema de funcionamento do braço Aid-Mark I	5
1.2	Exemplos de Hexápodes	6
1.3	Projeto SPURV da <i>Universidade de Washington</i>	6
1.4	Evolução da Tecnologia no “mundo” dos UAV’s	7
1.5	Submarino <i>Turtle</i>	9
1.6	Manta Test Vehicle	11
2.1	AUV HUGIN	16
2.2	<i>HUGIN MRS</i>	16
2.3	Bluefin-9	17
2.4	A9-M	18
2.5	Echo Ranger	19
2.6	Seaglider	20
2.7	AUV Marlin	21
2.8	Resultado duma pesquisa do AUV Marlin	21
2.9	MK 39 EMATT	22
2.10	Kanyon	23
2.11	BIOSwimmer	24
2.12	GhostSwimmer	25
2.13	SwarmDivers	26
2.14	Flimmer e Wanda	27
2.15	Volant Multi-modal Vehicle	28
2.16	Primeiro modelo do projeto SABUVIS	29
2.17	SABUVIS I	29
2.18	BUV 3 do projeto SABUVIS	30
2.19	Tipos de cauda do projeto SABUVIS	30
3.1	Modelos usados para controlo de navegação e orientação	35
3.2	Tipos de peixes que inspiram BUVs	36
3.3	Formas de nado dos BUVs com forma de peixes	37
3.4	BUV 2 desenhado no âmbito do projeto polaco	38

3.5	Sugestão de modelo Carangiform	40
3.6	Movimentos de rotação segundo o eixo	41
3.7	Exemplo do efeito da deflexão	42
3.8	Referenciais NED e Body	44
3.9	Referencial body	45
3.10	Força da gravidade e de impulsão	48
3.11	Exemplo do efeito das barbatanas no movimento do veículo	52
3.12	Movimento retilíneo, influência da cauda	57
3.13	Movimento retilíneo, influência de todas as barbatanas	58
3.14	Movimento retilíneo, barbatanas laterais como “travão”	59
3.15	Raios de giração (atuação nas barbatanas laterais)	60
3.16	Efeito no movimento do veículo da deflexão positiva nas barbatanas laterais	61
3.17	Aproximação de movimento retilíneo com flutuabilidade positiva	62
3.18	Efeito da deflexão positiva na cauda	63
3.19	Raio de giração com deflexão negativa na cauda	64
3.20	Comparação entre modelos aplicados à força de propulsão	65
4.1	Loop da identificação do modelo	68
4.2	Método recursivo	72
4.3	Simulação utilizando o modelo básico	80
4.4	RMSE do modelo básico sem ruído	81
4.5	RMSE do modelo básico com SNR baixo	83
4.6	RMSE do modelo básico com SNR médio	84
4.7	RMSE do modelo básico com SNR médio	86
4.8	RMSE do modelo básico para diferentes níveis de SNR	87
4.9	Simulação utilizando o modelo de atrito quadrático	88
4.10	RMSE do modelo de atrito quadrático sem ruído	90
4.11	RMSE do modelo de atrito quadrático com SNR baixo	92
4.12	RMSE do modelo de atrito quadrático com SNR baixo	94
4.13	RMSE do modelo de atrito quadrático com SNR alto	96
4.14	RMSE do modelo quadrático para diferentes níveis de SNR	97
4.15	Simulação tendo em conta o efeito das barbatanas no atrito do veículo	99
4.16	Comparação RMSE entre modelo com efeito das barbatanas sem ruído e com SNR baixo	100
4.17	Comparação entre RMSE sem ruído e com SNR baixo	101
4.18	Comparação RMSE entre modelo com efeito das barbatanas com SNR médio e alto	104

4.19	Comparação entre RMSE com SNR médio e alto	105
4.20	Comparação do RMSE com os diferentes níveis de ruído	108
4.21	Simulação do modelo com centros não coincidentes	110
4.22	Comparação RMSE entre modelo com centros não coincidentes sem ruído e com SNR baixo	111
4.23	Comparação entre RMSE sem ruído e com SNR baixo	112
4.24	Comparação RMSE entre modelo com centros não coincidentes com SNR médio e alto	113
4.25	Comparação do RMSE com os diferentes níveis de ruído	114

Lista de Tabelas

3.1	Modelos para UUVs segundo os graus de liberdade	43
3.2	Simbologia utilizada num modelo com 6 graus de liberdade	46
3.3	Experiências realizadas para testar o simulador	56
3.4	Características da experiência 1	57
3.5	Características da experiência 2	57
3.6	Características da experiência 3	58
3.7	Características da experiência 4	59
3.8	Características da experiência 5	61
3.9	Características da experiência 7	63
3.10	Características da experiência 8	64
4.1	Experiências para validação do algoritmo de identificação	79
4.2	Comparação entre os valores reais dos parâmetros dinâmicos e os valores obtidos experimentalmente (Modelo linear, sem ruído) . . .	81
4.3	Comparação entre os valores reais dos parâmetros dinâmicos e os valores obtidos experimentalmente (Modelo linear, SNR baixo) . . .	82
4.4	Comparação entre os valores reais dos parâmetros dinâmicos e os valores obtidos experimentalmente (Modelo linear, SNR médio) . .	84
4.5	Comparação entre os valores reais dos parâmetros dinâmicos e os valores obtidos experimentalmente (Modelo linear,SNR alto)	85
4.6	Comparação entre os valores reais dos parâmetros dinâmicos e os valores obtidos experimentalmente (Modelo quadrático, sem ruído) .	89
4.7	Comparação entre os valores reais dos parâmetros dinâmicos e os valores obtidos experimentalmente (Modelo quadrático, SNR baixo)	91
4.8	Comparação entre os valores reais dos parâmetros dinâmicos e os valores obtidos experimentalmente (Modelo quadrático, SNR médio)	93
4.9	Comparação entre os valores reais dos parâmetros dinâmicos e os valores obtidos experimentalmente (Modelo quadrático, SNR alto) .	95
4.10	Comparação entre os valores reais dos parâmetros dinâmicos e os valores obtidos experimentalmente (Modelo com efeito das barbatanas, sem ruído)	102

4.11	Comparação entre os valores reais dos parâmetros dinâmicos e os valores obtidos experimentalmente (Modelo com efeito das barbatanas, com SNR baixo)	103
4.12	Comparação entre os valores reais dos parâmetros dinâmicos e os valores obtidos experimentalmente (Modelo com efeito das barbatanas, com SNR médio)	106
4.13	Comparação entre os valores reais dos parâmetros dinâmicos e os valores obtidos experimentalmente (Modelo com efeito das barbatanas, com SNR alto)	107

Lista de Abreviaturas

APL	A pplied P hysics L aboratory
ASW	A nti- S ubmarine W arfare
AUV	A utonomous U nderwater V ehicle
BUV	B iomimetic U nderwater V ehicle
DHS	D epartment of H omeland S ecurity's
EDA	E uropean D efence A gency
EMATT	E xpendable M obile ASW M obile T raining T arget
ISR	I ntelligence S urveillance and R econnaissance
LSTS	L aboratório de S istemas e T ecnologia S ubaquática
MCM	M obile C ontent M anagement
NED	N orth E ast D own
RLS	R ecursive L east S quare
ROV	R emotely O perated V ehicle
SABUVIS	S warm of B iomimetic U nderwater V ehicle for ISR
SNR	S ignal N oise R adio
TCS	T ime C ritical S trike
UAV	U nmanned A utonomous V ehicle
ULRM	U niversal L aunch and R ecovery M odule
US	U nited S tates
UUV	U nmanned U nderwater V ehicle

Capítulo 1

Introdução

O desconhecido sempre desafiou o ser humano. Desta forma, o alto mar sempre foi sinónimo de desconhecido e aventura. No seio destes conceitos nasce a sua exploração e constante procura do conhecimento do mesmo. Esta tarefa é considerada desafiante e perigosa, mas nem isso impede a sua exploração. É desta forma que a indústria de veículos subaquáticos não tripulados tem vindo a ganhar cada vez mais interessados e se tem vindo a desenvolver cada vez mais. "Este aumento de interesse causou um aumento na investigação e desenvolvimento destes veículos, com o foco principal na extensão da capacidade operacional e longevidade"(Mazlan, 2015).

A evolução é uma constante presente no nosso quotidiano. Tanto a nível tecnológico como a nível industrial, a robótica atinge novos patamares todos os dias. É assim que a tecnologia dos veículos não tripulados submarinos também se tem desenvolvido e superado. Os *Unmanned Underwater Vehicles* (UUVs), como se diz em inglês, têm acompanhado esta evolução, sendo prova disso os diversos veículos já desenvolvidos. A utilização destes veículos abrange diversas áreas científicas, comerciais e industriais, tendo cada vez mais relevância no campo militar.

O aproveitamento da evolução do hardware em termos de atuadores, sensores, processadores, materiais e técnicas de fabrico e do software no caso dos drivers permitiu o constante desenvolvimento dos sistemas computacionais como a navegação, controlo e redes de comunicação.

O Homem sempre se interessou pelo mundo animal e citando o naturalista Charles Darwin: “a existência é um termo da evolução”. Este interesse levou ao desenvolvimento e estudo de certas características dos animais, possibilitando a sua transformação e aproveitamento para a robótica. Aplicando este interesse aos dias de hoje: a criação, estudo e desenvolvimento de *Biomimetic Unmanned Vehicles* (BUVs) ganhou cada vez mais espaço no campo da robótica submarina. Tendo

como referência vários seres vivos, é assim que estes UUVs são criados com diferentes características estruturais e computacionais, culminando a sua aplicação em diversos ambientes.

Neste capítulo, irão ser abordados vários temas relacionados com o desenvolvimento da robótica submarina, nomeadamente aqueles cuja biomimética têm relevância. Serão apresentados vários exemplos de BUVs, ocorrendo um estudo das características predominantes do mesmo. Pretende-se, assim, adquirir o máximo de conhecimento do estado da arte de forma a desenvolver um simulador de um BUV de baixo custo, bem como um algoritmo que permita identificar parâmetros deste.

1.1 Motivação

O interesse pela vida submarina fez surgir a curiosidade e respetiva evolução dos veículos não tripulados. A aproximação destes mesmo veículos aos seres vivos revelou-se como mais um desafio a que o ser humano se sujeitou a superar. Com vista a “resolver este problema” surgiram imensos estudos e projetos com inspiração nos mais diversos seres vivos aquáticos (biomimetia).

Ao longos dos últimos anos a necessidade de *Unmanned Autonomous Vehicle* (UAVs) aumentou, tornando-se uma parte fulcral em determinadas missões. Este aumento de interesse e necessidade deve-se a diversos fatores, entre os quais:

- Manutenção e capacidade de manter a operacionalidade mais baratas do que a dos veículos tripulados;
- Monitorização contínua, aumentando a eficiência e produtividade das missões;
- Melhoria dos padrões de defesa, pois não se corre o risco de causar danos pessoais, uma vez que as pessoas podem ser utilizadas noutras tarefas, sem estarem no plano operacional;
- Controlo e análise de vários parâmetros através da utilização de diversos sensores.

Como referido anteriormente, a utilização de BUVs no campo militar tornou-se uma necessidade em certas missões. Assim, têm tido cada vez mais preponderância e constituem cada vez mais uma mais-valia no terreno. A sua versatilidade pode ser vista em várias missões, tais como:

- Contra medidas de Minas (Conry et al., 2013);

- Exploração de terreno inimigo (Griffiths, 2003);
- Decoy e perturbação do inimigo (Griffiths, 2003);
- Inspeção, observação e identificação de objetos em áreas confinadas (Griffiths, 2003);
- Oceanografia e hidrografia (Blidberg, 2001);
- Transporte de Cargas (Griffiths, 2003);
- *Anti-Submarine Warfare* (ASW) (Griffiths, 2003);
- *Time Critical Strike* (TCS) (Fossen, 2011);
- *Intelligence, Surveillance and Reconnaissance* (ISR) (Morawski et al., 2018).

Como foi referido anteriormente, a utilização de BUVs pode ser extremamente vantajosa. A manobrabilidade dada por estes, o aumento do efeito surpresa (furtividade) e um aumento significativo da eficiência na propulsão são fatores que fazem dos veículos autónomos cada vez mais uma opção viável para ambientes hostis.

1.2 Inspiração biomimética

O corpo e o cérebro dos peixes têm-se desenvolvido de forma a melhorar a sua capacidade de controlo, independentemente das suas habilidades debaixo de água. Alguns peixes são altamente móveis, outros são muito eficientes na sua locomoção, outros são ainda estritamente estáticos ainda que na presença de perturbações fortes. Alguns combinam todas estas características (Colgate e Lynch 2004).

A biomimética é a área que estuda os princípios criativos e estratégias da natureza. O seu princípio baseia-se em utilizar a natureza como um exemplo e fonte de inspiração. A biomimética traduz-se na forma mais eficiente e curiosa de se procurar soluções sustentáveis para os diversos desafios humanos, através da imitação e modelação das analogias da natureza, dos fenómenos e padrões.

As referências à biomimética já existem desde o século XV quando Leonardo Da Vinci, atento observador da anatomia e do voo dos pássaros, fez inúmeras anotações e esboços de máquinas voadoras. A biomimética tem duas faces: por um lado o uso de matérias artificiais imitando funções de sistemas biológicos, permitindo assim

um avanço na tecnologia e nas técnicas utilizadas para determinadas funções e objetivos. Por outro, os sistemas biomiméticos são inspirados na morfologia biológica aproximando a robótica à vida animal.

O primeiro estudo escrito que se inspirou na biomimética surgiu no ano de 1965 (Waldron, 2000), um projeto realizado na Universidade de Stanford. O projeto consistiu no desenvolvimento de um braço robótico ortopédico cujo objetivo foi ajudar as pessoas com lesões na coluna. O braço possuía 6 graus de liberdade e era controlado por um banco de interruptores, cuja ativação era realizada através da língua do operador ou de outras partes do corpo funcionais. Todo o funcionamento do projeto está presente na figura 1.1.

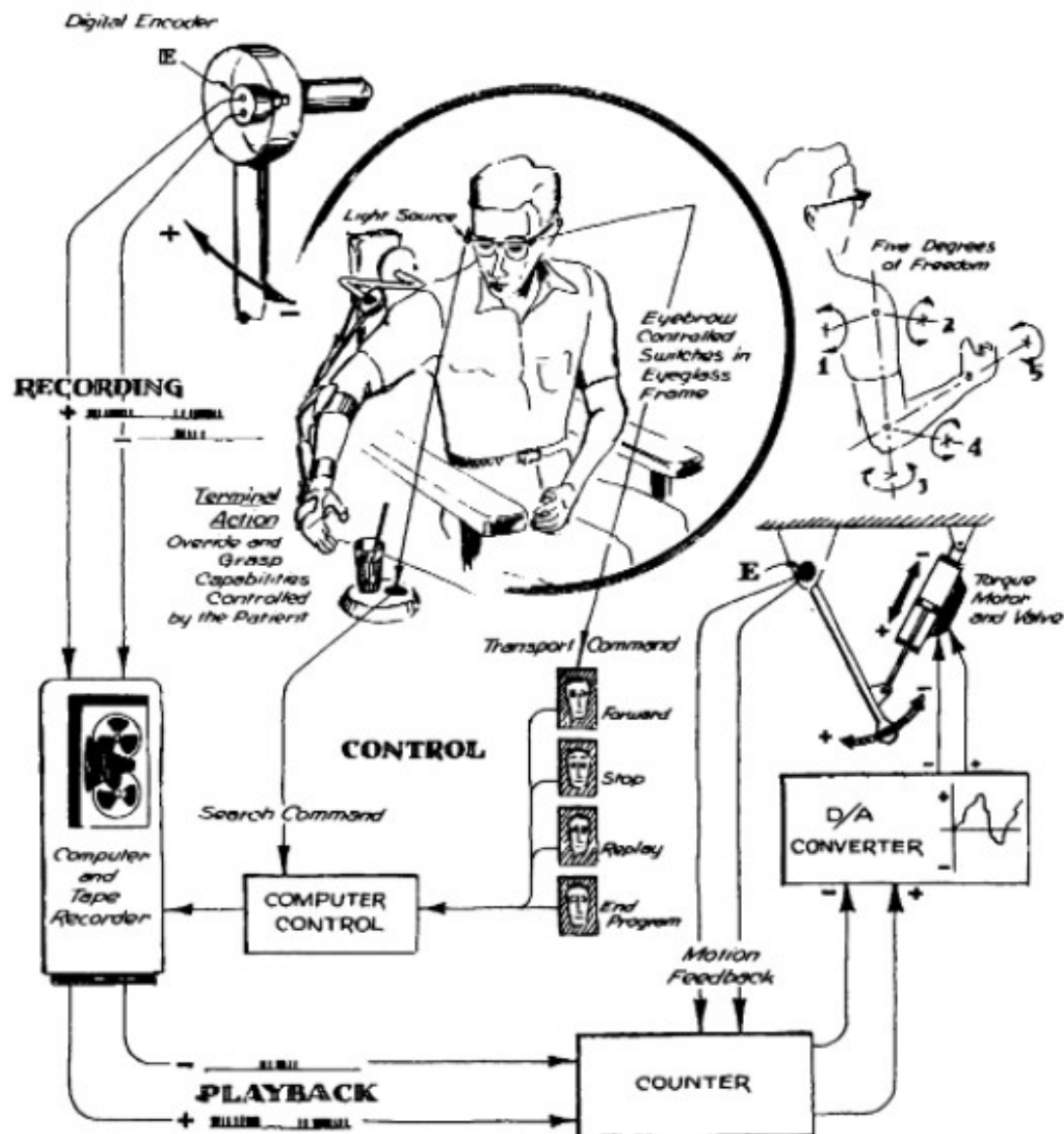


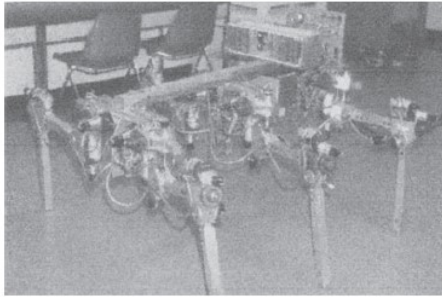
FIGURA 1.1: Esquema de funcionamento do braço Aid-Mark I

Fonte: Verdonck, 2009

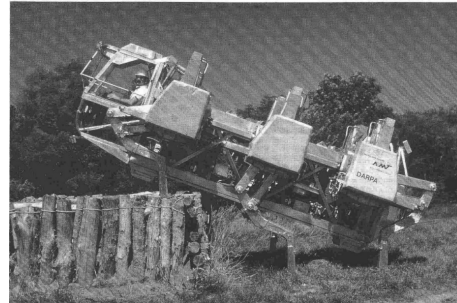
Desta forma a tecnologia evoluiu e aproximou-se cada vez mais dos seres vivos, nascendo os robôs “com pernas”. O primeiro estudo intitula-se *Phony Pony*, construído por Frank (Report, 1968).

No desenvolvimento de software para quadrúpedes estudou-se a teoria de *leg phasing rules* (McGhee1968). Cresce, desta forma, o interesse por movimentos sequenciais e repetitivos (sinusóide). Mais tarde, surgiu o estudo de séries de *Fourier*, o que permitiu a evolução para movimentos mais complexos. Tornou-se possível otimizar a velocidade sem prejudicar a estabilidade. Este processo foi alargado ao estudo de hexápodes, inicialmente por simulação numérica (Bessonov e Umnov,

1974) e posteriormente por modelação matemática (Song e Waldron, 1987). As primeiras máquinas de “6 pernas” consideradas estáveis (Galloway et al., 2013) foram desenvolvidas por *McGhee and Iswandhi*, como podemos observar na figura 1.2.



(A) Projeto hexápode de *McGhee and Iswandhi*



(B) Veículo Hexápode com suspensão adaptável

FIGURA 1.2: Exemplos de Hexápodes
Fonte: Waldron, 2000

Este progresso não se verificou apenas nos veículos à superfície, já na década de 1970 foram desenvolvidos estudos pela Universidade de Washington (UARS e SPURV) de forma a adquirir dados sobre as regiões do Ártico. Na figura 1.3 podemos observar o protótipo *SPURV*. Este veículo submarino conseguia atingir 3600 metros de profundidade aos quais eram adicionados cerca de 2000 metros de capacidade através do sensor acústico. Assim, este veículo conseguia recriar o fundo submarino até profundidades de 5600 metros. O seu formato assemelhava-se a um atum sendo assim caracterizado como veículo biomimético.



FIGURA 1.3: Projeto SPURV da *Universidade de Washington*

O veículo presente na figura 1.3 conseguia funcionar durante 5 horas e 30 minutos a uma velocidade de 2.5 m/s. O seu diâmetro era de 0.508 metros com um deslocamento associado de 430 quilogramas (Waldron, 2000).

Os projetos foram aparecendo e as ideias foram surgindo, mas a tecnologia disponível não permitia acompanhar o pensamento (Figura 1.4) e a implementação destas ideias tornava-se um problema sem solução. Foi necessário esperar pelo avanço da tecnologia noutras áreas de forma a poder ser adaptada para o mundo da robótica. Com o aumento da rivalidade na década de 1980 o consequente avanço da tecnologia em áreas fora da comunidade dos UAV's possibilitou que o problema referido anteriormente fosse ultrapassado. Surgiram computadores mais pequenos e mais rápidos com uma melhor capacidade de processamento. Avanços contínuos nos *softwares* e na engenharia possibilitaram aumentar a complexidade dos sistemas satisfazendo as ideias formuladas. Ainda assim, tornou-se claro que a tecnologia existente não bastava para tornar os veículos autónomos fiáveis e operacionais.

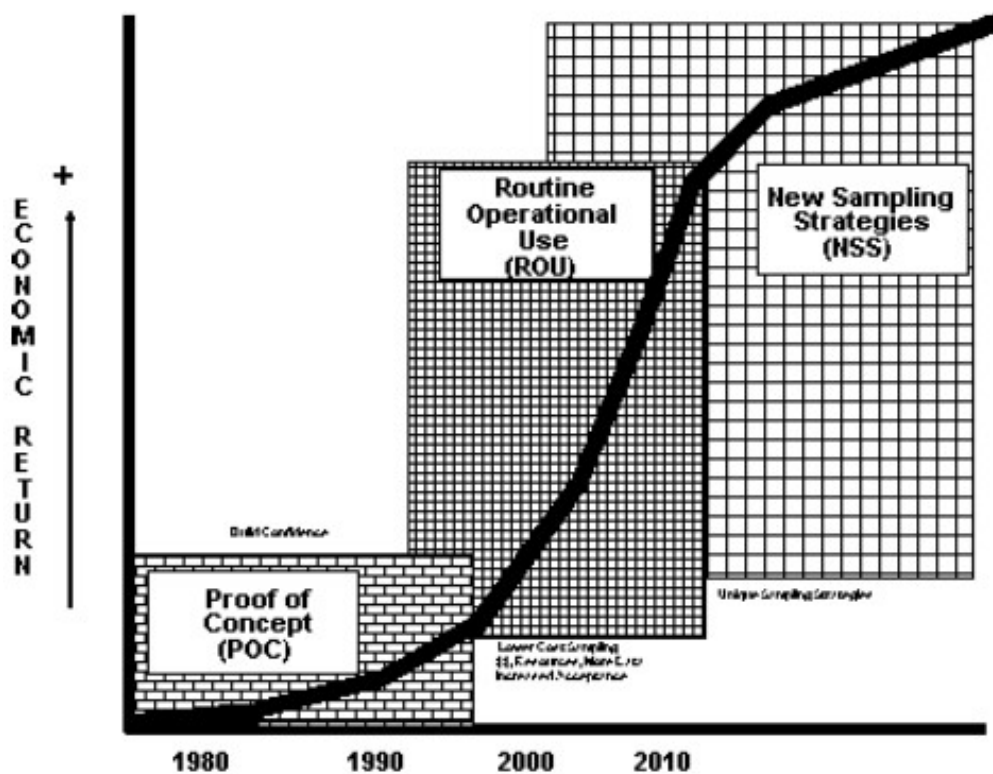


FIGURA 1.4: Evolução da Tecnologia no “mundo” dos UAV's¹Fonte: Blidberg, 2001

¹Evolução temporal da tecnologia que permitiu a passagem de protótipos para veículos autónomos fiáveis. Em 2000, o uso da tecnologia verificou-se de forma operacional, gerando um lucro de retorno para os desenvolvedores.

O interesse na área dos veículos autónomos cresceu e isso ficou patente no aumento do número de participantes em cimeiras e eventos. Em 1980 ocorreu o primeiro “International Symposium on Unmanned Untethered Submersible Technology” (UUST) em New Hampshire e contou com a presença de apenas 24 entusiastas. Já em 1987 este encontro contou com a presença de mais de 100 empresas, 20 universidades e 20 agências federais divididas entre 9 países (Blidberg, 2001). Só por esta adesão enorme se consegue comprovar que o mundo da robótica estava a crescer e a ter cada mais interessados.

Na década de 1990 acontece a realização e concretização dos projetos até então apenas teóricos. Nasceu a primeira geração de AUVs através duma união de variados esforços. A principal motivação deste avanço deveu-se à exploração dos fundos marítimos, o que fez mover muitos interesses económicos.

No início do novo século surgiu o primeiro veículo autónomo comercializável. Desta forma, confirmou-se o uso desta tecnologia para fins lucrativos. Os estudos e pesquisas tornaram-se em desenvolvimento económico da indústria oceânica. É possível observar que a tecnologia e a indústria “andam de braço dado”, pois uma é dependente da outra. A contínua progressão da tecnologia é essencial de forma a que os AUVs consigam atingir todo o seu potencial.

A ideia de máquinas capazes de surpreender o inimigo debaixo de água surgiu com a necessidade de adquirir níveis superiores de surpresa e eficiência nos ataques. Apenas no fim do século vinte a importância económica e científica ganhou peso. A posse de informação (*Intelligence*) sobre os inimigos revelou-se cada vez mais importante e o meio subaquático revelou-se uma ferramenta importantíssima na aquisição destes dados. A relevância de uma posição estratégica militar superior à do inimigo tornou-se num ponto fulcral para ganhar vantagem em conflitos.

Os confrontos armados sempre foram um grande impulsor nos avanços da tecnologia. Foi assim que em 1776 se registou o primeiro ataque com um veículo subaquático. O veículo *Turtle* (Figura 1.5), criado pelo americano David Bushnell, foi desenvolvido com o intuito de quebrar a linha defensiva da Armada Britânica durante a Guerra da Independência Americana.



FIGURA 1.5: Submarino *Turtle*

Fonte: [https://pt.wikipedia.org/wiki/Tartaruga_\(submarino\)](https://pt.wikipedia.org/wiki/Tartaruga_(submarino))

A partir da década de 1960 a segurança, viabilidade financeira e limitações funcionais tornaram-se preponderantes na escolha de retirar o “Homem” do meio e criar assim os *Remotely Operated Vehicles* (ROVs). O principal foco de retirar os humanos de cena consiste numa questão de segurança (essencialmente), mas também porque desta forma os limites físicos a estes associados deixam de ser problema. Assim, os ROVs atingem maiores profundidades, carecem de menos custo, tanto de produção como de manutenção, além de que, mesmo que se percam, nunca se perde o maior bem de qualquer missão: a vida humana.

De uma forma geral os avanços na tecnologia relacionada com os ROVs deveram-se essencialmente a necessidades militares e não a necessidades de melhorias ou especificações nos próprios sistemas, o que acabou por prejudicar a melhoria mais rápida dos softwares/ hardware.

Os primeiros sistemas possuíam uma ligação por fio ao utilizador o que limitava imenso o seu raio de operação. Desta forma tornou-se necessário criar uma outra forma de ligação entre o utilizador e o ROV. Com esta atualização surgiram imensos problemas, entre os quais:

- Atualização das intruções, indicando objetivos claros e pontos chave da missão ao veículo;
- Comunicação através de sensores e dados que permitam enviar informação ao utilizador de forma a evitar constrangimentos durante a realização das operações;
- Sistemas próprios de navegação.

A atualização constante de dados e a transmissão dos mesmos para o utilizador em tempo real tornou-se um desafio. A criação de um sistema online que permita a constante interação utilizador-UUV necessitou de sensores capazes de medir características e informações relevantes para a missão e para o controlo do veículo, compiladores e processadores desses mesmo dados e “inteligência robótica” capaz de tomar decisões baseadas nos objetivos da missão.

O maior crescimento deu-se na década de 1980 com o aparecimento de microprocessadores e diversos materiais (ferros, plásticos e fibras). O que até então era apenas uma cena de um filme de ficção científica tornou-se facilmente realizável e a base para projetos de estudo no futuro. Os estudos que se desenvolviam e eram adaptados a UUVs tornaram-se casos de estudo em todo o mundo. Até mesmo estudos químicos (David Smith et al., 1991) tiveram o seu contributo e respectiva adaptação para a evolução dos BUVs.

Os BUVs tornam-se em sistemas capazes de atuar como recolha de dados, mas também como agentes capazes de executar determinadas ações contra unidades hostis. Assim, podem entrar em cena como unidades passivas ou ativas.

A maioria das ações de defesa levadas a cabo por UUVs requerem que estes funcionem como plataformas avançadas com o grande objetivo de determinar as características e disposição das forças inimigas. De um modo geral, as ações defensivas resumem-se em:

- Detecção, localização e seguimento de tropas inimigas submarinas (ASW);
- Detecção e identificação de minas em território amigo;
- Operações hidrográficas e ambientais em missões de cooperação;
- Recolha de *Intelligence* dos sistemas inimigos permitindo uma melhor exploração dos pontos fracos do inimigo.

De forma a tornar a ASW eficiente e a respetiva deteção e seguimento o veículo autónomo necessita de ter a capacidade de possuir, recuperar e operar sensores e o seu respetivo processamento de forma a detetar submarinos à distância,

possuir um bom sistema de energia o que permite ter uma autonomia considerável e também alimentar um sistema de comunicações que permita comunicar a longas distâncias, ser capaz de comunicar em tempo real a recolha de dados de forma a criar um panorama o mais perto da realidade possível.

O desafio seguinte passava por tornar mais eficientes os sensores e conseguir fazer com que estes obtivessem dimensões mais pequenas de forma a serem aplicados nos UUVs. As primeiras aplicações militares foram em contra medidas de minas (Madsen & Bjerrum, 2000). O facto de ter objetivos bem específicos ajudou ao desenvolvimento mais aprofundado dos UUVs. A necessidade de um processamento mais rápido e da melhoria dos sonares e sensores com um objetivo específico facilitou, de certa forma, o trabalho dos investigadores. Ao terem um objetivo concreto permitia que conduzissem a sua pesquisa e esforço de forma mais restrita, aumentando assim a eficiência do trabalho. Com o aumento dos estudos e projetos a hidrografia também avançou, pois a maioria dos civis aproveitou a instrumentalização e eficiência militar de forma a desenvolver sistemas e projetos para os seus objetivos. Assim, o *Manta Test Vehicle* (MTV) (Figura 1.6) foi um ponto de partida para o estudo da batimétrica e mapeamento através de um método de navegação não-tradicional.

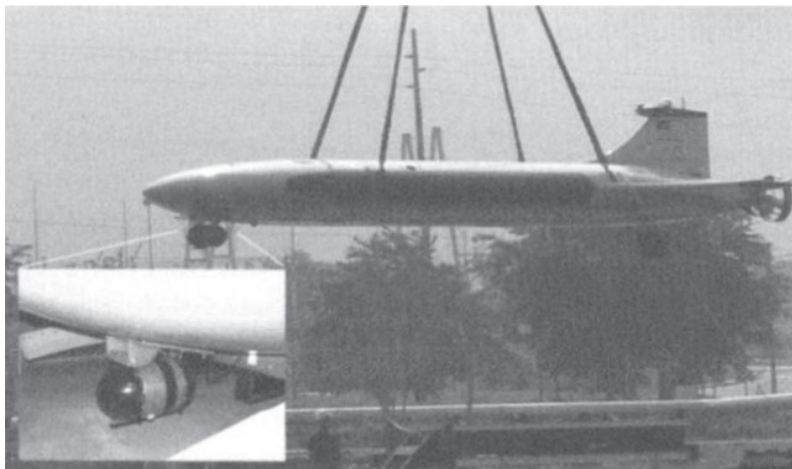


FIGURA 1.6: *US Naval Underwater Manta Test Vehicle*
Fonte: Griffiths, 2003

1.3 Objetivo da Dissertação

O projeto SABUVIS II desenvolve-se em várias vertentes. Esta dissertação enquadra-se na identificação dos parâmetros dinâmicos de um BUV utilizando como ponto de partida o protótipo do projeto SABUVIS.

Para tornar possível este objetivo existem vários passos a percorrer e objetivos secundários que se irão realizar, sendo estes:

- Criação do simulador de um BUV em *matlab*;
- Criação de um algoritmo capaz de retirar os parâmetros dinâmicos utilizando o simulador;
- Incrementação da complexidade do simulador aproximando-o de um movimento real;
- Identificação dos parâmetros segundo o aumento de complexidade do simulador;
- Análise dos resultados experimentais.

O sucesso desta análise estará dependente do erro entre o valor real e o valor obtido experimentalmente. Inicialmente, o algoritmo será aperfeiçoado. No simulador os parâmetros são valores conhecidos, o que permite saber o erro existente entre os valores referidos anteriormente. Como os parâmetros são inseridos computacionalmente no simulador ter-se-á sempre uma base de comparação entre o valor real (inserido) e o valor obtido experimentalmente. O aumento de complexidade do sistema dar-se-á pela adição de parâmetros que tornam o sistema mais próximo da realidade. A introdução de atrito quadrático, a influência da posição das barbatanas na navegação e a diferença posicional entre o centro de gravidade e o centro de impulsão, todos estes fatores influenciarão o simulador e a rota traçada por este. Após a obtenção dos valores dos parâmetros estes serão analisados: inicialmente se são fisicamente possíveis e posteriormente se correspondem à realidade do movimento do veículo.

1.4 Estrutura

O trabalho escrito procura refletir e explicar todo o trabalho desenvolvido. No capítulo 1 é realizada uma breve introdução, seguida da motivação para a realização desta dissertação e as respetivas inspirações biomiméticas. O primeiro capítulo termina com os objetivos da dissertação.

O 1.4º capítulo apresenta um estudo dos veículos autónomos existentes na vertente militar e as respectivas aplicações. O capítulo culmina com a explicação do projeto onde o veículo em estudo se insere.

No capítulo 3 são explicadas as teorias da modelação, onde é explicado qual o modelo utilizado na modelação matemática do veículo em estudo, a transformação de coordenadas globais para coordenadas corporais, construção dos vetores e matrizes velocidade, posição e momento e ainda os ângulos associados aos seis graus de liberdade do BUV. Neste capítulo é também explicada a constituição do simulador e são analisados os resultados e gráficos que este apresenta, bem como a sua relevância no trabalho desenvolvido. O capítulo encerra com a análise do simulador executando várias experiências que comprovam o seu funcionamento.

No 4º capítulo importa salientar a identificação de parâmetros que irão possibilitar a aprendizagem por reforço e construção do algoritmo. Neste capítulo irão ser retratados os métodos existentes, culminando na sua aplicação em veículos submarinos, mais especificamente em BUVs. o capítulo termina com a análise dos resultados do algoritmo e respectiva avaliação da sua adaptação ao simulador e níveis de ruído.

A dissertação encerra com a conclusão da dissertação.

Capítulo 2

Estado da Arte

A existência de referências e estudos sempre serviram de base para qualquer trabalho académico. Neste capítulo serão referidos vários UUVs/BUVs militares que serviram de inspiração, dividindo-os pelas suas aplicações e organizando-os de forma temporal. O estudo realizado serviu para aprofundar os conhecimentos e retirar ideias de forma a tornar o veículo mais sustentável e eficaz na sua missão. Quanto mais informações e mais perspectivas tivermos “debaixo da nossa alçada” de conhecimento melhor poderá ser o nosso desenvolvimento e conhecimento do tema. Resumidamente, neste capítulo são abordados vários veículos e qual a sua inspiração para o design do veículo onde o estudo será aplicado.

2.1 Aplicações militares

A utilização de veículos autónomos passou a ser uma forma de ataque e defesa nas forças armadas. O facto de afastar o maior bem (ser humano) dos cenários hostis e criar mais uma barreira no que à interação pessoa a pessoa diz respeito é sempre uma mais valia. Em seguida são apresentados vários BUVs, sendo estes separados pelas suas aplicações no mundo militar.

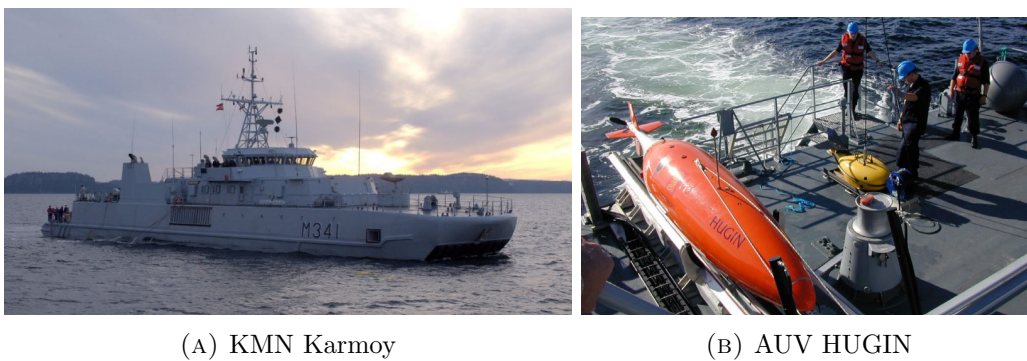
2.1.1 Contra-medida de minas

Como foi referido anteriormente, a *Mine Counter Measures* (MCM) foi uma das primeiras aplicações militares dos veículos autónomos subaquáticos. Mais de 90% dos bens é transportado via marítima, desta forma a segurança da navegação é um dos principais pontos das marinhas em todo o mundo. Existem imensas minas espalhadas pelos oceanos como resultado das guerras mundiais e da guerra fria. O desenvolvimento de sensores cada vez mais eficazes e de sonares capazes de detetar

estas mesmas minas é, de facto, uma prioridade de empresas como a *Thales* e a *Kongsberg Maritime*.

Hugin

O AUV Hugin (Figura 2.1b) foi construído pela *Kongsberg Maritime* juntamente com a *Statoil*, *Norwegian Defence Research Establishment* e *Norsk Undervannsintervensjon*. Este veículo tem como principal função a deteção de minas e ASW. Em 2002 foi atribuído ao *RNM Karmoy* (Figura: 2.1a) e as suas missões serviram de estudo e base para o desenvolvimento de projetos seguintes como o *HUGIN MRS*.



(A) KMN Karmoy

(B) AUV HUGIN

FIGURA 2.1: AUV HUGIN

Fonte: Marthiniussen et al., 2004

O mais interessante a retirar deste projeto é a sua continuidade e base de trabalho, pois com o primeiro protótipo e respectiva exploração e melhoria criou-se um outro AUV, o HUGIN MRS - Mine Reconnaissance System (Figura 2.2).



FIGURA 2.2: *HUGIN MRS*

Fonte: ²

²<https://www.unmannedsystemstechnology.com/2017/03kongsberg-maritime-provides-auvs-norwegian-defence-materiel-agency>

Bluefin-9

O *Bluefin-9* (Figura 2.3) é um veículo facilmente transportado por duas pessoas, devido às suas dimensões. Está equipado com um sonar de 900Hz e uma câmara. Conta ainda com sensores acústicos, temperatura e pressão. Possui uma bateria de lítio que se troca rapidamente, o que permite que este realize missões até 12 horas. Este UUV ganhou um contrato de cerca de 29 milhões de dólares americanos atribuído à Marinha dos Estados Unidos.

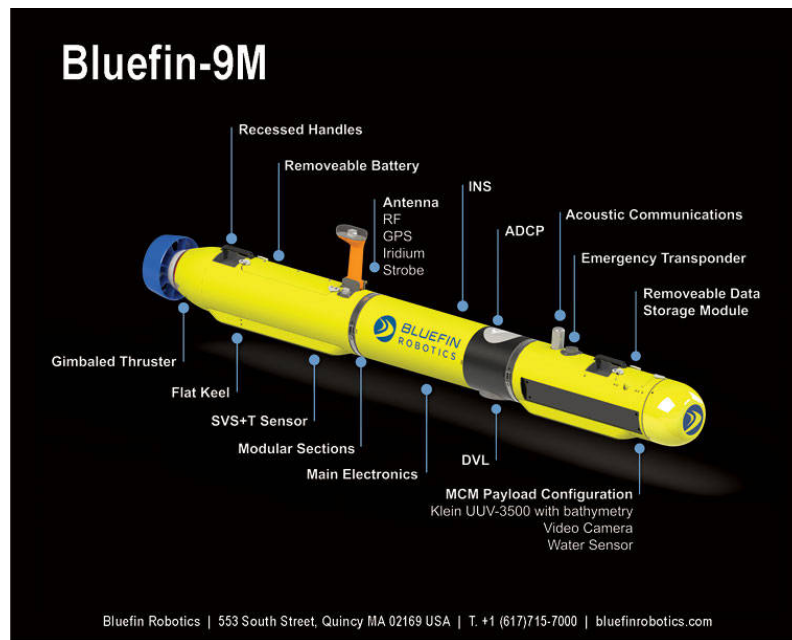


FIGURA 2.3: *Bluefin-9* e respectivos componentes e sensores
Fonte:³

Bluefin-9

O mais relevante neste veículo autónomo para a inspiração desta dissertação é sem dúvida o seu transporte e a facilidade com que é usado. Este pode garantir a segurança de portos inteiros e ainda realizar operações de deteção de minas pesando pouco mais de 60 quilogramas e medindo cerca de 175 centímetros.

A9-M

O A9-M (Figura 2.4) é um AUV desenvolvido pela *France's ECA Group*. O veículo possui uma assinatura magnética e acústica reduzida de forma a tornar mais eficiente o processo de detecção de minas. Possui ainda um sistema de navegação

³<https://gdmmissionsystems.com/products/underwater-vehicles/bluefin-9-m-autonomous-underwater-vehicle>)

inercial e pode ser lançado de qualquer plataforma. Este sistema faz ainda parte do *MCM Mission Module for Coastal Mine Warfare*.

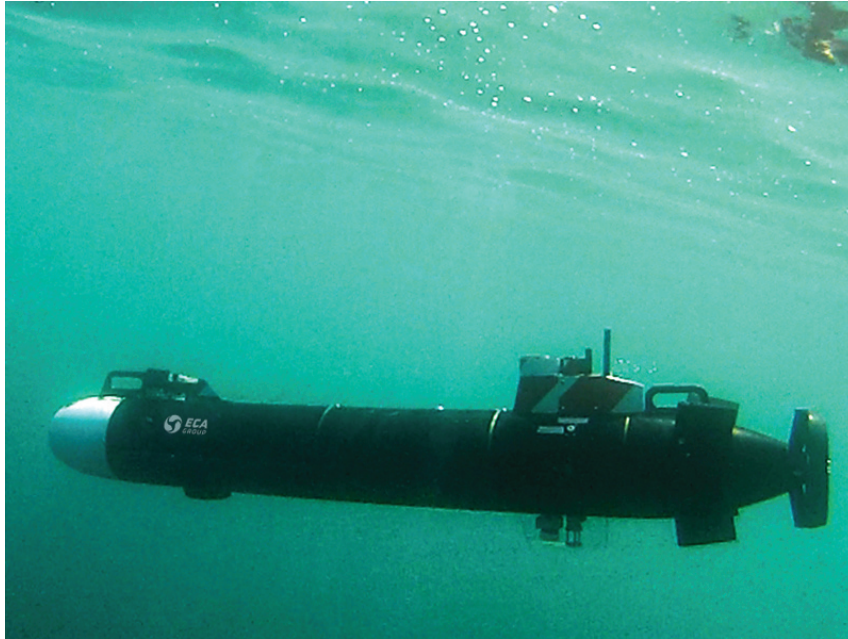


FIGURA 2.4: *A9-M* em missão
Fonte: ⁴

A característica de maior interesse deste veículo é a sua capacidade de conseguir trabalhar em rede com outros veículos como é o caso do *SeaScan MK2* e do *K-Ster C*. Esta capacidade aumenta significativamente a área de busca e aumenta a probabilidade de deteção.

Oceanografia

Com o passar dos anos e o respectivo desenvolvimento da indústria, a pesquisa e o respectivo conhecimento do oceano tornou-se uma necessidade. Algumas empresas de óleos e gás que necessitavam de efetuar descargas precisaram de recolher dados e informações de forma a tornarem mais eficiente e menos poluente este processo. Além disso, o interesse pela indústria, batimetria e prospeção fez com que surgissem UUVs com capacidade de executar missões de alta duração a elevadas profundidades, recolhendo dados de forma contínua. O mapeamento do fundo do mar foi também uma área que despertou o interesse da indústria submarina.

Echo Ranger AUV

⁴<http://www.navaldrone.com/A9-M.html>

O Echo Ranger (Figura 2.5) foi desenvolvido em 2001 pela *Boeing* com o propósito de realizar pesquisas ambientais para empresas de óleos e gás. Atualmente este veículo realiza missões de ISR.



FIGURA 2.5: Echo Ranger
Fonte: <https://auvac.org/13-2/>

O mais relevante deste sistema é a capacidade do seu modem acústico que permite transmitir dados para uma estação de controlo em terra. Além disso a sua estrutura permite que este mergulhe até profundidades de cerca de 3 quilómetros. Numa versão mais recente esta capacidade foi ampliada para cerca do dobro, aumentando assim o seu raio de ação.

Seaglider

O Seaglider (Figura 2.6) foi desenvolvido com o intuito de realizar missões de longa duração a elevada profundidade. O *Applied Physics Laboratory (APL)* da Universidade de Washington criou este veículo com o objetivo de retirar dados oceanográficos. Em 2010 a empresa responsável pela produção deste veículo, *iRobot*, recebeu dois contratos do *Naval Oceanographic Office* para realizar operações no rio Mississippi. Os “Gliders” possuem uma característica própria, sendo que podem passar semanas ou meses a navegar autonomamente, sendo ótimos para a prospeção e pesquisa do fundo oceânico.

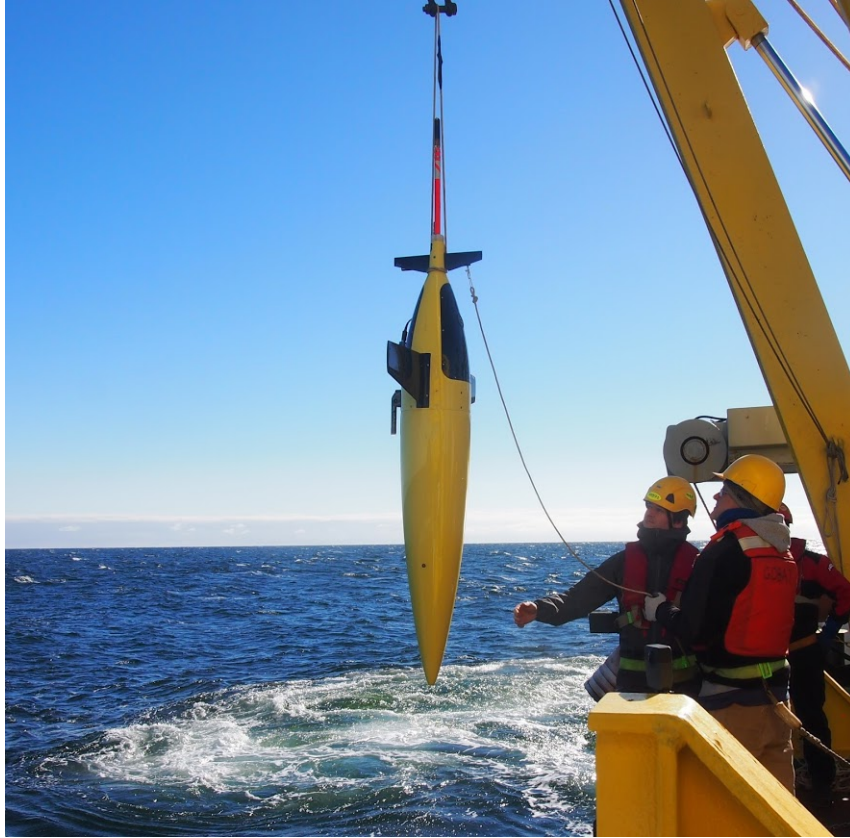


FIGURA 2.6: Seaglider a ser lançado do navio sul coreano Araon em janeiro de 2018

Fonte: ⁵

Este veículo consegue ainda “sobreviver” em ambientes extremamente hostis como águas polares, mantendo-se a navegar mesmo em pleno inverno.

Marlin

Este UAV foi criado com o grande objetivo de realizar *surveys* e inspecionar infraestruturas subaquáticas (Figura 2.7). Está equipado com *3D Imaging Sonar*, câmara de vídeo HD, sensor de proximidade e ainda com uma unidade de armazenamento de dados.

⁵<https://www.geekwire.com/2019/seagoing-robots-survive-year-probing-climate-changes-effects-antarctic-ice/>

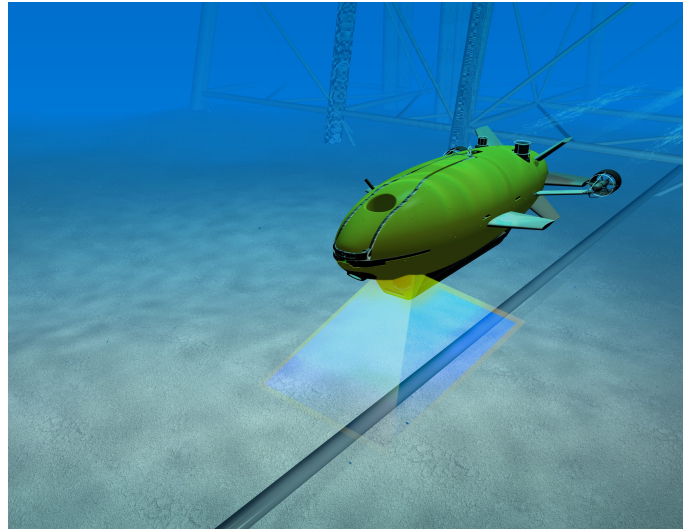


FIGURA 2.7: Projeção animada do AUV Marlin a investigar um cabo submarino
Fonte: ⁶

Este veículo foi atribuído à Marinha dos Estados Unidos da América para integrar o *Universal Launch and Recovery Module* (ULRM) de forma a ser testado junto de submarinos. O que mais impressiona neste AUV é a qualidade de imagem e respectiva construção 3D.

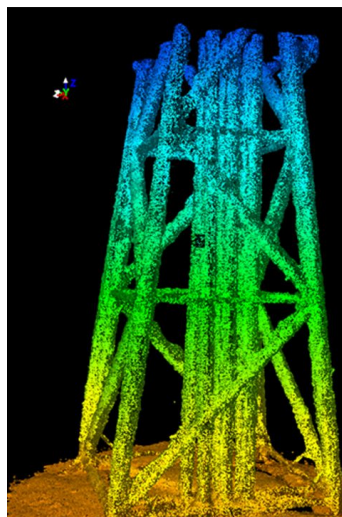


FIGURA 2.8: Resultado duma pesquisa do AUV Marlin
Fonte: ⁷

⁶<https://www.lockheedmartin.com/en-us/products/marlin.html>

⁷<https://www.lockheedmartin.com/en-us/products/marlin.htm>

Guerra Anti-Submarina

MK 39 EMATT

O MK39 EMATT (Figura 2.9) foi criado com o intuito de simular as assinaturas acústicas e magnéticas de um submarino de forma a treinar ASW. Este veículo integra o *Expendable Mobile ASW Training Target* (EMATT). Este UUV pode ser lançado de terra ou de uma plataforma marítima, existindo ainda uma versão que permite que este seja lançado por submarinos (SUBMATT).



FIGURA 2.9: MK 39 EMATT a ser lançado do *USS Normandy*
 Fonte: <https://twitter.com/mhmiranusa/status/1192903643902697473>

A Marinha Norte-Americana adquiriu cerca de 10.000 unidades durante o ano de 2013 ⁸. Assim, em 2016 o *MK39 Mod 2 EMATT*, uma versão mais recente, começou a ser o principal meio de treino da Marinha dos Estados Unidos da América, integrando o treino ASW em águas oceânicas.

Kanyon

A guerra nuclear existe e como tal também os UUVs acompanharam esta evolução e o *Kanyon* (Figura 2.10) foi desenvolvido pela Rússia de forma a conseguir transportar armas nucleares capazes de dizimar uma cidade costeira inteira. O nome foi atribuído pelo Pentágono.

⁸<http://www.navaldrone.com/MK39-EMATT.html>



FIGURA 2.10: Projeção do Canyon
Fonte: ⁹

As informações sobre este UUV são muito poucas, ainda assim é de relevar a capacidade deste UUV em transportar e utilizar armas nucleares.

Veículos Submarinos Biomiméticos (BUVs)

BIOSwimmer

O BIOSwimmer (Figura 2.11) foi inspirado nos movimentos de um atum. O principal objetivo da construção deste UUV foi garantir a segurança dos portos. Este veículo deriva do *GhostSwimmer*, ambos desenvolvidos pela *Boston Engineering's*. Em 2010 o *Department of Homeland Security's* (DHS) *Science and Technology Directorate* (S&T) patrocinou o desenvolvimento do BIOSwimmer.

⁹<https://thediplomat.com/2016/12/russia-tests-nuclear-capable-underwater-drone/>



FIGURA 2.11: BIOSwimmer em testes
Fonte: ¹⁰

O mais relevante deste veículo é a sua semelhança com o projeto SABUVIS. Ambos inspirados em atuns e com o objetivo principal da biomimetia bem presente: diminuir o ruído e assinatura acústica/magnética. A biomimetia está bem presente neste veículo e citando o responsável do programa do BIOSwimmer, *David Taylor*: “It’s called ‘biomimetics’. We’re using nature as a basis for design and engineering a system that works exceedingly well. Tuna have had millions of years to develop their ability to move in the water with astounding efficiency. Hopefully we won’t take that long.”

GhostSwimmer

O GhostSwimmer (Figura 2.12) foi desenvolvido com a intenção de imitar um peixe de grandes dimensões. Mede cerca de 1,5 metros e pesa perto de 50 quilogramas. *Michael Rufo* disse que: “It swims just like a fish does by oscillating its tail fin back and forth. The unit is a combination of unmanned systems engineering and unique propulsion and control capabilities.” Mais uma vez a biomimética tem um papel preponderante na construção destes veículos. Além da segurança que fornecem, pois são muito menos detetáveis em missões de ISR, este veículo quando comparado com um veículo de propulsão tradicional (hélice) de proporções semelhantes tem largas vantagens em termos de ruído e detecção.

¹⁰<https://www.dhs.gov/science-and-technology/st-snapshot-bioswimmer>



FIGURA 2.12: GhostSwimmer
Fonte: <https://auvac.org/268-2/>

Este veículo assume um papel preponderante e é considerado uma passagem de ficção científica para a realidade. Em 2014 completou os testes na *Joint Expeditionary Base Little Creek-Fort Story* (JEBLC-FS) realizados pela *U.S. Navy*. Além disso este veículo pode ser autónomo ou teleguiado até uma distância de 170 metros.

SwarmDiver

Desenvolvido pela *American Company Aquabotix* o SwarmDiver (Figura 2.13) é um BUV com o objetivo de realizar missões de defesa, oceanografia, aquacultura, pesquisa e hidrografia.



FIGURA 2.13: SwarmDivers em missão com a *U.S. Navy*

Fonte: ¹¹

O mais interessante deste projeto é a interligação criada entre os veículos. Estes funcionam em rede e aparecem no mercado como *game-changers*. Os ataques a navios ganham uma nova faceta, pois surgem novas táticas e dinâmicas que podem ser criadas facilmente apenas por um utilizador.

Futuro

Flimmer

O Flimmer (Figura 2.14a) é uma adaptação do WANDA (Figura 2.14b). O Flimmer possui uma característica especial: consegue ser um veículo aéreo não tripulado e também um submarino autónomo.

¹¹<https://www.offshore-energy.biz/aquabotix-scores-with-us-navy/>



(A) Flimmer



(B) Wanda

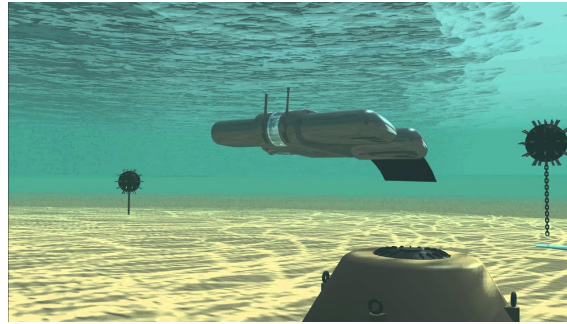
FIGURA 2.14: Flimmer e Wanda

Fonte: navaldrones.com

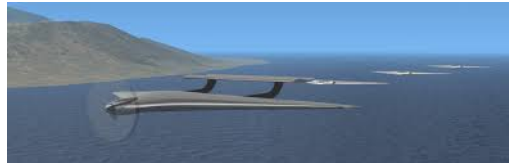
A grande vantagem deste veículo é de facto a sua capacidade de se deslocar a grandes velocidades (92 Km/h). Por enquanto este veículo apenas realiza missões relacionadas com o ambiente, mas os seus produtores já planeiam lançar uma nova versão capaz de realizar missões de ASW.

Volant Multi-modal Vehicle

O Volant (Figura 2.15) é um veículo multi-modal criado pela *Sandia national Laboratories Intelligent Systems, Robotics, & Cybernetics* (ISRC). Este BUV será capaz de voar, nadar e mover-se em terra, movimentando-se nos três meios e atravessar diversos obstáculos. Por enquanto apenas existe o conceito e a *Sandia* procura parcerias de forma a concretizar o projeto.



(A) Volant em modo submarino



(B) Volant em modo aéreo

FIGURA 2.15: Volant multi-modal Vehicle

Fonte: <https://www.wired.com/2013/11/transformer-drone/>

De facto, o futuro dos drones militares não passa por vigilância ou largar bombas, passa sim pela capacidade de combater em vários tipos de terreno com apenas um veículo. Esta versatilidade é por enquanto um sonho, ainda assim os próximos anos ditarão aquilo que será o futuro dos conflitos e a utilização de UAVs nos mesmos.

2.2 Contexto

Num projeto que envolve a Polónia, Alemanha, Portugal e a Agência Europeia de Defesa (EDA) criou o programa *Swarm of Biomimetic Underwater Vehicle for ISR* (SABUVIS) com a duração de 4 anos. Em 2016, foi construído um primeiro modelo na Polónia, inspirado numa foca (Figura 2.16). Este veículo, construído pela Escola Naval polaca, possui duas barbatanas laterais e uma cauda composta por duas barbatanas de menores dimensões.



FIGURA 2.16: Primeiro modelo do projeto SABUVIS
Fonte: ¹²

O programa ficou concluído em 2019 com a construção do SABUVIS I (Figura 2.17). Este veículo imita um atum e foi construído pela Universidade de Cracóvia, possui 2 barbatanas laterais e uma cauda constituída por uma só barbatana, permitindo que o modelo nade com maior fluidez.



FIGURA 2.17: SABUVIS I
Fonte: ¹³

Esforços conjuntos da *OceanScan* (construção mecânica do veículo), Laboratório de Sistemas e Tecnologia Subaquática (LSTS) (responsável pelo desenvolvimento da instrumentação e sensores) e do CINAV (responsável por desenvolver os controladores de baixo nível e a Inteligência Artificial) criaram um terceiro BUV. Este BUV destaca-se dos demais pois tentou-se aplicar técnicas de aprendizagem por reforço para o controlo do veículo (Figura 2.18).

¹²http://www.hisutton.com/Biomimetic_Autonomous_Underwater_Vehicles.html

¹³http://www.hisutton.com/Biomimetic_Autonomous_Underwater_Vehicles.html



FIGURA 2.18: BUV 3 do projeto SABUVIS
Fonte: Araújo, 2020

Este BUV conta ainda com a particularidade de ter uma cauda cambiável. Esta cauda pode assemelhar-se a uma cauda do tipo peixe (Figura 2.19a) ou a uma cauda do tipo foca (Figura 2.19b). Pode ainda ser acoplada uma hélice, pertencente ao *SeaCon* da Marinha.



(A) Cauda em forma de peixe



(B) Cauda em forma de foca

FIGURA 2.19: Tipos de cauda do projeto SABUVIS
Fonte: Araújo, 2020

O projeto SABUVIS II nasceu com o intuito de criar um cardume de veículos de subsuperfície biomiméticos heterogêneos, mas com a capacidade de interagir entre si. O desafio deste projeto consiste em construir um sistema de baixo custo, reduzidas dimensões e baixo peso. Todos os processos relativos a expansão, monitorização e manutenção são de fácil intervenção, garantindo requisitos operacionais de baixo nível, podendo facilmente ser atualizado/melhorado.

Como em todos os grupos existem os líderes e os restantes membros. A ideia de construir um cardume assenta nesta mesma ideologia. Assim, o cardume é constituído por dois tipos de veículos: os líderes, *Swarm Leader Biomimetic Autonomous Underwater Vehicles* (L-BAUVs) e os restantes membros, *Swarm Member Biomimetic Autonomous Underwater Vehicles* (M-BAUVs). Os líderes serão equipados com um sistema de navegação preciso e sistemas de comunicação de longo alcance que irão funcionar essencialmente no modo de Tx - transmissão. O objetivo deste sistema de comunicação é essencialmente distribuir a informação da missão e tarefas aos restantes elementos assim como também transmitir a informação necessária para o posto de controlo. Os M-BAUVs, por sua vez, deverão possuir um sistema de navegação mais fraco e de baixo custo e um sistema de comunicação simples com o principal objetivo de receber intruções, funcionando essencialmente no modo Rx - receção. A condição de liderança de um cardume resume-se a cumprir um trajeto mantendo a formação do mesmo ou a disposição dos veículos. Só após cumprir com esta missão se pode pensar em avançar para missões e tarefas mais complexas. Basicamente funciona como pequenos objetivos em que quando é alcançado passa-se ao próximo. Por exemplo, inicialmente a tarefa é fazer com que o cardume faça uma determinada rota mantendo a formação inicial. Só após se cumprir este objetivo se pode passar ao próximo. Este poderá passar por mudar a formação durante a rota. Mais uma vez, só após este objetivo ser concluído se pode pensar em atribuir tarefas mais complexas. A maioria destas tarefas cumpre-se por aprendizagem por reforço.

Capítulo 3

Modelação

Nos tempos mais modernos podemos assistir a uma evolução nos desenhos dos veículos submarinos, fazendo com que estes se aproximem de seres vivos e imitem a sua forma de nadar. Isto aumenta a furtividade dos veículos e o efeito surpresa. Normalmente o nadar destes BUVs assemelha-se a movimentos ondulatórios assim como as suas barbatanas. A modelação matemática do veículo utilizado como exemplo nesta dissertação aproxima-se do movimento de um atum. Genericamente, no seguinte capítulo pretende-se modelar um veículo biomimético com uma barbatana caudal e duas barbatanas laterais.

Resumidamente, a ideia principal deste capítulo é obter um modelo matemático para um veículo biomimético com duas barbatanas laterais e uma barbatana caudal a ser desenvolvido no contexto do projecto SABUVIS II, que permita mais tarde, por exemplo, testar controladores e comportamentos para o veículo com recurso a simulação e não ao veículo real.

3.1 Teoria da Modelação

Os modelos de sistemas podem ser usados para previsão, simulação em tempo real ou simplesmente para treino e melhorias dos próprios sistemas. Segundo Fossen, 2011, os modelos podem ser distinguidos em três tipos, sendo estes o modelo de simulação, *control design* e *observer design*. Estes modelos (Figura 3.1) são usados na simulação, controladores e sensores, respectivamente, dos veículos autónomos. Os modelos devem ser capazes de reconstruir, ao longo do tempo, a resposta dos veículos a impulsos e estímulos ou a eventos e acidentes que possam ocorrer de forma a criar fielmente um modelo do veículo sem recorrer à utilização do mesmo, isto é, em ambiente controlado.

Control Design Model

Este modelo é utilizado para simular os controladores associados ao veículo. No seu modelo mais simplificado o controlador proporcional, integral e derivativo (PID) utiliza sinais de entrada constantes para posterior análise. A evolução deste modelo mais simples consiste em gerar sinais de feedback e feedforward. Estes sinais são muito importantes pois são eles que possibilitam aumentar a complexidade do sistema e recriar com mais fidelidade o tracking de trajetórias.

Observer Design Model

Este modelo é diferente do *Control Design Model*, pois considera a dinâmica associada aos sensores de navegação e ao meio. O seu foco é modelar o ruído, situações de falha e predição de movimentos. Este modelo inclui por vezes um modelo específico com o objetivo de estimar a ondulação, vento e corrente tratando estes dados como perturbações. De forma a adquirir a posição do veículo o sistema é, normalmente, constituído por cerca de 20 Equações Diferenciais (EDs) (Fossen, 2011).

Simulation Model

Este modelo é o que melhor define um sistema, pois representa e analisa a sua simulação. Este modelo considera:

- Dinâmica do casco;
- Sistema de propulsão;
- Sensores e instrumentos de medida;
- Forças ambientais como vento, ondas e corrente.

Os modelos de simulação mais complexos onde o processamento é efetuado com recurso a memória e o percurso do veículo é calculado, constantemente, com base nas matrizes de massa e atrito são constituídos entre 50 a 200 EDs. Por outro lado um modelo que é manipulado por apenas 6 graus de liberdade pode ser traduzido em cerca de 12 EDs de forma a generalizar a sua posição e velocidade. Ainda adicionando as componentes ambientais o sistema fica resumido em menos de 50 EDs, facilitando a perceção do mesmo, diminuindo a sua complexidade.

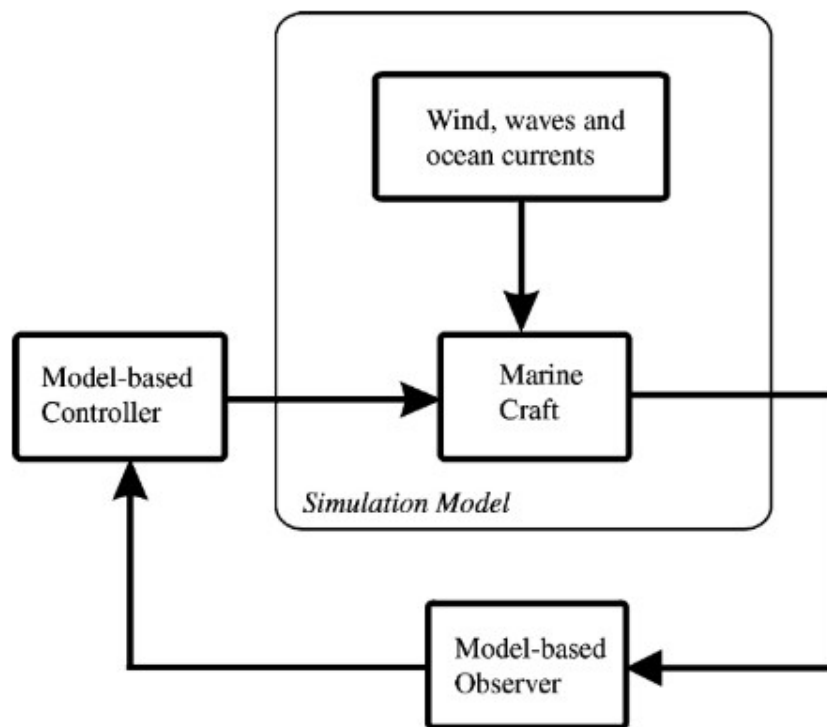


FIGURA 3.1: Modelos usados para controlo de navegação e orientação
 Fonte: Fossen, 2011

Tendo como base a figura 3.1, podemos concluir que o *Simulation Model* é o modelo que considera todas as condições do meio e é aquele cujos sistemas auxiliares (navegação, controlo, sensores e orientação) são considerados, pois reúne todos os controladores e sensores associados ao veículo. A complexidade dos sistemas está, sem dúvida, associada ao número de EDs.

De uma forma geral, neste capítulo irão ser explicadas as várias etapas que levam à criação do simulador tendo por base o modelo existente em *Szymak, 2017*. O veículo ainda não está totalmente construído nem operacional, mas há o seu projecto mecânico detalhado em *de Paiva, 2020*. Surgem vários desafios na construção do modelo, entre os quais a transformação de coordenadas, cálculo das forças e momentos associados aos movimentos do veículo e consequentemente à sua trajetória. O modelo deve ser sempre adaptado tendo em conta os graus de liberdade que o veículo possui. Ainda assim, deve-se ter sempre em conta que os modelos não lineares representam os acontecimentos reais com mais fidelidade, embora a sua complexidade seja mais elevada.

3.2 Locomoção biomimética

Os BUVs podem ser caracterizados segundo a sua aparência e consecutivamente segundo os graus de liberdade que possuem. Na figura 3.2 pode-se observar vários “modelos de peixes” onde variam os graus de liberdade e respetiva concepção e controlo.

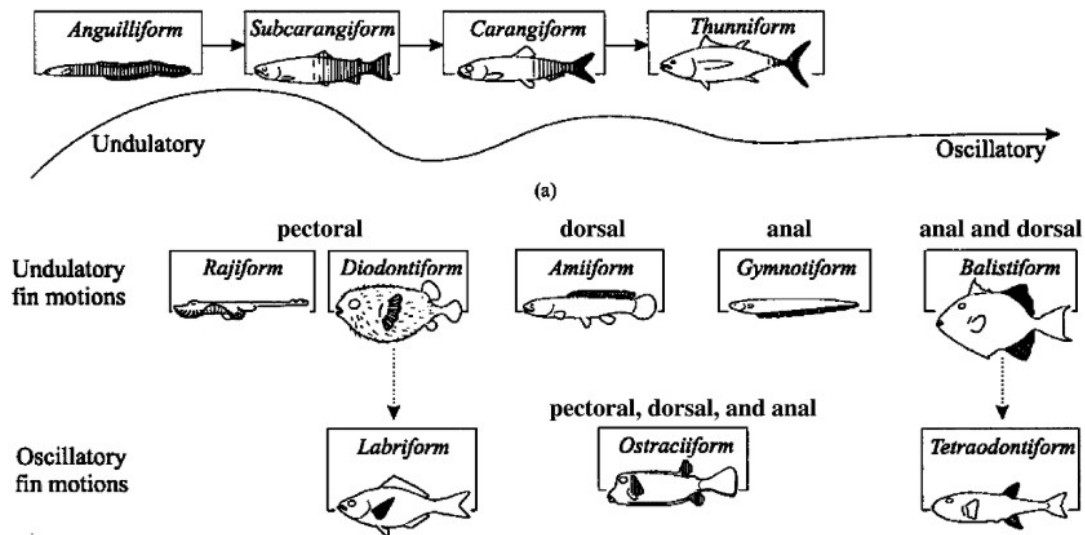


FIGURA 3.2: Tipos de peixes que inspiram BUVs

Fonte: Sfakiotakis et al., 1999

Observando a figura anterior salienta-se que quanto mais oscilatório é o movimento menos graus de liberdade este possui, sendo por isso mais fácil de projetar. De facto, podemos ainda dividir os BUVs em grupos. Por um lado a capacidade de gerar energia (propulsão) através de movimentos ondulatórios do corpo, por outro através de movimentos de barbatanas, aproximando-se do movimento oscilatório. Quanto mais graus de liberdade o veículo possuir, mais ondulatório será o seu movimento. Na figura 3.3 pode-se observar que o modelo de peixe *Anguilliform* tem um “nadar” muito mais ondulatório que o *Thunniform*.

Por outro lado a forma como as barbatanas laterais se movimentam também é determinante na caracterização dos BUVs com forma de peixe. Mais uma vez os movimentos podem ser ondulatórios ou oscilatórios, sendo o menos complexo este último.

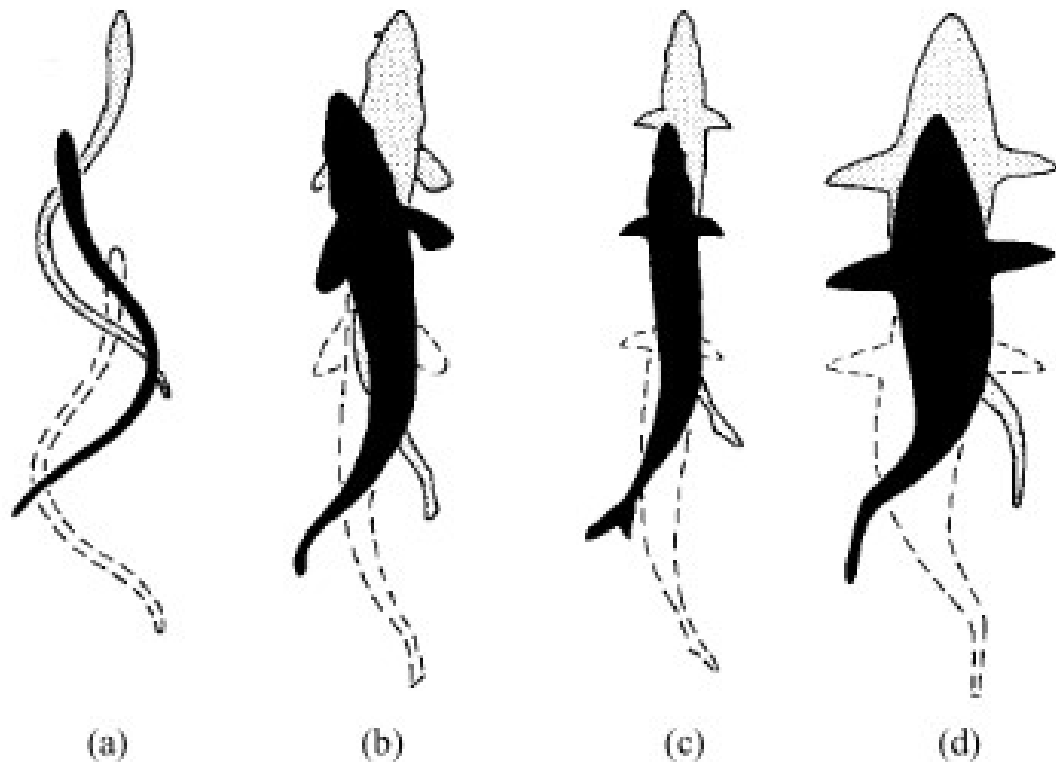


FIGURA 3.3: Formas de nado de: (a) *Anguilliform*, (b) *Subcarangiform*, (c) *Carangiform* e (d) *Thunniform*

Fonte: Sfakiotakis et al., 1999

O protótipo SABUVIS encaixa-se na forma *Carangiform*. A sua cauda possui 2 graus de liberdade e é constituída por um módulo que se separa do restante corpo. A cauda, por ter muito menos massa que o restante corpo, faz com que este não oscile quando está em movimento. Isto é, o facto da cauda ser um módulo à parte faz com que seja mais fácil oscilar apenas a cauda e não todo o corpo, reduzindo assim os movimentos oscilatórios.

Na figura 3.4 podem-se observar as características e dimensões do veículo utilizado como referência para a criação do simulador.

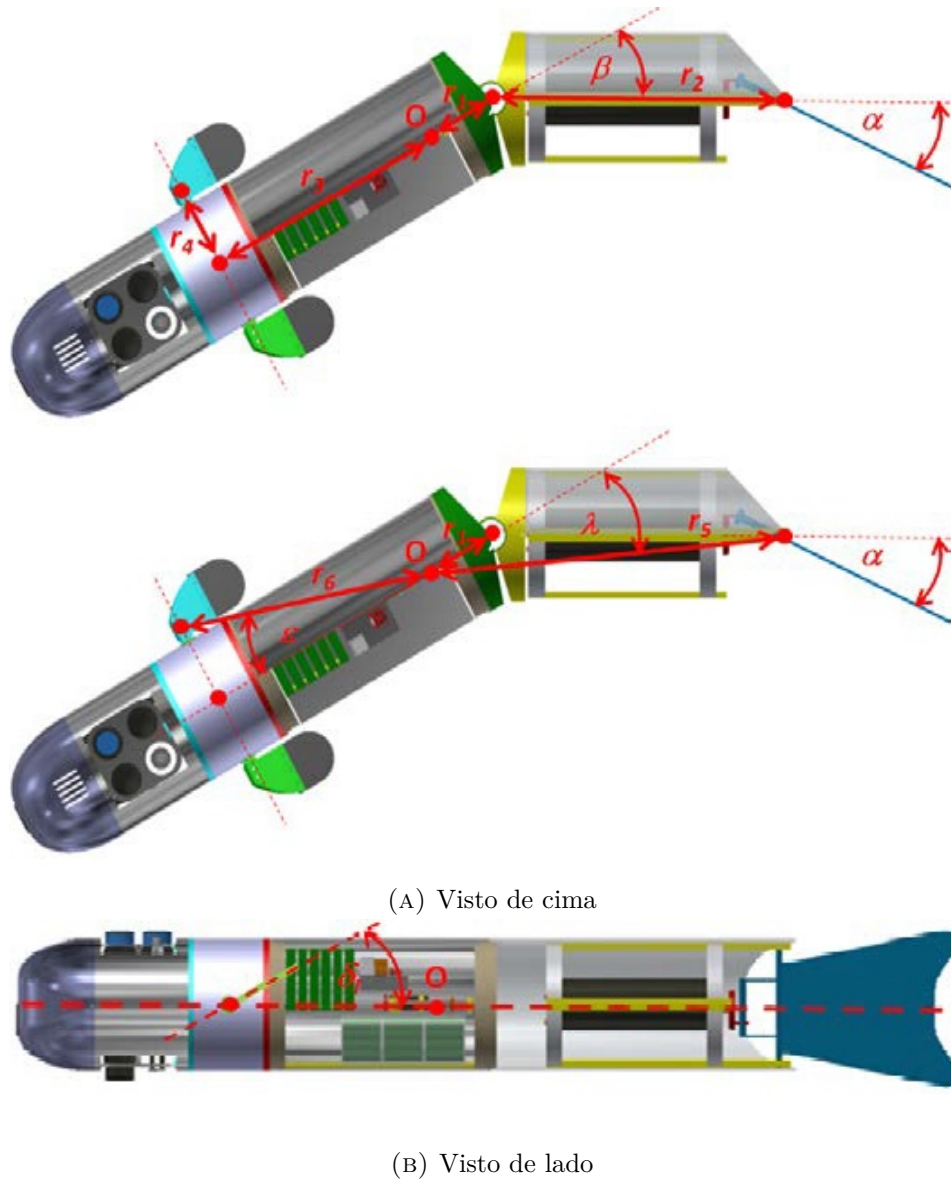


FIGURA 3.4: BUV 2 desenhado no âmbito do projeto polaco
Fonte: Szymak, 2017

O centro de gravidade do veículo (O) é considerado a origem para o cálculo das forças de cada barbatana, incluindo a cauda. Os parâmetros da figura são os seguintes:

Ângulos

- $\beta \longrightarrow$ ângulo entre o corpo principal do veículo e o módulo da cauda;
- $\lambda \longrightarrow$ ângulo entre o centro de gravidade e o segundo grau de liberdade da cauda;
- $\delta_l \longrightarrow$ ângulo da barbatana esquerda;

- $\varepsilon \longrightarrow$ ângulo entre o centro de gravidade e o grau de liberdade das barbatanas;

- α - ângulo da cauda.

Distâncias

$r_1 \longrightarrow$ distância entre o centro de gravidade e o módulo da cauda;

$r_2 \longrightarrow$ distância entre o primeiro grau de liberdade da cauda até ao segundo grau de liberdade;

$r_3 \longrightarrow$ distância do centro de gravidade até ao eixo das barbatanas laterais;

$r_4 \longrightarrow$ distância entre o meio do eixo das barbatanas até ao grau de liberdade das mesmas;

$r_5 \longrightarrow$ distância entre o centro de gravidade e o segundo grau de liberdade da cauda;

$r_6 \longrightarrow$ distância do centro de gravidade até ao grau de liberdade das barbatanas laterais.

Os índices utilizados foram os seguintes:

- $t \longrightarrow$ corresponde à cauda (tail);
- $l \longrightarrow$ corresponde à barbatana esquerda (left);
- $r \longrightarrow$ corresponde à barbatana direita (right);
- $d \longrightarrow$ corresponde ao atrito causado pelas barbatanas laterais;

No resto da dissertação é considerada uma aproximação da figura 3.4.

O modelo a desenvolver é para ser aplicado a um BUV com duas barbatanas laterais e uma cauda , totalizando 3 graus de liberdade para a atuação (Figura 3.5).

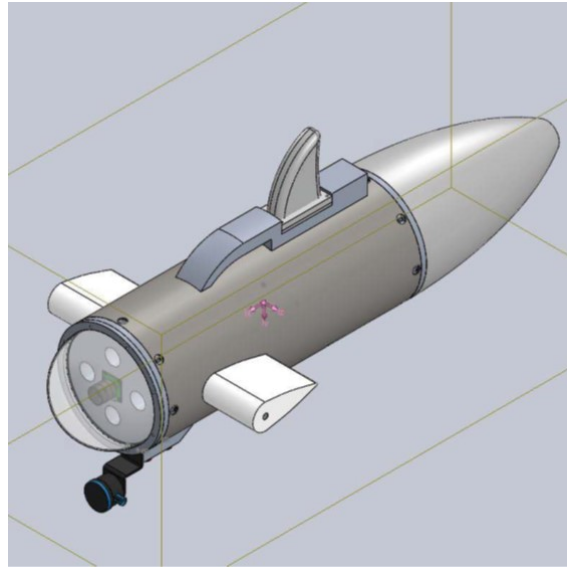


FIGURA 3.5: Sugestão de modelo Carangiform
Fonte: de Paiva, 2020

A partir da figura 3.4 é possível observar a atuação nas barbatanas e a forma como a sua posição afeta o movimento do veículo. É, assim, considerado o atrito provocado pela posição instantânea (dada por ζ) das barbatanas. Para tal considerou-se que o efeito da cauda ($\zeta(3)$) e das barbatanas laterais ($\zeta(1)$ para a barbatana esquerda e $\zeta(2)$ para a barbatana direita) apenas nos 3 eixos.

O simulador criado retrata o movimento do veículo consoante as características das barbatanas. Assim, atuando nas barbatanas e impondo uma amplitude de movimento, uma frequência e uma deflexão podemos tirar várias ilações e caracterizar raios de giração, distância percorrida e movimentos relevantes na caracterização do veículo. No modelo utilizado foi então considerado que para cada barbatana se pode atuar na amplitude de movimento ($^{\circ}$), frequência de oscilação (Hz) e deflexão ($^{\circ}$).

Para o modelo utilizado o atrito causado pelas barbatanas na rotação dos eixos (Figura 3.6) não foi considerado. Ainda assim, considera-se que no eixo das abcissas não existe rotação, isto é, o *roll* é constante fazendo com que o veículo não rode sobre este eixo. No eixo das ordenadas o *yaw* é afetado principalmente pela deflexão da cauda, sendo que as barbatanas laterais também influenciam a rotação neste eixo. Por fim, no eixo das cotas é considerado que apenas as barbatanas laterais têm efeito na rotação do eixo, ora seja, no *pitch*. Este atrito foi considerado nos 3 eixos para o simulador, mas o seu efeito na rotação nos eixos não foi. Assim, concluiu-se que para o eixo das abcissas (sentido popa-proa) o efeito da cauda seria

desprezado e que o atrito causado pelas barbatanas laterais seria máximo quando estas se encontrassem no máximo de deflexão (90°) e seria mínimo quando se encontrassem paralelas ao plano XoY, o que pode ser traduzido pela função seno. Por outro lado, para o eixo das ordenadas (sentido bombordo-estibordo) apenas foi considerado o efeito da cauda e contrariamente às barbatanas laterais o atrito é máximo quando esta não possui deflexão, sendo assim traduzida numa função cosseno. No eixo das cotas (sentido centro da terra) apenas foi considerado o atrito nas barbatanas laterais, sendo que aqui acontece uma situação contrária ao que se sucede no eixo das abcissas, sendo por isso o atrito traduzido por uma função cosseno. Todos os valores resultantes das funções trigonométricas são consideradas em módulo, pois o atrito causado por uma barbatana que se encontre a 20° é idêntico quando esta se encontra a -20° .

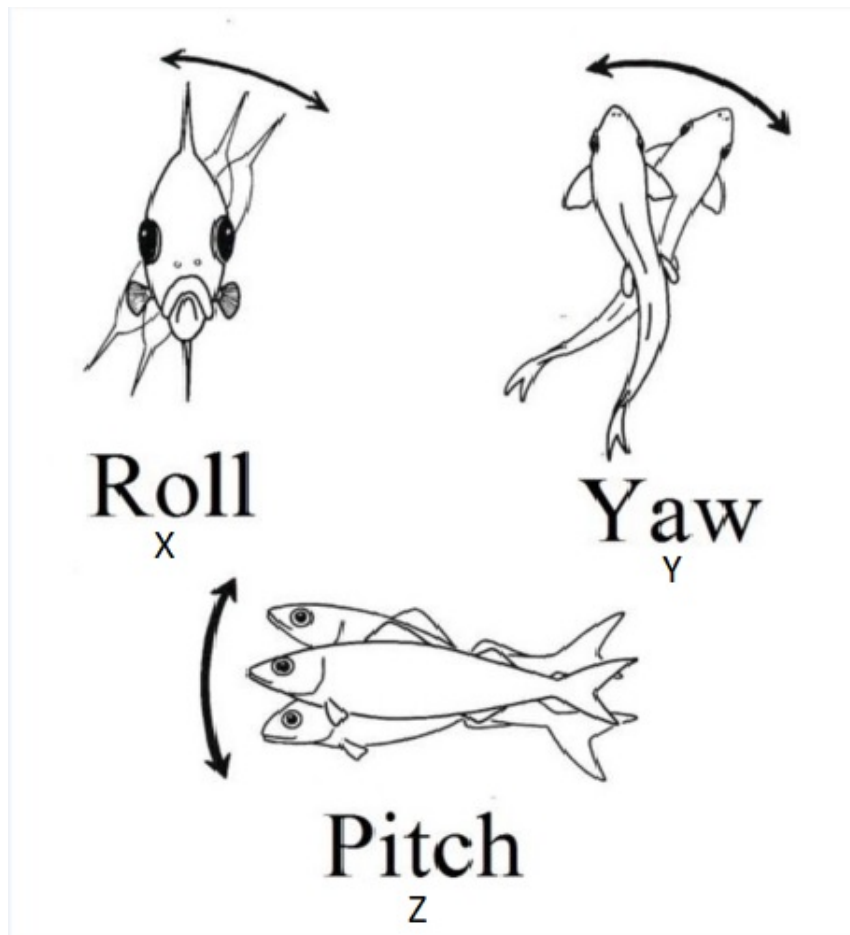


FIGURA 3.6: Movimentos de rotação segundo o eixo

Exemplificando: se o veículo se deslocar com uma deflexão na cauda esta fará com que o veículo mude de rumo (yaw) (Figura 3.7).

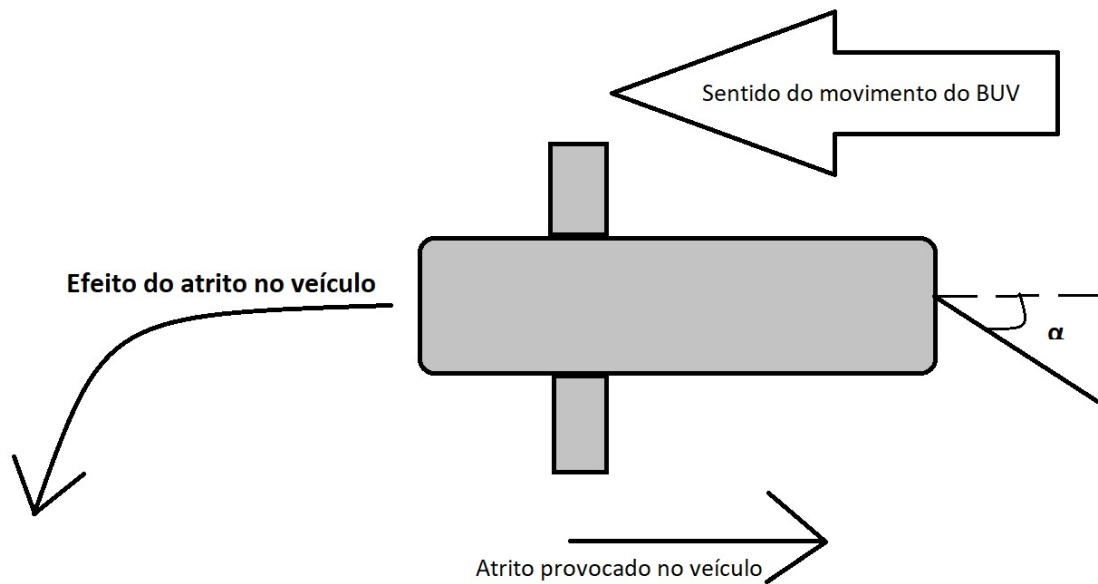


FIGURA 3.7: Exemplo do efeito da deflexão

A deflexão pode ser aplicada em todas as barbatanas, sendo que na cauda uma deflexão positiva faz com que o veículo se movimente para bombordo, no sentido do eixo das ordenadas, enquanto que a deflexão negativa provoca uma curva para estibordo. Nas barbatanas laterais, uma deflexão negativa faz com que o veículo de movimento no sentido do eixo das cotas, imergindo. Uma deflexão contrária faz com que o veículo se desloque para a superfície.

De forma a realizar a modelação de veículos submarinos e navios autónomos as equações de cinemática, hidrostática e teoria do controlo são a base para obter modelos dependendo dos graus de liberdade que o veículo possui. Os veículos podem ter um (1), três (3), quatro (4) ou seis (6) graus de liberdade e podem ser baseados em diferentes modelos dependendo dos valores ou termos que se desprezam, isto é, que se igualam a zero. A tabela 3.1 resume os diferentes tipos de modelos e os respectivos graus de liberdade associados.

TABELA 3.1: Modelos para UUVs segundo os graus de liberdade
Fonte: Fossen, 2011

Número de Graus de Liberdade	Modelo Utilizado	Caracterização
1	Modelo de Nomoto	Primeira ordem
		Segunda ordem
3	Pivot Point Controlo Não dimensional	Não linear
		Baseado na resistência à corrente e arrasto
	Modelos de Manobrabilidade Não Linear	Baseado em funções modulus de segunda ordem
		Baseado em funções ímpares
4	Modelos de Manobrabilidade Linear	Linear
		Não linear com base nos coeficiente de corrente
	Modelos de Posição Dinâmica	Linear
6	Modelo Não Linear	Son e Nomoto
		Blanke e Christensen
		Baseado na teoria Low-Aspect Ratio Wing
6	Modelo Linear	
6	Modelo Não Linear	
6	Modelo para AUVs e ROVs	

Explorando os modelos segundo os seus graus de liberdade podemos exemplificar e identificar o movimento de um navio com piloto automático, onde o veículo apenas possui um grau de liberdade. Adicionando ainda exemplos, um navio à superfície pode ser modelado por um modelo com 3 graus de liberdade, sendo estes os movimentos horizontais (*surge*, *sway* e *yaw*).

O modelo utilizado nesta dissertação é um modelo de 6 graus de liberdade, mais especificamente o modelo para AUVs e ROVs. Este modelo possui 6 graus de liberdade, sendo cada um associado a um eixo e à respectiva rotação no mesmo. O modelo é apresentado na forma matricial sendo que as primeiras 3 linhas representam as forças e momentos nos eixos, enquanto que as restantes 3 linhas representam o mesmo, mas associado à rotação nos eixos.

3.2.1 Coordenadas Geográficas (NED) Vs Coordenadas do Veículo

Quando se analisa o movimento de um veículo aquático com 6 graus de liberdade consideram-se dois referenciais. Um deles possui o centro coincidente com a normal do objeto na superfície terrestre, conhecido como *North-East-Down* (NED) e um outro referencial, cujo centro coincide com o centro de gravidade do veículo (Body). Na figura 3.8 pode-se observar a comparação entre estes dois referenciais.

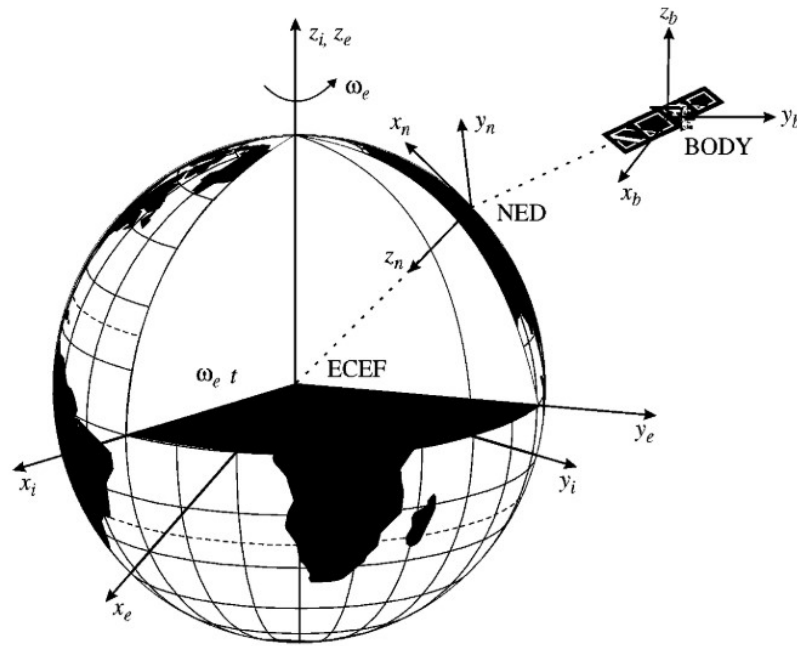


FIGURA 3.8: Referenciais NED e Body
Fonte: Fossen, 2011

Referencial NED

Este referencial segue o sistema Geodésico do mundo de 1984. É o referencial mais comum, pois é usado no dia a dia tanto para a navegação como para as deslocações aéreas. Neste referencial os eixos apontam para os seguintes pontos cardeais:

- X_n - Norte Verdadeiro;
- Y_n - Este;
- Z_n - Normal à superfície da Terra com sentido para o centro da mesma.

De referir que as forças atuantes no eixo das cotas estão extremamente dependentes da diferença entre a força de impulsão e a força da gravidade. Os ângulos criados com o centro do referencial são intitulados de latitude e longitude.

Referencial Body

Este referencial tem um centro móvel, pois coincide com o centro de massa do veículo. Enquanto a posição e orientação podem ser definidas tendo em conta um referencial exterior do veículo, as velocidades lineares e angulares são descritas tendo em conta um referencial fixo ao corpo do veículo (Figura 3.9) Desta forma:

- X_B - Eixo longitudinal (sentido popa-proa);
- Y_B - Eixo transversal (sentido para estibordo);
- Z_B - Eixo da normal (sentido convés-quilha).

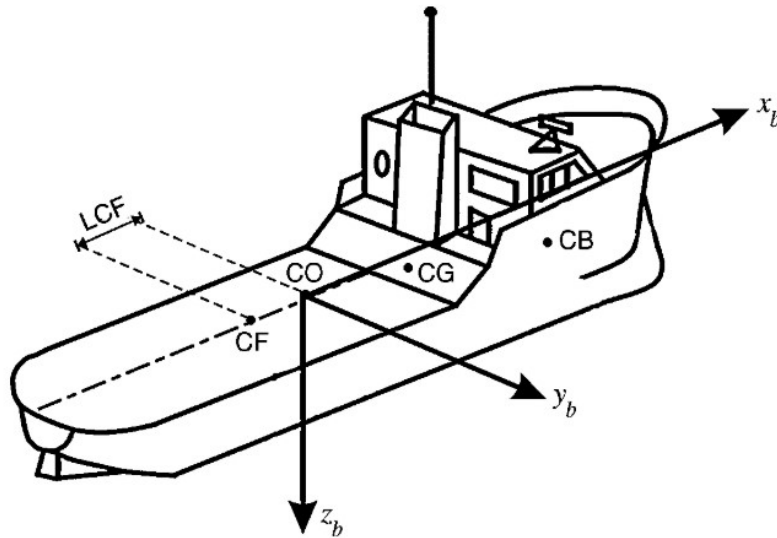


FIGURA 3.9: Referencial body
Fonte: Fossen, 2011

onde:

- LCF $\rightarrow$ *Longitudinal Center of Flotation* - Centro de flutuação longitudinal;
- CF $\rightarrow$ *Center of Flotation* - Centro de Flutuação;
- CO $\rightarrow$ *Body axes coordinate origin* - Origem do referencial *Body*;
- CG $\rightarrow$ *Center of Gravity* - Centro de gravidade;
- CB $\rightarrow$ *Center of Buoyancy* - Centro de flutuabilidade;

3.2.2 Forças e Momentos

O Princípio de Arquimedes (287-212 AC) é um dos princípios base da Hidrostática. Nesta ciência as forças gravitacionais e de impulsão são chamadas de forças de equilíbrio. Nesta dissertação estas forças serão consideradas para veículos submarinos. Assim, estas são determinadas tendo em conta:

- Volume de deslocamento;
- Localização do centro de Impulsão;
- Eixos e respectivos momentos associados.

Considera-se a existência de dois referenciais:

- um com o centro coincidente com o centro de Impulsão (CB);
- outro com o centro coincidente com o centro de gravidade (CG).

Assim, as coordenadas associadas ao centro de Impulsão são: $[X_b, Y_b, Z_b]$ e as coordenadas associadas ao centro de Gravidade são: $[X_g, Y_g, Z_g]$.

Na tabela 3.2 apresentam-se as forças, momentos, velocidades e posições segundo o eixo do referencial do corpo do BUV e a respectiva rotação em torno dos eixos. Esta simbologia será utilizada no resto da dissertação.

TABELA 3.2: Simbologia utilizada num modelo com 6 graus de liberdade

Descrição	Forças e Momentos	Velocidades lineares e angulares	Posições e Ângulos de Euler
Movimentos no eixo de X	X	u	x
Movimentos no eixo de Y	Y	v	y
Movimentos no eixo de Z	Z	w	z
Rotação em redor do eixo de X [Roll]	K	p	ϕ
Rotação em redor do eixo de Y [Pitch]	M	q	θ
Rotação em redor do eixo de Z [Yaw]	N	r	ψ

- τ representa a primeira coluna da tabela, sendo pois o vetor que representa as forças para cada eixo (X, Y, Z), assim como os seus momentos (K, M, N).

- ν é o vector de velocidade generalizada que contém os termos da coluna (segunda) das velocidades lineares e angulares da tabela 3.2.

- η é a posição generalizada do veículo no referencial *NED*, e essa posição contém não só as coordenadas x,y,z mas também os ângulos de roll (ϕ), pitch (θ) e yaw (ψ), presentes na terceira coluna da tabela 3.2.

Assim, ficam definidos os vetores de posição (η), velocidade (ν) e atuação (τ), essenciais na definição do veículo e construção do simulador.

Não só as forças propulsoras atuam no veículo, havendo também forças naturais que influenciam o movimento do mesmo. De forma a calcular a ação das forças verticais (eixo dos Zz) isto é, as principais forças responsáveis pela imersão/emersão do veículo, considerou-se:

$$W = mg \quad (3.1)$$

onde:

- W representa o peso;
- m representa a massa do veículo;
- g representa a gravidade (aprox. 9.8 m/s²).

Desta forma, W representa a força da gravidade, sendo a força responsável pela imersão do veículo. Considerando o referencial da figura ?? o seu valor é positivo (+).

$$B = \rho g \nabla \quad (3.2)$$

onde:

- B representa a força de impulsão;
- ρ representa a densidade da água;
- g representa a gravidade;
- ∇ representa o deslocamento do veículo.

Ambas as forças atuam apenas no plano vertical, sendo que a única componente que possuem está contida no eixo das cotas, como é possível observar na figura 3.10.

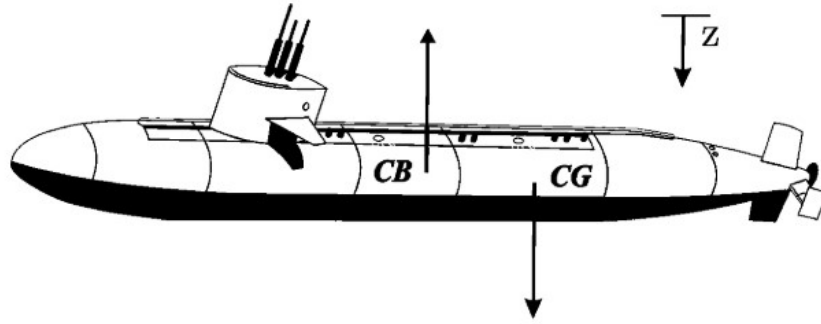


FIGURA 3.10: Força da gravidade e de impulsão
Fonte: Fossen, 2011

3.3 Aplicação ao BUV

Nesta dissertação e para o BUV estudado utilizou-se um modelo com seis graus de liberdade cuja aplicação é em AUVs e ROVs, como visto anteriormente. Considerou-se, tendo como base as leis de *Newton*, a equação que representa o movimento do veículo: $M * a = \sum \text{Forças}$, onde a representa a aceleração generalizada (linear e angular) e as forças são: as de atrito ($D(\nu) * \nu$), flutuabilidade (gravidade + impulsão) ($g(\eta)$) e propulsivas (τ).

Todas as considerações serão na forma matricial, pois é considerado a interação em todos os eixos (Xx, Yy, Zz), assim como as forças e momentos associados a cada um. Desta forma, a equação que representa o modelo (Equação 3.3) é considerada na forma matricial (Fossen, 2011):

$$M\dot{\nu} + D(\nu)\nu + g(\eta) = \tau \quad (3.3)$$

Todos os valores são generalizados, isto é, os valores utilizados são usados como base, mas tanto o simulador como o algoritmo de identificação podem ser aplicados a qualquer BUV com características semelhantes ao modelo manipulado.

Iniciando a “dissecação” da equação 3.3:

A **matriz de inércia (M)** requer que muitos parâmetros hidrodinâmicos sejam conhecidos. Estes parâmetros podem ser reduzidos tendo em conta as simetrias existentes no corpo do veículo. Esta matriz junta as matrizes de massa do corpo do veículo (M_A) e de massa acrescentada (M_{RB}). Este veículo é considerado de corpo rígido (Rigid Body - RB) (Szymak, 2017), pois:

- Possui três planos de simetria;
- Move-se segundo seis ângulos de liberdade;
- Move-se a baixa velocidade num líquido viscoso.

Considerou-se uma matriz de massa do veículo (M_A) e uma matriz de massa acrescentada (M_{RB}) obtendo-se:

$$M_A = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_x & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & I_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & I_z \end{bmatrix}$$

$$M_{RB} = \begin{bmatrix} Xup & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Yup & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Zup & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Kup & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & Mup & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Nup \end{bmatrix}$$

Onde:

- $m \rightarrow$ massa do veículo em quilogramas;
- $I_x, I_y, I_z \rightarrow$ momentos de inércia do veículo;
- $Xup, Yup, Zup \rightarrow$ forças do líquido viscoso nos respectivos eixos;
- $Kup, Mup, Nup \rightarrow$ momentos associados às forças do líquido viscoso em cada eixo.

Concluindo:

$$M = M_A + M_{RB} \tag{3.4}$$

$$M = \begin{bmatrix} M_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & M_{22} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & M_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & M_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & M_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & M_{66} \end{bmatrix}$$

Onde:

- $M_{11} = m + X_{up}$
- $M_{22} = m + Y_{up}$
- $M_{33} = m + Z_{up}$
- $M_{44} = I_x + K_{up}$
- $M_{55} = I_y + M_{up}$
- $M_{66} = I_z + N_{up}$

A matriz que concentra as **forças e momentos de atrito (D)** é considerada extremamente não linear e difícil de obter para veículos com 6 graus de liberdade que se movimentam a altas velocidades. Ainda assim, pode-se considerar uma aproximação onde se pondera o atrito quadrático e a força de atrito entre as vertentes longitudinais e transversais.

Esta matriz pode ser resumida a uma diagonal:

$$D(\nu) = \text{diag}\{X_u, Y_v, Z_w, K_p, M_q, N_r\} = \\ \text{diag}\{X_{|u|u}|u|, Y_{|v|v}|v|, Z_{|w|w}|w|, K_{|p|p}|p|, M_{|q|q}|q|, N_{|r|r}|r|\}$$

Note-se que cada elemento da matriz é constituído por dois termos. O primeiro termo está associado ao coeficiente de atrito linear ($D^*\nu$), enquanto que o segundo termo é o coeficiente de atrito quadrático ($D^*\nu^2$). Esta operação é sempre executada com o módulo de ν ($|\nu|$), pois desta forma ocorre a preservação do sinal.

Aplicando esta preservação de sinal ao nosso sistema, quando o sinal da multiplicação $[D^*|\nu|^*\nu]$ é:

- negativo (-), o veículo move-se para trás;
- positivo (+), o veículo move-se para a frente.

Isto porque, representado ν a velocidade do veículo, esta tem o mesmo sentido que o seu deslocamento. Não tendo o BUV hélice é muito difícil fazer com que este se desloque para trás, tendo sempre em conta o referencial do corpo. Apenas se as barbatanas laterais rodassem mais de 90 graus seria possível criar deslocamento para ré.

Resumindo, as forças de atrito opõem-se sempre ao movimento e o uso do módulo serve para que independentemente da direcção de locomoção do veículo essa força tenha sempre sentido contrário ao movimento do mesmo.

Acrescentou-se também o efeito das barbatanas laterais no eixo das abcissas:

- $lfex = Xvx \cdot |(\sin(\zeta(1)) + \sin(\zeta(2)))|;$
- $Qfex = Xvxx \cdot |(\sin(\zeta(1)) + \sin(\zeta(2)))|;$

No eixo das ordenadas considerou-se apenas o efeito que a cauda tem, obtendo-se as seguintes equações:

- $ltey = Yvy \cdot |\cos(\zeta(3))|;$
- $Qtey = Yvyy \cdot |\cos(\zeta(3))|;$

No eixo das cotas apenas se reputou o efeito das barbatanas laterais:

- $lfex = Zvz \cdot |(\cos(\zeta(1)) + \cos(\zeta(2)))|;$
- $Qfex = Zvzz \cdot |(\cos(\zeta(1)) + \cos(\zeta(2)))|;$

O efeito das barbatanas é considerado apenas nos eixos, não sendo contabilizado o efeito que estas provocam na rotação do veículo. O pensamento geral foi selecionar a função (*sen* ou *cos*) que melhor representasse a força que a barbatana faria segundo o eixo. Por exemplo, se o veículo se estivesse a movimentar em linha reta e as barbatanas laterais estiverem a 90° o atrito será máximo, sendo a função que é máxima em 90° é a função *sin*. O exemplo pode ser melhor observado na figura 3.11.

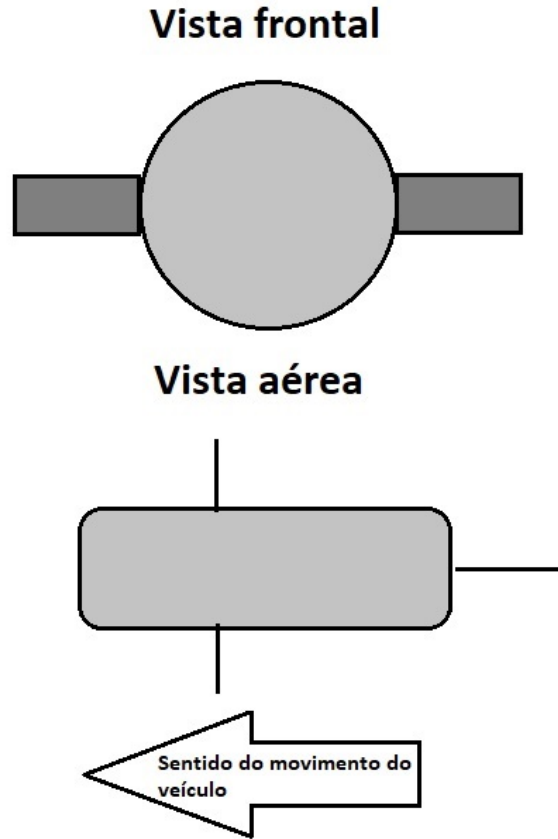


FIGURA 3.11: Exemplo do efeito das barbatanas no movimento do veículo

Concluindo, nesta dissertação assume-se que:

- $D_{11} = X_u + X_{|u|u}|u| + l f_{ex} + Q f_{ex}$
- $D_{22} = Y_v + Y_{|v|v}|v| + l f_{ey} + Q f_{ey}$
- $D_{33} = Z_w + Z_{|w|w}|w| + l f_{ez} + Q f_{ez}$
- $D_{44} = K_p + X_{|p|p}|p|$
- $D_{55} = M_q + M_{|q|q}|q|$
- $D_{66} = N_r + N_{|r|r}|r|$

Assim, na equação 3.3, a matriz de *damping* (D) tomou o formato:

$$D = \begin{bmatrix} D_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & D_{22} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & D_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & D_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & D_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & D_{66} \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

A matriz $g(\eta)$ é a representação dos ângulos de Euler associados às forças e momentos produzidos pela gravidade e pela força de impulsão (referencial *Body*). Deste modo, para se obter uma flutuação neutra tem que se igualar W e B ($W = B$). “Por conveniência e por segurança constroem-se veículos com $B > W$, pois em caso de avaria ou falha dos sistemas o veículo ascende à superfície, não ocorrendo o risco de perda do protótipo. De qualquer modo, $B \gg W$ não é viável pois seria necessário um gasto de energia muito grande para manter o veículo abaixo da superfície da água.” (Fossen, 2011)

$$g(\eta) = \begin{bmatrix} (W - B)\sin(\theta) \\ -(W - B)\cos(\theta)\sin(\phi) \\ -(W - B)\cos(\theta)\cos(\phi) \\ -(y_g W - y_b B \cos(\theta)\cos(\phi) + (z_g W - z_b B)\cos(\theta)\sin(\phi) \\ (z_g W - z_b B)\sin(\theta) + (x_g W - x_b B)\cos(\theta)\cos(\phi) \\ -(x_g W - x_b B)\cos(\theta)\sin(\phi) - (y_g W - y_b B)\sin(\phi) \end{bmatrix}$$

As forças W e B são verticais no referencial *NED*, mas deixam de o ser quando passam a ser consideradas no referencial *body*. É essa transformação que está presente na matriz $g(\eta)$.

O termo τ que se encontra à direita da equação 3.3 representa o **vetor de forças e momentos** que atuam no veículo gerados pelo seu meio de propulsão. Como o meio de propulsão imita o movimento ondulatório de um peixe, surge uma dificuldade acrescida no cálculo destes parâmetros.

Como visto anteriormente:

$$\tau = [X, Y, Z, K, M, N] \quad (3.6)$$

De forma a calcular as componentes vetoriais ($X_t, Y_t, \dots$) torna-se necessário calcular os braços associados aos mesmos. Um braço é caracterizado pela distância

entre o eixo de movimento e o ponto ao qual está a ser aplicada uma força de resistência.

Assim, tendo em conta a localização das barbatanas e o centro de gravidade, utilizado como referência, obteve-se:

$$X_t = \cos\beta \cdot T_t \quad (3.7)$$

$$Y_t = \sin\beta \cdot T_t \quad (3.8)$$

$$N_t = -\cos\lambda \cdot r_5 \cdot Y_t \quad (3.9)$$

$$X_l = \cos\delta_l \cdot T_l \quad (3.10)$$

$$Z_l = \sin\delta_l \cdot T_l \quad (3.11)$$

$$N_l = r_4 \cdot X_l \quad (3.12)$$

$$M_l = r_3 \cdot Z_l \quad (3.13)$$

$$N_d = \cos(90 - \varepsilon) \cdot r_6 \cdot X_d \quad (3.14)$$

onde:

$T_t, T_l, T_r \longrightarrow$ força gerada pela cauda, barbatana esquerda e direita, respectivamente;

Apenas foram efetuados os cálculos para a barbatana esquerda, sendo que para a barbatana direita as equações 2.15 - 2.18 são idênticas mudando apenas o índice “ l ” para o índice “ r ”.

A força aplicada por cada uma das barbatanas é uma função variável no tempo dependente do ângulo em que estas se encontram e da frequências que estas possuem. Tendo em conta a geometria do veículo concluiu-se que:

$$X = X_t + X_l + X_r - X_d \quad (3.15)$$

$$Y = Y_t \quad (3.16)$$

$$Z = Z_l + Z_r \quad (3.17)$$

$$K = 0 \quad (3.18)$$

$$M = M_l + M_r \quad (3.19)$$

$$N = N_t + N_l + N_r - N_d \quad (3.20)$$

Desta forma, o vetor τ é obtido em função das defleções das barbatanas.

O trabalho de *Szymak, 2017* obtém a força de propulsão, em função da frequência de oscilação das barbatanas, de forma experimental, num tanque instrumentado. No entanto pode ser considerada uma aproximação em que essa força pode ser aproximadamente proporcional à amplitude da oscilação e à respectiva frequência. Assim, quanto maior estas características maiores serão os valores τ .

O valor de cada parâmetro de τ não corresponde a uma constante e pode não corresponder a uma sinusóide, sendo aproximado por uma onda periódica descrita numa série de Fourier:

$$F = K_0 \cdot A_{osc} \cdot w_{osc} \cdot (1 + K_1 \cdot \cos(w_{osc} \cdot t + \phi_1) + K_2 \cdot \cos(2 \cdot w_{osc} \cdot t + \phi_2)) \quad (3.21)$$

onde os parâmetros K estão associados aos ganhos, a A_{osc} representa a amplitude do movimento da barbatana em graus, a w_{osc} representa a frequência de batimento de cada barbatana em *Hertz* (Hz) e os parâmetros associados a ϕ representam o desfasamento adicionado ao sinal.

Ao longo do tempo a forma de onda periódica para a força gerada por uma barbatana pode ser relativamente complexa, mas que pode ser aproximada pelos primeiros termos de uma série de Fourier. Note-se que no modelo de *Szymak, 2017* considera-se essa série com apenas 2 termos, um constante e outro proporcional a uma sinusóide com a frequência de oscilação, onde as respectivas constantes são obtidas experimentalmente onde o desfasamento ϕ_1 é ignorado.

3.4 Resultados Experimentais

Para recriar os movimentos de um BUV foi criado um simulador¹⁴. Neste foram utilizados os valores experimentais de *Szymak, 2017*. Para o modelo de propulsão é utilizado um modelo sinusoidal (2 primeiros termos da série de Fourier). Estes valores foram obtidos experimentalmente num tanque de ensaio para várias frequências e definidos para uma amplitude constante de 20°.

Nas imagens pode ser observado um gráfico 2D que representa a movimentação do veículo no plano XoY e um gráfico 3D que representa o mesmo movimento,

¹⁴<https://github.com/PedroMel0/BUV-Simulator>

mas tendo em conta os 3 eixos, o que permite uma melhor perspectiva e noção do movimento executado.

O gráfico que contém a indicação dos ângulos θ e ψ representam a inclinação do veículo em torno dos eixos das ordenadas e das cotas, respectivamente.

O gráfico que contém as velocidades relativas no eixo das abcissas (u) e no eixo das cotas (w) encontra-se no canto inferior esquerdo de cada imagem, enquanto que no canto inferior direito estão representadas as forças de atuação das barbatanas no eixo das abcissas (X) e o momento associado ao eixo das cotas (N).

De referir ainda que a força da gravidade (W) foi igualada à força de impulsão (B) nas experiências 1-5.

Foram realizadas várias experiências (Tabela: 3.3) de forma a validar o simulador e testar a sua veracidade.

TABELA 3.3: Experiências realizadas para testar o simulador

Experiência	Descrição
1	Movimento retilíneo (atuação da cauda)
2	Movimento retilíneo (atuação da cauda e barbatanas laterais)
3	Movimento retilíneo (barbatanas laterais como “travão”)
4	Raios de giração (estibordo e bombordo)
5	Efeito da deflexão (barbatanas laterais)
6	Compensação da flutuabilidade com a deflexão nas barbatanas laterais
7	Efeito da deflexão (cauda)
8	Comparação dos modelos de obtenção da força de propulsão

3.4.1 Experiência 1 - Movimento retilíneo (atuação da cauda)

Iniciando a análise do movimento do BUV fez-se um movimento retilíneo com este, atuando apenas na cauda e mantendo as barbatanas laterais numa posição neutra, sem qualquer atuação.

TABELA 3.4: Características da experiência 1

Características	Cauda	Barbatana direita	Barbatana esquerda	Tempo de Simulação (s)
Amplitude de oscilação (°)	20	0	0	100
Frequência de oscilação (Hz)	1	0	0	
Deflexão (°)	0	0	0	

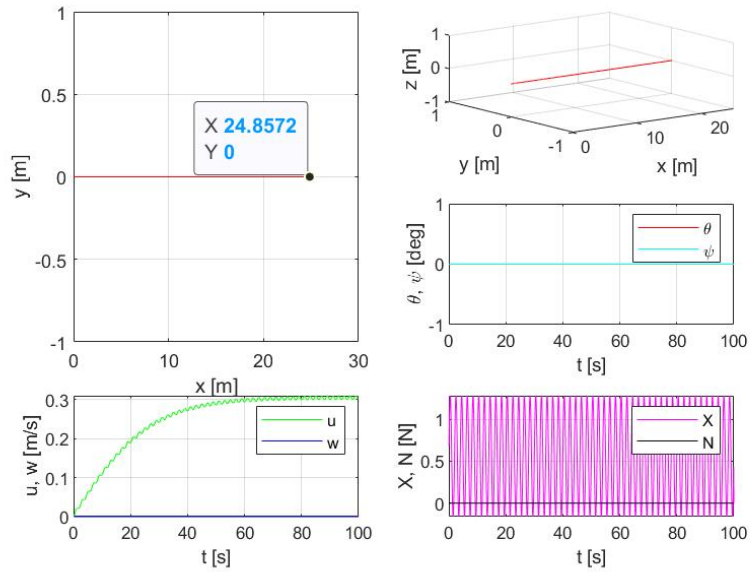


FIGURA 3.12: Movimento retilíneo, influência da cauda

Com o movimento descrito acima o veículo deslocou-se cerca de 25 metros. É, pois, de esperar com a atuação das barbatanas laterais, este se desloque mais, como pode ser observado na figura 3.13.

3.4.2 Experiência 2 - Movimento retilíneo (atuação da cauda e barbatanas laterais)

TABELA 3.5: Características da experiência 2

Características	Cauda	Barbatana direita	Barbatana esquerda	Tempo de Simulação (s)
Amplitude de oscilação (°)	20	20	20	100
Frequência de oscilação (Hz)	1	1	1	
Deflexão (°)	0	0	0	

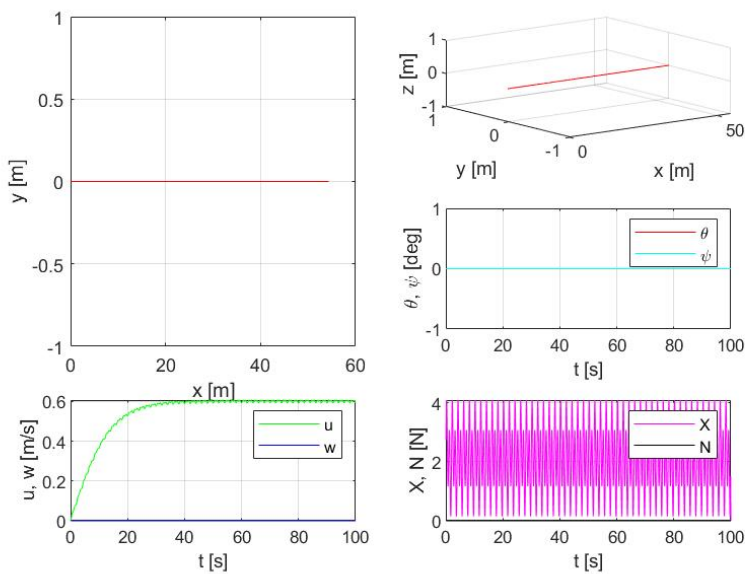


FIGURA 3.13: Movimento retilíneo, influência de todas as barbatanas

Na figura 3.13 pode-se observar que o BUV realizou um movimento retilíneo, percorrendo cerca de 55 metros. O efeito das barbatanas laterais aumenta a distância percorrida em cerca de 30 metros durante o mesmo tempo de simulação.

3.4.3 Experiência 3 - Movimento retilíneo (barbatanas laterais como “travão”)

De forma a atuar na deflexão, colocaram-se as barbatanas laterais a fazer de “travão”, colocando-as a 90°. Desta forma as barbatanas ficaram com a seguinte configuração:

TABELA 3.6: Características da experiência 3

Características	Cauda	Barbatana direita	Barbatana esquerda	Tempo de Simulação (s)
Amplitude de oscilação (°)	20	0	0	100
Frequência de oscilação (Hz)	1	0	0	
Deflexão (°)	0	90	90	

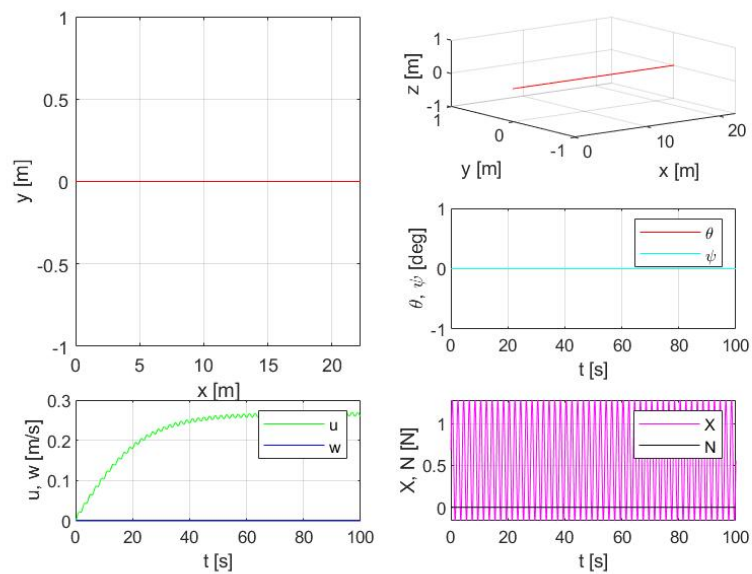


FIGURA 3.14: Movimento retilíneo, barbatanas laterais como “travão”

Note-se que o veículo percorreu menos 2 metros, mostrando que as barbatanas podem funcionar para abrandar o movimento e aumentando as constantes responsáveis pelo seu “peso” no simulador (X_{vx} , X_{vxx} , ...) pode-se fazer com que estas tenham mais influência.

3.4.4 Experiência 4 - Raios de giração (estibordo e bombordo)

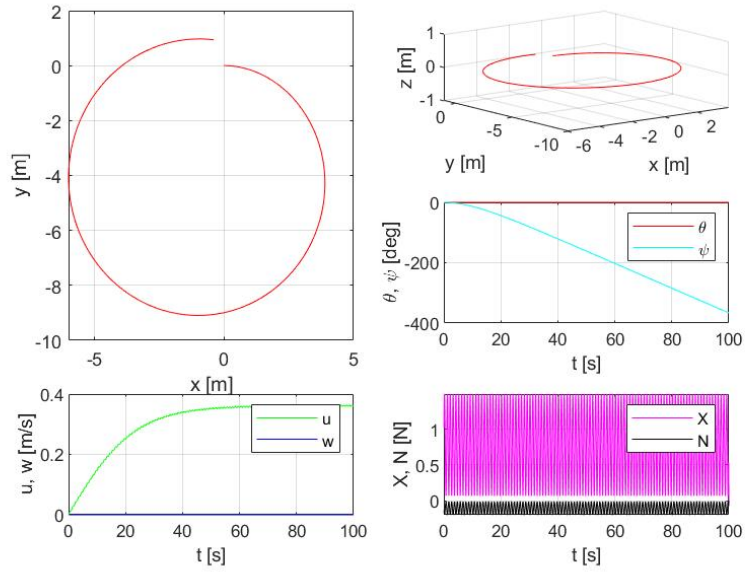
Indo ao encontro de caracterizar o movimento do veículo continuou-se a análise deste pelos raios de giração.

As características das barbatanas laterais mantiveram-se, sendo estas:

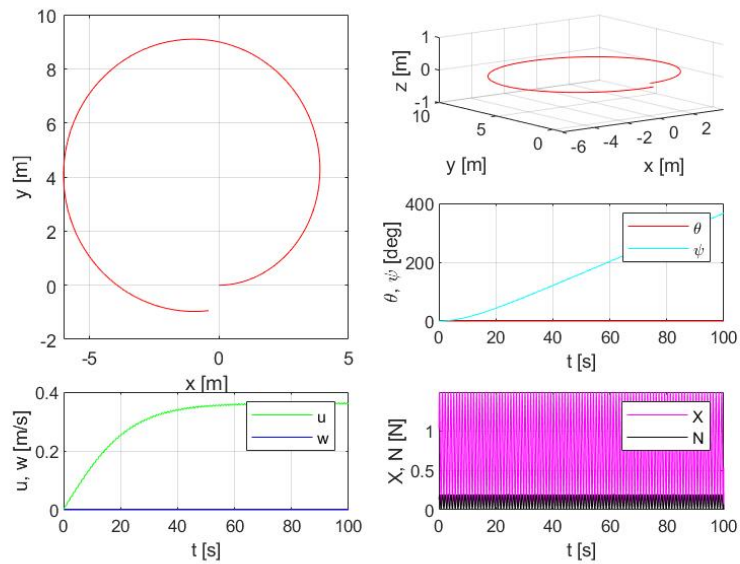
TABELA 3.7: Características da experiência 4

Características	Cauda	Barbatana direita	Barbatana esquerda	Tempo de Simulação (s)
Amplitude de oscilação (°)	0	0	20	100
Frequência de oscilação (Hz)	0	0	1	
Deflexão (°)	0	0	0	

Sendo atuadas à vez, a primeira experiência corresponde a uma curva para estibordo, pois a atuação ocorreu apenas na barbatana esquerda. Posteriormente realizou-se a mesma experiência na barbatana direita, fazendo com que o veículo realiza-se uma curva para bombordo. Na tabela 3.7 apenas está demonstrada a atuação na barbatana esquerda, posteriormente atuou-se igualmente na barbatana direita.



(A) Curva para estibordo



(B) Curva para bombordo

FIGURA 3.15: Raios de giração (atuação nas barbatanas laterais)

Em ambas as curvas o diâmetro de giração é de cerca de 10 metros e iguala-se, tanto para estibordo como para bombordo.

3.4.5 Experiência 5 - Efeito da deflexão (barbatanas laterais)

De seguida atuou-se na deflexão, isto é, o *offset* a partir do qual a barbatana oscila. Atuou-se inicialmente nas barbatanas laterais com uma deflexão positiva.

TABELA 3.8: Características da experiência 5

Características	Cauda	Barbatana direita	Barbatana esquerda	Tempo de Simulação (s)
Amplitude de oscilação (°)	0	20	20	50
Frequência de oscilação (Hz)	0	3	3	
Deflexão (°)	0	1	1	

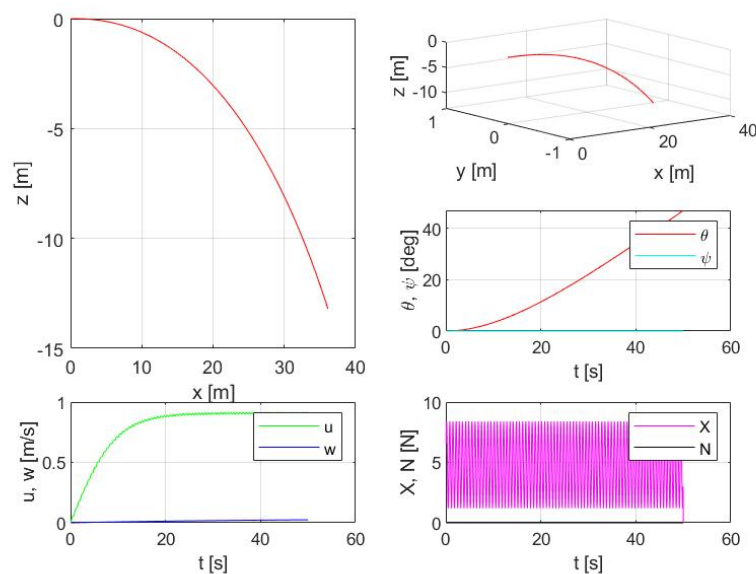


FIGURA 3.16: Efeito no movimento do veículo da deflexão positiva nas barbatanas laterais

De acordo com o esperado, com uma deflexão positiva o veículo tem tendência a imergir. Note-se que o veículo emerge 0.26 m/s. A situação assemelha-se

quando a deflexão troca de sinal e as barbatanas laterais passam a impulsionar o veículo na direção da superfície.

3.4.6 Experiência 6 - Compensação da flutuabilidade com a deflexão nas barbatanas laterais

Tal como explicado no subcapítulo 3.3, as forças resultantes da flutuabilidade têm de ser positivas, pois em caso de falha total o veículo se dirija à superfície. Como tal, foi inserido uma diferença unitária entre estas forças e através de tentativa e erro tentou-se aproximar a rota do veículo duma reta. Esta teve uma variação de 45 centímetros e é uma aproximação obtida através de tentativa e erro.

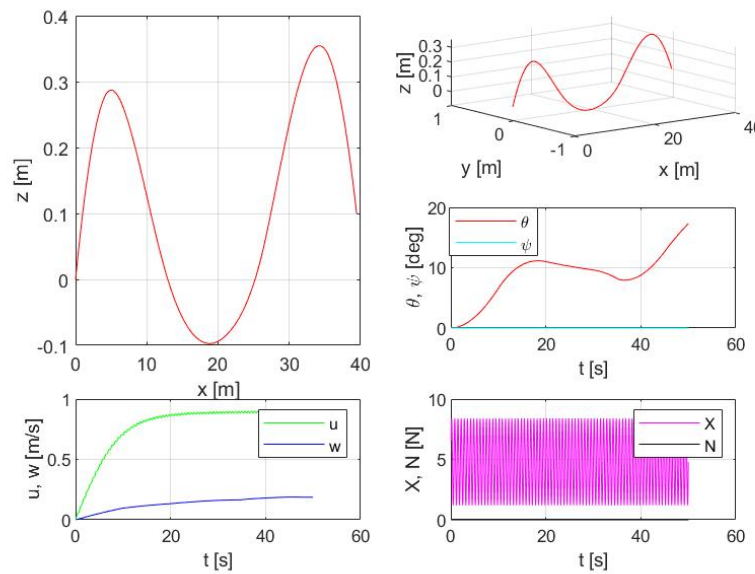


FIGURA 3.17: Aproximação de movimento retilíneo com flutuabilidade positiva

Note-se que o movimento do veículo é ondulatório, pois a flutuabilidade tenta ser compensada com a deflexão das barbatanas laterais. Quando o veículo imerge a deflexão é positiva, enquanto que enquanto o veículo emerge esta é neutra, sendo que a única força atuante é a força de impulsão.

3.4.7 Experiência 7 - Efeito da deflexão (cauda)

A deflexão na cauda afeta muito o rumo do BUV e com uma deflexão positiva o veículo move-se para bombordo, isto é, para a parte negativa do eixo das ordenadas, como se pode observar na figura 3.18

Nesta experiência as barbatanas possuíam a seguinte configuração:

TABELA 3.9: Características da experiência 7

Características	Cauda	Barbatana direita	Barbatana esquerda	Tempo de Simulação (s)
Amplitude de oscilação (°)	20	0	0	50
Frequência de oscilação (Hz)	2	0	0	
Deflexão (°)	2	0	0	

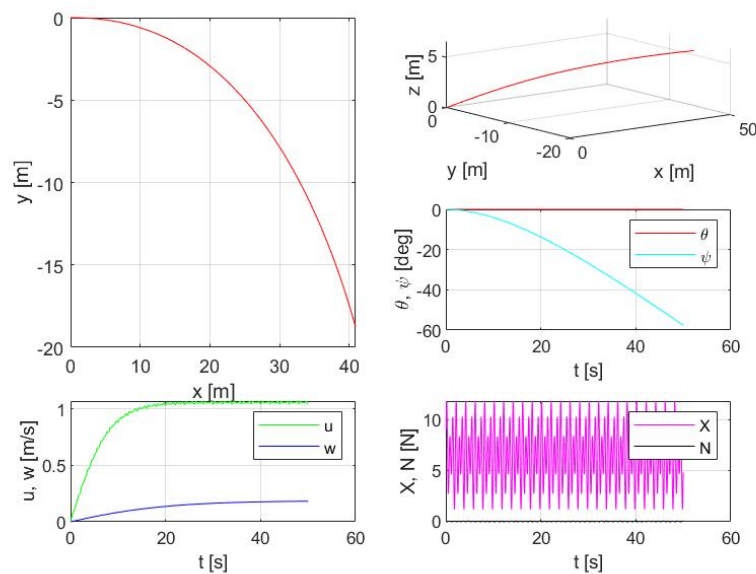


FIGURA 3.18: Efeito da deflexão positiva na cauda

Pode-se observar na figura acima que apenas com uma deflexão de 2 graus e durante uma simulação de 50 segundos o veículo moveu-se lateralmente 0.36 m/s.

Também é possível fazer um raio de giração atuando apenas na cauda e com uma flutuabilidade positiva. Atuando na cauda com uma deflexão negativa é possível notar na figura 3.19 que o raio de giração com uma deflexão de -5° e 3 batimentos por segundo com 20 graus de amplitude proporcionam um raio de giração de cerca de 10 metros de diâmetro.

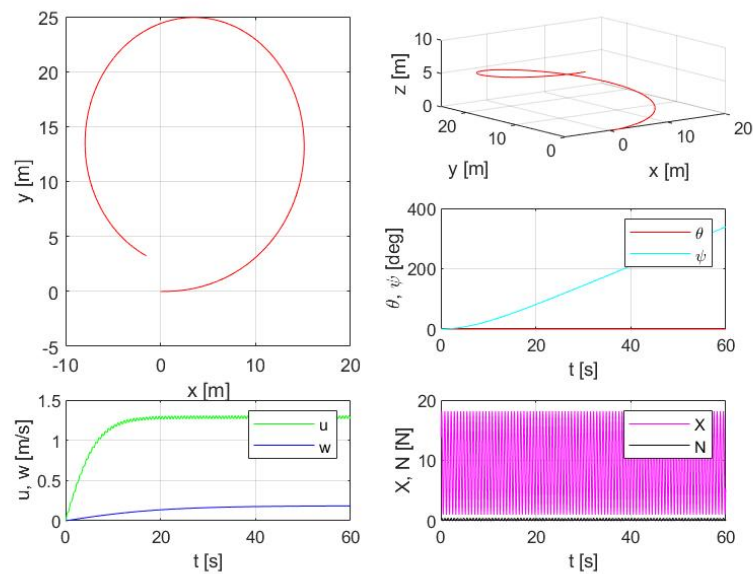


FIGURA 3.19: Raio de giração com deflexão negativa na cauda

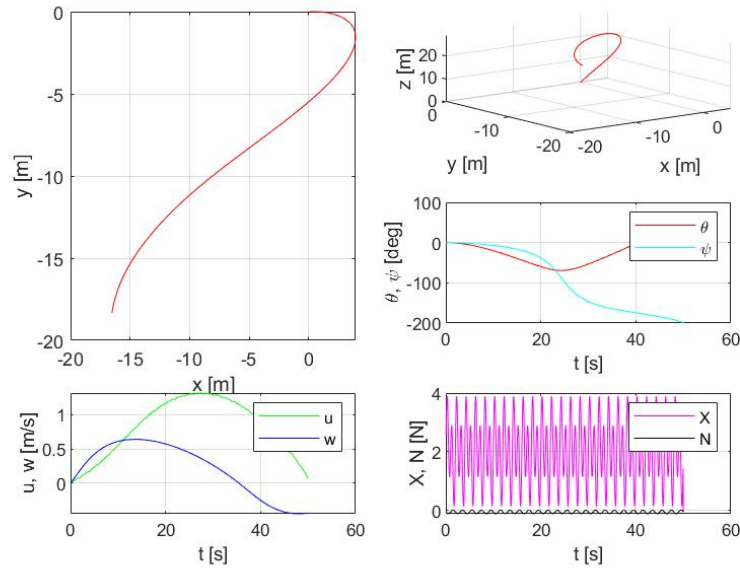
Note-se que alterando a deflexão e a frequência pode-se aumentar ou diminuir o diâmetro do raio de giração.

3.4.8 Experiência 8 - Comparação dos modelos de obtenção da força de propulsão

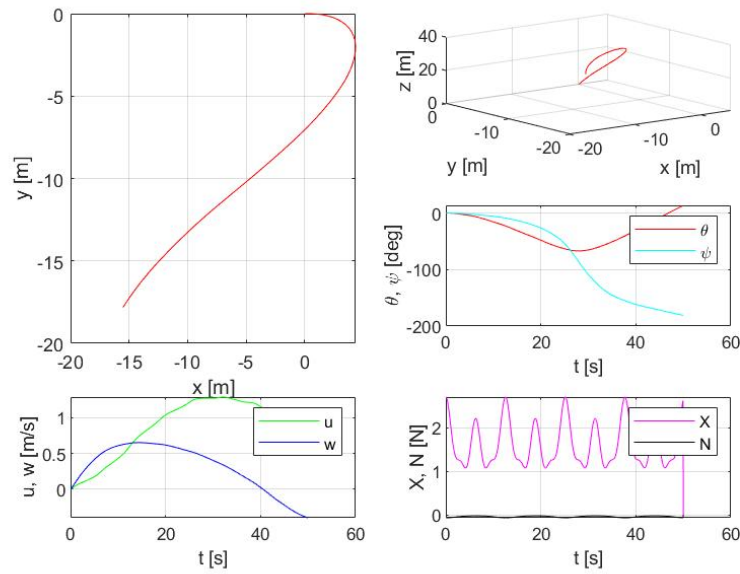
Foi então realizada uma experiência de forma a comparar as duas formas de obtenção do vetor de atuação τ e simulou-se o movimento do BUV com as seguintes características em cada barbatana:

TABELA 3.10: Características da experiência 8

Características	Cauda	Barbatana direita	Barbatana esquerda	Tempo de Simulação (s)
Amplitude de oscilação (°)	5	3	3	50
Frequência de oscilação (Hz)	0.5	1	1	
Deflexão (°)	10	20	20	



(A) Simulação utilizando os valores experimentais de *Szymak, 2017*



(B) Simulação utilizando os valores por aproximação de série de Fourier

FIGURA 3.20: Comparação entre modelos aplicados à força de propulsão

Na figura 3.20 podem-se observar os dois modelos de obtenção da força de propulsão.

Note-se que todos os gráficos estão muito semelhantes e apresentam apenas alguns valores numéricos diferentes que acabam por se revelar desprezáveis. Existe

uma pequena distorção da velocidade relativa no eixo das abcissas devido à aproximação das forças de atuação por série de Fourier e não por uma interpolação linear de valores experimentais. De maior realce surge as diferenças no gráfico que representa a força X e o momento N . A maior diferença entre estes gráficos encontra-se maioritariamente nas frequências de oscilação do sinal e esta diferença pode ser explicada pela aproximação que é realizada na série de Fourier.

Na figura 3.20a os valores de associados a cada barbatana são retirados experimentalmente e são aproximados por uma série de Fourier com 2 termos. Posteriormente, realizando uma interpolação entre os valores, é retirado o valor de força de propulsão que cada barbatana provoca no veículo.

O outro modelo considera uma série de Fourier com valores de K_0 , K_1 , ϕ_1 , K_2 e ϕ_2 calculados por aproximação ao modelo anterior, incluindo mais um termo na série de Fourier e tendo como prioridade a semelhança entre movimentos.

Após a realização destas experiências é de assinalar que a maioria das experiências foram executadas atuando nas barbatanas com intervalos de 10 segundos o que dificulta tanto a resposta do sistema a um novo estímulo como o controlo do mesmo. Todos os movimentos do BUV podem ser mais controlados através de uma atuação em tempo real.

De forma a testar o simulador usaram-se parâmetros do veículo de Szymak, 2017, mas esses parâmetros poderão não ser conhecidos para outros veículos de formato semelhante. Nessa situação pode-se estimar esses parâmetros usando técnicas analíticas de modelação hidrodinâmica ou procurar inferir esses valores a partir dos valores de aceleração, velocidade e posição facultados pelos sensores do veículo. Esta última opção será abordada no capítulo seguinte.

Capítulo 4

Identificação de Parâmetros

A identificação de sistemas dinâmicos lineares iniciou-se no final da década de 1950 (Zadeh, 1962). O seu sucesso refletiu-se de tal maneira que atualmente a identificação de parâmetros de sistemas lineares e a modelação *data driven* passaram a ser um fator a ter em conta nos modelos de design mais modernos.

Os sistemas não lineares surgiram quando os sistemas mais “simples” (lineares) não conseguiram corresponder às necessidades dos utilizadores (Thompson, 1988). O mundo real é não linear e varia com o tempo, o que torna os sistemas lineares imprecisos e por vezes não correspondem exatamente à realidade, acabando por não reproduzirem comportamentos essenciais na avaliação e aprovação de sistemas. Ainda assim, os sistemas lineares são um “ponto de partida” em qualquer sistema, permitindo melhorar algoritmos e respostas dos sistemas.

O conceito principal deste capítulo é, tendo em conta o simulador do capítulo anterior, tentar identificar os valores correspondentes aos vários parâmetros (coeficientes de atrito, momentos de inércia) que se assumem desconhecidos, a partir dos dados dos sensores existentes a bordo do veículo (unidades inerciais, acelerómetros, giroscópios, etc). Assume-se por isso que, durante a operação do veículo, se consegue medir a aceleração ($\dot{\nu}$), a velocidade (ν) e a orientação do veículo (η). Como tal, foram estudados vários métodos e modelos de forma a aumentar a complexidade do sistema e aproximá-lo de um movimento real.

4.1 Métodos Existentes

A identificação de parâmetros nos sistemas é uma ciência que estuda as reações de um sistema e tenta recriá-lo através de um modelo matemático, tal que este possa ser estudado. Após a modelação matemática do sistema cabe ao utilizador escolher quais as capacidades ou limitações do mesmo. De forma a que a escolha

seja o mais acertada possível torna-se necessário acumular um grande número de experiências e observações.

Na imagem 4.1 são consideradas várias etapas até à validação do modelo criado. Isto é, dependendo dos objetivos do utilizador existirá um modelo de design do veículo e um modelo matemático que o representa. Neste capítulo o passo mais abordado do *loop* será o modelo estimado (*estimate model*) e, claro está, a sua validação (*validate*).

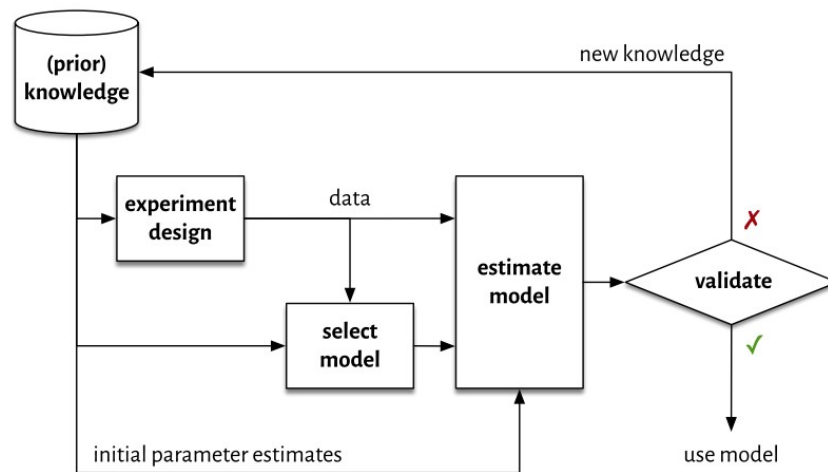


FIGURA 4.1: Loop da identificação do modelo
Fonte: Of, 2016

A eficácia de um algoritmo de identificação pode ser traduzida pela diferença entre o valor real e o valor estimado. Quanto menor for esse erro, melhor será o algoritmo e mais otimizado estará o sistema, na questão da obtenção dos parâmetros. Ainda assim, o valor estimado também estará dependente da “qualidade” com que se obtém o valor real (Of, 2016).

A escolha de um modelo varia consoante as preferências do utilizador e as ordens / comportamento dos sistemas onde são aplicados estes métodos. Além disso o quanto se conhece dos sistemas e o número de parâmetros a calcular faz variar qual o melhor método de identificação.

O comportamento do sistema faz com que este possa ou não ser estudado dentro de um loop, tornando mais fácil a identificação. Isto é, quanto menos vastos e diferenciados forem os movimentos do sistema e quanto mais estes se assemelharem a um padrão mais fácil será a sua identificação, pois o número de variáveis a obter também decresce.

De qualquer modo o modelo utilizado, seja este linear ou não linear tem como objetivo recriar um *output* do modelo $[\hat{y}(t)]$ para o tempo correspondente, tendo por base cálculos e valores prévios do resultado *input* - *output* do sistema. Inicialmente os modelos vão prever valores, os quais são conhecidos, de forma a aperfeiçoar o mesmo. Posteriormente, através de uma redução do erro entre o valor real e o valor obtido, o modelo chega cada vez mais perto do ideal.

Resumindo, o objetivo é prever um *output* tendo em conta os parâmetros de input, o mais fielmente possível (Schoukens & Ljung, 2019). Assim, $y(t|\theta)$ corresponde ao valor real do output e $\hat{y}(t|\theta)$ ao valor estimado para o output a partir do simulador com parâmetros dinâmicos θ .

Assim, a escolha de um algoritmo de identificação está dependente do comportamento e do design do veículo onde este é aplicado. Após a escolha do algoritmo devemos ser capazes de responder às seguintes questões:

- O modelo seleccionado consegue detetar pequenas ressonâncias ou movimentos de histerese prejudiciais ao sistema?
- O nível de conhecimento do sistema fará com que, após a aplicação do algoritmo, fiquemos com um conhecimento profundo da resposta do sistema a determinado *input* ou iremos ficar com um modelo *black box*?
- O modelo escolhido é uma representação fiel da resposta do sistema a determinada perturbação ou *input*?

Os métodos lineares são bastante práticos, pois são bastante eficientes computacionalmente. Além disso são também o ponto de partida para imensos métodos não lineares. Os modelos lineares são os métodos mais simples e triviais de aproximação a sistemas complexos e altamente não lineares. Desta forma, os modelos lineares podem ser classificados em dois tipos:

Os sistemas lineares dinâmicos e contínuos no tempo, normalmente são modelados pelas seguintes expressões (Yedla, s.d.):

$$\dot{x}(t) = A(t)x(t) + B(t)u(t) \quad (4.1)$$

$$y(t) = C(t)x(t) + D(t)u(t) \quad (4.2)$$

onde:

- $\dot{x} = \frac{dx}{dt}$;

- x é o estado do sistema;
- u representa o *input* dado ao sistema;
- y representa o *output* do sistema;
- A , B , C e D são matrizes que caracterizam e definem o sistema.

Os sistemas lineares dinâmicos e discretos são modelados pelas seguintes expressões:

$$x(t+1) = A(t)x(t) + B(t)u(t) \quad (4.3)$$

$$y(t) = C(t)x(t) + D(t)u(t) \quad (4.4)$$

Sendo que todos os termos têm o mesmo significado que no sistema linear dinâmico e contínuo no tempo.

Método de Estimativa

Como foi referido anteriormente, o melhor método é aquele que apresentar menos erro entre o valor real $[y(t|\theta)]$ e o valor que o método estimou $[\hat{y}(t|\theta)]$.

A maioria dos métodos de estimativa avalia um erro entre os dois valores. Conceptualmente, escreve-se:

$$\hat{\theta}_N = \underset{\theta}{\operatorname{argmin}} \sum_{t=1}^N \|y(t) - \hat{y}(t|\theta)\|^2 \quad (4.5)$$

Considerando que o *output* do sistema está um passo à frente da predição ($t-1$) e o erro é uma função gaussiana, o modelo estimado $\hat{\theta}_N$ é uma estimativa de máxima verossimilhança. Esta estimativa é um método para estimar parâmetros de um modelo estático. Assim, a partir de um conjunto de dados e dado um modelo estatístico, a estimativa por máxima verossimilhança estima valores para os diferentes parâmetros do modelo.

4.1.1 Método utilizado

O **método dos mínimos quadrados** é uma técnica que permite realizar a otimização matemática, tentando minimizar a soma dos quadrados das diferenças entre o valor estimado e os dados observados. Esta diferença é conhecida por resíduo.

Um requisito para o método dos mínimos quadrados é que o fator imprevisível (erro) seja distribuído aleatoriamente e essa distribuição seja normal. O Teorema Gauss-Markov garante que o estimador de mínimos quadrados é o estimador não-enviesado de mínima variância linear na variável resposta. Outro requisito é que o modelo é linear nos parâmetros, ou seja, as variáveis apresentam uma relação linear entre si. Caso contrário, deveria ser usado um modelo de regressão não-linear.

Exemplificando:

$$y = Ax \quad (4.6)$$

onde:

- $y \rightarrow$ atuação no sistema (*output*);
- $x \rightarrow$ variáveis a determinar (θ) (*input*);
- $A \rightarrow$ características do sistema (aceleração, velocidade e posição).

O objetivo consiste em identificar a variável x através da atuação no sistema y . A solução deste tipo de sistemas nem sempre é garantida e torna-se necessário encontrar uma solução que minimize o erro, neste caso o método dos mínimos quadrados: $\|y - Ax\|_2^2$.

Utiliza-se o princípio ortogonal (Moon & Stirling, 2000) de forma a encontrar a solução ($\hat{x}_{ls}$). Assim, obteve-se:

$$\hat{x}_{ls} = (A^T A)^{-1} A^T y \quad (4.7)$$

A matriz $(A^T A)^{-1} A^T$ é uma matriz esquerda inversa da matriz A . Duma forma geral, esta é a matriz utilizada em meios computacionais.

Este método é utilizado quando se obtém um conjunto de dados referente ao veículo e não para atuar neste em tempo real.

Como foi referido anteriormente, de forma a analisar um sistema linear a modelação do mesmo consiste em modelar a expressão matemática que representa o sistema de forma a obter uma fórmula semelhante à expressão 4.6.

Método Recursivo

No nosso veículo a atualização dos dados é constante, pois este irá encontrar-se em movimento enquanto o algoritmo de identificação é aplicado. O método offline

implica recolher todos os dados e, posteriormente, usar a equação 4.7 para estimar os parâmetros. O método recursivo (online) actualiza os parâmetros cada vez que chega mais informação, sem necessidade da aplicação da equação utilizada no método offline.

Os novos dados podem ser utilizados usando um método recursivo, isto é, mesmo que dados sejam incrementados não é necessário reiniciar o algoritmo nem esperar por um conjunto de dados, podendo este ser atualizado em tempo real (online).

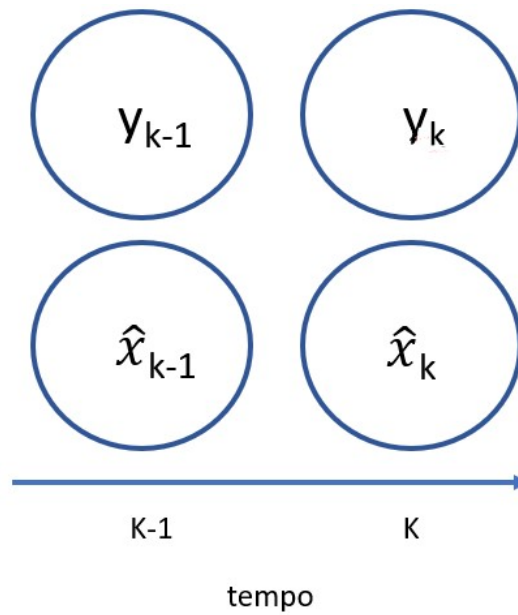


FIGURA 4.2: Método recursivo

O objetivo do método recursivo é obter o valor de $\hat{x}_{k+1}$ em função de $\hat{y}_k$ e $\hat{x}_k$.

O novo valor é calculado da seguinte forma:

$$\hat{x}_k = \hat{x}_{k-1} + K_k(y_k - H_k \hat{x}_{k-1}) \quad (4.8)$$

onde K_k representa um ganho na matriz e permite saber qual o erro associado à nova medição. Este erro é calculado tendo por base o método já enunciado: método de estimativa.

Exemplificando:

Considerando o sistema $Ax = b$, com:

- $x \in \mathbb{R}^m$;

- $b \in \mathbb{R}^n$;
- $A \in \mathbb{R}^{n \cdot m}$.

pretende-se obter o valor de $\hat{x}$ que minimiza $\hat{x} = \operatorname{argmin}_x ||b - Ax||^2 = \operatorname{argmin}_x \sum_{k=1}^n (y_k - a_k x)^2$ onde a_k é linha número k da matriz A e y_k o elemento k de b.

A solução deste problema é dada por:

$$\hat{x} = (A^T A)^{-1} A^T b = P_k A^T b \quad (4.9)$$

onde se considera $(A^T A)^{-1} = P_k$.

Considerando agora uma observação adicional (a_{k+1}, y_{k+1}) , calcular o novo valor de $\hat{x}_{k+1}$ reutilizando os cálculos anteriores.

Ponderando:

$$\bar{A} = \begin{bmatrix} A \\ a_{k+1} \end{bmatrix}$$

$$\bar{b} = \begin{bmatrix} b \\ y_{k+1} \end{bmatrix}$$

obtém-se:

$$\hat{x}_{k+1} = (\bar{A}^T \bar{A})^{-1} \bar{A}^T \bar{b} \quad (4.10)$$

Computacionalmente, a grande dificuldade da expressão anterior passa por obter a matriz inversa $\bar{A}^T \bar{A}$.

De forma a obter a versão recursiva, notar que:

$$\begin{aligned} P_{k+1} &= (\bar{A}^T \bar{A})^{-1} = (A^T A + a_{k+1}^T a_{k+1})^{-1} = \\ &= (A^T A)^{-1} - \frac{(A^T A)^{-1} a_{k+1}^T a_{k+1} (A^T A)^{-1}}{1 + a_{k+1} (A^T A)^{-1} a_{k+1}^T} = \\ &= P_k - \frac{P_k a_{k+1}^T a_{k+1} P_k}{1 + a_{k+1} P_k a_{k+1}^T} \end{aligned} \quad (4.11)$$

Concluindo:

$$P_{k+1} = (I - K_{k+1} a_{k+1}) P_K \quad (4.12)$$

onde:

$$K_{k+1} = \frac{P_K a_{k+1}^T}{1 + a_{k+1} P_K a_{k+1}^T} \quad (4.13)$$

Utilizando a expressão 4.10 a nossa nova estimativa é dada por:

$$\begin{aligned} \hat{x}_{k+1} &= P_{k+1} (A^T b + a_{k+1}^T y_{k+1}) = \\ &= (I - K_{k+1} a_{k+1}) P_K (A^T b + a_{k+1}^T y_{k+1}) = \\ &= P_K A^T b - K_{k+1} a_{k+1} P_K A^T b + (I - K_{k+1} a_{k+1}) P_K a_{k+1}^T y_{k+1} \\ &= \hat{x}_k - K_{k+1} a_{k+1} \hat{x}_k + (I - K_{k+1} a_{k+1}) P_K a_{k+1}^T y_{k+1} \end{aligned} \quad (4.14)$$

Note-se ainda que:

$$\begin{aligned} (I - K_{k+1} a_{k+1}) P_K a_{k+1}^T &= \\ &= P_K a_{k+1}^T - \frac{P_K a_{k+1}^T a_{k+1} P_K a_{k+1}^T}{1 + a_{k+1} P_K a_{k+1}^T} = \\ &= \frac{P_K a_{k+1}^T + P_K a_{k+1}^T a_{k+1} P_K a_{k+1}^T - P_K a_{k+1}^T a_{k+1} P_K a_{k+1}^T}{1 + a_{k+1} P_K a_{k+1}^T} = \\ &= k_{k+1} \end{aligned} \quad (4.15)$$

Logo:

$$\hat{x}_{k+1} = \hat{x}_k - K_{k+1} a_{k+1} \hat{x}_k + K_{k+1} y_{k+1} \quad (4.16)$$

Concluindo obtemos 3 equações, sendo estas:

$$K_{k+1} = \frac{P_K a_{k+1}^T}{1 + a_{k+1} P_K a_{k+1}^T} \quad (4.17)$$

$$\hat{x}_{k+1} = \hat{x}_k + K_{k+1} (y_{k+1} - a_{k+1} \hat{x}_k) \quad (4.18)$$

onde $a_{k+1} \hat{x}_k = \hat{y}_{k+1}$

$$P_{k+1} = (I - K_{k+1} a_{k+1}) P_K \quad (4.19)$$

Note-se que se pode introduzir um fator de esquecimento (λ) de dados antigos e passamos a ter:

$$K_{k+1} = \frac{P_K a_{k+1}^T}{\lambda + a_{k+1}^T P_K a_{k+1}} \quad (4.20)$$

$$P_{k+1} = \lambda^{-1} \cdot (I - K_{k+1} a_{k+1}^T) P_k \quad (4.21)$$

A expressão 4.17 funciona como um ganho na equação 4.18. Isto é, quanto mais for o valor de a_{k+1} , maior será a compensação que se irá fazer na próxima iteração. Assim, quanto maior o valor do erro de estimativa (a_{k+1}) pior terá sido a estimativa do valor do parâmetro. K_{k+1} indica o peso que se dá à medida y_k . Isto é, se houver muita incerteza na estimativa $\hat{x}_k$ o valor de K_{k+1} é alto, caso contrário é baixo, o que quer dizer que uma nova medida não vai influenciar muito a nova estimativa de x_k .

O método recursivo tem um parâmetro λ que corresponde a um factor de esquecimento, que determina o quanto a influência de dados antigos é perdida com o tempo para a estimativa dos parâmetros. Se $\lambda = 1$ não há esquecimento, para valores inferiores começa a haver mais esquecimento e a estimativa passa a depender mais dos valores mais recentes. Tipicamente usam-se valores próximos de 1 (por exemplo 0.99).

No algoritmo criado foi utilizado o método dos mínimos quadrados e não a sua forma recursiva.

4.2 Aplicação a veículos submarinos

Todos os cálculos e passos que foram explicados na secção 4.1 podem ser aplicados a veículos submarinos e a BUVs. Um dos problemas da identificação de parâmetros através de regressões é que os valores estimados possam não ser fisicamente possíveis. Os valores estimados são fisicamente fiáveis e possíveis quando podem ser explicados no mundo real e não só através de dados numéricos. Um exemplo disso mesmo é o valor que a massa pode tomar: tem de ser sempre positivo. (Duarte, 2014)

O sistema que é estudado nesta dissertação baseia-se na equação 3.3 de onde sabemos os seguintes parâmetros:

- $\dot{\nu} \longrightarrow$ Aceleração resultante de:

$$\dot{\nu} = M^{-1} \cdot (\tau + g(\eta) - D \cdot \nu) \quad (4.22)$$

- $\nu \longrightarrow$ Matriz composta pelas velocidades lineares e angulares:

$$\nu = \begin{bmatrix} u & v & w & p & q & r \end{bmatrix}^T$$

onde: u , v e w representam as velocidades lineares dos eixos das abcissas, ordenadas e cotas, respectivamente.

p , q e r representam as velocidades angulares dos eixos das abcissas, ordenadas e cotas, respectivamente.

- Transformação de coordenadas da matriz dos ângulos de Euler ($g(\eta)$), isto é:

$$\begin{bmatrix} \sin(\theta) & \cos(\theta) \cdot \sin(\phi) & \cos(\theta) \cdot \cos(\phi) & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T$$

A equação 3.3, que assume a forma matricial é modificada para a forma polinomial obtendo-se:

$$M_{11} \cdot \dot{\nu}_1 + D_{11} \cdot \nu_1 + g_1 = \tau_1 \quad (4.23)$$

$$M_{22} \cdot \dot{\nu}_2 + D_{22} \cdot \nu_2 + g_2 = \tau_2 \quad (4.24)$$

$$M_{33} \cdot \dot{\nu}_3 + D_{33} \cdot \nu_3 + g_3 = \tau_3 \quad (4.25)$$

$$M_{44} \cdot \dot{\nu}_4 + D_{44} \cdot \nu_4 + g_4 = \tau_4 \quad (4.26)$$

$$M_{55} \cdot \dot{\nu}_5 + D_{55} \cdot \nu_5 + g_5 = \tau_5 \quad (4.27)$$

$$M_{66} \cdot \dot{\nu}_6 + D_{66} \cdot \nu_6 + g_6 = \tau_6 \quad (4.28)$$

Utilizando as expressões 4.23 - 4.28 podemos criar 2 novas matrizes: uma com os parâmetros conhecidos (A) e outra com os parâmetros dinâmicos que o algoritmo desenvolvido deve retirar do veículo (θ). Multiplicando estas duas matrizes obtêm-se o vetor τ , cujos parâmetros também são conhecidos.

Assim, obtemos as seguintes matrizes:

$$A = \begin{bmatrix} \dot{\nu}_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \nu_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & s\theta \\ 0 & \dot{\nu}_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \nu_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & c\theta s\phi \\ 0 & 0 & \dot{\nu}_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \nu_3 & 0 & 0 & 0 & c\theta c\phi \\ 0 & 0 & 0 & \dot{\nu}_4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \nu_4 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dot{\nu}_5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \nu_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dot{\nu}_6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \nu_6 & 0 \end{bmatrix}$$

onde c é o indicativo de *cos* e s é o indicativo de *sin*.

$$\theta = \begin{bmatrix} M_{11} \\ M_{22} \\ M_{33} \\ M_{44} \\ M_{55} \\ M_{66} \\ D_{11} \\ D_{22} \\ D_{33} \\ D_{44} \\ D_{55} \\ D_{66} \\ F \end{bmatrix}$$

$$\tau = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \\ \tau_4 \\ \tau_5 \\ \tau_6 \end{bmatrix}$$

De referir que o parâmetro F resulta de W - B apresentado na matriz $g(\eta)$

No *matlab* construiu-se uma matriz incremental, isto é, a cada iteração do simulador/veículo são acrescentadas seis novas linhas à matriz A e à matriz τ . A cada amostra temporal retirada as novas linhas são acrescentadas incrementando as matrizes. De forma a obter a matriz θ realiza-se um simples cálculo matemático: A/τ

O objetivo principal será fazer com que o valor obtido dos parâmetros corresponda ao valor real que consta do simulador. Quanto menor for a diferença entre os valores menor será o erro existente no algoritmo criado.

O método utilizado para a detecção de erro é o método explicado no subcapítulo 4.1. Com as matrizes representadas anteriormente obtemos um modelo do tipo $\tau = A\theta$.

Resumidamente, a ideia principal é reescrever a equação 3.3 de forma a obter algo semelhante à equação 4.6 onde τ e A dependem unicamente das medidas num dado instante e θ é o vector que reúne todos os parâmetros a estimar. As matrizes τ e A crescem com os dados obtidos ao longo do tempo, dando origem às matrizes τ e V , que têm tantas linhas quanto a duração em que o algoritmo esteve a correr vezes o número de linhas associadas aos parâmetros a estimar (tempo * número de linhas de A).

Se o modelo for linear é possível obter o erro dos valores dos parâmetros através do método dos mínimos quadrados. É este o caso para os parâmetros em questão. Como demonstrado nas equações 4.23-4.28, para o caso mais simples, isto é, de atrito linear.

A complexidade da identificação vai aumentando e tornando o movimento do veículo mais próximo da realidade.

No entanto, terão que ser feitas algumas considerações e têm que se ter algumas preocupações para se obter a melhor aproximação dos parâmetros. Por um lado, se a actuação não for suficientemente rica para excitar toda a dinâmica do veículo é natural que os parâmetros correspondentes às dinâmicas não excitadas não consigam ser identificados. Por exemplo, colocando o veículo a andar unicamente em frente é natural que não se consiga estimar momentos de inércia nem atritos segundo Y ou Z .

Por outro lado, se dois parâmetros surgem sempre associados um ao outro no modelo matemático (por exemplo P - B), é natural que não se consiga identificar individualmente. No exemplo dado, só é possível obter a força resultante entre a força de impulsão e a força da gravidade.

Por fim, nos pontos anteriores assume-se que as forças de propulsão presentes no vector *tau* são conhecidas. Ora se isso é considerado em *Szymak, 2017*, devido ao aparato experimental usado, isso já não é verdade para o *BUV* que se pretende modelar.

Desta forma, podem-se identificar os parâmetros relativos à propulsão, mas há sempre o problema do factor de escala. Isto é, se o vector de atuação (τ) aumentar para o dobro pode-se sempre obter os mesmos valores dos sensores se as matrizes de Inércia (M), de atrito (D) e da matriz associada aos ângulos de Euler (g) também aumentarem para o dobro. Uma maneira de contornar esse problema do factor de escala é assumir que se conhece pelo menos um parâmetro dessas matrizes. Um “bom candidato” é o parâmetro M_{11} , que corresponde aproximadamente à massa do veículo, que pode ser obtida facilmente com uma balança. A diferença entre M_{11} e essa massa (massa acrescentada), costuma ser baixa segundo o eixo das abcissas, para veículos de tipo cilíndrico.

4.3 Resultados experimentais

O algoritmo¹⁵ criado foi utilizado em diversas experiências de forma a aperfeiçoar o mesmo e garantir a operacionalidade do veículo em situações cada vez mais diversas e próximas da realidade. As experiências estão apresentadas na tabela 4.1 e em todas foi usado o método dos mínimos quadrados como método de estimativa do erro. Em todos os modelos foi sendo introduzido ruído (*Signal Noise Ratio - SNR*) e este foi incrementado e avaliado em diferentes níveis, desde baixo a alto.

Note-se que o parâmetro M_{44} é o responsável pela rotação em torno do eixo das abcissas e como o veículo não possui balanço (roll) este valor é adquirido como 0, uma vez que os valores experimentais são obtidos através dos vetores de posição, velocidade, aceleração e atuação existirá sempre um erro residual nas experiências realizadas. Isto porque o valor obtido é 0, sendo diferente do valor obtido experimentalmente. Assim como o momento associado à rotação também é assumido 0 e desprezado.

TABELA 4.1: Experiências para validação do algoritmo de identificação

Modelo	Descrição
Básico	Efeito de atrito linear
Quadrático	Efeito de atrito linear e quadrático
Posição das barbatanas	Efeito de atrito linear, quadrático e dependente da posição das barbatanas
Diferença posicional entre CG e CB	Efeito de atrito linear, quadrático, dependente da posição das barbatanas e da diferença entre o centro de gravidade e o centro de impulsão

¹⁵<https://github.com/PedroMel0/BUV-Simulator/tree/main/Identification>

4.3.1 Modelo básico de atrito linear

Neste modelo foram aplicados diferentes níveis de ruído e foi avaliado quantas iterações do ciclo seriam necessárias para que a diferença entre o valor estimado e o valor real fosse insignificante, isto é, o erro.

Os parâmetros estudados para o modelo básico, isto é, com atrito linear, são apresentados na tabela 4.2.

Iniciou-se a análise do modelo básico com uma simulação durante 5 minutos (300 segundos).

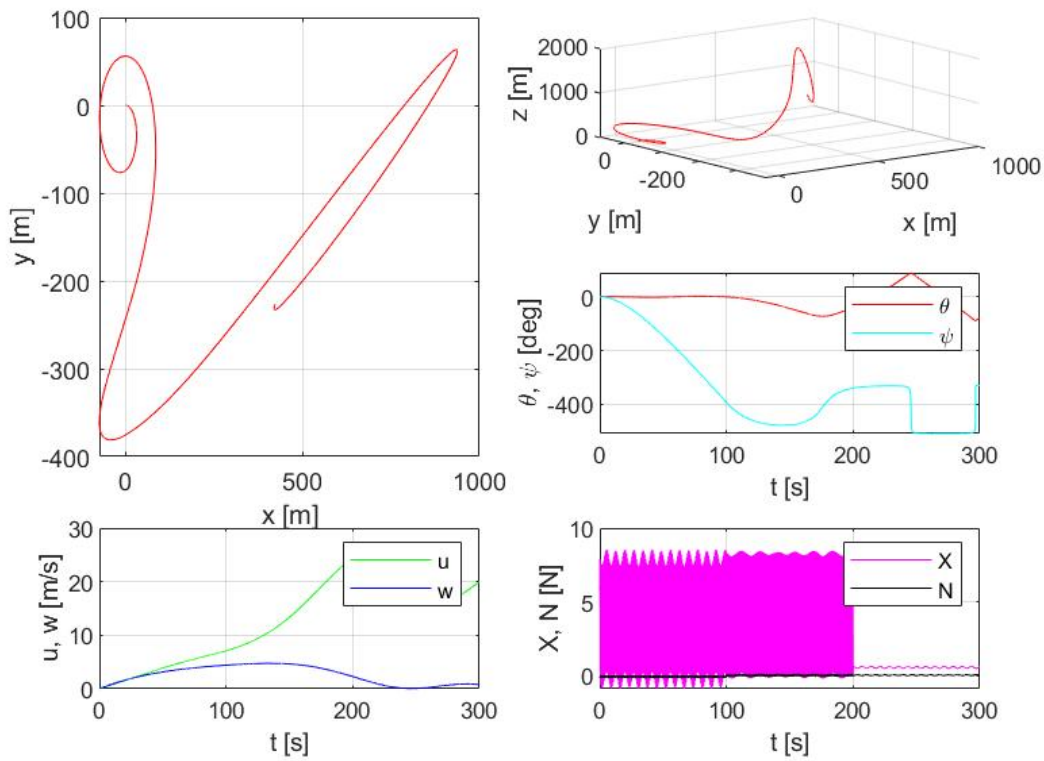


FIGURA 4.3: Simulação utilizando o modelo básico

Iniciou-se a análise do algoritmo para o modelo básico sem ruído, correndo este em 180 amostras, isto é, 10 segundos.

Nesta experiência obtiveram-se os seguintes valores:

O valor experimental apresentado resulta da última iteração do algoritmo de identificação, sendo esta a iteração que apresenta uma menor diferença entre os valores reais e os obtidos.

4.3. Resultados experimentais

TABELA 4.2: Comparação entre os valores reais dos parâmetros dinâmicos e os valores obtidos experimentalmente (Modelo linear, sem ruído)

Parâmetro	Valor Real	Valor Experimental
M_{11}	49.5	49.5
M_{22}	104	104
M_{33}	104	104
M_{55}	18.92	18.92
M_{66}	18.92	18.92
D_{11}	0.0894	0.0894
D_{22}	1.9	1.9
D_{33}	1.9	1.9
D_{55}	0.8	0.8
D_{66}	0.7	0.7
F	10	10

O gráfico apresentado na figura 4.4 mostra que o erro tende para 0 muito rapidamente, o que é um indicativo de que o algoritmo identifica facilmente os parâmetros.

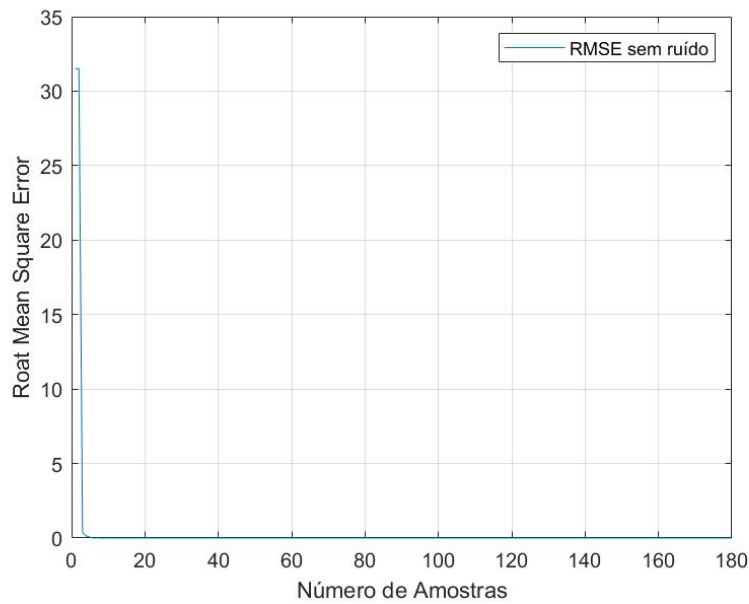


FIGURA 4.4: RMSE do modelo básico sem ruído

Segundo o gráfico apresentado em 4.4 o erro vai diminuindo à medida que o número de amostras aumenta, o que é expectável.

Conclui-se assim que foi apenas necessário um ciclo (1/18 segundos) para que os valores dinâmicos fossem obtidos.

Iremos agora repetir todo o processo anterior com a mesma simulação, mas utilizando agora um SNR baixo. O ruído será colocado no vetor de velocidade, isto é, em Nu , sendo o seu valor um número qualquer (random) com um desvio padrão de 0.001. Assim, aos valores do vetor de velocidade será adicionado um valor *random* diminuindo a eficácia do algoritmo e tornando necessário a utilização de mais ciclos para obter os parâmetros dinâmicos. De notar que o parâmetro de menor valor no vetor de velocidade possui o valor de $9.0016e-05$ e tendo um desvio de 0.001 altera significativamente o seu valor numérico.

TABELA 4.3: Comparação entre os valores reais dos parâmetros dinâmicos e os valores obtidos experimentalmente (Modelo linear, SNR baixo)

Parâmetro	Valor Real	Valor Experimental
M_{11}	49.5	49.5001
M_{22}	104	104.2509
M_{33}	104	103.9062
M_{55}	18.92	18.9787
M_{66}	18.92	18.9054
D_{11}	0.0894	0.0894
D_{22}	1.9	1.8132
D_{33}	1.9	1.8978
D_{55}	0.8	0.2942
D_{66}	0.7	0.7004
F	10	9.9909

Todos os valores estão numericamente semelhantes à exceção dos quintos elementos da Matriz de Inércia e da Matriz de atrito. Como foi referido anteriormente, ao adicionar um número com um desvio padrão de 0.001 alteraria significativamente o valor numérico do elemento de menor valor, sendo este o quinto elemento. Assim, como também visto no gráfico da figura 4.5 o erro só se aproxima de 0 ao fim de 60 amostras, isto é, aproximadamente 3,33 segundos.

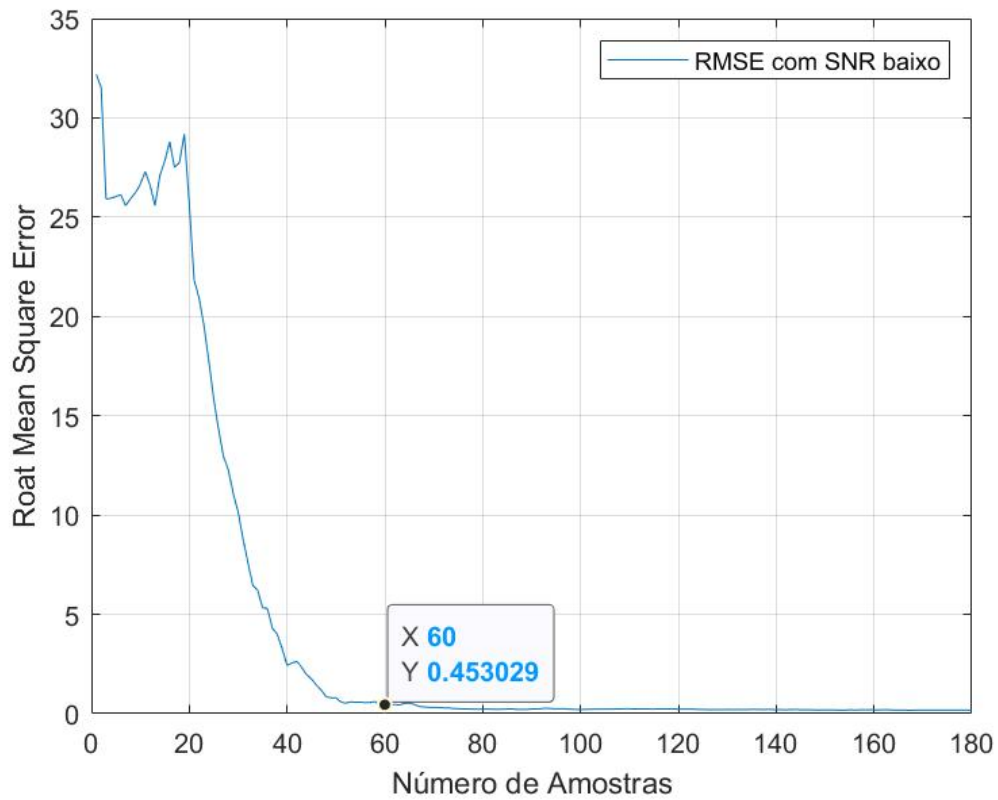


FIGURA 4.5: RMSE do modelo básico com SNR baixo

Considerando agora um SNR médio, repetiu-se o algoritmo. Foi agora considerado uma alteração ao vetor de aceleração (dNu), adicionando um valor random com um desvio padrão de 0,0001. Neste vetor existem 3 elementos na ordem de 10^{-4} , sendo que a soma deste valor random altera consideravelmente os valores de aceleração. Com as condições anteriores obtiveram-se os seguintes resultados:

TABELA 4.4: Comparação entre os valores reais dos parâmetros dinâmicos e os valores obtidos experimentalmente (Modelo linear, SNR médio)

Parâmetro	Valor Real	Valor Experimental
M_{11}	49.5	49.5023
M_{22}	104	102.9247
M_{33}	104	102.9158
M_{55}	18.92	18.2546
M_{66}	18.92	18.8764
D_{11}	0.0894	0.0882
D_{22}	1.9	1.9671
D_{33}	1.9	1.8800
D_{55}	0.8	0.8350
D_{66}	0.7	0.6993
F	10	9.8959

De forma geral todos os valores estão próximos numericamente. Aumentou-se o tempo de simulação do algoritmo para 40 segundos (720 amostras) e como observado no gráfico da figura 4.6, apenas a partir de 463 amostras (aprox. 26 segundos) o erro é menor que 1.

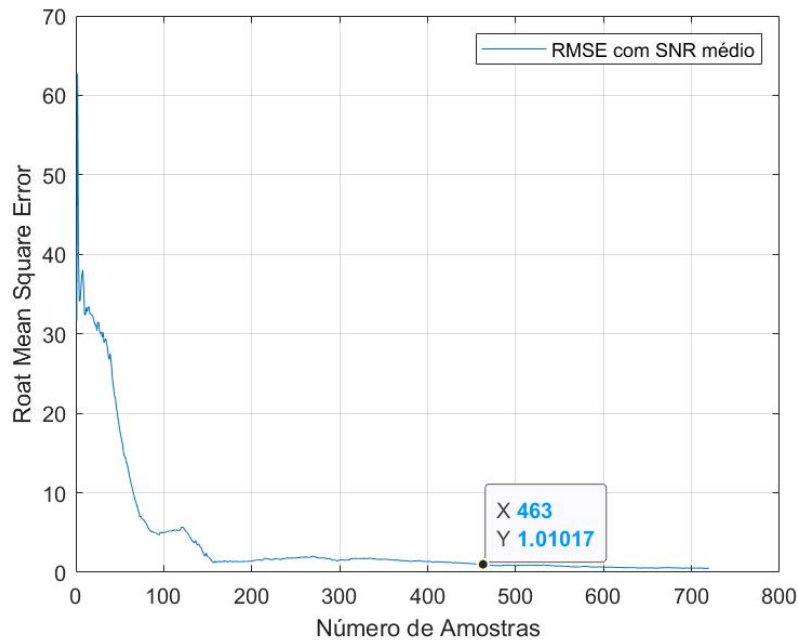


FIGURA 4.6: RMSE do modelo básico com SNR médio

Por fim, considerou-se um SNR alto, adicionando ruído tanto no vetor de aceleração, como no vetor de velocidade. Para esta experiência considerou-se a junção dos dois ruídos anteriores, isto é, a soma de um número random com desvio padrão de 0.001 no vetor de velocidade e a soma de um número random com desvio padrão de 0,0001 no vetor de aceleração. Os resultados foram os seguintes:

TABELA 4.5: Comparação entre os valores reais dos parâmetros dinâmicos e os valores obtidos experimentalmente (Modelo linear, SNR alto)

Parâmetro	Valor Real	Valor Experimental
M_{11}	49.5	49.5073
M_{22}	104	102.6713
M_{33}	104	101.7995
M_{55}	18.92	18.5799
M_{66}	18.92	18.9029
D_{11}	0.0894	0.0872
D_{22}	1.9	1.9878
D_{33}	1.9	1.8599
D_{55}	0.8	0.6199
D_{66}	0.7	0.7013
F	10	9.7883

Mais uma vez, todos os valores obtidos ficaram numericamente semelhantes aos valores reais, mas desta vez, como observado no gráfico da figura 4.7 apenas a partir da amostra 688 (aprox. 38 segundos) o erro foi inferior a 1. Esta situação é uma situação extrema em que os valores sofrem enorme ruído.

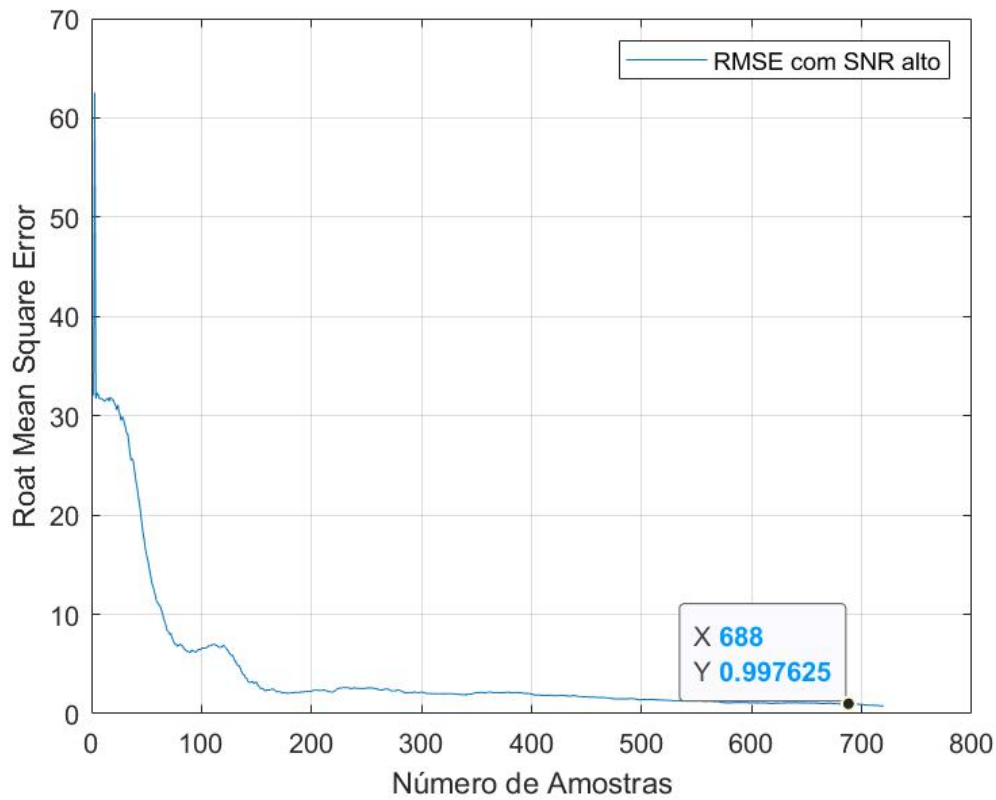


FIGURA 4.7: RMSE do modelo básico com SNR alto

Como seria de esperar o algoritmo vai tendo cada vez mais dificuldade em obter os parâmetros à medida que o SNR aumenta. Este é o modelo mais simples que apenas considera o atrito linear. Posteriormente, serão analisados casos mais complexos.

Concluindo, o gráfico presente na figura 4.8 compila toda a informação das experiências realizadas para o modelo básico.

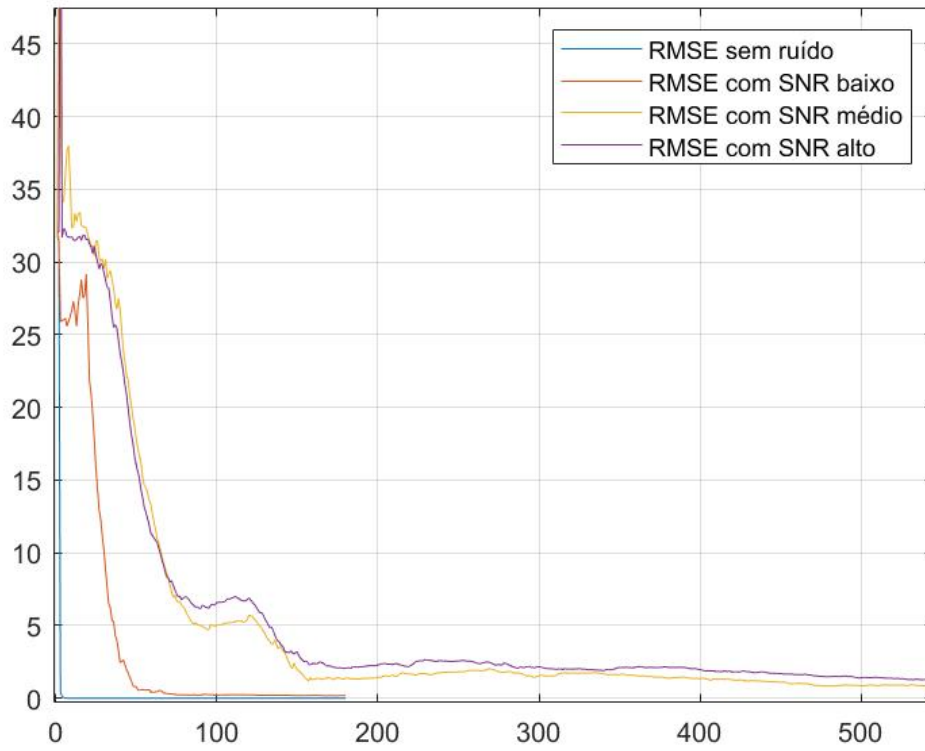


FIGURA 4.8: RMSE do modelo básico para diferentes níveis de SNR

4.3.2 Modelo de atrito linear e atrito quadrático

Assume-se agora o **modelo com atrito quadrático**, isto é, a matriz de atrito (D) contém os mesmos elementos mas estes são constituídos por duas parcelas. Por exemplo, a parâmetro D_{11} passa a ser constituído pela parcela linear ($X_u \cdot Nu1$) e pela parcela quadrática ($X_{uu} \cdot |Nu1| \cdot Nu1$).

Admite-se:

$$X_u = 0.0894;$$

$$X_{|u|u} = 5.72;$$

$$Y_v = 1.9;$$

$$Y_{|v|v} = 18.58;$$

$$Z_w = 1.9;$$

$$Z_{|w|w} = 18.58;$$

$$K_p = 0;$$

$$K_{|p|p} = 0;$$

$$M_q = 0.8;$$

$$M_{|q|q} = 11;$$

$$N_r = 0.7;$$

$$N_{|r|r} = 10;$$

Ainda que estes valores não correspondam aos coeficientes do veículo que está a ser estudado foram retirados experimentalmente (Szymak, 2017) de um veículo com características geométricas semelhantes de forma a facilitar a identificação destes parâmetros.

Simulou-se novamente durante 5 minutos e obteve-se o movimento e valores da figura 4.9

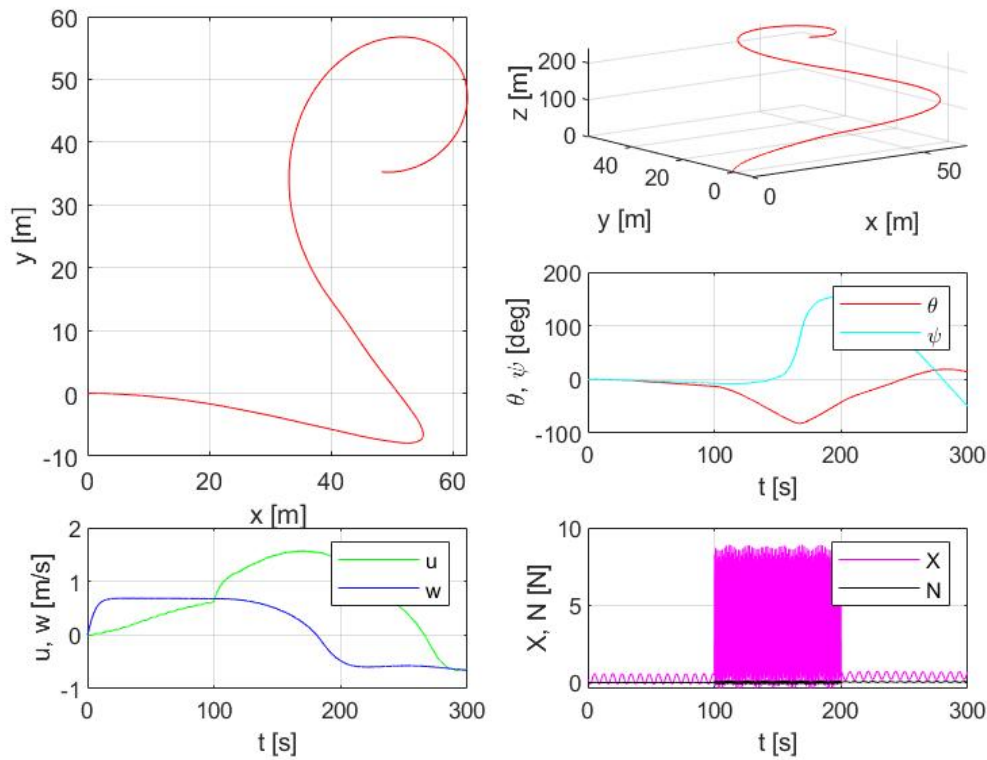


FIGURA 4.9: Simulação utilizando o modelo de atrito quadrático

O algoritmo foi adaptado de forma a retirar os parâmetros da matriz de inércia (M), da matriz de atrito (D) e a força resultante entre a força de impulsão e a força da gravidade (F).

4.3. Resultados experimentais

TABELA 4.6: Comparação entre os valores reais dos parâmetros dinâmicos e os valores obtidos experimentalmente (Modelo quadrático, sem ruído)

Parâmetro	Valor Real	Valor Experimental
M_{11}	49.5	49.50
M_{22}	104	104.0
M_{33}	104	104.0
M_{55}	18.92	18.92
M_{66}	18.92	18.92
X_u	0.0894	0.0894
Y_v	1.9	1.9
Z_w	1.9	1.9
M_q	0.8	0.8
N_r	0.7	0.7
X_{uu}	5.72	5.72
Y_{vv}	18.58	18.58
Z_{ww}	18.58	18.58
M_{qq}	11	11
N_{rr}	10	10
F	10	10

Como observado na tabela 4.6, os valores são exatamente iguais, sendo que o algoritmo observou 180 amostras (10 segundos). Assim, o gráfico apresentado na figura 4.10 tende para 0 ao fim de 1 ciclo (5 iterações), como seria de esperar, uma vez que a experiência foi realizada sem ruído.

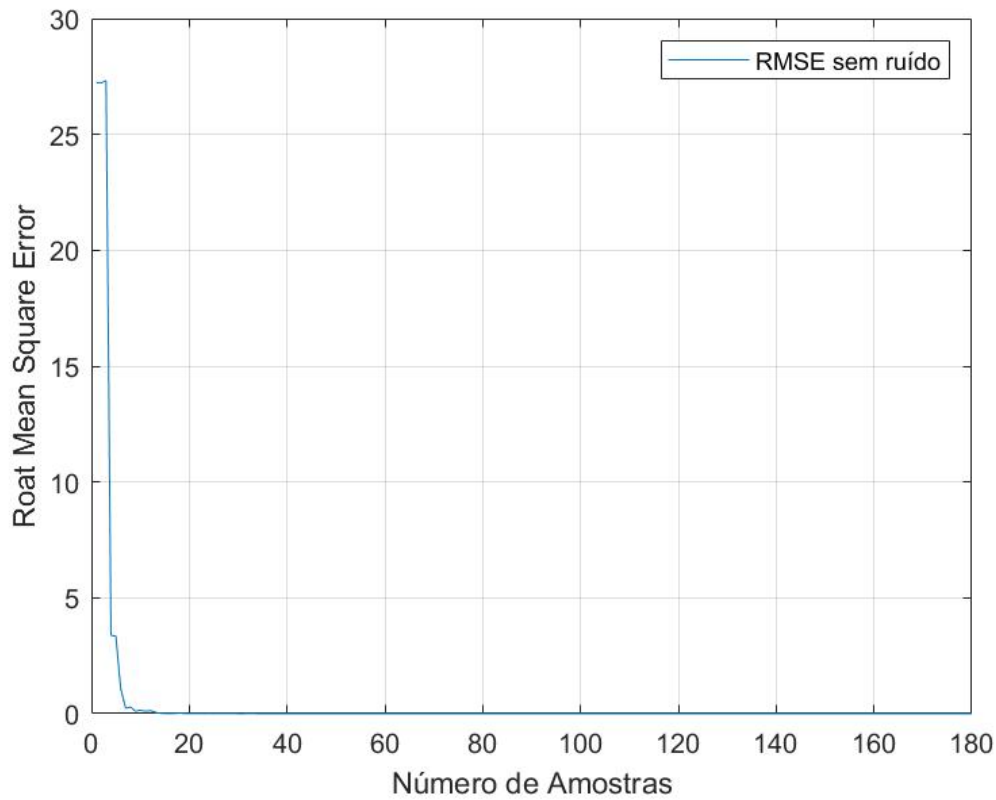


FIGURA 4.10: RMSE do modelo de atrito quadrático sem ruído

Como realizado no modelo anterior, também neste modelo a experiência se irá repetir com diferentes valores de SNR. Iniciou-se a experiência com um SNR baixo e como tal foi considerado um desvio padrão no vetor de aceleração, este que afeta diretamente apenas o conjunto dos parâmetros da matriz de inércia. Como o elemento deste vetor que apresenta menor valor é na ordem de 10^{-8} , foi escolhido um número random com desvio padrão na ordem de 10^{-9} . Nesta experiência o algoritmo correu durante 15 segundos e na última iteração foram obtidos os valores da tabela 4.7.

TABELA 4.7: Comparação entre os valores reais dos parâmetros dinâmicos e os valores obtidos experimentalmente (Modelo quadrático, SNR baixo)

Parâmetro	Valor Real	Valor Experimental
M_{11}	49.5	49.50
M_{22}	104	104.0002
M_{33}	104	104.0
M_{55}	18.92	18.92
M_{66}	18.92	18.92
X_u	0.0894	0.0894
Y_v	1.9	1.8999
Z_w	1.9	1.9
M_q	0.8	0.8
N_r	0.7	0.7
X_{uu}	5.72	5.72
Y_{vv}	18.58	18.9805
Z_{ww}	18.58	18.58
M_{qq}	11	10.9994
N_{rr}	10	10.009
F	10	10

Note-se que os valores numéricos são bastante semelhantes e que o algoritmo tem alguma dificuldade em obter os valores de atrito quadrático. Algumas diferenças numéricas são mais notórias nestes parâmetros e estas podem ser explicadas pelo movimento simulado do veículo, uma vez que a componente em Y (Y_{vv}) é a que possui um valor mais baixo (na ordem de 10^{-8}), podendo ser facilmente afetada por ruído.

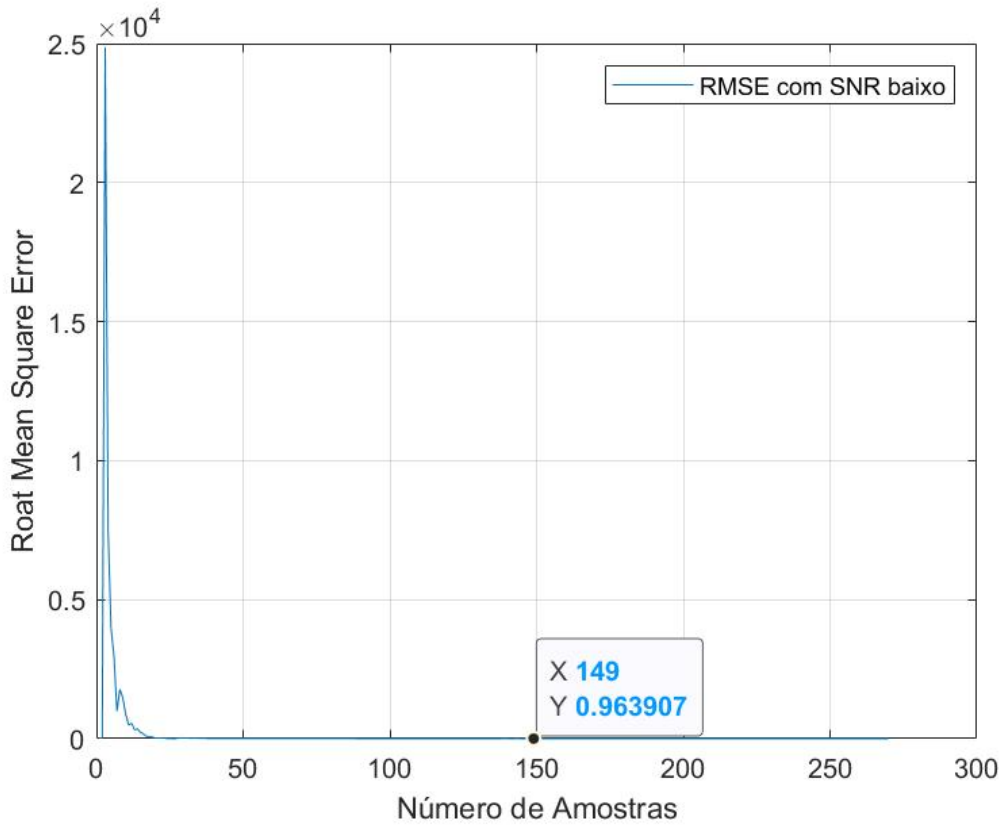


FIGURA 4.11: RMSE do modelo de atrito quadrático com SNR baixo

Como observado no gráfico da figura 4.11, o *RMSE* é menor que 1 a partir de 149 amostras (aprox. 8 segundos) e o erro converge rapidamente para 0.

Realizou-se a mesma experiência, mas agora com um valor médio de SNR, sendo este aplicado no vetor de velocidade. Este vetor influencia 2 conjuntos de parâmetros, sendo estes o atrito linear e o atrito quadrático. Desta forma, foi selecionado um número random com desvio padrão na ordem de 10^{-6} . O algoritmo correu durante 20 segundos, o que corresponde a 360 amostras. A última iteração obteve os seguintes valores:

4.3. Resultados experimentais

TABELA 4.8: Comparação entre os valores reais dos parâmetros dinâmicos e os valores obtidos experimentalmente (Modelo quadrático, SNR médio)

Parâmetro	Valor Real	Valor Experimental
M_{11}	49.5	49.50
M_{22}	104	104.0013
M_{33}	104	103.9996
M_{55}	18.92	18.9199
M_{66}	18.92	18.9196
X_u	0.0894	0.0894
Y_v	1.9	1.8973
Z_w	1.9	1.9
M_q	0.8	0.8
N_r	0.7	0.7003
X_{uu}	5.72	5.7199
Y_{vv}	18.58	25.6588
Z_{ww}	18.58	18.5799
M_{qq}	11	10.9931
N_{rr}	10	9.6821
F	10	10

Mais uma vez, o algoritmo demonstrou as dificuldades evidenciadas com o SNR baixo, sendo que apenas o valor Y_{vv} apresenta uma diferença significativa. Ainda assim, obteve-se o gráfico da figura 4.12 onde o SNR é inferior a 1 a partir de 199 amostras (aprox. 11 segundos)

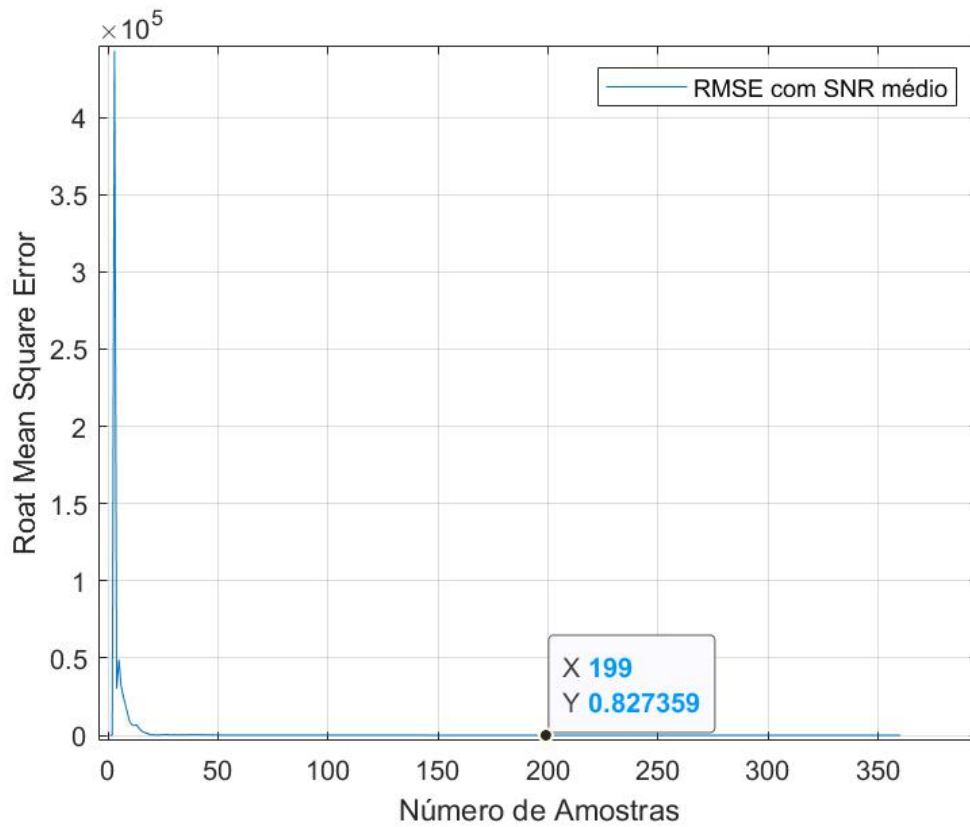


FIGURA 4.12: RMSE do modelo de atrito quadrático com SNR médio

Voltou-se a testar o algoritmo, mas desta vez com um SNR alto e tal como no modelo anterior voltámos a juntar os SNR's anteriores e foi ainda adicionado um valor random de desvio padrão na ordem de 10^{-8} no vetor que "afeta" matematicamente o vetor de atrito quadrático (QNu). Desta forma foi aplicado um valor random de desvio padrão na ordem de 10^{-6} no vetor de velocidade e outro número random de desvio padrão na ordem de 10^{-9} no vetor de aceleração. A experiência correu durante 20 segundos e obtiveram-se os seguintes valores:

4.3. Resultados experimentais

TABELA 4.9: Comparação entre os valores reais dos parâmetros dinâmicos e os valores obtidos experimentalmente (Modelo quadrático, SNR alto)

Parâmetro	Valor Real	Valor Experimental
M_{11}	49.5	49.50
M_{22}	104	104.0018
M_{33}	104	104
M_{55}	18.92	18.92
M_{66}	18.92	18.9206
X_u	0.0894	0.0894
Y_v	1.9	1.8996
Z_w	1.9	1.9
M_q	0.8	0.8
N_r	0.7	0.6998
X_{uu}	5.72	5.72
Y_{vv}	18.58	17.3380
Z_{ww}	18.58	18.58
M_{qq}	11	11.1088
N_{rr}	10	10.1446
F	10	10

Mesmo com um SNR elevado os valores não se diferenciaram muito e a partir da amostra 313 (aprox. 17 segundos) o erro foi inferior a 1, como observado no gráfico da figura 4.13.

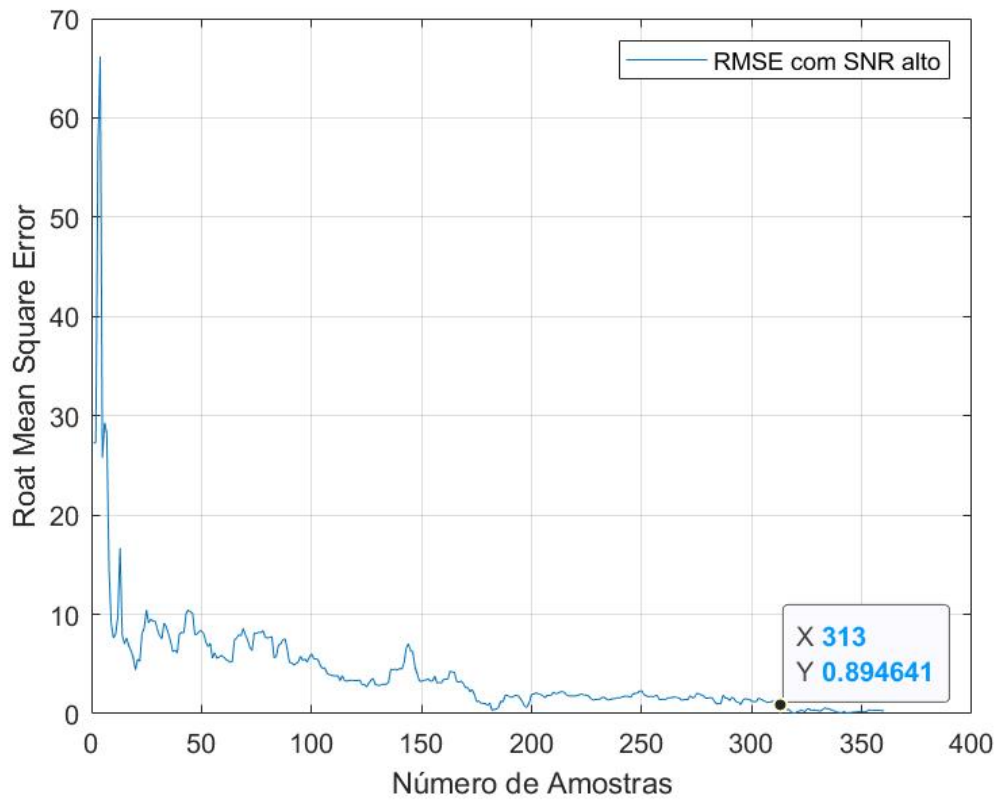


FIGURA 4.13: RMSE do modelo de atrito quadrático com SNR alto

Concluindo, os gráficos de RMSE foram juntos no gráfico presente na figura 4.14

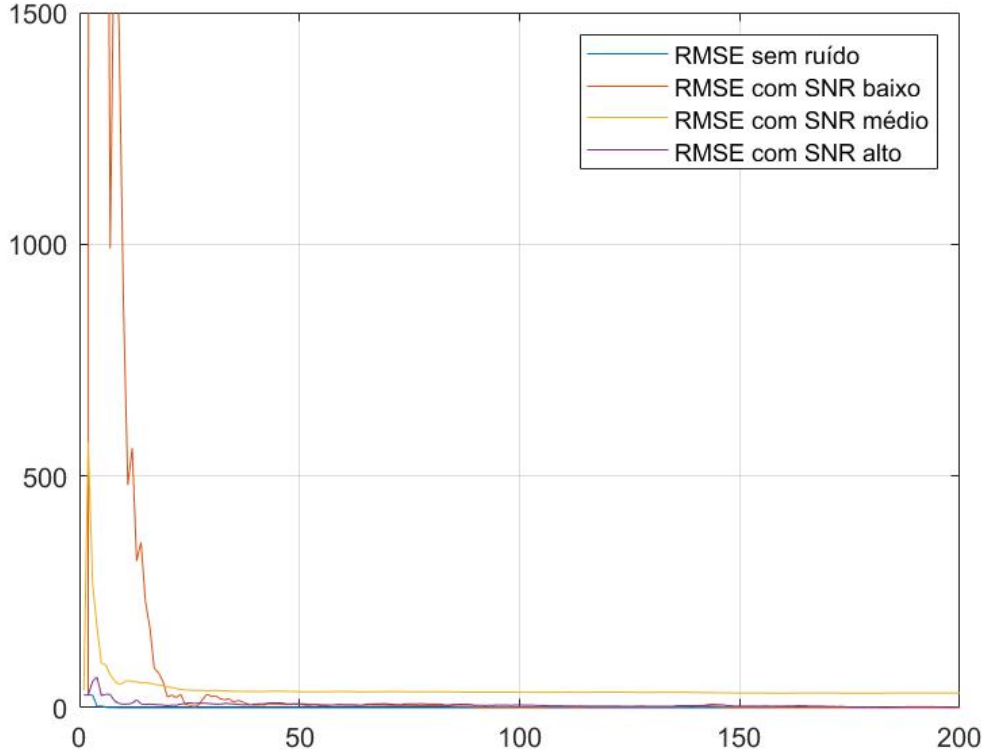


FIGURA 4.14: RMSE do modelo quadrático para diferentes níveis de SNR

Note-se que a linha correspondente à experiência foi a que demorou mais tempo a estabilizar por afetar apenas o conjunto de parâmetros da matriz de inércia, sendo estes os de maior ordem (Ex: $M_{22} = 104$) e ocorrendo uma grande discrepância de valores provoca um erro enorme. Ainda assim, após a análise cuidadosa de cada experiência salienta-se o facto do algoritmo demorar cada vez mais a estabilizar, isto é, $\text{RMSE} < 1$.

4.3.3 Modelo com atrito linear, quadrático e efeito das barbatanas

Incrementando o modelo anterior com o efeito das barbatanas na deslocação do veículo serão acrescentados mais 6 elementos para identificar, sendo estes o atrito linear e quadrático para cada um dos eixos.

As constantes representadas foram obtidas através de tentativa e erro ponderando também os valores utilizados no modelo base (Szymak, 2017). A posição das barbatanas pode influenciar o atrito a que o veículo está sujeito. Por exemplo, se

o veículo se estiver a movimentar em linha reta e as barbatanas se encontrarem a 90 graus (perpendiculares ao movimento) estão terão um efeito que faz diminuir a velocidade do BUV. Desta forma, analisaram-se os efeitos das posições das barbatanas e o quanto estas afetam o movimento do veículo.

Foram considerados os seguintes valores:

- $Xvx = 0.014$;
- $Xvxx = 0.91$;
- $Yvy = 0.015$;
- $Yvyy = 0.95$;
- $Zvz = 0.0001$;
- $Zvzz = 0.01$;

Foi apenas considerado o efeito que cada barbatana tem no movimento do veículo e simulou-se um percurso que interaja nas 3 barbatanas, nas 3 características de cada (amplitude, frequência e offset), durante 50 segundos. Assim, obteve-se o percurso representado na figura 4.15

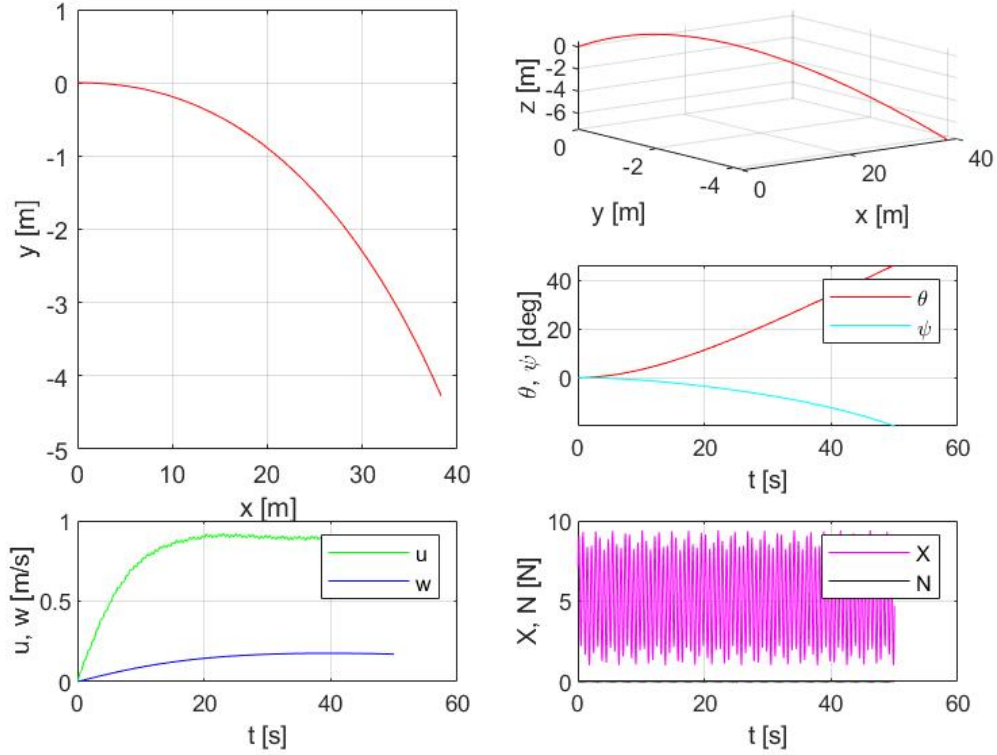


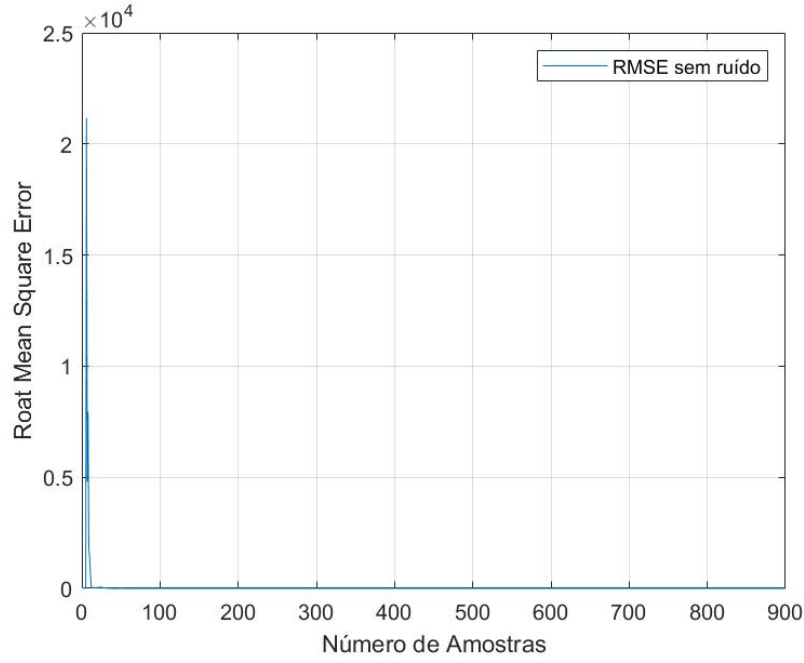
FIGURA 4.15: Simulação tendo em conta o efeito das barbatanas no atrito do veículo

Como nas simulações anteriores o nível de ruído começou em 0, sendo posteriormente aumentado para um nível de SNR baixo, médio e no fim alto. Estas experiências foram sempre realizadas com a mesma simulação. De referir que no algoritmo pode ser introduzido ruído em cada um dos parâmetros, seja velocidade, aceleração, atuação ou até mesmo apenas no efeito linear das barbatanas. Na realidade isso não poderá acontecer, pois o ruído existente resultará dos dados lidos pelos sensores presentes no veículo. Assim, existindo ruído na leitura da velocidade, existirá também, consequentemente na aceleração e em todos os parâmetros dependentes desta (atrito linear e quadrático).

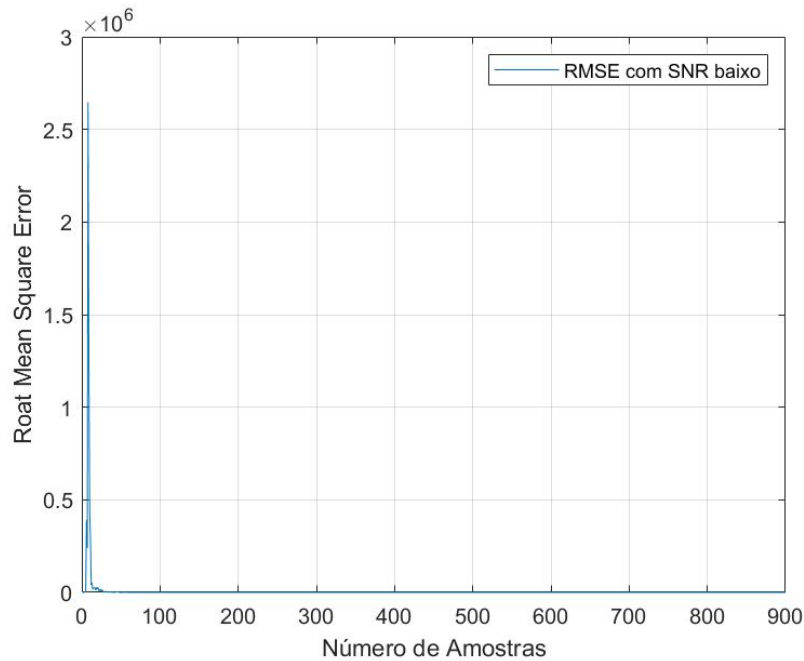
Com vista a analisar experimentalmente o algoritmo de identificação criado o ruído é introduzido no próprio algoritmo individualmente em cada parâmetro.

Na figura 4.16 pode-se observar a comparação de RMSE entre o modelo onde não foi aplicado ruído e o modelo com SNR baixo (10^{-7}). O ruído foi introduzido no vetor de velocidade.

Na tabela 4.10 observa-se a comparação dos parâmetros sem ruído. Note-se que os novos parâmetros lineares (X_{vx} , Y_{vy} , Z_{vz}) e o novos parâmetros quadráticos (X_{vxx} , Y_{vyy} , Z_{vzz}) foram obtidos para o simulador através de tentativa e erro e não são mandatórios.



(A) RMSE do modelo com efeito das barbatanas sem ruído



(B) RMSE do modelo com efeito das barbatanas com SNR baixo

FIGURA 4.16: Comparação RMSE entre modelo com efeito das barbatanas sem ruído e com SNR baixo

Em ambas as experiências o valor do erro tende para 0 rapidamente, embora na figura 4.17 se note que o RMSE com SNR baixo demora mais a convergir para 0, como seria de esperar. Para o modelo onde o ruído não foi aplicado note-se que o valor é praticamente 0 ao fim de 1 iteração (18 amostras), enquanto que no modelo com SNR baixo apenas ao fim de 3 iterações o valor estabiliza para 0.

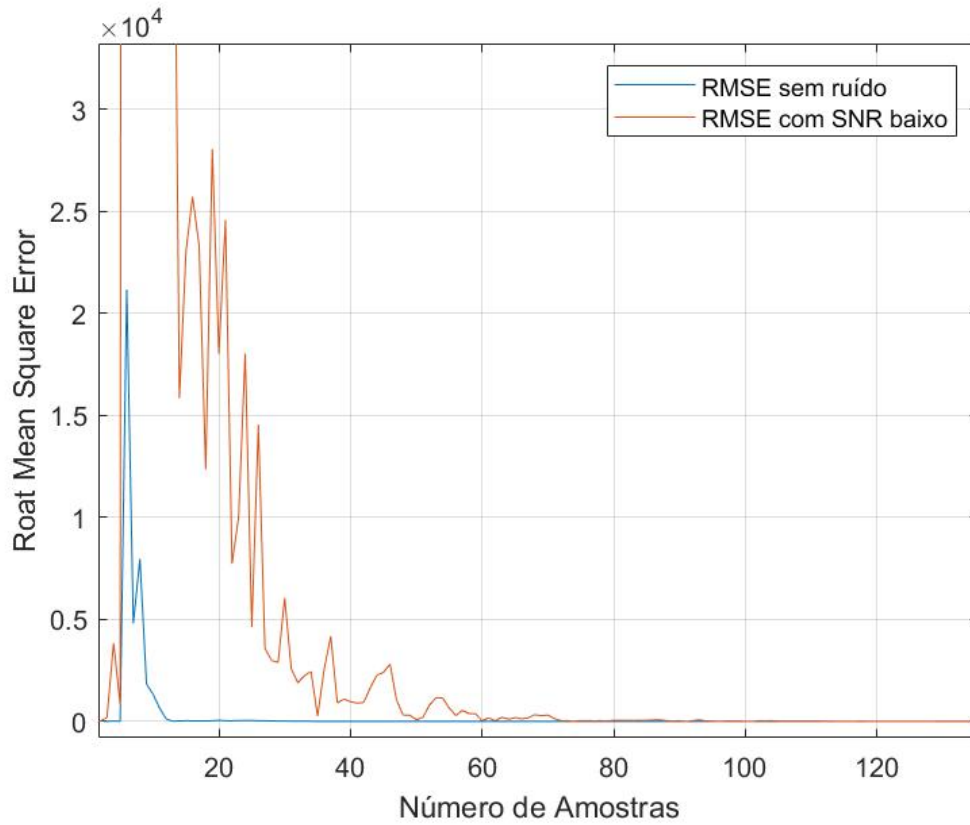


FIGURA 4.17: Comparação entre RMSE sem ruído e com SNR baixo (Modelo com efeito das barbatanas)

Nas seguintes tabelas pode-se observar a diferença numérica entre parâmetros ao fim de 50 segundos de identificação.

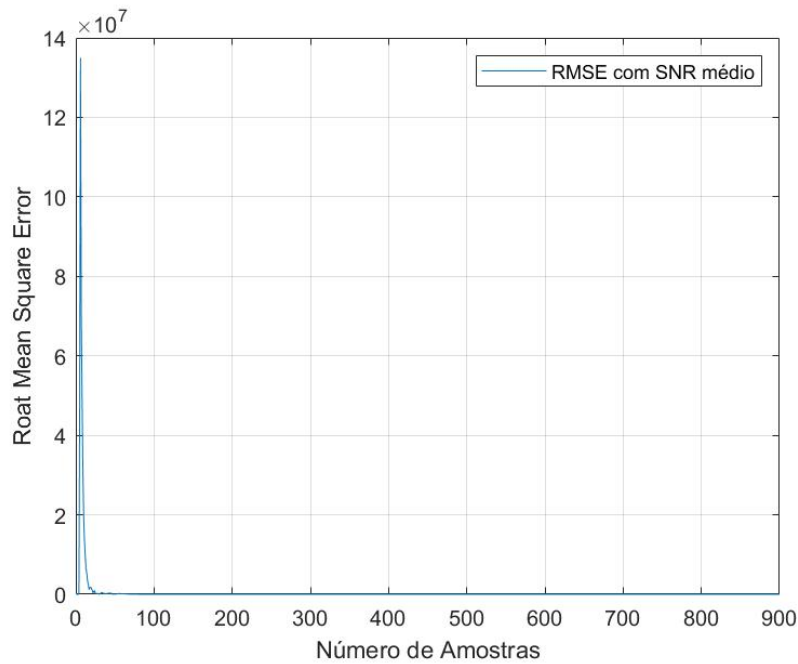
TABELA 4.10: Comparação entre os valores reais dos parâmetros dinâmicos e os valores obtidos experimentalmente (Modelo com efeito das barbatanas, sem ruído)

Parâmetro	Valor Real	Valor Experimental
M_{11}	49.5	49.5
M_{22}	104	104
M_{33}	104	104
M_{55}	18.92	18.92
M_{66}	18.92	18.92
X_u	0.0894	0.0894
Y_v	1.9	1.9
Z_w	1.9	1.9
M_q	0.8	0.8
N_r	0.7	0.7
X_{uu}	5.72	5.72
Y_{vv}	18.58	18.5798
Z_{ww}	18.58	18.58
M_{qq}	11	11
N_{rr}	10	10
X_{vx}	0.014	0.014
Y_{vy}	0.015	0.015
Z_{vz}	0.0001	0.0001
X_{vxx}	0.91	0.91
Y_{vyy}	0.95	0.9502
Z_{vzz}	0.01	0.01
F	1	1

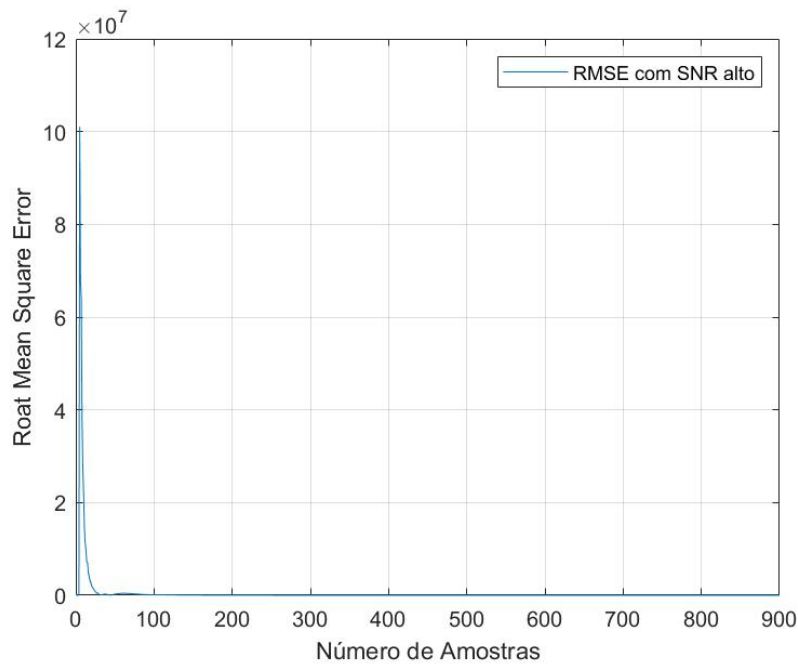
TABELA 4.11: Comparação entre os valores reais dos parâmetros dinâmicos e os valores obtidos experimentalmente (Modelo com efeito das barbatanas, com SNR baixo)

Parâmetro	Valor Real	Valor Experimental
M_{11}	49.5	49.5
M_{22}	104	104
M_{33}	104	104
M_{55}	18.92	18.92
M_{66}	18.92	18.92
X_u	0.0894	0.0894
Y_v	1.9	1.9002
Z_w	1.9	1.9
M_q	0.8	0.8
N_r	0.7	0.7
X_{uu}	5.72	5.72
Y_{vv}	18.58	18.5666
Z_{ww}	18.58	18.5798
M_{qq}	11	11
N_{rr}	10	9.9999
X_{vx}	0.014	0.014
Y_{vy}	0.015	0.0148
Z_{vz}	0.0001	0.0001
X_{vxx}	0.91	0.91
Y_{vyy}	0.95	0.9647
Z_{vzz}	0.01	0.0101
F	1	1

De forma a completar a análise do algoritmo para este modelo testou-se um SNR médio (10^{-5}) e um SNR alto (10^{-3}). Ambos os ruídos foram introduzidos no vetor de velocidade obtendo-se os seguintes resultados gráficos:



(A) RMSE do modelo com efeito das barbatanas com SNR médio



(B) RMSE do modelo com efeito das barbatanas com SNR alto

FIGURA 4.18: Comparação RMSE entre modelo com efeito das barbatanas com SNR médio e alto

Em ambos os casos o valor convergiu para 0 mostrando que o algoritmo consegue identificar os parâmetros mesmo com muito ruído. Na figura 4.19 pode-se observar que o modelo com SNR alto demora mais a estabilizar para 0 que o modelo

com SNR médio.

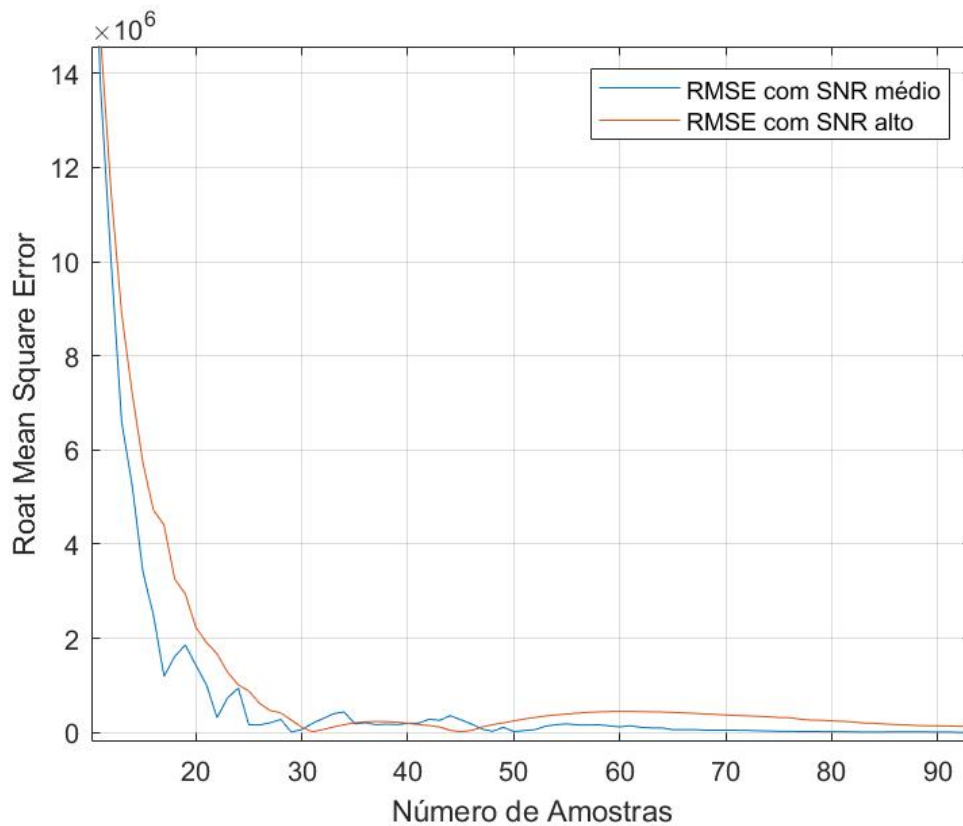


FIGURA 4.19: Comparação entre RMSE com SNR médio e alto (Modelo com efeito das barbatanas)

A nível numérico de notar que o algoritmo tem alguma dificuldade em identificar os parâmetros no eixo das ordenadas, pois neste eixo o efeito da cauda é predominante e a deflexão inserida nesta afeta preponderantemente a estabilidade do veículo.

TABELA 4.12: Comparação entre os valores reais dos parâmetros dinâmicos e os valores obtidos experimentalmente (Modelo com efeito das barbatanas, com SNR médio)

Parâmetro	Valor Real	Valor Experimental
M_{11}	49.5	49.5
M_{22}	104	104.0021
M_{33}	104	103.9993
M_{55}	18.92	18.9195
M_{66}	18.92	18.9214
X_u	0.0894	0.0894
Y_v	1.9	1.8605
Z_w	1.9	1.8983
M_q	0.8	0.8002
N_r	0.7	0.6999
X_{uu}	5.72	5.72
Y_{vv}	18.58	23.0424
Z_{ww}	18.58	18.5843
M_{qq}	11	10.9872
N_{rr}	10	10.0098
X_{vx}	0.014	0.014
Y_{vy}	0.015	0.0562
Z_{vz}	0.0001	0.0010
X_{vxx}	0.91	0.91
Y_{vyy}	0.95	-3.7135
Z_{vzz}	0.01	0.00073
F	1	1

TABELA 4.13: Comparação entre os valores reais dos parâmetros dinâmicos e os valores obtidos experimentalmente (Modelo com efeito das barbatanas, com SNR alto)

Parâmetro	Valor Real	Valor Experimental
M_{11}	49.5	49.5
M_{22}	104	107.5507
M_{33}	104	104.1058
M_{55}	18.92	19.1372
M_{66}	18.92	19.1895
X_u	0.0894	0.0894
Y_v	1.9	10.6015
Z_w	1.9	2.4185
M_q	0.8	0.6846
N_r	0.7	0.3718
X_{uu}	5.72	5.7201
Y_{vv}	18.58	203.4229
Z_{ww}	18.58	15.8800
M_{qq}	11	16.4824
N_{rr}	10	57.0318
X_{vx}	0.014	0.0131
Y_{vy}	0.015	-9.9850
Z_{vz}	0.0001	-0.2779
X_{vxx}	0.91	0.9112
Y_{vyy}	0.95	-146.5045
Z_{vzz}	0.01	1.4656
F	1	0.9998

De referir que com um SNR alto é normal que os valores no eixo das ordenadas tenham uma diferença maior, pois o valor de velocidade neste parâmetro foi da ordem de 10^{-4} , com um SNR na ordem de 10^{-3} os valores são muito alterados, o que justifica as diferenças numéricas na segunda linha das matrizes.

Na figura 4.20 pode-se observar a comparação do RMSE entre os diferentes níveis de ruído e, com alguma naturalidade, conclui-se que quanto maior o ruído mais dificuldade tem o algoritmo em estabilizar.

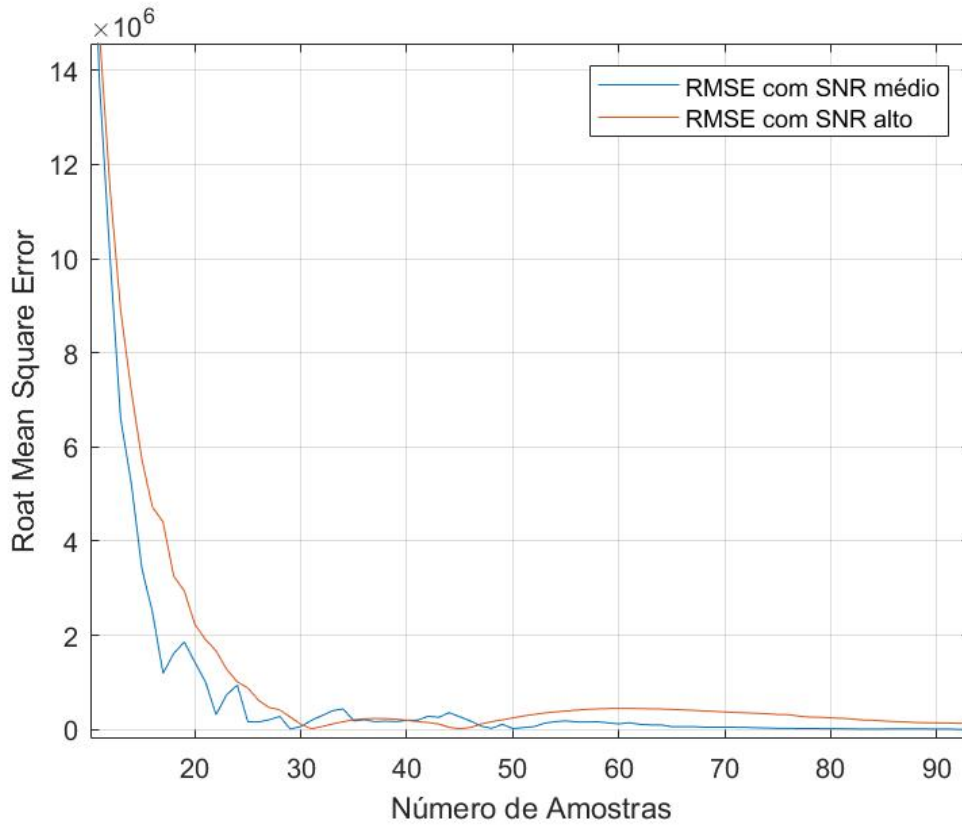


FIGURA 4.20: Comparação do RMSE com os diferentes níveis de ruído (Modelo com efeito das barbatanas)

4.3.4 Modelo com atrito linear, quadrático, efeito das barbatanas e diferença entre o centro de gravidade e o centro de impulsão

Aproximando o modelo da realidade e tendo em conta a matriz dos ângulos de Euler pode-se ter em conta a diferença posicional entre o centro de gravidade e o centro de impulsão. O algoritmo não consegue detetar parâmetros que se somem/-subtraíam, como por exemplo, só se consegue detetar a diferença entre as forças de impulsão e a força de gravidade, não consegue detetar individualmente cada parâmetro. Assim, de forma a diferenciar fisicamente o centro de impulsão com o centro de gravidade foi considerado que o centro de gravidade fica centrado no referencial, isto é, com as coordenadas $(0,0,0)$, enquanto que o centro de impulsão é alterado.

No simulador não são considerados os parâmetros das linhas 4 e 6 da matriz $g(\eta)$, sendo que estes são igualados a 0, assumindo a matriz a seguinte forma:

$$g(\eta) = \begin{bmatrix} (W - B)\sin(\theta) \\ -(W - B)\cos(\theta)\sin(\phi) \\ -(W - B)\cos(\theta)\cos(\phi) \\ 0 \\ (z_g W - z_b B)\sin(\theta) + (x_g W - x_b B)\cos(\theta)\cos(\phi) \\ 0 \end{bmatrix}$$

Assim sendo é possível definir uma diferença posicional em dois eixos, no eixo das abcissas e no eixo das cotas.

Na experiência realizada foi tido em conta um desvio de 0.1 centímetros (direção proa) no eixo das abcissas e um desvio de 1 centímetro no eixo das cotas (direção contrária ao sentido do eixo) do centro de impulsão para o centro de gravidade que se encontra centrado no referencial. Tal como nas experiências anteriores os níveis de ruído foram sendo aumentados de forma a testar o algoritmo de identificação.

Com o aumento da complexidade do simulador e a exploração de novos parâmetros o modelo aproxima-se sempre da realidade, ficando cada vez mais fiável no retrato dos movimentos associados ao veículo. De notar que na experiência executada apenas foram adicionados mais 2 parâmetros (x_b e z_b), mas na totalidade serão contabilizados 4. Isto porque os parâmetros associados ao centro de gravidade (x_g e z_g) são considerados nulos por pertencerem ao centro do referencial.

Na figura 4.21 está presente a simulação utilizada para detetar os parâmetros do modelo referido anteriormente.

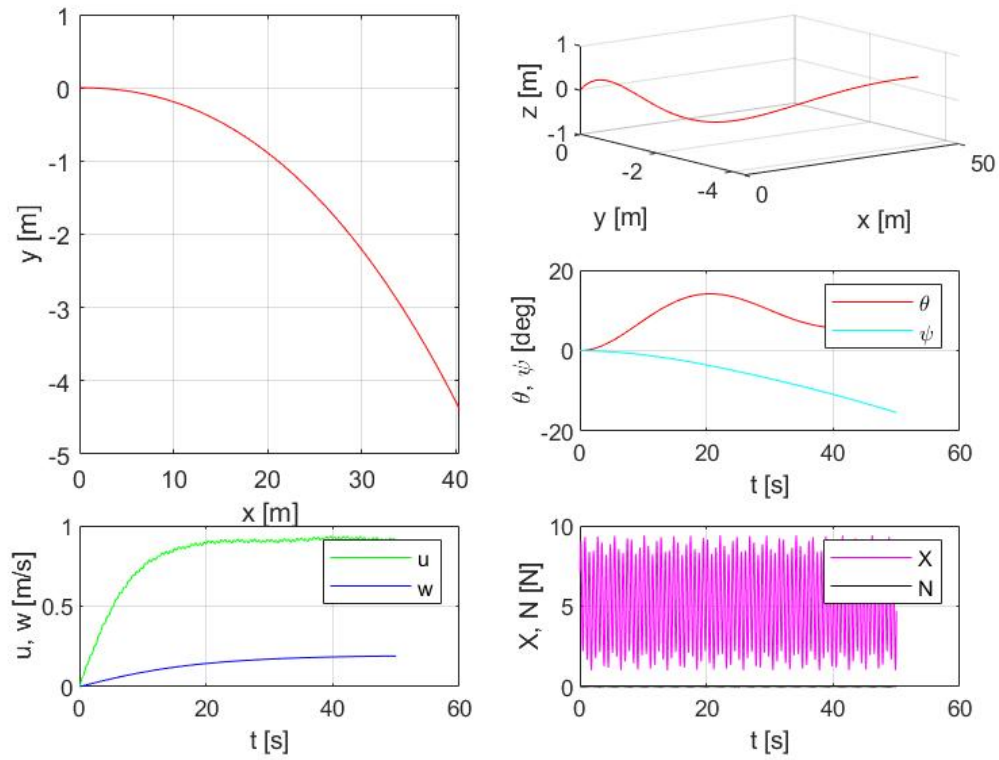
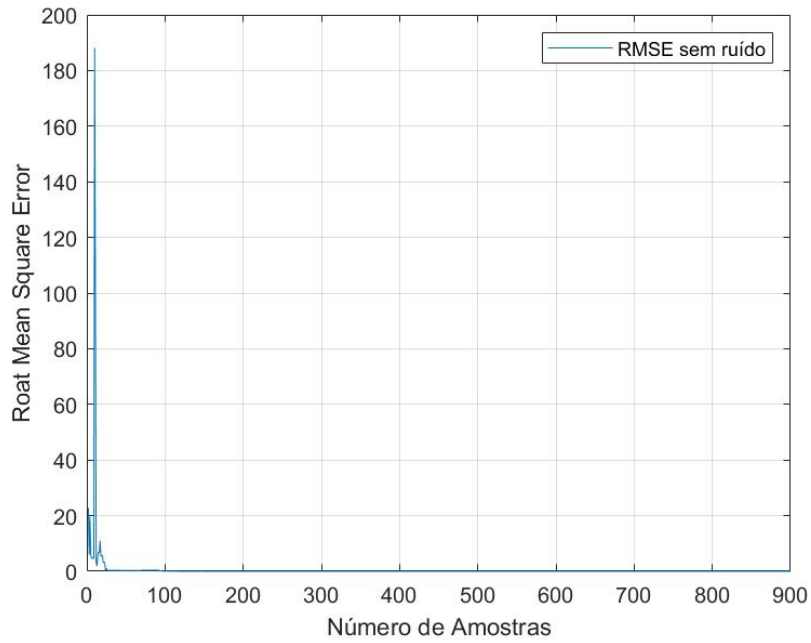
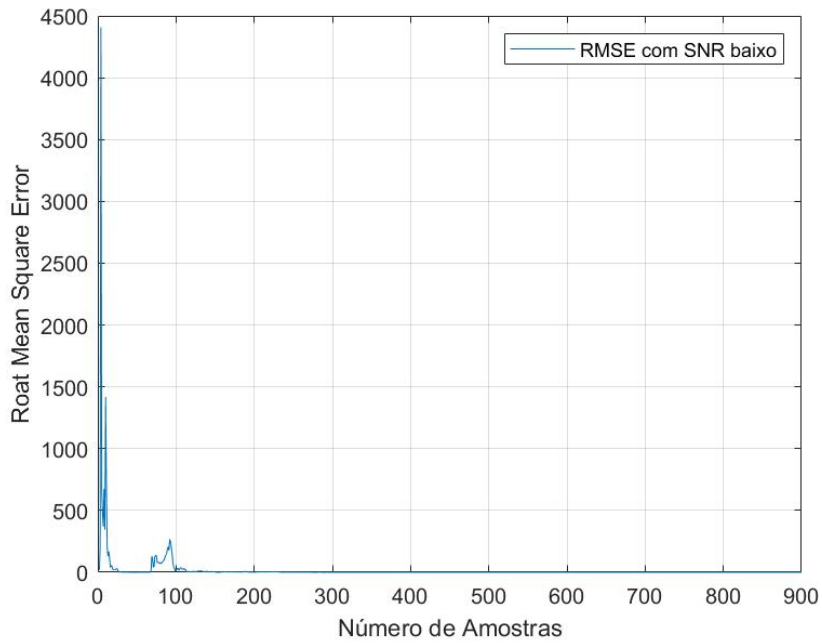


FIGURA 4.21: Simulação do modelo com centros não coincidentes

Na análise aos resultados do erro, tendo em conta o modelo mencionado pode-se observar para um estudo onde não exista ruído que o algoritmo identifica os 24 parâmetros facilmente e faz com que o erro tenda rapidamente para 0.



(A) RMSE do modelo com centros não coincidentes sem ruído



(B) RMSE do modelo com centros não coincidentes com SNR baixo

FIGURA 4.22: Comparação RMSE entre modelo com centros não coincidentes sem ruído e com SNR baixo

Como seria de esperar o modelo já com ruído tem mais dificuldade em estabilizar e descobrir os parâmetros. Para um SNR baixo foi considerado um valor de ordem 10^{-7} a atuar no vetor de velocidade.

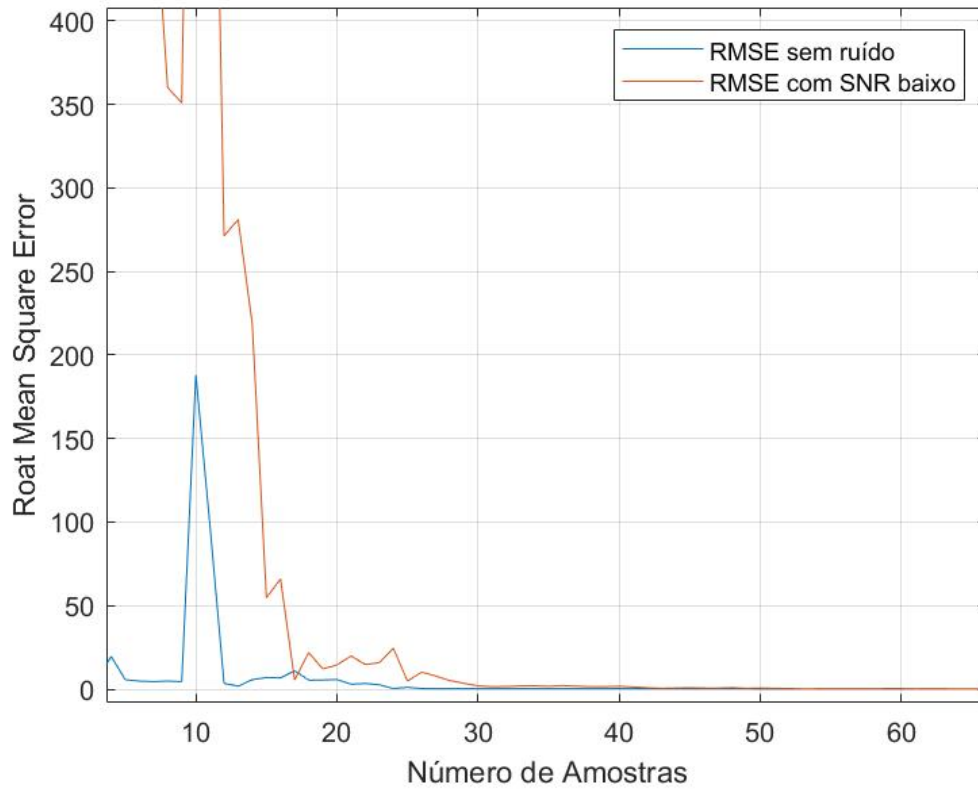
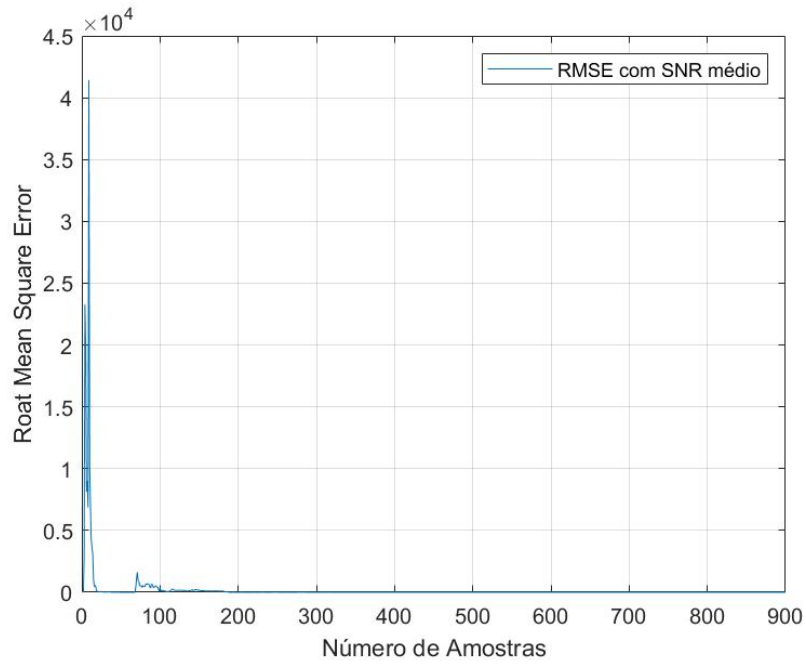
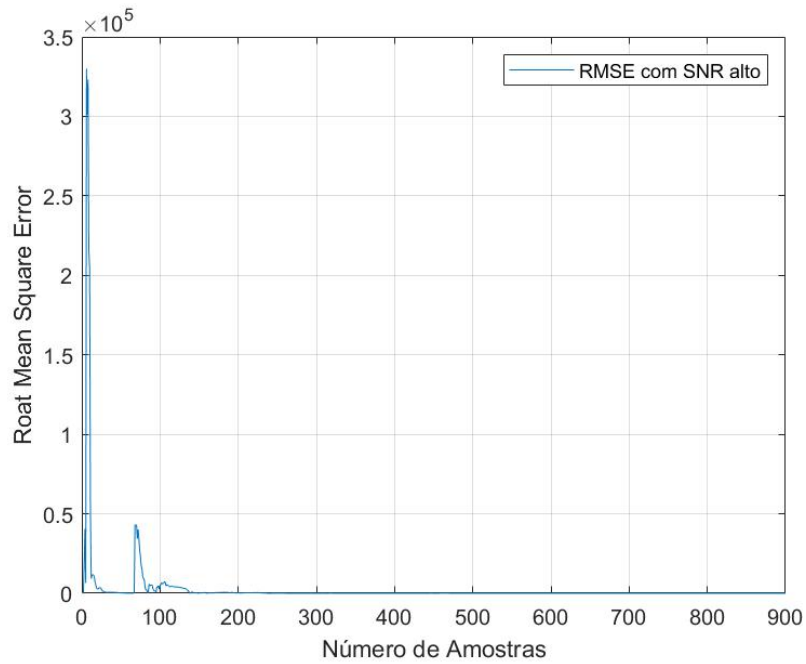


FIGURA 4.23: Comparação entre RMSE sem ruído e com SNR baixo (Modelo com centros não coincidentes)

Posteriormente foram realizadas experiências com um SNR maior, começando por um SNR médio com um valor de ordem 10^{-6} e posteriormente com um SNR alto de valor de ordem 10^{-5} . Os resultados podem ser observados na figura 4.24



(A) RMSE do modelo com centros não coincidentes com SNR médio



(B) RMSE do modelo com centros não coincidentes com SNR alto

FIGURA 4.24: Comparação RMSE entre modelo com centros não coincidentes com SNR médio e alto

Todas as experiências anteriores foram executadas durante 50 segundos e na figura 4.25 pode-se observar a comparação entre as diferentes experiências e concluir-se que quanto maior o SNR mais dificuldade o algoritmo tem em estabilizar.

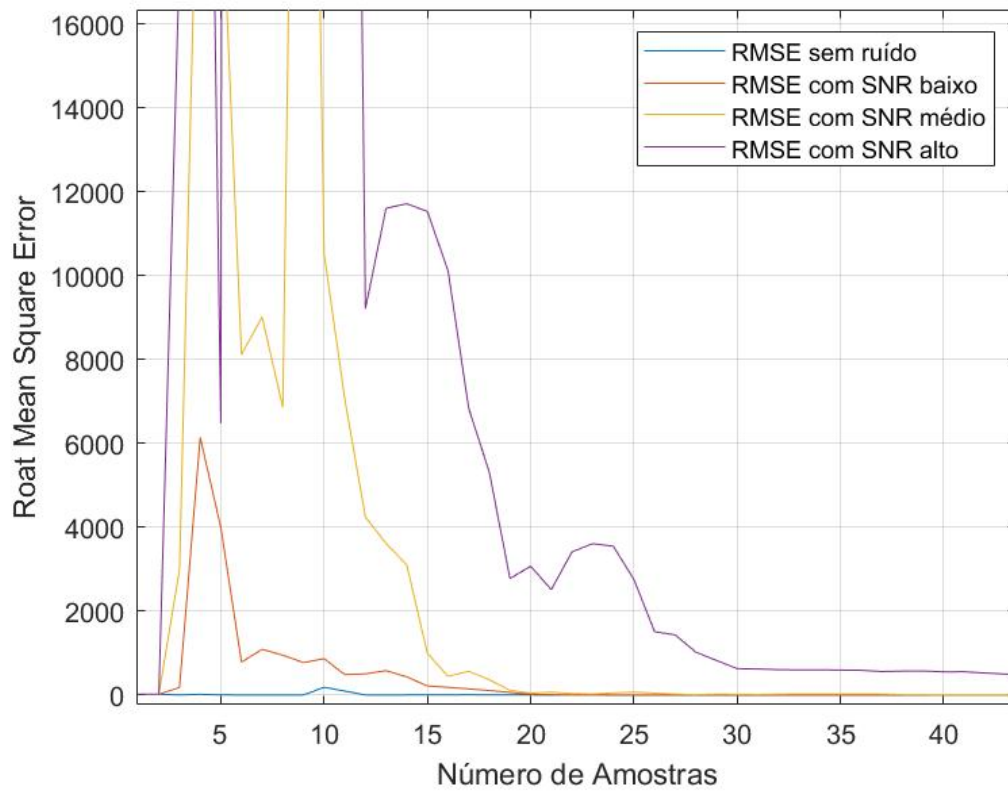


FIGURA 4.25: Comparação do RMSE com os diferentes níveis de ruído (Modelo com centros não coincidentes)

Atinge-se assim o modelo mais perto da realidade abordado nesta dissertação e note-se que o algoritmo identificou os parâmetros necessários para a compreensão do sistema e posterior análise.

Conclusão

Através das diferentes experiências pode-se concluir que existe dificuldade em estabilizar o veículo num movimento retilíneo quando este não possui flutuabilidade neutra. A frequência de batimento das barbatanas e cauda influencia muito o movimento, assim como a deflexão aplicada. Ainda assim, é possível realizar um percurso com o veículo atuando nas barbatanas e cauda. A deflexão negativa nas barbatanas faz com que o veículo se dirija à superfície e o contrário faz com que este “afunde”. A atuação no simulador é efetuada mudando valores de amplitude, oscilação e deflexão. Em relação ao simulador o objetivo foi realizado com sucesso, pois é possível dinamizar vários parâmetros e realizar um percurso designado para o mesmo.

Para o estudo em questão apenas interessam os dados finais do simulador e não o que acontece em tempo real (online), sendo que o simulador serve de base para obter os vetores de posição, velocidade e aceleração, necessários para calcular os parâmetros dinâmicos do veículo. O simulador utiliza os dados do projeto SABUVIS, mas a identificação dos parâmetros será geral para qualquer BUV com características semelhantes, isto é com duas barbatanas laterais e uma cauda.

O algoritmo de identificação criado foi sendo “incrementado” com complexidade e aproximado da realidade. À medida que a complexidade ia aumentando também o número de variáveis e parâmetros a identificar ia aumentando. Mesmo com a introdução de ruído o algoritmo detetava os parâmetros em poucos segundos, concluindo com sucesso os objetivos propostos.

Como trabalho futuro sugiro que se explore o método recursivo do método dos mínimos quadrados. A introdução de ruído em ambiente controlado é sempre uma experiência interessante de se realizar, por isso sugiro que se repitam as experiências a nível do ruído introduzido. Uma vantagem em usar o método designado é que os parâmetros podem ir sendo actualizados à medida que os dados dos sensores vão sendo atualizados. Dessa forma pode-se, por exemplo, usar essa identificação em tempo real para detectar alterações na dinâmica do veículo, que pode corresponder a situações de avaria ou falha (uma barbatana que fica encravada, por

exemplo). Posteriormente este pode ser mais explorado, variando a taxa de esquecimento do mesmo e estudando qual o efeito da estimativa inicial na convergência do erro e as respectivas consequências na obtenção dos parâmetros.

Bibliografia

- Araújo, H. F. R. (2020). Hilário Filipe Rocha Araújo Projeto e desenvolvimento de um veículo autónomo biomimético de subsuperfície.
- Bessonov, A. & Umnov, N. (1974). The analysis of gaits in six-legged vehicles according to their static stability. *On Theory and Practice of Robots and Manipulators* (pp. 1–10). Springer.
- Blidberg, D. R. (2001). The development of autonomous underwater vehicles (auvs); a brief summary.
- Conry, M., Keefe, A., Ober, W., Rufo, M. & Shane, D. (2013). BIOSwimmer: Enabling technology for port security. *2013 IEEE International Conference on Technologies for Homeland Security, HST 2013*, 364–368. <https://doi.org/10.1109/THS.2013.6699031>
- David Smith, J., Bagg, J. & Wrigley, I. (1991). Extractable polycyclic hydrocarbons in waters from rivers in South-Eastern Australia. *Water Research*, 25(9), 1145–1150. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0043-1354\(91\)90208-8](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0043-1354(91)90208-8)
- de Paiva, J. G. D. (2020). Gonçalo João Dias de Paiva Desenvolvimento de um Veículo Autónomo Biomimético.
- Duarte, S. (2014). Dynamic Model Identification of Robot Manipulators :
- Fossen, T. I. (2011). *Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control*. Wiley.
- Galloway, K. C., Clark, J. E. & Koditschek, D. E. (2013). Variable Stiffness Legs for Robust, Efficient, and Stable Dynamic Running. *Journal of Mechanisms and Robotics*, 5(1). <https://doi.org/10.1115/1.4007843>
- Griffiths, G. (2003). *Technology and Applications of Autonomous Underwater Vehicles* (1^a ed.). Taylor & Francis. <https://doi.org/10.1201/9780203522301>
- Madsen, P. & Bjerrum, A. (2000). Autonomous Underwater Vehicles in the MCM role. *Proceedings of the International UUV Symposium*, 39–45.
- Marthiniussen, R., Vestgard, K., Klepaker, R. A. & Storkersen, N. (2004). HUGIN-AUV concept and operational experiences to date. *Oceans' 04 MTS/IEEE Techno-Ocean'04 (IEEE Cat. No. 04CH37600)*, 2, 846–850.
- Mazlan, A. N. A. (2015). A Fully Actuated Tail Propulsion System for a Biomimetic Autonomous Underwater Vehicle. (January).

- Moon, T. K. & Stirling, W. C. (2000). *Mathematical methods and algorithms for signal processing*.
- Morawski, M., Sota, A., Zajac, J., Malec, M. & Krupa, K. (2018). Hardware and low-level control of biomimetic underwater vehicle designed to perform ISR tasks. *Journal of Marine Engineering and Technology*. <https://doi.org/10.1080/20464177.2017.1387089>
- Of, F. (2016). *USER-FRIENDLY SYSTEM IDENTIFICATION*. <https://doi.org/10.5281/zenodo.60402>
- Report, U. (1968). 'Fosr -68- 1. (May).
- Schoukens, J. & Ljung, L. (2019). Nonlinear System Identification: A User-Oriented Road Map. *IEEE Control Systems*, 39(6), 28–99. <https://doi.org/10.1109/MCS.2019.2938121>
- Sfakiotakis, M., Lane, D. M. & Davies, J. B. C. (1999). Fish Swimming Techniques. *Journal of Oceanic Engineering*, 24(2), 237–252.
- Song, S.-M. & Waldron, K. J. (1987). An analytical approach for gait study and its applications on wave gaits. *The International Journal of Robotics Research*, 6(2), 60–71.
- Szymak, P. (2017). Mathematical model of underwater vehicle with undulating propulsion. *3rd International Conference on Mathematics and Computers in Sciences and in Industry*, 269–274. <https://doi.org/10.1109/MCSI.2016.16>
- Thompson, J. (1988). JMT Thompson and HB Stewart, *Nonlinear Dynamics and Chaos; Geometrical Methods for Engineers and Scientists*, John Wiley and Sons, Chchester and New York, 1986, xvi+ 376p., 24× 16 cm, 9,870]. 43(1), 73.
- Verdonck, P. (2009). *Advances in biomedical engineering*. Elsevier Science.
- Waldron, K. J. (2000). A Brief History of Biomimetic Robotics. *International Symposium on History of Machines and Mechanisms Proceedings HMM 2000*, 371–378. https://doi.org/10.1007/978-94-015-9554-4_42
- Yedla, A. (s.d.). A Tutorial on Recursive methods in Linear Least Squares Problems Recursive Methods, 1–7.
- Zadeh, L. A. (1962). From Circuit Theory to System Theory. *Proceedings of the IRE*, 50(5), 856–865. <https://doi.org/10.1109/JRPROC.1962.288302>