



# Sistema de Localização Subaquático para Veículos Autónomos

**BRUNO LOPES MATIAS**

novembro de 2016



# Sistema de Localização Subaquático para Veículos Autónomos

Bruno Lopes Matias Nº 1100128

Dissertação, para satisfação parcial dos requisitos do Mestrado em Engenharia Eletrotécnica de Computadores

Orientador: José Miguel Soares De Almeida

Novembro de 2016  
Porto, Portugal.



*Aos meus Pais, Irmã,  
Avós e futura Esposa.*



## Agradecimentos

Esta dissertação contou com importantes apoios e incentivos sem os quais não se teria tornado possível a sua realização e aos quais estou eternamente grato.

Ao meu orientador, Professor Eng. José Almeida, por permitir estudar o tema desta dissertação, pelo saber transmitido e pela colaboração em solucionar dúvidas que foram surgindo.

Ao Professor Doutor Eduardo Silva, pela compreensão e por contribuir de forma direta para a conquista deste título, ao Hugo Ferreira, pelo apoio na realização dos *datasets*, e a todos os colegas do LSA, pelo companheirismo e força demonstrados.

À minha família, em especial aos meus pais, avó, irmã e cunhados, que estiveram sempre lá para mim, por serem modelos de vida e amor incondicional.

A todos os meus amigos pela compreensão para com as minhas ausências, sem esquecer um agradecimento especial ao, André Faria, António Ferreira, Carlos Almeida, Joel Oliveira, Flávio Lopes, João Ribeiro, Maurício Guedes e Marco Gonçalves pela solidariedade.

Por fim, e de uma forma especial, agradeço à minha futura esposa Marta Cadilhe pelo carinho, atenção e dedicação nesta etapa académica.



# Resumo

A necessidade de exploração e mineração no meio subaquático desencadeou, de alguma forma, uma acentuada evolução nas tecnologias e no desenvolvimento de veículos autônomos que opere nesse tipo de ambientes. A autonomia nas operações encontra-se, inteiramente, relacionada com o sistema de localização e é nesse sentido que o desenvolvimento desta dissertação se foca.

Os resultados obtidos com o presente estudo pretendem constituir um contributo para a obtenção de maior precisão e exatidão na performance de um sistema de localização subaquático. Neste sentido, são estudados dois aspetos fundamentais para um sistema de localização ser robusto e preciso, sendo eles a fusão sensorial e a calibração.

A fusão sensorial consistiu em utilizar um EKF com dados sensoriais do DVL, USBL, acelerómetros e sensor de pressão para estimar a localização. No entanto, para a realização da fusão sensorial, os sensores necessitam de ser calibrados, pois o desalinhamento entre os diversos sensores produz influencia negativamente no sistema de localização. Assim sendo, foi desenvolvido um sistema de calibração para minimizar esse problema.

As Minas subaquáticas, é um dos principais locais de operação para UUV para o INESC TEC, no entanto, as Minas apresentam distorções magnéticas sendo uma grande dificuldade para os sistemas de localização tradicionais. Deste modo, foi proposto um modelo para a obtenção da atitude sem recurso aos magnetómetros evitando a essas distorções.

Por fim, com o intuito de efetuar a validação dos algoritmos desenvolvidos foram realizados *datasets* para comprovar a eficiência do sistema de localização subaquático proposto.

Os resultados obtidos com o sistema desenvolvido neste estudo, quando comparados com o *ground truth* apresentaram erros inferiores a meio metro na posição estimada e 0.1 graus na orientação estimada, ao longo de um percurso de 722 m com uma duração de 10 minutos. É de salientar que o filtro probabilístico demonstrou-se robusto mesmo com a existência de algumas falhas na obtenção das medidas dos sensores acústicos.

---

**Palavras-Chave:**

Localização subaquática, USBL, DVL, Calibração DVL, Calibração USBL, Fusão sensorial, AHRS, EKF

# Abstract

The need to explore and mine underwater has triggered, in some ways, a pronounced evolution of the technologies and the development of autonomous vehicles which could operate in that type of environment. The operations autonomy is entirely related with the localization system and this thesis is focused in that sense.

The results we obtained with the present study aim to contribute to the process of obtaining a higher precision and accuracy in the performance of an underwater localization system. In this sense, we study two fundamental features for the robustness and precision of a localization system: multiple sensor fusion and system calibration.

An Extended Kalman Filter was used to fuse the sensor data from Doppler Velocity Log, Ultra-short baseline, accelerometers and a pressure sensor to estimate the position. However, in order to perform the sensorial fusion, the sensors need to be calibrated since the misalignment between the different sensors produces negative effects on the localization system. Thus, we have developed a calibration system to decimate this problem.

The underwater mines, one of the means of operation for the autonomous vehicles used in some ongoing projects at the INESC TEC's Centre for Robotics and Autonomous Systems, present very hostile characteristics with high magnetic distortions. This being the case, we have proposed a model to obtain the attitude without resorting to the magnetometers which would be immune to these distortions.

Lastly, in order to validate the algorithms we have developed, we have performed datasets to prove the efficiency of the underwater localization system we propose.

The results we obtained with the system we have developed in this study, when compared to the ground truth, presented errors which were inferior to half a meter in the estimated position and 0.1 degrees in the estimated orientation, through a route of 722 meters with a duration of 10 minutes. We should emphasize that the probabilistic filter proved to be robust even with the existence of some flaws while obtaining the measurements of the acoustic sensors.

---

**Keywords:**

Underwater Localization, USBL, DVL, Calibration DVL, Calibration USBL, Data Fusion, AHRS, EKF

# Conteúdo

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
1.1	Motivação . . . . .	2
1.2	Objetivos . . . . .	4
1.3	Estrutura do Relatório . . . . .	5
<b>2</b>	<b>Estado da Arte</b>	<b>7</b>
2.1	O problema da localização . . . . .	7
2.2	Localização subaquática . . . . .	9
2.2.1	<i>Dead Reckoning</i> . . . . .	10
2.2.2	Acústica . . . . .	12
2.2.3	Geofísica . . . . .	13
<b>3</b>	<b>Fundamentos Teóricos</b>	<b>15</b>
3.1	Referenciais . . . . .	15
3.1.1	Referencial Inercial ( <i>i-frame</i> ) . . . . .	17
3.1.2	<i>Earth Centered Earth Fixed</i> (ECEF) ( <i>e-frame</i> ) . . . . .	18
3.1.3	Referencial Local ( <i>n-frame</i> ) . . . . .	19
3.1.4	Referencial do Corpo ( <i>b-frame</i> ) . . . . .	19
3.2	Rotações tridimensionais . . . . .	20
3.2.1	Ângulos de Euler . . . . .	20
3.2.2	Quaterniões . . . . .	22
3.3	Transformação de Referenciais . . . . .	23
3.3.1	Transformação ECEF . . . . .	23
3.3.2	Transformação ECEF para NED . . . . .	23
3.3.3	Transformação Corpo ( <i>b-frame</i> ) para Navegação ( <i>n-frame</i> ) . . . . .	24
3.4	Filtro de Kalman Estendido (EKF) . . . . .	24
<b>4</b>	<b>Sensores subaquáticos</b>	<b>27</b>
4.1	<i>Conductivity Temperature Depth</i> (CTD) . . . . .	27
4.2	<i>Inertial Measurement Unit</i> (IMU) . . . . .	28
4.2.1	Acelerómetros . . . . .	30

4.2.2	Giroscópios . . . . .	30
4.3	<i>Doppler Velocity Log</i> (DVL) . . . . .	31
4.4	<i>Global Navigation Satellite System</i> (GNSS) . . . . .	34
4.5	Localização acústica . . . . .	36
4.5.1	<i>Long-BaseLine</i> (LBL) . . . . .	37
4.5.2	<i>Short-BaseLine</i> (SBL) . . . . .	39
4.5.3	<i>Ultra-Short-BaseLine</i> (USBL) . . . . .	40
<b>5</b>	<b>Sistema de localização subaquática</b>	<b>43</b>
5.1	Descrição do Hardware . . . . .	45
5.1.1	<i>Inertial Measurement Unit</i> (IMU) . . . . .	45
5.1.2	<i>Doppler Velocity Log</i> (DVL) . . . . .	47
5.1.3	<i>Ultra-Short-BaseLine</i> (USBL) . . . . .	48
5.1.4	Sensor de Pressão . . . . .	49
5.1.5	<i>Global Navigation Satellite System</i> (GNSS) . . . . .	50
5.2	Descrição do Software . . . . .	52
5.2.1	<i>Attitude and Heading Reference System</i> (AHRS) . . . . .	52
5.2.2	Calibração . . . . .	53
5.2.3	Fusão Sensorial . . . . .	55
<b>6</b>	<b>Implementação</b>	<b>57</b>
6.1	AHRS . . . . .	57
6.1.1	Inicialização do AHRS . . . . .	57
6.1.2	Mecanização do AHRS . . . . .	58
6.2	Calibração . . . . .	60
6.2.1	Obtenção da Orientação . . . . .	60
6.2.2	Obtenção da translação . . . . .	61
6.3	Fusão sensorial . . . . .	61
6.3.1	Inicialização do EKF . . . . .	62
6.3.2	Modelo de Processo . . . . .	63
6.3.3	Modelo das Observações . . . . .	65
6.4	<i>Setup</i> experimental . . . . .	67
<b>7</b>	<b>Resultados</b>	<b>71</b>
7.1	Validação do processo de calibração . . . . .	72
7.1.1	Calibração DVL . . . . .	72
7.1.2	Calibração USBL . . . . .	76
7.2	Caracterização da performance do AHRS . . . . .	78

7.3	Caracterização do sistema de localização subaquático . . . . .	80
<b>8</b>	<b>Conclusão e Trabalho Futuro</b>	<b>85</b>



## Lista de Figuras

2.1	Clássica abordagem de um sistema de localização. . . . .	9
2.2	Categorização da localização subaquática. . . . .	10
3.1	Aproximações à superfície da Terra. . . . .	16
3.2	Referencial Inercial. . . . .	17
3.3	Sistema de coordenadas <i>geodetic</i> . . . . .	18
3.4	Referencial Local NED em relação ao referencial ECEF. . . . .	19
3.5	Referencial do Corpo ( <i>b-frame</i> ). . . . .	20
3.6	Representação dos ângulos de Euler. . . . .	21
4.1	Representação gráfica de Allan Variance. . . . .	30
4.2	DVL <i>Phased Array &amp; Piston Array</i> da Teledyne . . . . .	32
4.3	Configuração de Janus . . . . .	33
4.4	Precisão Aumentação GNSS versus <i>baseline</i> . . . . .	36
4.5	Configuração LBL [1]. . . . .	38
4.6	Configuração GIB [2]. . . . .	39
4.7	Configuração SBL [3]. . . . .	40
4.8	Configuração USBL [1]. . . . .	41
5.1	Arquitetura geral do sistema de localização subaquático. . . . .	44
5.2	Spatial Fog Advanced Navigation. . . . .	46
5.3	DVL <i>Teledyne Explorer Phased Array Self-Contained</i> . . . . .	47
5.4	USBL <i>Evologics S2CR 7/17</i> . . . . .	49
5.5	Sensor de pressão Keller PA35X. . . . .	50
5.6	<i>Septentrio PolaRx2e</i> . . . . .	51
5.7	Diagrama de informação do AHRS. . . . .	52
5.8	Diagrama de informação de calibração . . . . .	54
5.9	Diagrama de informação da fusão sensorial. . . . .	55
6.1	Suporte em alumínio para os sensores do sistema de localização subaquática. . . . .	67

6.2	Suporte de alumínio com os sensores montados para a realização dos <i>datasets</i> . . . . .	67
6.3	Bóia com o <i>transponder</i> USBL acoplado. . . . .	68
6.4	Configuração dos sensores com os correspondentes referenciais e translações do <i>setup</i> experimental. . . . .	69
7.1	ROAZII na Mina da Bejanca durante a realização do <i>dataset 2</i> . . . . .	72
7.2	<i>Ground truth</i> versus DVL com e sem calibração no Rio Douro. . . . .	73
7.3	<i>Ground truth</i> versus DVL com e sem calibração na Mina da Bejanca. . . . .	75
7.4	<i>Ground truth</i> versus USBL com e sem calibração na Mina da Bejanca. . . . .	77
7.5	Comparação do <i>yaw</i> obtido através do AHRS com e sem compensação da rotação da Terra e <i>ground truth</i> . . . . .	79
7.6	Comparação do <i>roll</i> obtido através do AHRS com e sem compensação da rotação da Terra e <i>ground truth</i> . . . . .	79
7.7	Comparação do <i>pitch</i> obtido através do AHRS com e sem compensação da rotação da Terra e <i>ground truth</i> . . . . .	80
7.8	Comparação entre as posições obtidas pela integração do DVL com calibração e <i>ground truth</i> . . . . .	81
7.9	Comparação entre as posições obtidas pelo sistema de localização subaquático e <i>ground truth</i> . . . . .	82
7.10	Erro absoluto da posição estimada através do EKF utilizando IMU e DVL. . . . .	83
7.11	Erro absoluto da posição estimada através do EKF utilizando IMU, DVL, USBL e sensor de pressão. . . . .	84

## Lista de Tabelas

3.1	Parâmetros do WGS 84. . . . .	16
4.1	Sensores mais usados na localização subaquática . . . . .	27
4.2	Comparação da performance de um giroscópio da tecnologia FOG <i>versus</i> MEMS da empresa KVH [4]. . . . .	31
4.3	Comparação das especificações técnicas do DVL 600KHz <i>Phased Array Explored</i> vs DVL 600KHz <i>Piston Array Explored</i> . . . . .	32
4.4	Alcance e precisão em função da frequência do <i>Workhorse Navigator DVL</i> [5] . . . . .	33
4.5	Comparação entre GNSS . . . . .	35
4.6	Tamanho da <i>Baseline</i> e precisão em função do tipo de sistema acústico de posicionamento [6]. . . . .	37
4.7	Vantagens e desvantagens do sistema LBL [7]. . . . .	38
4.8	Vantagens e desvantagens do sistema SBL [7]. . . . .	40
4.9	Vantagens e desvantagens do sistema USBL. . . . .	42
5.1	Características técnicas do IMU da <i>Advanced Navigation Spatial FOG</i>	46
5.2	Especificações técnicas do DVL 600KHz <i>Phased Array Explorer</i> . . .	48
5.3	Especificações técnicas do USBL S2CR 7/17. . . . .	49
5.4	Especificações técnicas do sensor de pressão <i>Keller PA35X</i> . . . . .	50
5.5	Especificações técnicas do GNSS <i>Septentrio PolaRx2E</i> . . . . .	51
5.6	Precisão do GNSS <i>Septentrio PolaRx2E</i> na atitude estimada. . . . .	51
6.1	Rotações e translações face ao referencial do veículo do <i>setup</i> experimental . . . . .	69
7.1	Erro e desvio padrão do DVL em cada eixo referente ao 1º percurso sem calibração . . . . .	73
7.2	Erro e desvio padrão do DVL em cada eixo referente ao 1º percurso com calibração . . . . .	74

7.3	Parâmetros extrínsecos do DVL obtidos a partir da primeira trajetória efetuada no Rio Douro. . . . .	74
7.4	Erro e desvio padrão do DVL referente ao 2º percurso sem calibração	75
7.5	Erro e desvio padrão do DVL referente ao 2º percurso com calibração	75
7.6	Parâmetros extrínsecos do DVL obtidos a partir da segunda trajetória efetuada no Rio Douro. . . . .	76
7.7	Erro e desvio padrão USBL em cada eixo sem calibração . . . . .	77
7.8	Erro e desvio padrão USBL em cada eixo com calibração . . . . .	77
7.9	Parâmetros extrínsecos do USBL. . . . .	78
7.10	<i>Random Walk</i> e Instabilidade do Bias dos Giroscópios. . . . .	78
7.11	Erros e desvio padrão AHRS na atitude obtida. . . . .	80
7.12	Quantificação do erro e desvio padrão em posição do sistema de loca- lização subaquático com e sem USBL e sensor de pressão. . . . .	82
7.13	Quantificação do erro e desvio padrão do mesmo das velocidades com e sem EKF. . . . .	83

## Lista de Siglas e Acrónimos

<b>AHRS</b>	Attitude Heading Reference System
<b>ARW</b>	Angle Random Walk
<b>AUV</b>	Autonomous Underwater Vehicle
<b>CTD</b>	Conductivity-Temperature-Depth
<b>DGNSS</b>	Differential Global Navigation Satellite System
<b>DGPS</b>	Differential Global Positioning System
<b>DOF</b>	Degree Of Freedom
<b>DR</b>	Dead Reckoning
<b>DVL</b>	Doppler Velocity Log
<b>ECEF</b>	Earth-Centered Earth-Fixed
<b>ECI</b>	Earth Centered Inertial
<b>EKF</b>	Extended Kalman Filter
<b>ENU</b>	East-North-Up
<b>FOG</b>	Fibre Optic Gyroscope
<b>GBAS</b>	Ground Based Augmentation System
<b>GNSS</b>	Global Navigation Satellite System
<b>GPS</b>	Global Positioning System
<b>HRS</b>	High Rate Sensors
<b>HROV</b>	Hybrid Remotely Operated Vehicle
<b>IMU</b>	Inercial Measurement Unit
<b>INS</b>	Inertial Navigation System
<b>iUSBL</b>	Inverted Ultra-Short BaseLine
<b>KF</b>	Kalman Fiter
<b>LBL</b>	Long BaseLine
<b>LRS</b>	Low Rate Sensors

<b>LSA</b>	Laboratório de Sistemas Autónomos
<b>LTP</b>	Local Tangent Plane
<b>MAV</b>	Micro Air Vehicle
<b>MEMS</b>	MicroElectroMechanical Systems
<b>MSIS</b>	Mechanically Scanned Imaging Sonar
<b>NED</b>	North-East-Down
<b>PF</b>	Particle Filter
<b>PPP</b>	Precise Point Positioning
<b>PSD</b>	Power Spectral Density
<b>RLG</b>	Ring Laser Gyroscope
<b>ROV</b>	Remotely Operated Underwater Vehicle
<b>RTD</b>	Round Trip Delay Time
<b>RTK</b>	Real Time Kinematic
<b>SBAS</b>	Satellite Based Augmentation Systems
<b>SBL</b>	Short BaseLine
<b>SBP</b>	Sub Bottom Profiler
<b>SLAM</b>	Simultaneous Localization And Mapping
<b>SSBL</b>	Super-Short BaseLine
<b>SVD</b>	Singular Value Decomposition
<b>SVP</b>	Sound Velocity Probe
<b>UKF</b>	Unscented Kalman Filter
<b>USBL</b>	Ultra-Short BaseLine
<b>UUV</b>	Unmanned Underwater Vehicle
<b>WGS</b>	World Geodetic System

# 1

## Introdução

Considerando que 70% do Planeta Terra encontra-se coberto de água e que somente 5% das profundezas dos seus oceanos foram explorados pelo ser humano, denuncia um grande atraso na exploração de águas profundas. Este atraso, embora causado essencialmente pela inviabilidade económica e perigo que representa para o humano, tem ganho importância e impulsionado o surgimento de novas tecnologias no sentido de contornar esta situação.

Nas últimas décadas, os esforços direcionados para o desenvolvimento de AUV (*Autonomous Underwater vehicles*) e ROV (*Remotely Operated underwater Vehicle*) têm crescido exponencialmente, tornando-se plataformas extremamente promissoras na exploração e realização de operações nos oceanos. O facto de existir meios e ferramentas para monitorização e inspeção em águas profundas veio desvendar alguns mistérios do oceano, dar a conhecer a existência de alguns recursos naturais e proporcionar a possibilidade de estudo e exploração em novas áreas.

Os ROV na década de 80, tiveram um grande impacto em inúmeras áreas, nomeadamente na oceanografia e na exploração petrolífera, permitindo, assim, segurança e rentabilização do tempo nas operações marítimas. No entanto, tudo tem um preço, os cabos utilizados para o funcionamento do veículo, impõe limitações tanto de mobilidade como da área de operação, sendo, igualmente, necessária a existência de uma plataforma de suporte (e.g. barco, navio) [8].

Estas limitações levaram a que o desenvolvimento de AUV disparasse nas duas últimas décadas, sendo amplamente potenciado pelo aparecimento de novas tec-

nologias e soluções, materializando-se frequentemente, em protótipos para versões comerciais e militares [9]. Esta viragem muito se deve aos pontos fortes de um AUV, dos quais a mobilidade e a ausência de intervenção humana contínua. Com este tipo de veículo é, então, possível operar em áreas extremamente limitadas como são o caso de túneis submersos ou minas. Contudo, para que o AUV se encontre no seu nível de desempenho autónomo ideal tem imperativamente que haver a conjugação do desempenho de três sistemas repartidos (autonomia energética, de navegação e de decisão) e que estes estejam otimizados [10].

O tamanho do veículo e a densidade energética das baterias influenciam o nível de autonomia do sistema energético e, por sua vez, o sistema de decisão influencia o sistema energético na medida em que ao intervir no comportamento do veículo otimiza as trajetórias em tempo real, para evitar correntes oceânicas ou outros obstáculos inesperados e obter maior autonomia energética. No entanto, não é possível que o sistema de decisão possua tal capacidade, se não existir um sistema de navegação [11].

Um sistema de navegação na literatura pode ter dois significados distintos: (i) localização - determinar com precisão os estados do veículo (e.g. posição, velocidade e atitude); (ii) planificar e executar manobras de acordo com a localização desejada. Nesta dissertação um sistema de localização é definido pelo primeiro ponto, sendo o segundo um sistema de navegação.

Neste contexto, a planificação e a execução de manobras está totalmente dependente da localização. O nível de precisão do sistema de localização afeta o nível de autonomia do sistema de navegação e, conseqüentemente, o sistema de decisão e o sistema energético.

Cada vez mais, na indústria ou na investigação são exigidas missões mais eficazes e, conseqüentemente, mais complexas, sendo imprescindível que haja maior precisão no sistema de localização. Daí que esta dissertação terá como principal foco a obtenção de um sistema de localização com a maior precisão possível.

## 1.1 Motivação

A crescente utilização de AUV tem vindo a potenciar um crescimento de novos desafios e exigências. O sucesso de um qualquer veículo autónomo está intrinsecamente ligado a fatores importantes, tais como a autonomia energética, robustez, elevada capacidade de decisão e, fundamentalmente, maior exatidão, robustez e precisão na localização.

Ao nível de sistemas de localização no mundo subaquático, estas problemáticas con-

tinuam por ultrapassar totalmente, porque este ambiente de operação apresenta, habitualmente, características hostis ao desempenho de sistemas de localização. Em outros meios é natural o uso de GPS (*Global Positioning System*) para auxílio dos sistemas de localização, o que não acontece no meio subaquático devido à impossibilidade de propagação das ondas eletromagnéticas. Assim sendo, surge um interesse e um esforço redobrado na investigação e para a obtenção de novas soluções e novas tecnologias para os sistemas de localização subaquática.

A utilização de sensores inerciais, que providenciam acelerações e velocidades angulares, e de DVL (*Doppler Velocity Log*), que fornece as velocidades relativamente ao solo, ambos sensores muito utilizados, representam a base de um sistema de localização subaquática. Com base nestes sensores, a posição é obtida indiretamente através de outros sistemas complementares, como sensores acústicos, que fornecem posição relativa a um determinado referencial.

Os sensores de posicionamento acústico, são definidos mediante a *baseline* estabelecida, sendo eles: USBL (*Ultra-Short BaseLine*), SBL (*Short BaseLine*) ou LBL (*Long BaseLine*). Por fim, ao contrário do que acontece nos meios terrestre ou aéreo, na localização subaquática o plano vertical ( $Z$ ) possui maior exatidão, devido à pressão ser diretamente proporcional à profundidade.

Neste contexto, a maior motivação para a escolha do tema de estudo desta dissertação surgiu, fundamentalmente, da necessidade de lidar com o aumento da quantidade de informação sensorial recebida e com a diversidade de tipos de dados fornecidos por cada sensor. A necessidade de resolução deste problema é importante, muito devido à vastidão de exploração deste tipo de sistemas.

O desenvolvimento do sistema de localização subaquático irá melhorar o desempenho em diversas aplicações subaquáticas, tais como:

- Batimetria;
- Inspeção de cascos de navios;
- Inspeção de plataformas petrolíferas;
- Inspeção de diques ou barragens;
- Intervenções para reparação de estruturas danificadas;
- Substituição de componentes em máquinas de mineração;
- Recolha de dados geológicos;

Na sequência de alguns projetos que se encontram a decorrer no LSA (Laboratório de Sistemas Autónomos), tornou-se importante o desenvolvimento de um sistema de

localização que fosse robusto, exato e preciso.

Os projetos em curso são:

- VAMOS<sup>1</sup> (*Viable Alternative Mine Operating System*): Neste projeto europeu, o INESC TEC é responsável pelo desenvolvimento de um veículo do tipo HROV (*Hybrid Remotely Operated Vehicle*). Este veículo terá de ser capaz de fazer batimetria e mapeamento em minas submersas para apoio à operação de mineração subaquática. O desenvolvimento do sistema de localização subaquático dotará o HROV de uma capacidade de precisão e exatidão no processo de batimetria.
- UNEXMiN<sup>2</sup> (*Underwater Explorer For Flooded Mines*): Este projeto europeu tem como principal objetivo efetuar o mapeamento tridimensional de minas abandonadas submersas. O sistema autónomo deverá ser munido de capacidade sensorial que promova o fornecimento de dados científicos e geológicos, permitindo elucidar acerca do tipo de meio e solo de cada um dos ambientes explorados. Como as minas são compostas por vários canais desconhecidos, torna-se importante que o veículo seja capaz de mapear e navegar a mina, sendo, assim, imperativo um sistema de localização subaquático;
- TURTLE<sup>3</sup> (*Autonomous Support System for SubSea Operations*): O projeto TURTLE consistiu no desenvolvimento de um sistema autónomo para exploração de águas profundas, tendo como foco o baixo consumo energético na deslocação pela coluna de água. Este veículo de navegação autónoma, sem cabo umbilical, em zonas com profundidade, possui capacidade de operação durante longos períodos de tempo. Deste modo, o sistema de localização subaquático é imprescindível para a navegação do veículo.

## 1.2 Objetivos

De acordo com as necessidades dos projetos mencionados anteriormente e a grande dificuldade imposta pelo ambiente subaquático na obtenção de localizações fiáveis e precisas, o principal objetivo desta dissertação consiste no desenvolvimento de um sistema de localização subaquático.

Assim sendo, os objetivos específicos desta dissertação são:

---

<sup>1</sup><http://vamos-project.eu>, acedido em 10/10/2016.

<sup>2</sup><http://www.unexmin.eu>, acedido em 10/10/2016.

<sup>3</sup><http://www.poci-competite2020.pt/noticias/detalhe/Turtle-apoio-fundos-estruturais-europeu>, acedido em 10/10/2016.

- Identificar e analisar as práticas atuais para o desenvolvimento de um sistema de localização subaquático;
- Caracterizar e selecionar sensores para localização subaquática existentes no mercado;
- Quantificar e caracterizar os erros de cada sensor de localização;
- Desenvolver um sistema de localização subaquático robusto, exato e preciso;
- Validar o sistema de localização subaquático em ambiente real e em tempo real;
- Avaliar a performance do sistema de localização subaquático.

### 1.3 Estrutura do Relatório

Este documento encontra-se organizado em oito capítulos. No primeiro capítulo contextualiza-se o tema, a motivação, os objetivos e a estrutura desta dissertação. O segundo capítulo aborda o problema da localização e, de seguida, demonstra quais as técnicas, tecnologias e sensores para a resolução do problema da localização subaquática.

De forma a inteirar os fundamentos basilares deste estudo, no terceiro capítulo são apresentados os referenciais existentes para localização, as transformações possíveis entre referenciais e o filtro de *Kalman*.

No quarto capítulo são abordados, de um modo geral, os sensores mais utilizados para a realização de sistemas de localização subaquática, bem como as vantagens e desvantagens de cada um deles e os tipos de erros associados a cada um dos sensores. O sistema de localização subaquático é abordado no capítulo quinto, apresentando a arquitetura geral, os sensores utilizados e o funcionamento do software numa abordagem de alto nível.

A implementação é exposta no capítulo seis, sendo explicado detalhadamente cada módulo do sistema de localização subaquático. Ainda, neste capítulo é apresentado-se o *setup* experimental para a obtenção dos resultados.

Por fim, exibem-se as conclusões ao estudo, as contribuições deste trabalho para a localização subaquática. A encerrar o documento, temos as referências bibliográficas que acrescentam valor e dão suporte ao presente documento.



# 2

## Estado da Arte

O estado da arte exposto nesta secção tem como objetivo a apresentação de estudos relevantes para a temática. Encontra-se dividida em duas partes. Na primeira parte foi recolhida informação relativa ao problema da localização, de modo a consolidar o enquadramento de base a este estudo. A segunda parte diz respeito aos trabalhos e estudos científicos relevantes para o desenvolvimento desta dissertação.

### 2.1 O problema da localização

Quando viajamos ou nos encontramos em zonas que não conhecemos, surge, frequentemente, aquela típica pergunta "Onde estou?". Para contornar essa situação tentamos encontrar pontos de referência, ficamos atentos às placas de sinalização, usamos a bússola ou até acedemos ao sistema de GPS do nosso *smartphone*.

Já em grandes superfícies, em espaços *indoor*, o uso de GPS não é exequível e não é por mero acaso que as pessoas mais distraídas andam perdidas no parque de estacionamento à procura da viatura, por não terem identificado, atempadamente, pontos de referência que permitissem localizar a viatura, mais tarde.

No caso de veículos autónomos, o problema também se coloca, uma vez que não é viável executar uma missão com sucesso sem saber onde está localizado. Para além do sistema de localização ser o sistema primordial de um veículo autónomo, este possui três sistemas totalmente dependentes de si, dos quais: (i) sistema de controlo; (ii) sistema de planeamento; (iii) sistema de navegação [11]. Resumidamente,

o sistema de localização deve conseguir estimar os estados de posição, velocidade e atitude, de forma mais fiável possível.

A abordagem clássica para estimar os estados (posição, velocidade e atitude) consiste em equipar o veículo autónomo com sensores inerciais capazes de medir a velocidade angular e a aceleração. Ora, através da integração da aceleração obtém-se tanto a velocidade como a posição e através da integração da velocidade angular obtém-se a atitude. Todavia, a integração possui aspetos positivos e negativos, uma vez que com a integração, os erros de alta frequência (e.g. ruído branco) são suavizados e, em contrapartida, os erros de baixa frequência (e.g. bias, fatores de escala e alinhamento) são amplificados [11]. Para minimizar os erros causados pela integração, devem ser utilizados medidas provenientes de outros sensores ou sistemas, tipicamente de uma baixa taxa de dados LRS (*Low Rate Sensors*), tais como GNSS (*Global Navigation Satellite System*), USBL, DVL, conforme o meio de operação do robô (terra, água ou ar).

Neste contexto, percebe-se que o maior problema da localização é a incerteza associada ao movimento do robô e às medidas dos sensores. Os estados do veículo tipicamente são estimados através de soluções probabilísticas, com recurso maioritariamente a filtros de *Kalman* KF (*Kalman Filters*) ou filtro de partículas PF (*Particle Filters*) [12].

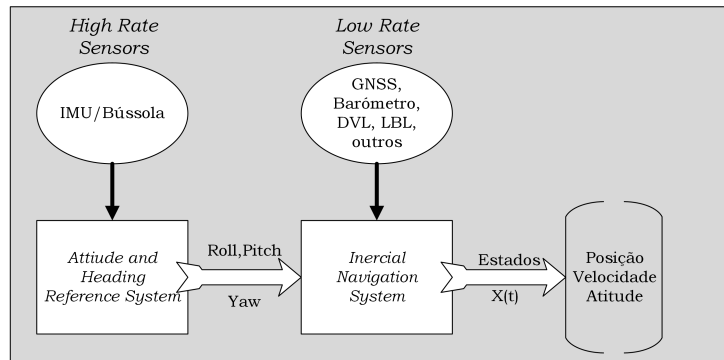
Na prática, um sistema de localização pode ser dividido em dois subsistemas [13]:

- **AHRS** (*Attitude Heading Reference System*) - estima a atitude do veículo;
- **INS** (*Inertial Navigation System*) - estima o estado do veículo (posição, velocidade).

Na Figura 2.1 apresenta-se a abordagem clássica de um sistema de localização em forma de diagrama de blocos.

Entretanto, esta abordagem só se tornou viável para a generalidade dos veículos autónomos devido ao surgimento da tecnologia MEMS (*MicroElectroMechanical Systems*), pela descida abrupta nos preços dos sensores inerciais e pela redução do tamanho e do peso, possibilitando a viabilidade de construção de alguns tipos de veículos autónomos, nomeadamente, MAV (*Micro Aerial Vehicle*) e UUV (*Unmanned Underwater Vehicle*) [14].

Os AHRS apareceram, em grande parte, devido ao surgimento da tecnologia MEMS, porém os sensores inerciais são extremamente ruidosos, logo a atitude é fornecida com menos precisão e exatidão [14, 15]. Na generalidade, são usados os sensores inerciais MEMS com filtros probabilísticos para que a sua utilização seja viável.



**Figura 2.1:** Clássica abordagem de um sistema de localização.

Idealmente, quanto maior for o número de sensores melhor é o sistema de localização, porém não se pode negar que a quantidade de sensores pode tornar-se um grande problema do ponto de vista de implementação, porque os erros provenientes de uma calibração incorreta, desalinhamento ou interferência são comuns ainda mais quando um sistema de localização possui múltiplos sensores. Para além disso, a complexidade do sistema de localização aumenta com o número de sensores e consequentemente aumenta a complexidade na afinação dos filtros probabilísticos. De um modo geral, o sistema de localização possui os seguintes problemas:

- Precisão e exatidão *versus* custo monetário;
- Tipos de sensores mediante o ambiente do tipo de robô;
- Modelos probabilísticos *versus* custo computacional;
- Melhoria com aumento do número de sensores *versus* complexidade.

## 2.2 Localização subaquática

Atualmente, existe um interesse redobrado em desenvolver novas tecnologias para o meio aquático. O aumento do custo de mão de obra, a ausência de matéria-prima e o risco/impossibilidade do ser humano em aceder a determinadas zonas subaquáticas desperta um grande investimento monetário e intelectual em desenvolver novas soluções, novas tecnologias e UUV. Para que os UUV realizem as tarefas minimamente exigidas é, imperativamente, necessário um sistema de localização e, por sua vez, uma maior exatidão/precisão nos sistemas de localização. Quanto maior a exatidão/precisão, maior é o preço das soluções existentes no mercado, sendo obrigatoriamente necessário pesar o fator custo/qualidade, uma vez que o custo para o

desenvolvimento do sistema autónomo pode ultrapassar o benefício.

Na localização subaquática são utilizadas três técnicas distintas: (i) DR (*Dead Reckoning*);(ii) Acústica;(iii) Geofísica, sendo aconselhado a conjugação entre elas para soluções que requerem maior precisão e redundância. Na Figura 2.2 ilustra a categorização dessas técnicas de localização subaquática [13].

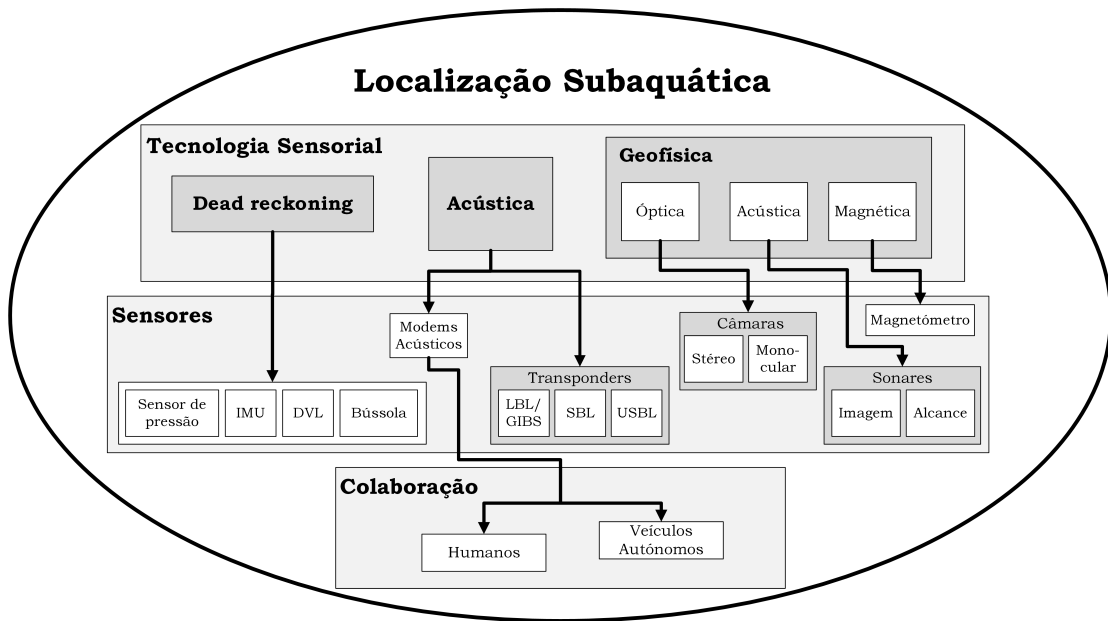


Figura 2.2: Categorização da localização subaquática.

Seguidamente, apresenta-se cada uma das três técnicas de localização subaquática e a possível conjugação entre ambas.

### 2.2.1 *Dead Reckoning*

A técnica DR consiste em determinar a posição atual estimada, através das velocidades do veículo, sabendo a posição inicial, ou seja, o somatório da posição inicial com a integração das velocidades [16]. A localização por DR é apenas uma aproximação, uma vez que não contabiliza os erros associados aos sensores (bias, *offset*, atitude...) [17, 16]. O erro depende do sensor utilizado e do tipo de missão, pois pode ocorrer que o sensor produza, inesperadamente, dados que possam conter erros.

A localização inercial é encarada como uma solução DR, pois a posição e a orientação é obtida de uma forma indireta. Por um lado, a posição é obtida através da dupla integração das acelerações e, por outro, a orientação é obtida através da

integração das velocidades angulares. A combinação mais usual para alcançar a localização por DR subaquática consiste em utilizar o IMU (*Inercial Measurement Unit*), o DVL e o sensor de pressão. A posição no plano horizontal ( $x, y$ ) é obtida através da integração das medidas do DVL. A posição no plano vertical ( $z$ ) é obtida diretamente através do sensor de pressão. E a atitude é obtida através dos dados provenientes do IMU [18]. Qualquer erro existente nas velocidades ou na orientação resulta numa posição errada, sendo que quanto mais demorada for a missão, maior será o erro entre a posição estimada e a posição real, pois, a posição não é observada diretamente sendo o erro propagado por toda a trajetória.

No sentido de minimizar os erros provenientes das indiretas observações no plano horizontal (i.é. integração da velocidade para obter posição) utilizam-se filtros probabilísticos, sendo KF o mais comum de todos [19]. Neste contexto, alerta-se para o facto dos estados não serão estimados corretamente caso as observações possuam ruído enviesado ou não gaussiano [20], pois KF assume que todas as observações são gaussianas.

As principais fontes de erro que deterioram drasticamente a posição estimada por DR são: (a) incorreto alinhamento; (b) erro na atitude estimada; (c) velocidade do som [21].

Existem várias abordagens no que diz respeito ao cálculo do alinhamento entre os sensores e a aproximação da atitude estimada, a partir dos dados do DVL. No geral, as abordagens existentes utilizam variantes de KF, das quais, EKF (*Extended Kalman Filter*) e UKF (*Unscented Kalman Filter*) [20, 21, 19, 22].

Segundo Jalving (2004) [21], é possível obter uma melhor performance que a divulgada pelo próprio fabricante caso se resolva os erros associados ao alinhamento, atitude e velocidade do som. Este teste consistiu em percorrer uma linha reta de 5.5Km e obtiveram um erro absoluto de 4.5m.

Uma outra abordagem é feita por Troni (2013)[23], em que estima as acelerações através das velocidades fornecidas pelo DVL, de forma a fornecer correções aos dados do acelerómetro AHRS *low-cost*. De seguida, estima a atitude do veículo (*roll* e *pitch*) com recurso ao ECF (*Extended Complementary Filter*) e compara os dados do sistema ECF-DVL e do INS de alta precisão obtendo a posição por DR. A solução proposta obteve uma melhoria de aproximadamente 30% em relação à posição obtida apenas através do AHRS.

### 2.2.2 Acústica

As ondas acústicas, ao contrário das ondas eletromagnéticas ( $< 10m$  - propagação na água), propagam-se muito bem em ambientes subaquáticos. Neste sentido, os transdutores acústicos são utilizados como *beacons* ou *modems* para localizar os AUV [9].

A técnica acústica é baseada no tempo de voo TOF (*Time Of Flight*) do sinal acústico entre *beacons* ou *modems* [13]. Ao contrário da técnica DR, a localização acústica fornece observações diretas da posição e não possui erros provocados pela integração ou *drift* [24].

Combinando a técnica DR com a acústica compensa-se o *drift* e erros de integração, tendo um sistema de localização com uma maior precisão e uma maior taxa de dados (*data rate*). Isto significa que a maior parte dos sistemas acústicos de posicionamento (e.g. LBL, SBL, USBL) fornecem a posição a um *data rate* baixo ( $< 2Hz$ ) em condições ideais, porém como na acústica pode ocorrer falhas ou demora no cálculo da posição, a DR vai sempre compensando.

A maior parte das falhas na obtenção da posição deriva do ruído causado por reflexões no próprio sinal acústico quando os sistemas se encontram (i) à superfície da água, (ii) no fundo do oceano ou (iii) próximo das plataformas de suporte dos sistemas acústicos (embarcações, plataformas). A posição fornecida pelos sistemas acústicos é a posição relativa ao corpo do transdutor acústico, o que se reflete num dos grandes problemas desta técnica, uma vez que para conhecer a posição relativamente a um referencial local é necessário conhecer a atitude do sistema acústico. Um erro de 1 grau na atitude do sistema acústico a 100m de distância, significa um "erro absoluto" de 1.75m. A interferência magnética, o uso de *AHRS low-cost* e a má calibração entre sistemas (*AHRS* & Sistema acústico) são as maiores causas para esse problema. Batista (2012) [25] usa um sistema LBL/USBL em simultâneo com giroscópio para estimar a atitude evitando o recurso aos magnetómetros que em determinadas zonas de operação deforma o campo magnético. Outro grande problema é a latência de dados devido aos sistemas SBL e USBL calcularem a posição numa unidade central e não no próprio veículo, ou seja, a posição calculada quando enviada contém a latência do envio por acústica, chegando atrasada consideravelmente. Este facto tem um grande impacto no filtro probabilístico. A abordagem proposta por Ridao (2011) [26] compreende a utilização da técnica DR e USBL, fundindo os dados através de um EKF. No entanto, como anteriormente referido, o USBL não se encontra no veículo, sendo necessário enviar as posições calculadas por via acústica. Com esta implementação existe um *delay* na medida obtida e como tal é implementado um *buffer* circular para guardar as medidas do DVL até à correspon-

dente medida da posição. De seguida, é realizado um *update* no filtro das medidas guardadas no *buffer* circular [26]. Rigby (2006) considera a utilização de um sistema de localização fundido o DVL com USBL e um filtro de partículas como sendo uma solução mais eficaz do que com o EKF, já que as medidas do USBL possuem ruído não gaussiano [27]. A falha da comunicação acústica é provável causando *delays* ou até mesmo a não receção da posição. A configuração iUSBL (*Inverted Ultra-Short BaseLine*) veio colmatar estes problemas. A antena USBL é colocada no veículo, recebendo as posições diretamente no veículo. A combinação de um iUSBL, IMU e sensor de pressão, utilizada por Hiller (2011) [28], demonstra que esse problema foi eliminado, bem como foi possível eliminar reflexões provenientes da embarcação ou da superfície da água. Por fim, caso a missão do AUV possibilite a vinda periodicamente à tona da água, o uso do GNSS permite inicializar o algoritmo com mais eficácia (i.é. estimar os bias, sensores inerciais, alinhamento) e realizar o *update* da posição periodicamente [29, 28].

### 2.2.3 Geofísica

Em muitas aplicações com AUV, a localização torna-se impraticável através de *beacons* ou *modems* acústicos, sendo necessário recorrer a outras técnicas [9, 16]. Os *beacons* acústicos têm que obrigatoriamente ser previamente instalados para cada missão, sendo apenas possível operar entre eles, tornando a missão limitada a um curto espaço de operação e, por vezes, extremamente dispendiosa para um AUV. A técnica geofísica usa a informação do meio ambiente como referência para se localizar [30], não sendo necessário o recurso à localização acústica. A localização geofísica pode ser baseada num mapa previamente disponível ou a realização de um mapa em tempo real e auto-localizar através dele, denominando-se SLAM (*Simultaneous localization and mapping*). Esta técnica pode usar batimetria, campos magnéticos ou até anomalias gravitacionais provenientes do local da operação [9], sendo categorizado em três grupos distintos [13]:

- magnética - normalmente utiliza mapas do campo magnético da Terra para estimar a localização [31, 32, 33, 34], no entanto existem abordagens sem um mapa à priori [35];
- ótica - pode usar câmaras monocular, stéreo ou ambas, tendo como principal função capturar imagens do fundo do oceano ou de estruturas, com o objetivo de identificar *features* e, partir daí, estimar a localização.
- acústica - deteta e identifica *features*, podendo-se tornar *landmarks* através de sonares acústicos para estimar a localização. Correspondência de *features*

através de mapas baseado em batimetria (e.g. *Multibem*, *SidesScan*, DVL) [36, 37]. Ribas (2010) [37] utiliza as paredes como *features* para se auto-localizar com um *priori-map*, através das medida do MSIS (*Mechanical Scanning Imaging Sonar*). É utilizada a transformada de Hough para detetar as retas que as paredes formam, sendo utilizado o EKF para estimar os estados. Já Hagen (2010) [36] utilizando *Nonlinear Bayesian Filter* para estimar os estados, compara as medidas de profundidade fornecidas pelo DVL como *priori map* obtido pelo multibeam.

# 3

## Fundamentos Teóricos

Neste capítulo, de forma a consolidar as bases teóricas do presente estudo, aborda-se os referenciais, as transformações de referenciais, os ângulos de Euler, os quaterniões e o filtro de *Kalman* estendido.

### 3.1 Referenciais

Os sistemas de localização envolvem medidas, provenientes de diferentes sistemas ou sensores, entendidas relativamente a um referencial. Existem vários referenciais definidos e estes são úteis na medida em que tornam possível a conjugação de medidas provenientes de cada sistema ou sensor de forma relacioná-las entre si.

Como o planeta Terra possui uma forma irregular e extremamente complexa, este necessita ser simplificado em um modelo sobre o qual torne possível navegar e localizar. Isto é, para um sistema de localização funcionar é necessário simplificar o modelo da Terra em três níveis: i) forma, ii) rotação e iii) gravidade.

Em termos de superfícies, são utilizadas, em geral, três superfícies distintas [38]:

- **Topografia da Terra** - sendo ela irregular;
- **Elipsoide** - matematicamente definida, aproximando-se um geoide;
- **Geoide** - correspondente ao nível médio dos oceanos.

Na Figura 3.1 podemos visualizar as três superfícies.

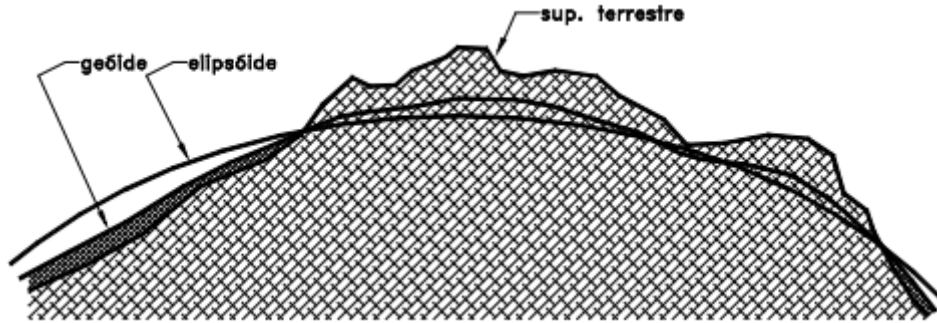


Figura 3.1: Aproximações à superfície da Terra [38].

Neste sentido, uma das normas mais utilizadas é a *World Geodetic System* revista pela última vez em 1984 (WGS 84). A norma WGS 84 utiliza uma elipsóide geocêntrica e equipotencial, ou seja, uma superfície onde o potencial gravítico é o mesmo em qualquer ponto. Na Tabela 3.1 apresentam-se os parâmetros mais relevantes que definem a elipse da norma WGS 84.

Tabela 3.1: Parâmetros do WGS 84.

Descrição	Simbologia	Valor	Unidades
Raio Equatorial	$a$	6.378.137	m .
Raio Polar	$b$	6.356.752,3142	m
Constante Gravitacional	GM	$3986004,418 \cdot 10^8$	$m^3/s^2$
Velocidade da Luz	C	299.792.458	m/s
Gravidade no Equador	$g_o$	9,780373	$m/s^2$
Velocidade Angular da Terra	$w_{ie}$	$7,292115 \times 10^{-5}$	rad/s

Por fim, devido à massa da Terra não ser uniformemente distribuída, o vetor gravidade varia mediante o local onde se encontra. Todavia a *Defence Mapping Agency* desenvolveu um modelo para obter o vetor gravidade local baseado na elipsóide WGS 84 dado por:

$$g^g = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \gamma(\varphi) \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

onde  $\varphi$  corresponde à latitude,

$$\gamma(\varphi) = g_o \frac{1 + 0.001931851353 \sin^2(\varphi)}{\sqrt{1 - 0.0066943800229 \sin^2(\varphi)}} \quad (3.2)$$

### 3.1.1 Referencial Inercial (*i-frame*)

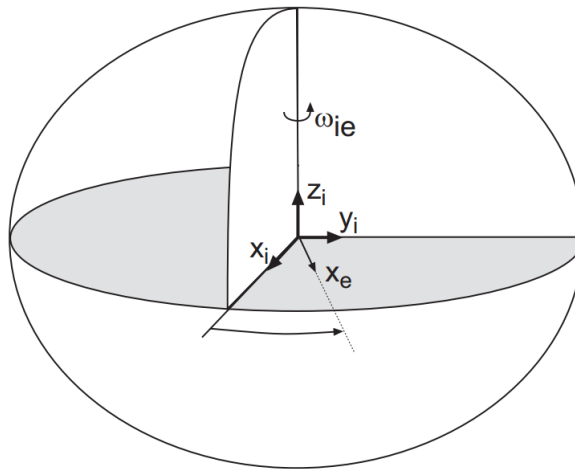
Um referencial inercial pode ser definido como sendo um referencial para o qual se cumpre o movimento linear. A origem do sistema de coordenadas inercial é arbitrário e os eixos de coordenadas podem apontar em qualquer das três direções perpendiculares.

Todos os sensores inerciais produzem medidas relativas a um referencial inercial [11]. Um dos exemplos mais utilizados como um referencial inercial é o *Earth-Centered Inercial* (ECI). A origem das coordenadas do ECI é o centro de gravidade da Terra, sendo os três referenciais demonstrados na Figura 3.2.

$x^i$  - na direção do equinócio vernal;

$z^i$  - paralelo ao eixo de rotação da terra (interceta o Pólo Norte);

$y^i$  - definido pela regra da mão-direita do sistema de coordenadas ortogonais.



**Figura 3.2:** Referencial Inercial [11].

### 3.1.2 Earth Centered Earth Fixed (ECEF) (*e-frame*)

O ECEF pode ser expresso em duas formas: (i) retangular ou (ii) geodésicas (latitude, longitude, altura). A origem do referencial localiza-se no centro de massa da Terra, tal como o referencial ECI, no entanto, com uma rotação em torno do eixo  $z^i$ . A velocidade angular da Terra relativamente ao referencial inercial é dada por:

$$w_{ie} \approx \left( \frac{1 + 365.25 \text{ cycle}}{(365.25)(24) \text{ hr}} \right) \left( \frac{2\pi \text{ rad/cycle}}{3600 \text{ sec/hr}} \right) = 7.292115 \times 10^{-5} \frac{\text{rad}}{\text{sec}} \quad (3.3)$$

A forma retangular é expressa na forma cartesiana  $[x, y, z]^e$  sendo:

$x^e$  - posicionado no equador tendo o meridiano como referência;

$z^e$  - paralelo ao eixo de rotação da Terra (interceta o Pólo Norte);

$y^e$  - definido pela regra da mão-direita do sistema de coordenadas ortogonais.

O sistema de coordenadas *geodetic* é um dos sistemas mais utilizados na navegação, utilizando o modelo da Terra em forma de elipsoide. O sistema de coordenadas é expresso por  $[\varphi, \lambda, h]^e$  latitude, longitude, altitude, respetivamente. A latitude é expressa em graus ou radianos, sendo o ângulo obtido a partir do plano equatorial até ao ponto de interesse. A longitude também é expressa por graus ou radianos, sendo obtida a partir do *prime* meridiano até o ponto de interesse. Por fim, a altitude é expressa em metros e corresponde à distância entre a elipsoide e o ponto de interesse (ver Figura 3.3).

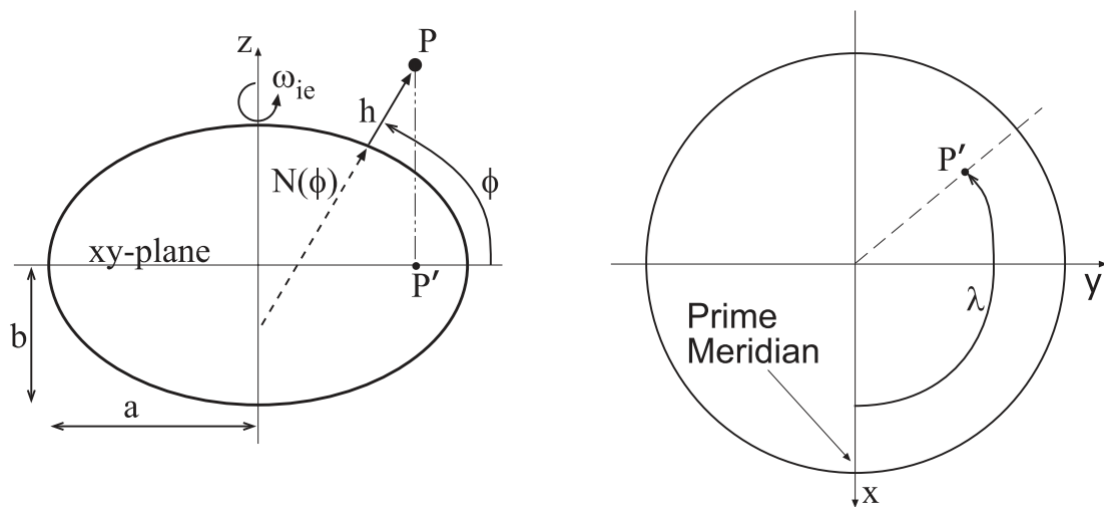
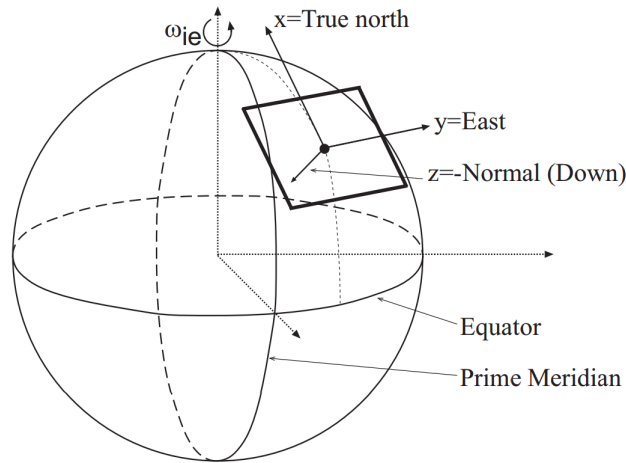


Figura 3.3: Sistema de coordenadas geodésicas [11].

### 3.1.3 Referencial Local (*n-frame*)

Um referencial local, também designado por LTP (*Local Tangent Plane*), consiste numa superfície plana tangencial num ponto na Terra onde a navegação decorre. Os referenciais locais mais utilizados são NED (*North-East-Down*) e ENU (*East-North-Up*), sendo o referencial NED mais utilizado para veículos aéreos e subaquáticos e ENU para veículos terrestres. A origem dos sistemas locais pode ser estabelecida em qualquer ponto do globo terrestre, sendo que, no caso do referencial local NED, o eixo  $x_n$  aponta para Norte,  $y_n$  para Este, e  $z_n$  para o centro da Terra. No caso do referencial local ENU,  $x_n$  aponta para Este  $y_n$  para Norte e  $z_n$  para cima. Na Figura 3.4 está representado o referencial NED em relação ao ECEF.



**Figura 3.4:** Referencial Local NED em relação ao referencial ECEF [11].

### 3.1.4 Referencial do Corpo (*b-frame*)

Em sistemas de localização, o objetivo é determinar a posição de um veículo, baseado nas medidas de um ou mais sensores. Para isso, é necessário definir, em cada sensor e veículo, um sistema de coordenadas denominado por referencial do corpo (*b-frame*). A origem do referencial é localizado, normalmente, no centro de massa de cada sistema e a sua orientação é relativamente a um referencial local ou global. A orientação pode ser expressa em ângulos de Euler *roll*( $\phi$ ), *pitch*( $\theta$ ) e *yaw* ou *heading*( $\psi$ ) em torno dos eixos  $x^b, y^b, z^b$ . Na navegação aquática, o movimento longitudinal é denominado por *surge*, o transversal por *sway* e o vertical *heave*. Na Figura 3.5 apresenta-se o referencial do corpo e as orientações relativamente a um referencial global.

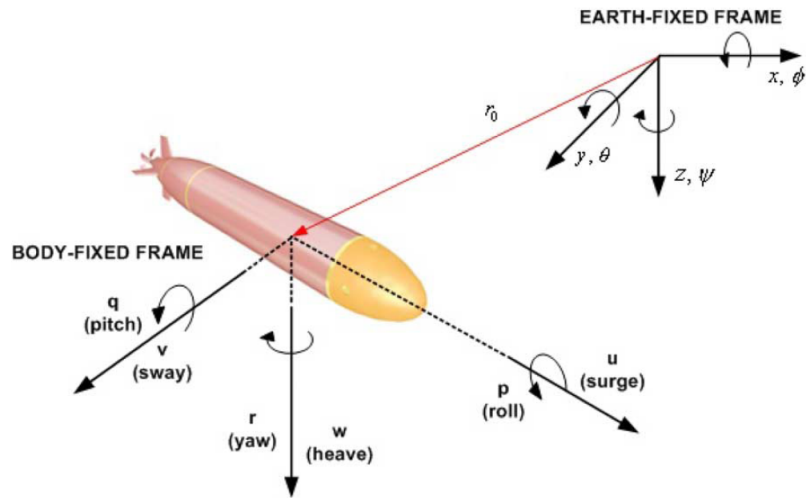


Figura 3.5: Referencial do Corpo (body frame) [39].

Sendo cada eixo definido por:

$x^b$ - o movimento linear longitudinal (*surge*);

$y^b$ - o movimento linear transversal (*sway*).

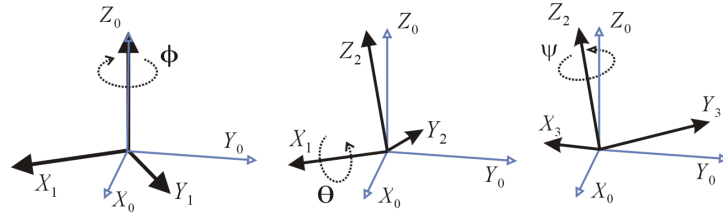
$z^b$ - o movimento linear vertical (*heave*) ;

## 3.2 Rotações tridimensionais

Existem várias formas de representar a orientação 3D, sendo que nesta secção serão abordados os ângulos Euler e quaterniões.

### 3.2.1 Ângulos de Euler

Os ângulos de Euler é o método mais utilizado, pois é o mais perceptível para o ser humano. O método de ângulos de Euler foi definido por Leonhard Euler e serve para representar a orientação de um corpo rígido num espaço euclidiano tridimensional. A orientação é descrita em três ângulos, um por cada eixo de um plano cartesiano  $(x, y, z)$ , sendo denominada por *roll* ( $\phi$ ), *pitch* ( $\theta$ ) e *yaw* ( $\psi$ ), respetivamente. Na Figura 3.6 encontra-se representado o método de ângulos Euler.



**Figura 3.6:** Representação dos ângulos de Euler<sup>1</sup>.

A rotação em torno do eixo  $X$  ( $\phi$ ) é expressa matematicamente através da seguinte matriz:

$$R_x(\phi) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi \\ 0 & \sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

A rotação em torno do eixo  $Y$  ( $\theta$ ) é expressa matematicamente através da seguinte matriz:

$$R_y(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

E, por fim, a rotação em torno do eixo  $Z$  ( $\psi$ ) é demonstrada matematicamente através da seguinte matriz:

$$R_z(\psi) = \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

A seqüência de três rotações uma por cada eixo é dada por:

$$R(\phi, \theta, \psi) = R_x(\phi)^T R_y(\theta)^T R_z(\psi)^T \quad (3.7)$$

$$= \begin{bmatrix} \cos \theta \cos \psi & \cos \theta \sin \psi & -\sin \theta \\ \sin \phi \sin \theta \cos \psi - \cos \phi \sin \psi & \sin \phi \sin \theta \sin \psi + \cos \phi \cos \psi & \sin \phi \cos \theta \\ \cos \phi \sin \theta \cos \psi + \sin \phi \sin \psi & \cos \phi \sin \theta \sin \psi - \sin \phi \cos \psi & \cos \phi \cos \theta \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

No seguimento da matriz anterior, os ângulos de Euler são obtidos a partir da

<sup>1</sup><http://math.stackexchange.com/questions/6720/calculate-euler-yaw-pitch-and-roll-for-a-3d-point-to-face-another>, acessado 10/10/2016.

seguinte equação:

$$\begin{bmatrix} \phi \\ \theta \\ \psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{atan2}(R_{23}, R_{33}) \\ -\text{asin}(R_{13}) \\ \text{atan2}(R_{12}, R_{11}) \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

### 3.2.2 Quaterniões

Os quaterniões é um outro método de representar a orientação tridimensional de um corpo. Ao contrário dos ângulos de Euler, os quaterniões não são intuitivos para o ser humano. Todavia, os quaterniões resolvem as singularidades denominadas por *gimballock* dos ângulos de Euler e reduzem o custo computacional quando é realizada qualquer tipo de rotação.

Os quaterniões são representados por:

$$q = [q_0, q_1, q_2, q_3]^T = \begin{bmatrix} q_0 \\ q_{1:3} \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

onde  $q_0$  é um escalar e  $q_1, q_2, q_3$  um número complexo.

$$\|q\| = \sqrt{q_0^2 + q_1^2 + q_2^2 + q_3^2} \quad (3.11)$$

$$q^{-1} = \frac{q}{\|q\|} \quad (3.12)$$

A relação de quaterniões para ângulos de Euler é dada por:

$$q = \begin{bmatrix} q_0 \\ q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \frac{\phi}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{\psi}{2} + \sin \frac{\phi}{2} \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{\psi}{2} \\ \sin \frac{\phi}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{\psi}{2} - \cos \frac{\phi}{2} \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{\psi}{2} \\ \cos \frac{\phi}{2} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\psi}{2} + \sin \frac{\phi}{2} \cos \frac{\theta}{2} \sin \frac{\psi}{2} \\ \cos \frac{\phi}{2} \cos \frac{\theta}{2} \sin \frac{\psi}{2} - \sin \frac{\phi}{2} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\psi}{2} \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

Por fim, de acordo com a sequência de rotações da equação 3.8  $R_x, R_y, R_z$  a matriz rotação em quaterniões é dada por:

$$R = \begin{bmatrix} -q_3^2 - q_2^2 + q_1^2 + q_0^2 & 2(q_1q_2 - q_0q_3) & 2(q_1q_3 + q_0q_2) \\ 2(q_0q_3 + q_1q_2) & -q_3^2 + q_2^2 - q_1^2 + q_0^2 & 2(q_2q_3 - q_0q_1) \\ 2(q_1q_3 - q_0q_2) & 2(q_2q_3 + q_0q_1) & q_3^2 - q_2^2 - q_1^2 + q_0^2 \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

### 3.3 Transformação de Referenciais

As transformações entre referenciais permitem representar um vetor em diferentes sistemas de coordenadas, isto é, trata-se de converter um vetor representado num determinado referencial para outro referencial. Existe uma vasta quantidade de técnicas que possibilitam a transformação de referenciais. De seguida, apresentam-se as diferentes transformações utilizadas ao longo deste estudo.

#### 3.3.1 Transformação ECEF

A transformação do sistema de coordenadas geodésicas  $(\varphi, \lambda, h)^e$  para cartesianas  $(x, y, z)^e$  de acordo com a norma WGS 84 é dada por:

$$P_e = \begin{bmatrix} x_e \\ y_e \\ z_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (R_N + h) \cos \varphi \cos \lambda \\ (R_N + h) \cos \varphi \sin \lambda \\ [(R_N(1 - e^2) + h) \sin \varphi] \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

onde a excentricidade ( $e$ ) é dada por:

$$e = \sqrt{\frac{a^2 - b^2}{a^2}} \quad (3.16)$$

$R_N$  raio da curvatura na primeira vertical:

$$R_N(\varphi) = \frac{a}{(1 - e^2 \times \sin^2(\varphi))^{\frac{1}{2}}} \quad (3.17)$$

e  $R_M$  o raio da curvatura do meridiano da elipsoide:

$$R_M(\varphi) = \frac{a(1 - e^2)}{(1 - e^2 \sin^2(\varphi))^{\frac{3}{2}}} \quad (3.18)$$

Assim, pode-se expressar a latitude, longitude e altura em coordenadas cartesianas ECEF.

#### 3.3.2 Transformação ECEF para NED

Para realizar a transformação de coordenadas ECEF para coordenadas locais NED, é necessário deter as coordenadas em ECEF retangulares e ECEF geodésicas. Na

equação 3.19 demonstra-se a relação entre os dois sistemas de coordenadas.

$$P_n = R_e^n (P_e - P_{e,ref}) \quad (3.19)$$

$$R_e^n = \begin{bmatrix} -\sin \varphi_{ref} \cos \lambda_{ref} & -\sin \varphi_{ref} \sin \lambda_{ref} & \cos \varphi_{ref} \\ -\sin \lambda_{ref} & \cos \lambda_{ref} & 0 \\ -\cos \varphi_{ref} \cos \lambda_{ref} & -\cos \varphi_{ref} \sin \lambda_{ref} & \sin \varphi_{ref} \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

onde  $P_n$  corresponde às coordenadas NED,  $P_{e,ref}$  à posição original das coordenadas NED expressas em ECEF,  $P_e$  coordenadas ECEF e  $R_e^n$  a matriz de rotação das coordenadas ECEF para NED [40].

### 3.3.3 Transformação Corpo (*b-frame*) para Navegação (*n-frame*)

A relação entre o sistema de coordenadas de navegação para o sistema de coordenadas do corpo é dada por uma rotação. Assumindo que o sistema de coordenadas do corpo é denominado por  $v_b$  a transformação é dada por:

$$v_b = R_b^n v_n; \quad (3.21)$$

onde a matriz  $R_b^n$  é a matriz de rotação transposta da equação 3.8 dada por:

$$R_b^n = \begin{bmatrix} \cos \theta \cos \psi & -\cos \phi \sin \psi + \sin \phi \sin \theta \cos \psi & \sin \phi \sin \psi + \cos \phi \sin \theta \cos \psi \\ \cos \theta \sin \psi & \cos \phi \cos \psi + \sin \phi \sin \theta \sin \psi & -\sin \phi \cos \psi + \cos \phi \sin \theta \sin \psi \\ -\sin \theta & \sin \phi \cos \theta & \cos \phi \cos \theta \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

## 3.4 Filtro de Kalman Estendido (EKF)

O EKF é uma versão do filtro de Kalman para sistemas não lineares. Consiste num algoritmo recursivo que permite estimar um vetor de estados que caracteriza um modelo de um sistema. Ao contrário do algoritmo dos mínimos quadrados, em que oferece uma estimativa baseando-se apenas nas medições atuais, o EKF combina as observações atuais com as previsões do estado atual obtido e as suas anteriores. O EKF é composto por duas fases:

1. **Previsão;**
2. **Atualização.**

## Previsão

Na fase da previsão prevê-se o estado estimado e a respetiva covariância.

- Estado estimado previsto:

$$\hat{x}_{k|k-1} = f(\hat{x}_{k-1|k-1}, u_{k-1}) \quad (3.23)$$

Onde  $\hat{x}_{k|k-1}$  é o estado a prever,  $f$  a função que relaciona o modelo de previsão e  $u_{k-1}$  medidas recebidas do estado anterior.

- Covariância estimada prevista:

$$P_{k|k-1} = F_{k-1}P_{k-1|k-1}F_{k-1}^T + G_{k-1}Q_{k-1}G_{k-1}^T \quad (3.24)$$

Sendo,  $P_{k|k-1}$  a covariância prevista,  $F_k$  a matriz jacobiana do modelo de previsão,  $G$  a matriz jacobiana que relaciona os erros com os estados e  $Q$  a matriz de ruído.

## Atualização

Na fase da atualização os estados previstos e a covariância são atualizados de acordo com as observações disponíveis.

- **Inovação** - Consiste na diferença entre as atuais observações ( $z_k$ ) e os estados atuais previstos ( $\hat{x}_{k|k-1}$ ).

$$\bar{y}_k = z_k - h(\hat{x}_{k|k-1}) \quad (3.25)$$

- **Covariância da Inovação** - Indica o nível de incerteza relativamente à inovação, sendo  $R_k$  a matriz de ruído do *update*.

$$S_k = H_k P_{k|k-1} H_k^T + R_k \quad (3.26)$$

- **Ganho de Kalman** - Indica o peso de aceitação do sistema relativamente à nova medida.

$$K_k = P_{k|k-1} H_k^T S_k^{-1} \quad (3.27)$$

- **Estado Estimado**

$$\hat{x}_{k|k} = \hat{x}_{k|k-1} + K_k \bar{y}_k \quad (3.28)$$

- **Covariância Estimada** - Incerteza do estado estimado.

$$P_{k|k} = P_{k|k-1} - K_k S_k K^T \quad (3.29)$$

A função  $h$  correlaciona os estados previstos com as medidas de *update*, sendo  $H_k$  o jacobiano da função  $h$ .

# 4

## Sensores subaquáticos

Neste capítulo apresentam-se alguns sensores subaquáticos, dos quais os sensores inerciais, CTD (*Conductivity Temperature Depth*), DVL, GNSS USBL, SBL e LBL. Na Tabela 4.1 apresentam-se as principais características de alguns dos sensores mais usados na localização subaquática.

**Tabela 4.1:** *Sensores mais usados na localização subaquática*

Sensor	Tipo de Medida	Taxa de Dados	Precisão	Alcance
Altímetro	Altitude- $Z$	1 – 10Hz	0.01 – 1.0m	varia
Sensor de Pressão	Profundidade- $Z$	1 – 10Hz	0.01%FS	ilimitado
Inclinómetros	<i>Roll &amp; Pitch</i>	1 – 10Hz	0.1°- 1°	+/-45°
Bússola	<i>Yaw</i>	1 – 10Hz	1°- 10°	360°
IMU	Aceleração $XYZ$ Vel. Angulare $XYZ$	1 – 1000Hz	varia	-
DVL	Velocidade $XYZ$	1 – 25Hz	< 0.3%	< 175m
LBL 300kHz	Posição $XYZ$	1 – 10Hz	+/- 0.02m	100m
LBL 12kHz	Posição $XYZ$	0.1 – 1Hz	0.1 – 10m	5 – 10km
USBL 42 – 65kHz	Posição $XYZ$	1 – 2Hz	0.01m/0.1°	2000m

### 4.1 Conductivity Temperature Depth (CTD)

O CTD é um dispositivo que possui vários sensores com o intuito de fornecer os parâmetros relativamente à constituição da água, sendo eles condutividade, tem-

peratura e pressão. Através destes parâmetros é possível determinar a salinidade da água e, por sua vez, perceber a densidade do meio aquático. A salinidade e a densidade da água são parâmetros extremamente importantes para corrigir erros associados aos sensores acústicos. A profundidade de um determinado veículo subaquático, pode ser determinada usando a equação 4.1, que depende diretamente da pressão e da densidade da água.

$$pf = \frac{P - P_0}{\rho g_0} \quad (4.1)$$

onde  $pf$  a profundidade,  $P, P_0$  pressão na água e pressão atmosférica respectivamente,  $\rho$  densidade da água.

Dependendo da exatidão requerida e do ambiente de operação, a densidade da água pode ser assumida como uma constante, puramente proporcional à pressão, no entanto, quando a operação é realizada em grandes diferenças de profundidade é necessário contabilizar esses parâmetros. Por fim, os sistemas de localização terrestres e aéreos possuem o maior erro no eixo  $z$  (vertical), já na localização subaquática este é menor, pois através do CTD ou sensores de pressão, as medidas são absolutas, obtendo precisões abaixo dos centímetros.

## 4.2 Inertial Measurement Unit (IMU)

Um IMU é, geralmente, constituído por três acelerómetros, giroscópios e, por vezes, magnetómetros ortogonais. A partir da integração deste tipo de sensores, utilizando a técnica DR, obtém-se a posição e a atitude, obtendo-se, assim, seis DOF (*Degree Of Freedom*).

Existem dois tipos de IMU: (1) *strapdown* e (2) *gimballed*. Num sistema *strapdown*, os sensores estão fixos numa base rígida, enquanto o *gimballed* consiste num sistema mecânico onde a plataforma gira em torno de um eixo. O IMU *gimballed* é mais pesado e consome mais energia, não sendo considerado apropriado para a maior parte dos AUV [41]. O aparecimento da tecnologia MEMS, em sistemas *strapdown*, tornou os sistemas mais pequenos e mais leves e reduziu o consumo energético e o custo monetário. Porém, são mais ruidosos que outras tecnologias ( FOG(*Fibre-Optic Gyroscope*), RLG(*Ring Laser Gyroscope*)), obtendo uma pior performance. As principais fontes de erro dos sensores inerciais devem-se a:

- **Imperfeição dos sensores** - são erros determinísticos causados por imperfeições dos sensores, sendo possível identificá-los com elevada precisão por processos de calibração.

- **Fator de escala** - relaciona o sinal medido dos sensores inerciais com o sinal de entrada, podendo idealmente ser modelado como uma constante.
- **Desalinhamento** - resultante das imperfeições de montagem devido à dificuldade de se obter a ortogonalidade entre sensores.
- **Distúrbios aleatórios** - são erros não determinísticos causados por fontes de erro da natureza, podendo apenas ser descritos através de processos estocásticos.
  - **Ruído ou ARW (*Angle Random Walk*)** - é ruído branco de alta frequência que interfere na medida do sensor, podendo ser filtrado.
  - **Bias** - é a principal componente de ruído dos sensores inerciais, sendo ele definido como uma componente de saída, não relacionada com a entrada.

Como já referido anteriormente, o Bias é a principal fonte de erro dos sensores e possui características determinísticas e estocásticas, podendo ser estimado para melhorar o desempenho de um sistema inercial.

O bias pode ser dividido em três componentes :

- Bias *offset* - é determinístico e não variante no tempo, sendo estimado no processo de calibração;
- Bias repetibilidade - consiste num valor constante, mas é alterado sempre que existe um processo de liga/desliga;
- Bias instabilidade - é um erro aleatório numa baixa frequência, podendo ser estimado pelo processo de Markov de primeira ordem.

Muitas vezes o bias de instabilidade juntamente com o bias de repetibilidade é denominado por **Bias drift**, sendo o **bias** = bias *offset* + bias *drift* [42]. Existem vários métodos para quantificar a magnitude e o tipo de erros associados aos sensores inerciais (e.g. PSD(*Power spectral density*), KF, *Allan Variance*) [43, 44]. Tipos de erros, tais como, *quantization noise*, *angle random walk*, instabilidade do bias, ARW e *rate ramp*, são caracterizados pela inclinação da reta fornecida pelo método Allan Variance ao longo do tempo ( $\tau$ ), conforme podemos visualizar na Figura 4.1.

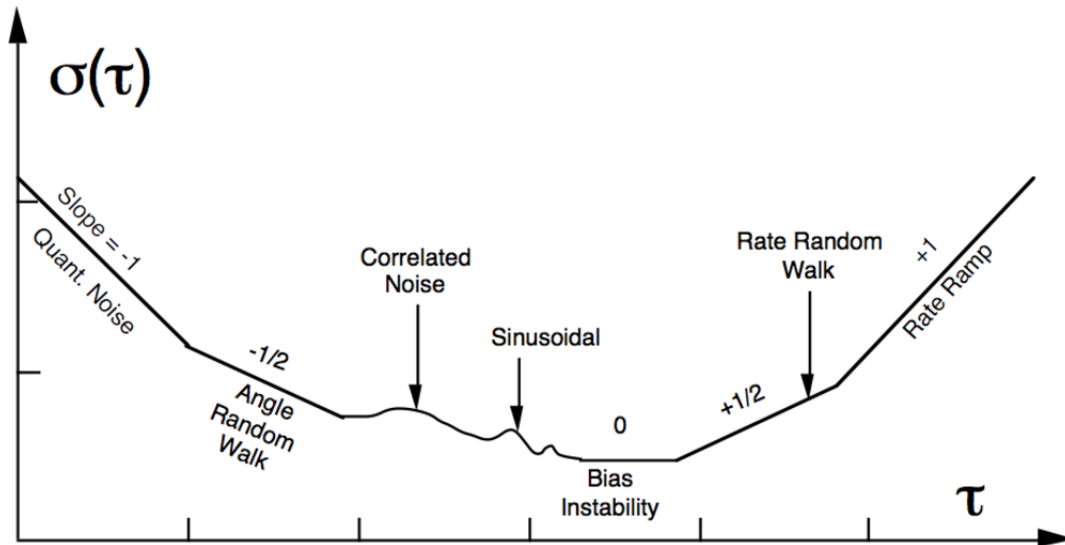


Figura 4.1: Representação gráfica de Allan Variance [45].

#### 4.2.1 Acelerómetros

Os acelerómetros são sensores que fornecem a aceleração linear, ou seja, medem a aceleração no corpo e a conseqüentemente aceleração gravitacional, sendo necessário compensar a aceleração gravitacional, obtendo assim, a força específica definida na equação 4.2:

$$f = a - g \quad (4.2)$$

onde  $f$  corresponde ao vetor de força específica,  $a$  ao vetor aceleração relativamente a um referencial e  $g$  à aceleração gravítica [46].

#### 4.2.2 Giroscópios

Os giroscópios utilizados em sistemas *strapdown* fornecem a velocidade angular em relação ao referencial inercial. Para obter o ângulo de rotação é necessário integrar a velocidade angular. O giroscópio pode utilizar a tecnologia MEMS ou ótica. A tecnologia ótica contém dois tipos de giroscópios, FOG (*Fibre-Optic Gyroscope*) e RLG (*Ring Laser Gyroscope*), partilhando o mesmo princípio de funcionamento, baseando-se na distorção da luz, a qual passa através de uma bobina. Os giroscópios óticos são de alta performance, pois possuem um baixo ARW, a intabilidade de bias é extremamente baixa e possuem menor sensibilidade às mudanças de temperatura e vibração em relação à tecnologia MEMS. Na Tabela 4.2 demonstra-se a performance

de um giroscópio FOG *versus* giroscópio MEMS da empresa KVH.

**Tabela 4.2:** Comparação da performance de um giroscópio da tecnologia FOG *versus* MEMS da empresa KVH [4].

Performance	Unidades	FOG	MEMS
Máx. Input Rate	$\pm^\circ/sec$	$\pm 490$	$\pm 400$
ARW	$^\circ/h\sqrt{Hz}$	$\leq 0.667$	$\leq 9$
Bias Offset (25°C)	$\pm^\circ/h$	$\pm 2$	$\pm 250$
Bias Instabilidade (temp. const.)	$^\circ/h, 1\sigma$	$\leq 0.05$	$\leq 1$
Bias Vibration	$^\circ/h/grms$	$\leq 0.3$	$\leq 1$

### 4.3 Doppler Velocity Log (DVL)

O DVL é um sensor subaquático utilizado em vários veículos marítimos, desde embarcações de grande porte até ROV e AUV. Este sensor é um dos mais usados para navegar através da técnica denominada por DR [26], podendo fornecer velocidades com grande precisão, tamanho reduzido e baixo consumo [47]. Utiliza o efeito de *Doppler* para obter as medidas de velocidade, ou seja, através da distorção de frequência entre o sinal acústico emitido e o recebido, obtém-se a velocidade relativamente ao objeto refletido. Para obter a velocidade, este sensor utiliza o fundo do oceano (*bottom-lock*), porém quando o fundo está fora do local de operação (tipicamente  $< 200m$ ), pode utilizar a coluna de água (*water-lock*). No entanto, quando utiliza a coluna de água como referência existe uma grande incerteza associada à medida pois as correntes do oceano [48] introduzem ruído na medida. O DVL, normalmente, é constituído por quatro transdutores orientados a,  $20^\circ$ ,  $25^\circ$  ou  $30^\circ$  a partir de um plano horizontal denominado por *Piston Array*. Para obter as velocidades no corpo num plano cartesiano  $(x, y, z)$  é necessário realizar uma transformação a partir da seguinte equação [49]:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} ca(b^1 - b^2) \\ ca(b^4 - b^3) \\ b(b^1 + b^2 + b^3 + b^4) \\ d(b^1 + b^2 - b^3 - b^4) \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

onde

$$a = \frac{1}{2\sin\theta}, \quad b = \frac{1}{4\cos\theta}, \quad c = \begin{cases} 1, & \text{convex transducer head} \\ -1, & \text{concave transducer head} \end{cases}, \quad d = \frac{a}{\sqrt{2}}$$

sendo  $\theta$  a orientação do transdutor,  $x, y, z$ , as velocidades nos três eixos, e  $e$  repre-

senta o erro das velocidades tendo em conta a qualidade do sinal recebido. Devido à sua construção (quatro transdutores distintos), as velocidades estão correlacionadas com um erro associado, pois os quatro transdutores não estão orientados exatamente com o mesmo ângulo e não estão perfeitamente ortogonais [26]. No entanto, a empresa Teledyne RD Instruments criou um novo tipo de DVL, os *Phased Array*, para além de serem perfeitamente ortogonais e não necessitarem de correções angulares, o tamanho, o peso e o ruído são menores e o alcance e a precisão aumentam, pois essa nova tecnologia contém apenas um transdutor. Na Figura 4.2 e na Tabela 4.3 são demonstradas as principais diferenças do *Doppler Velocity Log Explorer 600KHz phased array* versus *piston array*.



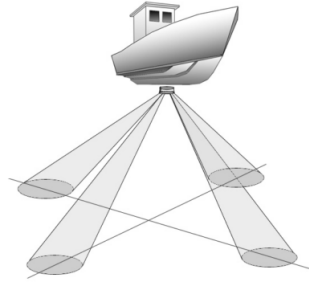
**Figura 4.2:** *DVL Phased Array & Piston Array da Teledyne*

**Tabela 4.3:** *Comparação das especificações técnicas do DVL 600KHz Phased Array Explored vs DVL 600KHz Piston Array Explored*

Especificações	Phased Array	Piston Array
Máx Altitude	81m	66m
<i>Long-term Accuracy</i>	$\pm 0.3\% \pm 0.2cm/s$	$\pm 0.5\% \pm 0.2cm/s$
Precisão @ $3m/s^2$	$\pm 1.8cm/s$	$\pm 1.9cm/s$
Precisão @ $5m/s^2$	$\pm 2.6cm/s$	$\pm 2.8cm/s$
Ângulo Transdutor	30° nominal	30°

Tipicamente, o sensor é instalado com os transdutores voltados para o fundo do oceano, sendo orientados no veículo, um para a frente, outro para trás, outro para a direita e, por fim, o último para a esquerda (ver Figura 4.3), sendo denominada por configuração de Janus. Como tal, é necessário rodar o DVL 45° no eixo vertical,

assim, a velocidade é distribuída uniformemente pelos quatro transdutores. Com esta configuração rejeitam-se os erros associados às velocidades horizontais causados por oscilações em *pitch* e *roll* [50].



**Figura 4.3:** Configuração de Janus

Quanto maior a frequência, melhor será a precisão, porém o alcance será menor. Na Tabela 4.4 demonstra-se o alcance e a precisão em função da frequência do *Workhorse Navigator DVL*.

**Tabela 4.4:** Alcance e precisão em função da frequência do *Workhorse Navigator DVL* [5]

Frequência	<i>Long-term Accuracy</i>	Min. Alcance	Máx. Alcance
300KHz	$\pm 0.4\% \pm 0.2\text{cm/s}$	1m	200m
600KHz	$\pm 0.2\% \pm 0.1\text{cm/s}$	0.75m	90m
1200KHz	$\pm 0.2\% \pm 0.1\text{cm/s}$	0.25m	25m

As principais fontes de erro do DVL num sistema de localização são:

- **Alinhamento** - alinhamento físico entre referenciais (e.g DVL $\Leftrightarrow$ AHRS);
- **Atitude** - orientação do DVL face ao referencial de navegação errada causando *drift* nas medidas estimadas;
- **Scatering** - quando o ângulo de incidência da onda acústica ao fundo do oceano não é o ideal, resultando em multi-caminhos e multi-ecos.
- **Refração** - quando a trajetória da onda acústica não se propaga retilineamente, causada por diferentes temperaturas e densidade da água na trajetória da onda acústica;
- **Time Stamp** - caso exista acelerações e rotações, o mínimo erro no sincronismo causa erros nas velocidades;

- **Velocidade do Som** - a velocidade do som na água é proporcional à velocidade medida pelo DVL, sendo dada por:

$$vel_{correta} = vel_{errada} \times \frac{C_{real}}{C_{dvl}} \quad (4.4)$$

## 4.4 Global Navigation Satellite System (GNSS)

Com o surgimento dos sistemas GNSS, a localização no meio terrestre e aéreo melhorou drasticamente, no entanto, a operação na água ou dentro de estruturas impossibilita o uso do sistema de posicionamento GNSS, pois as ondas eletromagnéticas não se propagam a distâncias aceitáveis ( $< 10m$ ). Contudo, na água é possível o uso GNSS, se o robô operar em zonas de águas pouco profundas que possibilite o AUV subir até à superfície regularmente [51] e obter medidas GNSS. O GNSS possui a capacidade de oferecer com precisão e segurança, a velocidade e posição em coordenadas geográficas (e.g. altitude, latitude e longitude) de um determinado objeto que se encontre situado na Terra ou próximo desta [52]. O termo GNSS foi utilizado pela primeira vez em 1991 pela Associação Internacional de Aviação Civil, para designar todos os sistemas de posicionamento por satélites artificiais, com o objetivo de disponibilizar uma cobertura contínua e global em todo o território terrestre.

Estes sistemas são utilizados por militares, empresas e, até mesmo, por particulares para diversos fins, desde a navegação, localização, mapeamento e medição de tempo.

Atualmente, existem vários sistemas de posicionamento global, tais como:

- **GPS** - Desenvolvido pelos EUA e operacional desde 1978, mas apenas disponível globalmente a partir de 1994. Este foi o primeiro sistema de GNSS e atualmente é um dos sistemas de navegação mais utilizados.

- **Glonass** - Criado pela antiga União Soviética e agora Rússia, foi colocado em operação em 1995, sofreu algumas falhas de cobertura durante a queda da União Soviética, mas foi recuperado e totalmente restaurado em 2011.

- **Galileo** - Sistema criado pela União Europeia, concebido desde o seu início como um projeto civil, ao contrário do GPS e Glonass. Os primeiros sinais foram validados em Janeiro de 2006, pelo satélite GIOVE-A, enviado em Dezembro de 2005. Prevê-se que, até 2019, o sistema esteja completamente funcional. Uma das novidades deste sistema é a capacidade de transmitir e confirmar pedidos de ajuda em caso de emergência.

- **Compass** - Também conhecido por BeiDou 2, tornou-se operacional apenas com cobertura na China, em Dezembro de 2011 com 10 satélites, estando previsto

cobertura global até 2020 [53].

**Tabela 4.5:** *Comparação entre GNSS*

Sistema	GPS	GLONASS	GALILEO	COMPASS
Proprietário	EUA	RUSSIA	União Europeia	China
Codificação	CDMA	FDMA/CDMA	CDMA	CDMA
Altura de Órbita	20.180 KM	19.130 KM	23.220 KM	21.150 KM
Período	11h 58m	11h 16m	14h 5m	12h 38m
Número de Satélites	Mínimo 24	31	4 em órbita	30 em órbita
Frequência	1.57542 GHz (L1 signal) 1.2276 GHz (L2 signal)	Around 1.602 GHz (SP) Around 1.246 GHz (SP)	1.164–1.215 GHz (E5a and E5b) 1.260–1.300 GHz (E6) 1.559–1.592 GHz (E2-L1-E11)	1.561098 GHz (B1) 1.589742 GHz (B1-2) 1.20714 GHz (B2) 1.26852 GHz (B3)
Estado	Operacional	Operacional, mas com CDMA em preparação	Em Preparação	15 Satélites Operacionais

Os sistemas GNSS necessitam de quatro satélites para obter a posição, três satélites para realizar a triangulação e um para sincronizar o relógio do recetor, pois os sistemas GNSS não medem distâncias diretamente mas sim o tempo de propagação da onda eletromagnética. A precisão obtida no posicionamento GNSS depende da minimização ou da eliminação de erros sistemáticos e dos ruídos que afetam as medidas. Os erros comuns de um sistema GNSS são:

- **Relógio**

- satélites - referem-se ao não sincronismo dos relógios dos satélites com o sistema de tempo GNSS, em que a diferença pode ser no máximo de  $1ms$ , que se pode traduzir num erro de pseudodistância de 300Km;
- recetor - provém do atraso do oscilador interno desses relógios, que diferem do tempo GNSS. Estes erros podem ser elevados em comparação com os erros dos relógios dos satélites e têm que ser estimados durante a resolução.

- **Órbitas** - causam a diminuição da velocidade de propagação dos sinais GNSS. Com isso, as pseudodistâncias obtidas são maiores que as distâncias geométricas;
- **Atmosfera** - provoca atrasos de propagação que se traduzem em erros na pseudodistância. Estes atrasos crescem quando o ângulo de elevação do satélite diminui;
- **Multi-caminho** - resulta de sinais que chegam aos recetores vindos, não diretamente dos satélites, mas de reflexões de objetos mais ou menos próximos da antena ou da linha entre o recetor e o satélite. Estes multi-caminhos causam erros nas medidas das pseudodistâncias e de fase portadora, dependendo da geometria do cenário das antenas dos satélites e dos próprios objetos refletoras assim como o próprio material refletor.

Numa utilização simples do serviço GNSS, ou seja, apenas um recetor e a constelação de satélites, pode-se obter erros em posição na ordem dos 10m e 20ns para o tempo [52], devido aos erros como já foram relatados anteriormente. Em diversas aplicações é impossível ter esta grandeza de erro, o que torna necessário aumentar o grau de precisão.

Para obter maior precisão utilizam-se métodos para atenuar os erros referidos. Todos esses métodos na literatura são denominados por aumento de GNSS, usando estações base para obter correções. A aumento de GNSS subdivide-se em várias técnicas, das quais, SBAS(*Satellite Based Augmentation Systems*), GBAS(*Ground Based Augmentation System*), DGNS(*Differential Global Navigation Satellite System*), RTK(*Real Time Kinematic*), PPP(*Precise Point Positioning*), tendo elas diferentes alcances de operação e diferentes precisões. Na Figura 4.4 apresentam-se as técnicas de aumento em relação à precisão/distância de operação.

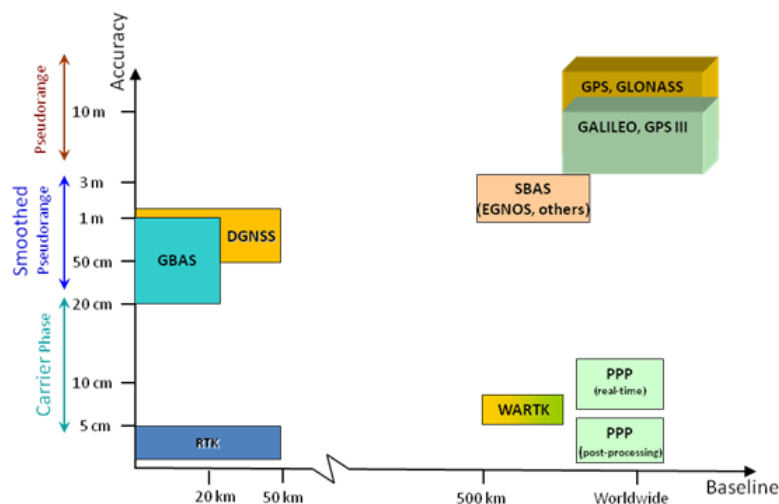


Figura 4.4: Precisão Aumento GNSS versus baseline<sup>1</sup>.

## 4.5 Localização acústica

Enquanto nos veículos aéreos e terrestres o problema de localização foi minimizado com o uso do GNSS, a localização subaquática requer uma alternativa devido à forte atenuação de ondas eletromagnéticas à tona da água. Assim, surgiram os sistemas de posicionamento acústico. O seu princípio de funcionamento baseia-se no tempo de propagação da onda acústica na água, ou seja, sabendo a velocidade do som na

<sup>1</sup>[http://www.navipedia.net/index.php/GNSS\\_Augmentation](http://www.navipedia.net/index.php/GNSS_Augmentation), acedido em 14/10/2016.

água é possível calcular a distância entre um emissor e um recetor. Porém, para obtermos a posição  $(x, y, z)$  no mínimo é necessário obter medidas de três emissores de modo a realizar triangulação. Existem três sistemas para calcular a posição, sendo eles classificados a partir da *baseline* formada entre os emissores referidos na Tabela 4.6.

**Tabela 4.6:** *Tamanho da Baseline e precisão em função do tipo de sistema acústico de posicionamento [6].*

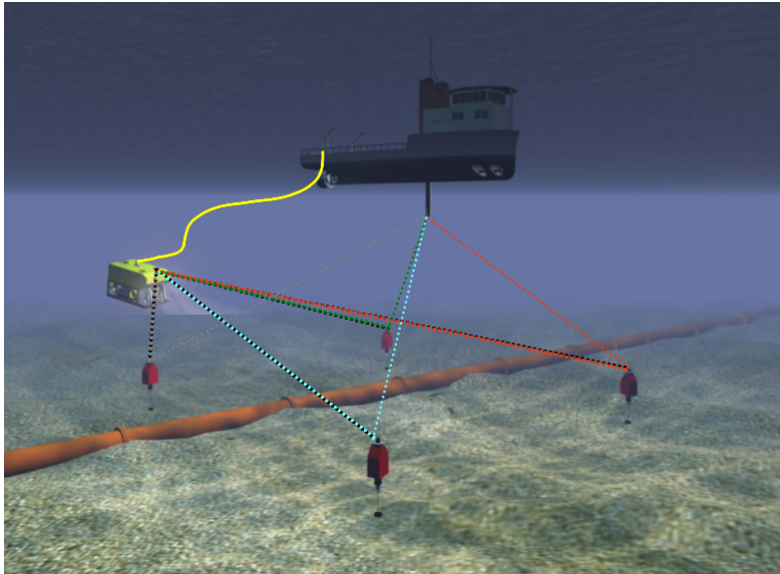
Tipo de sistema	Tamanho da <i>Baseline</i>	Precisão
<i>Ultrashort Baseline</i>	$< 10m$	0.2% <i>slant range</i>
<i>Short Baseline</i>	20m a 50m	0.5% profundidade
<i>Long Baseline</i>	100m a 6000m+	0.002m

#### 4.5.1 *Long-BaseLine* (LBL)

O LBL é o único sistema que usa os transdutores no fundo do oceano como ponto de referência para a localização. Dos três sistemas de posicionamento existentes, este é o que contém a maior *baseline* (ver Tabela 4.6). Geralmente, é definido um perímetro de operação onde o veículo irá operar [6]. Nas suas extremidades são colocados, no mínimo, três transdutores e, apenas, um no veículo, como é apresentado na Figura 4.5.

O sistema LBL utiliza a técnica *spheric navigation* ou a *hyperbolic*, sendo a *spheric navigation* a mais adotada, pois disponibiliza uma maior precisão [16]. Na técnica *spheric navigation*, o veículo interroga constantemente os transdutores georreferenciados e através do método RTD (*Round Trip Delay time*) calcula a distância ao transdutor que respondeu através do tempo de propagação, sabendo a velocidade do som na água. A posição do veículo é obtida através da técnica *trilateration* [7], ou seja, necessita pelo menos de três medidas de diferentes transdutores. Quanto maior o número de transdutores, maior é a precisão e redundância, porém maior é complexidade do sistema.

Por outro lado, o método *hyperbolic* contém um transdutor passivo no veículo, ou seja, só escuta (recebe), recebendo os sinais sincronizados ou com um *delay* conhecido, que são enviados pelos transdutores georreferenciados. A posição é obtida a partir da diferença de tempo de chegada TDOA (*Time Difference of Arrival*) dos sinais de, no mínimo, três transdutores. Como já foi referido anteriormente, o método *hyperbolic* disponibiliza menor precisão, no entanto, o consumo de energia no veículo é menor, pois o transdutor é passivo.



**Figura 4.5:** Configuração LBL [1].

A maioria dos sistemas LBL funcionam a  $10kHz$  de frequência, tendo uma precisão na ordem dos metros 1 a  $2m$  e um alcance de quilômetros ( $< 10Km$ ). No entanto, existem sistemas LBL de  $300kHz$  que podem obter posições de  $2cm$  de erro mas com um alcance reduzido ( $< 100m$ ) [9]. Em suma, abaixo, na Tabela 4.7 apresentam-se as vantagens e desvantagens do sistema LBL.

**Tabela 4.7:** Vantagens e desvantagens do sistema LBL [7].

Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> <li>• grande precisão independentemente da profundidade</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• instalação complexa</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• funcionamento em grandes áreas e profundidades</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• equipamento extremamente caro</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• apenas um transdutor no veículo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• tempo gasto na instalação do equipamento</li> </ul>

Em 1998, surgiu um novo conceito que utilizava o sistema LBL de forma invertida, denominado por GIB (*GPS Intelligent Buoy*) [54], em que sistema possui quatro hidrofones acoplados com um sistema DGPS (*Differential Global Positioning System*) como demonstra a Figura 4.6. Assim, através deste sistema não é necessário georreferenciar manualmente no fundo do oceano, uma vez que as bóias são georre-

ferenciadas em *real time* através do DGPS. A posição do veículo é calculada através da técnica *spheric navigation*. Com este método, o sistema torna-se mais flexível, mais prático e mais rápido na implementação. Como as boias estão em constante movimento, o veículo não consegue saber a sua posição, já que a posição é calculada através de uma estação base, não chegando a posição diretamente ao veículo.

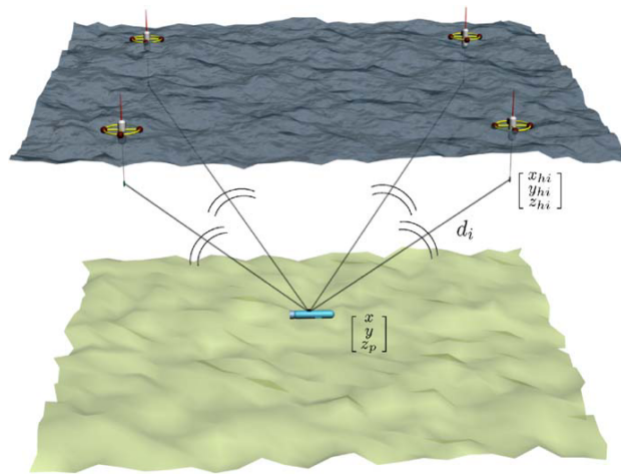
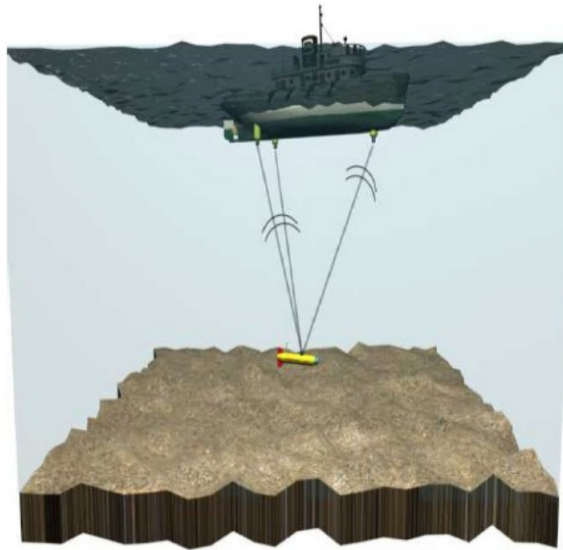


Figura 4.6: Configuração GIB [2].

#### 4.5.2 Short-BaseLine (SBL)

O sistema SBL é usado para localizar múltiplos veículos em movimento relativamente a transdutores fixos numa embarcação (barcos, navios) ou numa plataforma [7]. São no mínimo necessários três transdutores fixos na plataforma e um no veículo (ver Figura 4.7), sendo a precisão diretamente relacionada com a *baseline* formada entre os transdutores. Quanto maior for a *baseline* formada, melhor será a precisão, podendo obter precisões semelhantes relativamente ao sistema LBL [55]. Para obter a posição, o sistema SBL utiliza a técnica *trilateration* 4.5.1. Uma vez que o sistema SBL contém os transdutores fixos em plataformas móveis, este necessita de sensores adicionais para obter a posição absoluta (gyro, inclino-metros, AHRS), uma vez que o referencial encontra-se em constante movimento.



**Figura 4.7:** Configuração SBL [3].

Na Tabela 4.8 apresentam-se as vantagens e desvantagens do sistema SBL.

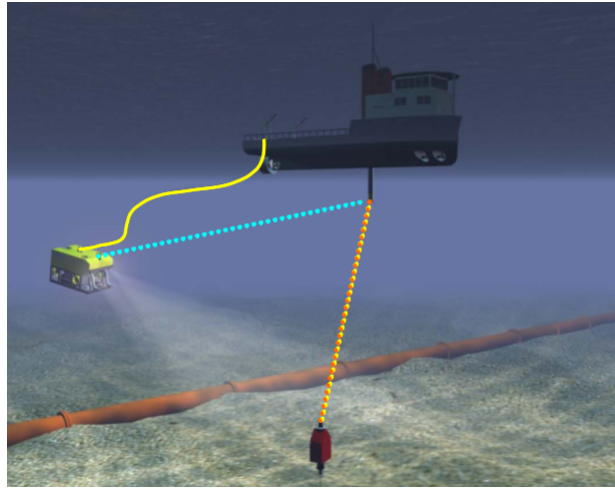
**Tabela 4.8:** Vantagens e desvantagens do sistema SBL [7].

Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> <li>• complexidade reduzida na implementação</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• necessita <i>baseline</i> grande para obter precisão (<math>&gt; 40m</math>)</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• transdutores com tamanho reduzido</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• necessidade de sensores adicionais para posição absoluta (AHRS)</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• redundância</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>\geq 3</math> transdutores são necessários para a <i>baseline</i></li> </ul>

### 4.5.3 Ultra-Short-BaseLine (USBL)

Dos sistemas de posicionamento acústico existentes, o USBL, também denominado por SSBL (*Super-Short BaseLine*), é o sistema mais utilizado em veículos autônomos, pois é de simples instalação, tamanho reduzido e baixo custo de implementação. O sistema USBL é composto por um *transceiver* e um *transponder*, sendo o *transceiver* que calcula a posição. A configuração clássica consiste em colocar o *transceiver* à tona de água numa embarcação, não sendo necessário estar fixo numa plataforma,

e o *transponder* no veículo (eg. AUV, ROV), tal como está ilustrado na Figura 4.8. No entanto, existe com a configuração tradicional o USBL, que tal como acontece no sistema SBL, a posição é calculada à tona da água na plataforma de operação, ou seja, o veículo não recebe a posição atual diretamente. No entanto, a configuração USBL invertido iUSBL traz vantagens para os veículos autónomos, não estando o *transceiver* a tona de água conseqüentemente o ruído será menor [28] e a latência de dados é eliminada, pois a posição é calculada no veículo e, conseqüentemente a precisão/exatidão melhora, pois elimina a incerteza relacionada com a latência dos dados de mensagens entre o sistema.



**Figura 4.8:** Configuração USBL [1].

Fisicamente, o *transceiver* é composto, no mínimo, por três transdutores, separados entre si por metade do comprimento de onda da frequência de operação do *transponder* (tipicamente  $< 10\text{cm}$ ) [56]. Devido à *baseline* ser extremamente pequena, o USBL necessita de utilizar dois métodos para obter a posição com alguma precisão. Para além do método TOA, utiliza a diferença de fase para obter a posição sendo o *transceiver* a interrogar e o *transponder* a responder [57]. Geralmente, o sistema USBL é usado para localizar veículos relativamente próximos ( $< 4\text{km}$ ) [7], pois a precisão é proporcional à distância formada entre os dois dispositivos (*transceiver*  $\iff$  *transponder*). Por fim, na Tabela 4.9 são mencionadas as principais vantagens e desvantagens deste sistema.

**Tabela 4.9:** *Vantagens e desvantagens do sistema USBL.*

Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"><li>• fácil instalação</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• necessidade de sensores adicionais para posição absoluta (AHRS) (<math>&gt; 40m</math>)</li></ul>
<ul style="list-style-type: none"><li>• apenas necessário um <i>transceiver</i></li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• precisão dependente do AHRS</li></ul>
<ul style="list-style-type: none"><li>• apenas necessário um <i>transponder</i></li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• suscetível ruído</li></ul>

# 5

## Sistema de localização subaquática

Com base no estudo realizado e apresentado no capítulo 2 e 4 verificou-se que um sistema de localização subaquático pode ser concebido tendo em conta diferentes abordagens. A exatidão/precisão e robustez do sistema versus o custo computacional e monetário dita como o sistema irá ser desenvolvido, no entanto, o tamanho dos sensores e a logística de operação são fatores com grande importância para a escolha e conceção do sistema.

Do ponto de vista de *hardware*, quase todos os sistemas possuem sensores inercias *strapdown* para a obtenção da atitude e da posição do veículo por DR . No entanto, devido à dupla integração, a posição degrada-se rapidamente, sendo necessário recorrer a outros sensores para uma correção. A preferência do DVL para executar o auxílio é avassaladora na literatura, pois consegue-se obter bons resultados, porém, o DVL mede velocidades e não a posição, obtendo a posição indiretamente por meio da integração.

Qualquer erro, seja no tempo da aquisição da medida, no alinhamento ou na rotação do sensor face ao referencial do veículo, é propagado no sistema degradado o desempenho do sistema de localização. Para tal é necessário um sensor ou sistema que forneça diretamente as posições. Os sistemas de localização acústica são o meio mais utilizado para esse fim. O LBL, versão 300kHz, é o sistema acústico que fornece melhor precisão, no entanto, o maior problema desse sistema é o tempo e a dificuldade imposta para a instalação do sistema na área da operação. Já o USBL é um sistema que oferece menor precisão que o LBL, no entanto, é o sistema ideal para os UUV,

pois é um sistema com um preço mais baixo, de simples instalação, necessitando somente de dois dispositivos (*traseiver* e *transponder*). Para os veículos UUV obterem o máximo de partido do USBL é necessário usá-lo no modo iUSBL para obter a posição com o mínimo de latência possível e, por sua vez, o sistema de localização obter uma maior precisão. Todavia, o sistema acústico possui menor performance no plano vertical, sendo utilizado o sensor de pressão para obter a posição em Z. Como já foi referido anteriormente, não é possível utilizar o sistema GNSS quando o veículo está submerso, mas apenas quando está à tona da água, trazendo inúmeras vantagens para o sistema de localização.

O *software* é dividido em três módulos, sendo um responsável pela calibração, outro pela obtenção da atitude e, por fim, outro que realiza a fusão sensorial para a obtenção da posição e velocidade (PV).

Na figura 5.1 apresenta-se, em forma de diagrama, a arquitetura geral do sistema de localização subaquática.

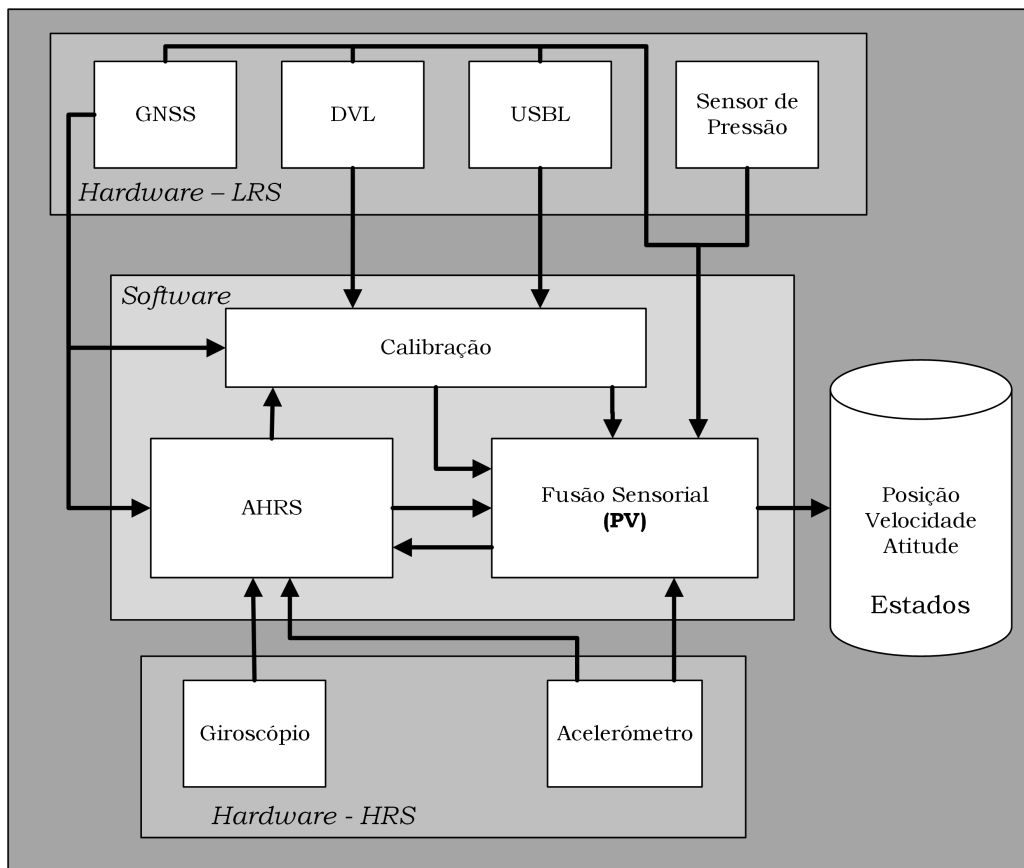


Figura 5.1: Arquitetura geral do sistema de localização subaquático.

Neste capítulo é explicada a construção e o funcionamento do sistema de localização tanto a nível de *hardware* como de *software*.

## 5.1 Descrição do Hardware

Conforme a arquitetura geral apresentada na figura 5.1, o *Hardware* é dividido em sensores HRS (*High Rate Sensors*) e LRS (*Low Rate Sensors*). Nos seguintes subcapítulos são descritas as características técnicas de cada sensor e a razão que esteve na base da escolha de cada um deles.

### 5.1.1 *Inertial Measurement Unit* (IMU)

Conforme foi explicado anteriormente, o uso de sensores inerciais em sistemas de localização são extremamente importantes, pois é através da integração que se obtêm a atitude do veículo e a posição por DR. A maioria dos sistemas de localização na literatura utiliza sensores inerciais *low-cost* com tecnologia MEMS, resultando elevado nível de ruído nos sensores. Um dos fatores mais relevantes para a obtenção de um sistema de localização com elevada exatidão é a obtenção correta da atitude. Nesse sentido, a utilização de giroscópio com tecnologia FOG é importante, pois melhor performance fornecerá ao sistema de localização subaquático. Um outro grande problema nos sistemas de localização subaquáticos, principalmente de operações em minas ou perto de máquinas fortemente magnéticas, é o uso do magnetómetros para obter o *yaw*, uma vez que a o campo magnético sofre distorções causados por materiais ferromagnéticos, motores e corrente elétrica e conseqüentemente, o sistema de localização irá estimar a orientação, de forma errada.

Em suma, o IMU deve possuir os seguintes requisitos:

- Giroscópio e Acelerómetro de baixo ruído (ARW, bias) de preferência da tecnologia FOG;
- robusto suscetível a pequenos impactos e possibilidade de salpicos de água;

Optou-se por adquirir o *Spatial* FOG da empresa Advanced Navigation (ver Figura 5.2).



**Figura 5.2:** *Spatial Fog Advanced Navigation* <sup>1</sup>.

Este, não só possui um IMU, como possui um sistema GNSS de duas portadoras (L1/L2) possibilitando o processamento em modo RTK e a fusão, em tempo real, dos dados inerciais (GNSS+IMU) provenientes do KVH 1750. Na tabela 5.1 apresentam-se a características técnicas do sensores inerciais.

**Tabela 5.1:** *Características técnicas do IMU da Advanced Navigation Spatial FOG*

Performance	Giroscópio	Acelerómetro
<i>Máx. Input Rate</i>	$490 \pm ^\circ/sec$	10g
ARW	$0.8^\circ/h/\sqrt{Hz}$	$120\mu g/\sqrt{Hz}$
Instabilidade do Bias	$0.05^\circ/h$	50 $\mu g$
<i>Data Rate</i>	1000Hz	1000Hz

Por fim, devido à elevada qualidade do giroscópio (instabilidade do bias e ARW baixo), é possível obter uma atitude com precisão e exatidão, através da integração das velocidades angulares dos giroscópios, no entanto é necessário compensar a rotação da Terra e inicializar corretamente a atitude. Com tais características os giroscópios apresenta a performance de um *north keeping*, a orientação irá manter-se correta por longos períodos de tempo sem necessitar de informação externa para

<sup>1</sup><http://www.advancednavigation.com.au/product/spatial-fog>, acedido em 19/10/2016.

corrigir.

Uma outra capacidade do giroscópio, embora não seja o foco desta dissertação, é a denominada por *north seeking*, ou seja, através da rotação da Terra é possível obter o *yaw* [58, 59].

### 5.1.2 *Doppler Velocity Log (DVL)*

De acordo com a oferta de mercado e mediante os requisitos impostos pelos projetos já mencionados, os principais requisitos são:

- precisão e exatidão nas medidas;
- *water lock*;
- tamanho reduzido (possibilidade de integração no TURTLE, UNEXMIN, HROV VAMOS);

Após uma análise do mercado optou-se por adquirir o DVL Teledyne Explorer 600kHz a versão *Phased Array Self Contained*. Esta versão, como já foi explicada no capítulo 4, não necessita de calibração na geometria dos *beams* devido ao facto de não existir *beams* físicos distintos sendo um só *beam* físico. Para além disso, possui *water lock*, ou seja, mesmo que não alcance o fundo do oceano para obter medidas, utiliza a coluna de água para o efeito, no entanto, quando opera nesse modo a exatidão da medida é menor. Na tabela 5.2 estão presentes as especificações técnicas mais relevantes do DVL.



**Figura 5.3:** *DVL Teledyne Explorer Phased Array SelfContained*<sup>1</sup>.

**Tabela 5.2:** Especificações técnicas do DVL 600KHz Phased Array Explorer <sup>1</sup>.

Máx. Altitude	81m
Long-term Accuracy	$\pm 0.3\% \pm 0.2cm/s$
Precisão @ $3m/s^2$	$\pm 1.8cm/s$
Precisão @ $5m/s^2$	$\pm 2.6cm/s$
Frequência	614.4kHz

### 5.1.3 Ultra-Short-BaseLine (USBL)

Tal como foi apresentado no capítulo 4, o USBL é um sistema de localização acústico que tem como vantagem, face aos outros sistemas (LBL, SBL), a facilidade de instalação, sendo necessário apenas dois dispositivos acústicos (*transceiver* e *transponder*). Como já referido, se o USBL for configurado de maneira tradicional (*transponder* no veículo autónomo), o veículo não recebe as posições mas sim o operador que está com o *transceiver*. Existe a possibilidade do veículo autónomo receber a posição, no entanto, a posição necessita de ser transmitida por um modem acústico. No mercado, existe a solução USBL com modem acústico integrado, aproveitando a comunicação acústica para calcular a posição relativa ao mesmo tempo. Para que o USBL fosse totalmente operacional em todos os projetos, foi também imposto um sistema que fosse capaz de comunicar a longas distâncias, tanto no plano vertical como no horizontal, pois o TURTLE opera necessita de ser operado em longas distâncias. Obviamente que quanto maior o alcance de operação, menor será a frequência do dispositivo e, consequentemente, menor será a precisão. Em suma, os requisitos que se pretendem para o USBL são:

- precisão e exatidão/alcance;
- modem acústico integrado;
- robusto;
- possibilidade de comunicação na horizontal.

Mediante a oferta de mercado, a empresa Evologics foi a que apresentou melhores soluções a nível de qualidade/preço. O modelo adquirido foi a versão S2CR 7/17 USBL presente na figura 5.4.

---

<sup>1</sup>[http://www.rdinstruments.com/\\_documents/Brochures/explorer\\_pa\\_ds\\_lr-072015.pdf](http://www.rdinstruments.com/_documents/Brochures/explorer_pa_ds_lr-072015.pdf), acedido em 20/10/2016.



**Figura 5.4:** *USBL Evologics S2CR 7/17*<sup>1</sup>.

Segue na tabela 5.3 as especificações técnicas do USBL.

**Tabela 5.3:** *Especificações técnicas do USBL S2CR 7/17*<sup>1</sup>.

Máx Alcance	8000m (10000m - boas condições)
Frequência	7 – 17kHz
<i>Slant Range Accuracy</i>	0.01m
<i>Bearing Resolution</i>	0.1°

#### 5.1.4 Sensor de Pressão

Como já referido anteriormente, a pressão é um fator importante para a localização. No entanto, no capítulo 4 foi abordado o CTD e não o sensor de pressão, uma vez que o CTD fornece mais informação relevante que o sensor de pressão. Como a pressão é diretamente proporcional à profundidade quando não operado em diferenças de pressão drásticas (e.g. 1bar para 200bar), selecionou-se um sensor de pressão para o sistema de localização subaquático, pelo facto de se justificar este tipo de sensor e, ainda mais, pelo aspeto monetário, uma vez que um CTD é consideravelmente mais dispendioso que um sensor de pressão. O sensor de pressão escolhido foi o *Keller PA35X* (ver Figura 5.5 e Tabela 5.4).

<sup>1</sup>[https://www.evologics.de/en/products/USBL/s2cr\\_7-17\\_usbl.html](https://www.evologics.de/en/products/USBL/s2cr_7-17_usbl.html), acedido 20/10/2016.



**Figura 5.5:** *Sensor de pressão Keller PA35X<sup>1</sup>.*

**Tabela 5.4:** *Especificações técnicas do sensor de pressão Keller PA35X<sup>1</sup>.*

Exatidão	0.05%FS
Long Term Stability	0.5mbar
Resolução	0.002%
Data Rate	400Hz

### 5.1.5 *Global Navigation Satellite System (GNSS)*

A escolha do INS Spatial FOG foi tomada devido ao facto de possuir GNSS incorporado com as duas portadoras (L1/L2). No entanto, como ainda não possui a licença para funcionar em modo RTK, o sistema GNSS selecionado para esta dissertação foi o Septentrio PolaRx2E (ver Figura 5.6), uma vez que as suas características são muito semelhantes. Na tabela 5.5 apresentam-se as especificações do GNSS.

---

<sup>1</sup><http://www.terrisgps.com/product/septentrio-polarx2e-receiver/>, acedido 20/10/2016.

<sup>1</sup><http://www.keller-druck.com/picts/pdf/engl/33xe.pdf>, acedido 20/10/2016.



**Figura 5.6:** *Septentrio PolaRx2e* <sup>2</sup>.

**Tabela 5.5:** *Especificações técnicas do GNSS Septentrio PolaRx2E* <sup>1</sup>.

Satélites	GPS/SBAS
Frequência	L1/L2
Precisão RTK(Hor./Ver.)	1cm/2cm
<i>Data Rate</i>	10Hz

Este sistema GNSS tem a possibilidade de incorporar duas antenas, assim sendo possível obter a atitude instantaneamente. Como tal, a separação das antenas é importante, pois quanto maior for a distância entre elas maior é a precisão. Na tabela está representada a precisão conforme a *baseline* definida.

**Tabela 5.6:** *Precisão do GNSS Septentrio PolaRx2E na atitude com duas antenas* <sup>1</sup>.

<i>Baseline</i>	<i>Roll/Pitch</i>	<i>Yaw</i>
1m	0.6°	0.3°
3m	0.1°	0.2°
10m	0.06°	0.03°

<sup>2</sup>[http://www.terrisgps.com/product\\_files/PolaRx2e@.253.pdf](http://www.terrisgps.com/product_files/PolaRx2e@.253.pdf), acessido 20/10/2016.

## 5.2 Descrição do Software

Neste subcapítulo são abordados os algoritmos de alto nível, na forma de diagramas, de cada subsistema do sistema de localização subaquático proposto.

### 5.2.1 *Attitude and Heading Reference System (AHRS)*

O AHRS é responsável por calcular a atitude do veículo, através da integração das velocidades angulares provenientes do giroscópio. Como o giroscópio possui um ruído extremamente baixo ( $0.8^\circ/h/\sqrt{Hz}$ ) apenas com a integração, compensação do bias e rotação da Terra, é possível obter uma atitude com exatidão, por um espaço de tempo, sem ser necessário recorrer a sensores externos (acelerómetros, magnetómetros) para estimar a atitude. No entanto, o sistema necessita de ser corretamente inicializado, recorrendo as medidas do GNSS e acelerómetros para o efeito. Na figura 5.7 apresenta-se, em forma de diagrama, o processo de obtenção da atitude do veículo.

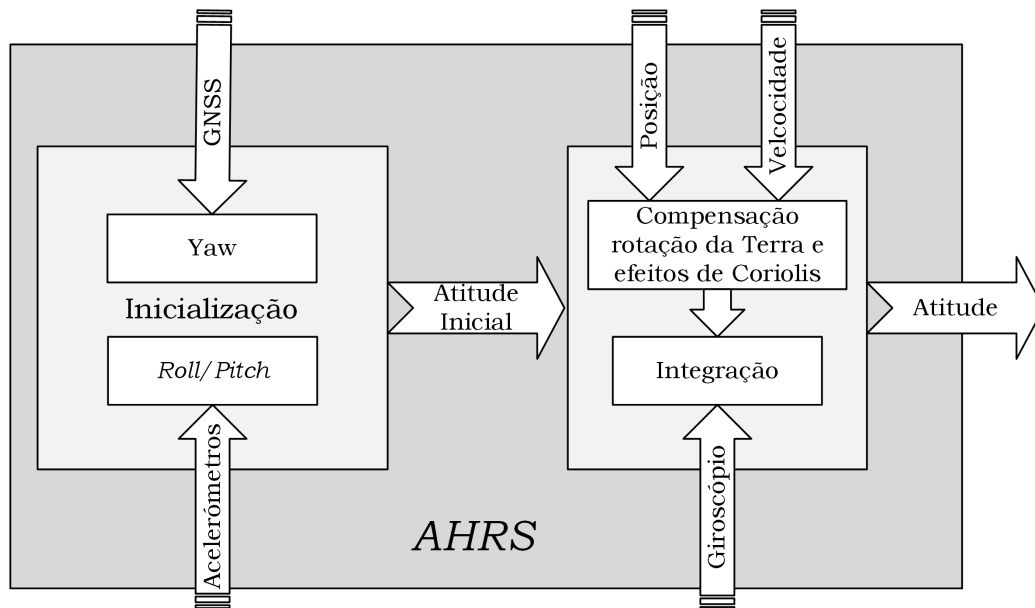


Figura 5.7: Diagrama de informação do AHRS.

Para a inicialização do sistema, o veículo necessita de possuir duas antenas com uma *baseline* definida ou utilizar uma única antena e realizar uma trajetória retilínea a uma velocidade mínima de 5m/s [60] para obter uma exatidão abaixo de  $0.5^\circ$ . Caso seja utilizado uma antena, é necessário usar as medidas dos acelerómetros e inicializar o *roll* e o *pitch*. No entanto, o facto de estar na água é mais complicado

obter o roll e pitch com exatidão, pois é difícil que o veículo esteja completamente parado.

### 5.2.2 Calibração

Como já foi referido, a calibração dos sensores é um fator crucial para o correto funcionamento do sistema de localização e obtenção da máxima capacidade de cada sensor. Porém, a calibração é subdividida em duas fase distintas:

1. obtenção dos parâmetros intrínsecos - calibração interna do próprio do sensor;
2. obtenção dos parâmetros extrínsecos - rotação e translação do referencial do sensor face ao do veículo.

Na calibração dos parâmetros intrínsecos, todos sensores acústicos necessitam de ser corrigidos quanto à velocidade do som na água, pois por defeito a maioria dos sensores assume que a velocidade é de  $1500m/s^2$  sendo a velocidade diferente em cada meio de operação devido à variação da temperatura e da salinidade. Alguns tipos sensores, como o DVL versão *Piston Array* necessita também de uma calibração intrínseca na geometria de cada *beam*, devido à orientação e distância de cada *beam* não ser exatamente igual.

Nos parâmetros extrínsecos, é necessário conhecer todas as rotações e translações face a um referencial rígido (tipicamente do veículo), para poder correlacionar medidas fornecidas por cada sensor. Na maior parte dos casos, os parâmetros extrínsecos são retirados manualmente, no entanto, não é suficiente para obter a máxima performance de cada sensor.

Os parâmetros intrínsecos do DVL e USBL são corrigidos através de dados fornecidos pelo SVP (*Sound Velocity Probe*) em tempo real, enquanto os parâmetros extrínsecos são obtidos através do algoritmo apresentado, em forma de diagrama, na Figura 5.8.

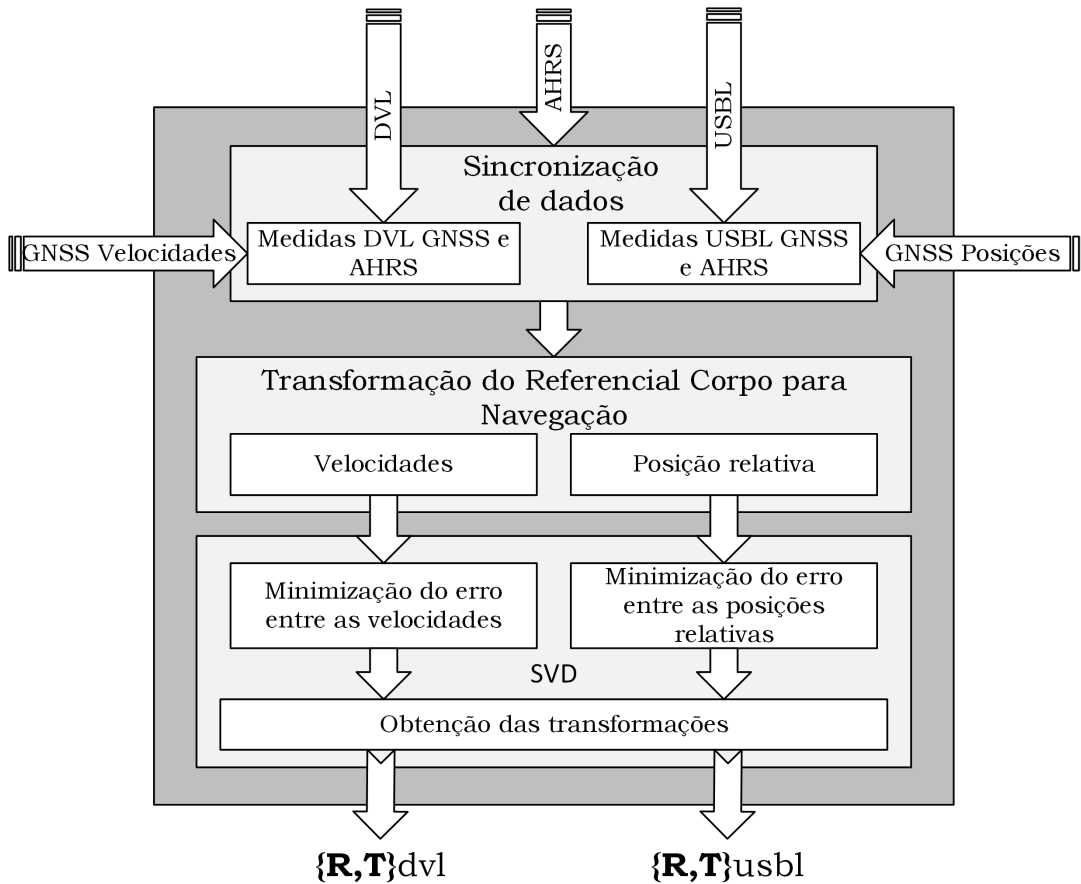


Figura 5.8: Diagrama de informação de calibração.

Basicamente, este algoritmo relaciona os dois sistemas de coordenadas (corpo, navegação) através dos dois conjuntos de pontos 3D provenientes dos sensores e do *ground truth* (referencial do veículo), descobrindo a orientação e translação de um referencial face ao outro através do método SVD (*Singular Value Decomposition*), apresentado por Eggert (1997)[61]. O autor realizou uma comparação entre quatro tipos de métodos para obter a translação e a rotação. De todos, o método SVD foi considerado o método mais eficiente na obtenção do vetor translação e na matriz de rotação. Por fim, para o correto funcionamento do algoritmo, o veículo necessita de realizar uma trajetória, obtendo dados do (GNSS+IMU) em modo RTK (posição e velocidade), DVL, USBL e por fim atitude estimada. De seguida, minimiza o erro entre o *ground truth* e os sensores acústicos. Para minimizar o erro, o algoritmo procura os extrínsecos de cada sensor (DVL, USBL) face ao referencial do veículo. Como as medidas do DVL e USBL necessitam de ser transformadas para o referencial do navegação, o sucesso deste algoritmo encontra-se dependente da atitude estimada,

pois a minimização do erro de cada sensor é baseada nas medidas transformadas a partir da atitude estimada.

### 5.2.3 Fusão Sensorial

Após calcular a atitude e adquirir os parâmetros de calibração, o sistema procederá à fusão sensorial sendo inicializado com os dados provenientes dos sensores.

O modelo do processo do filtro probabilístico terá, como entrada de controlo, as medidas dos acelerómetros e a atitude, enquanto que o modelo de observação receberá as medidas do USBL, DVL e sensor de pressão.

Os dados do DVL e USBL, serão previamente caracterizados mediante o coeficiente de qualidade fornecido pelos sensores, associando uma dada incerteza à respetiva medida. A cada atualização as observações estão sujeitas a camada de associação de dados, onde relacionará os dados sensoriais com o estado previsto. Através do filtro probabilístico, a fusão sensorial será capaz de estimar as posições, as velocidades e a atitude num referencial de navegação NED definido. Na figura 5.9 encontra-se apresentado em forma de diagrama a fusão sensorial.

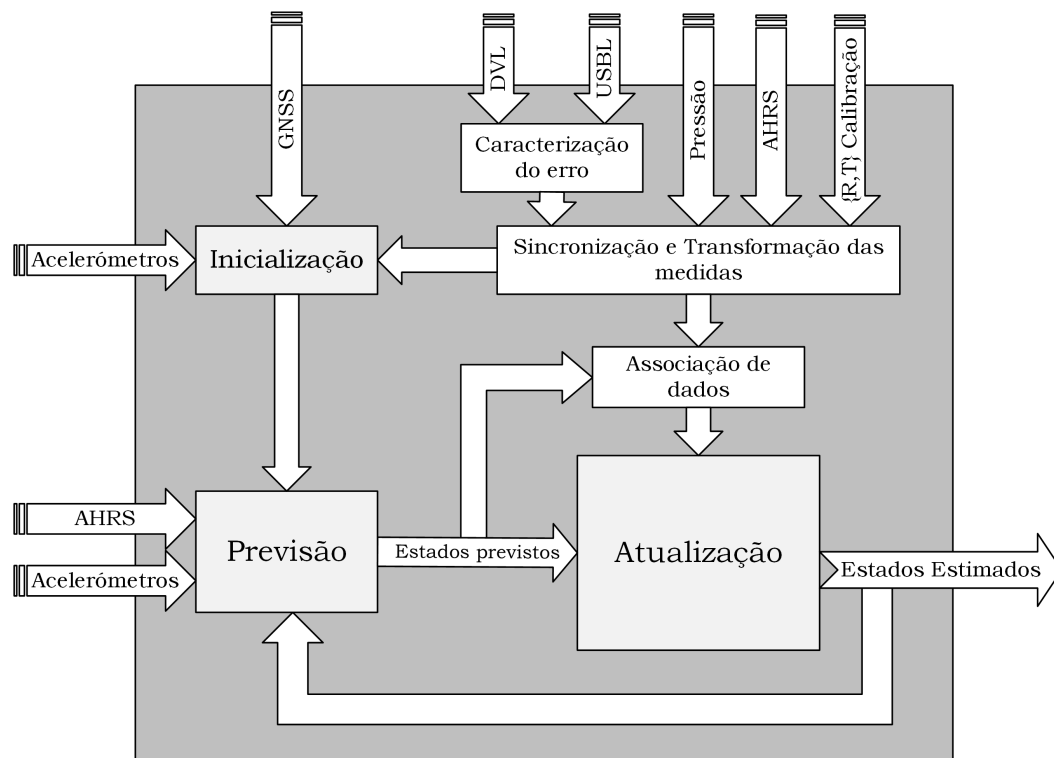


Figura 5.9: Diagrama de informação da fusão sensorial.



# 6

## Implementação

No presente capítulo expõem-se, detalhadamente, a conceção e o funcionamento do AHRS, a calibração e a fusão sensorial. Por fim, será apresentado o *setup* experimental que utilizado na obtenção dos resultados.

### 6.1 AHRS

Nesta secção é apresentada a conceção do AHRS no âmbito desta dissertação, estando dividido em duas partes, numa primeira secção apresenta-se como é realizada a inicialização da atitude e numa segunda secção expõem-se as equações necessárias para realizar a mecanização da atitude expressa em quaterniões.

#### 6.1.1 Inicialização do AHRS

Tendo presente que, tal como anteriormente afirmado, o AHRS utiliza os giroscópios para calcular a atitude, é necessária uma correta inicialização para obter a máxima performance do sistema.

Relativamente à obtenção do *yaw* através do GNSS, assinala-se que este pode ser obtido através de uma ou mais antenas. A utilização de duas ou mais antenas permite a determinação de dois ou três ângulos de forma absoluta. Se o AHRS só possuir dados de um antena GNSS para obter o *yaw*, é, então, necessário que o veículo se desloque de um ponto *A* para um ponto *B*, realizando um percurso

retilíneo com uma velocidade idealmente superior a  $5m/s$  [60]. O *roll* e *pitch* é inicializado através das medidas dos acelerómetros, sendo necessário que o veículo fique estático durante a inicialização. Posto isto, abaixo demonstra-se as equações que foram desenvolvidas para obter o *roll* ( $\phi$ ), *pitch* ( $\theta$ ) e o *yaw* ( $\psi$ ).

$$\begin{bmatrix} \phi(0) \\ \theta(0) \\ \psi(0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \arctan 2(a_y, a_z) \\ \arctan 2(-a_x, \sqrt{(a_y^2/a_z^2)}) \\ \arctan 2(\Delta_x, \Delta_y) \end{bmatrix} \quad (6.1)$$

sendo:

$$\Delta_x = (\lambda_A - \lambda_B)R \cos(\varphi_A), \Delta_y = (\varphi_A - \varphi_B)R \quad (6.2)$$

onde  $\lambda_A$  e  $\lambda_B$  correspondem à longitude do ponto  $A$  e o ponto  $B$ ,  $\varphi_A, \varphi_B$  a latitude dos pontos referidos e  $R$  o raio local da terra dado por:

$$R(\varphi) = \sqrt{\frac{(a^2 \cos(\varphi)^2) + (b^2 \sin(\varphi))^2}{(a \cos(\varphi))^2 + (b \sin(\varphi))^2}} \quad (6.3)$$

sendo  $a$  o raio equatorial e  $b$  o raio polar presente na Tabela3.1.

No entanto, a equação 6.1, calcula as orientações em ângulo de Euler e como possuem singularidades, exigem um maior esforço computacional, é fundamental transformar as orientações em quatérniões, usando para tal a transformação referida na equação 3.13.

### 6.1.2 Mecanização do AHRS

Após a inicialização da atitude do AHRS, é obtida a atitude por integração das velocidades angulares medidas pelos giroscópios. Com o decorrer do tempo, a atitude calculada por integração vai-se degradando (devido à obtenção do estado por DR). A rotação da Terra e o bias causam um erro na obtenção da atitude. A Terra roda  $\pm 15 \frac{deg}{hour}$  tendo um efeito prejudicial num sistema AHRS por integração caso este não seja compensado. Porém, devido à rotação da Terra, é necessário contabilizar as velocidades do veículo, pois é necessário compensar o efeito de Coriolis. Assim sendo, admitindo que  $w_{ib}^b$  são as velocidades angulares fornecidas pelos giroscópios,  $\sigma_w$  o ruído associado às medidas, as velocidades angulares no corpo são definidas por:

$$w_{bn}^b = w_{ib}^b - \sigma_w - w_{in}^b \quad (6.4)$$

sendo  $w_{in}^b$  as velocidades angulares expressas no corpo entre o referencial de navegação e o referencial inercial definidas por:

$$w_{in}^b = R_n^b(w_{ie}^n + w_{en}^n) \quad (6.5)$$

onde  $R_n^b$  consiste na matriz de rotação apresentada na equação 3.14 do referencial de navegação para o referencial corpo e  $w_{ie}^n$  a rotação da terra expressa no referencial navegação NED definida por:

$$w_{ie}^n = \left[ w_{ie} \cos(\varphi), 0, -w_{ie} \sin(\varphi) \right]^T \quad (6.6)$$

e  $w_{en}^n$  obtido através:

$$w_{en}^n = \left[ \frac{v_e \cos(\varphi)}{\cos(\varphi)(R_N+h)}, -\frac{v_n}{R_M+h}, -\frac{v_e \sin(\varphi)}{\cos(\varphi)(R_N+h)} \right]^T \quad (6.7)$$

onde:

- $v^n = [v_n, v_e, v_d]$  - correspondem às velocidades no referencial de navegação NED;
- $[\varphi, \lambda, h]^e$  - latitude, longitude e altura, respetivamente;
- $R_M$  - raio formado pela curvatura no meridiano obtido pela equação 3.18;
- $R_N$  - referente ao raio *prime vertical* obtido pela equação 3.17.

A partir da velocidade angular no corpo  $w_{bn}^b$ , a atitude expressa em quatérniões é dada a partir da equação diferencial definida por:

$$\dot{q}_k = \left( I + \left( \frac{1}{2} * B * dt \right) \right) q_{k-1} \quad (6.8)$$

onde  $I$  é uma matriz de identidade com dimensão 4 e a matriz  $B$  correlaciona as velocidades angulares com os quatérniões.

$$B = \begin{bmatrix} 0 & -w_{bn_x}^b & -w_{bn_y}^b & -w_{bn_z}^b \\ w_{bn_x}^b & 0 & w_{bn_z}^b & -w_{bn_y}^b \\ w_{bn_y}^b & -w_{bn_z}^b & 0 & w_{bn_x}^b \\ w_{bn_z}^b & w_{bn_y}^b & -w_{bn_x}^b & 0 \end{bmatrix} \quad (6.9)$$

De seguida, o sistema AHRS fornece a atitude do veículo expresso em quatérniões, sendo definido por:

$$q_k = [q_0, q_1, q_2, q_3]^T \quad (6.10)$$

## 6.2 Calibração

Tal como já foi referido no Capítulo 5, a calibração dos parâmetros extrínsecos é realizada através da comparação de dados do GNSS+IMU em modo RTK (*ground truth*) e os sensores acústicos (DVL e USBL).

O *ground truth* pode ser realizado em tempo real com o sistema *low-cost* apresentado em outro projeto [62], ou com os dados processados pelo *INS Spatial FOG*.

No sentido de proceder à calibração dos parâmetros extrínsecos, é importante que o veículo realize uma trajetória com mudanças de direção (e.g. retângulo, circunferência). Após a calibração dos extrínsecos, não é necessário repetir este procedimento, a não ser que os sensores sofram um deslocamento ou tenham sido retirados do veículo, porém a calibração intrínseca necessita de ser realizada em tempo real, pois as variações de temperatura e salinidade mudam frequentemente no mesmo local, influenciando a velocidade do som. Para a obtenção da rotação e translação, assumindo que existem dois conjuntos de pontos ( $a_i$  e  $b_i$ ) correspondentes ao problema, este pode ser descrito da seguinte forma:

$$a_i = Rb_i + T + \sigma_i \quad (6.11)$$

onde  $\sigma_i$  corresponde ao ruído associado às medidas,  $a_i$  ao conjunto de pontos do *ground truth*,  $b_i$  aos conjunto de pontos do sensor,  $R$  à matriz rotação ( $3 \times 3$ ) e  $T$  ao vetor translação 3D. Para fazer face ao problema, a obtenção da matriz de rotação e a translação  $[\hat{R}, \hat{T}]$  minimiza o erro através do método *least-squares* dado por:

$$\Sigma^2 = \sum_{i=1}^N \|a_i - \hat{R}b_i - \hat{T}\|^2 \quad (6.12)$$

### 6.2.1 Obtenção da Orientação

As duas nuvens de pontos (medidas do sensor e medidas do GNSS+IMU) necessitam de possuir o mesmo centróide para obter a matriz de rotação que minimiza o erro entre cada ponto. Para isso, é necessário subtrair o ponto médio de cada nuvem para obter a rotação. Assim sendo, a equação 6.12 pode ser descrita da seguinte forma:

$$\Sigma^2 = \sum_{i=1}^N \|a_{ci} - \hat{R}b_{ci}\|^2 \iff \sum_{i=1}^N (a_{ci}^T a_{ci} + b_{ci}^T b_{ci} - 2a_{ci}^T \hat{R}b_{ci}) \quad (6.13)$$

Para a equação 6.13 ser minimizada, o último termo  $((2a_{ci}^T \hat{R} b_{ci}))$  necessita de ser maximizado. Assim sendo, a matriz que correlaciona a nuvem de pontos é dada pela seguinte equação:

$$B = \sum_{i=1}^N b_{ci} a_{ci}^T \quad (6.14)$$

Posto isto, a matriz de rotação ótima pode ser dado por a decomposição valor singular (SVD) dado por:

$$B = U \Sigma V^T \quad (6.15)$$

onde a matriz de rotação  $\hat{R}$  é obtida através:

$$\hat{R} = V U^T \quad (6.16)$$

### 6.2.2 Obtenção da translação

Para a obtenção da translação é necessário, em primeiro lugar, alcançar a matriz de rotação. De seguida, a translação é obtida através do ponto médio de cada nuvem de pontos sendo dada por:

$$\hat{T} = a - \hat{R}b \quad (6.17)$$

## 6.3 Fusão sensorial

Através da análise do estado da arte, a utilização do KF para a realização da fusão sensorial é dominante, pois a facilidade de implementação e o reduzido custo computacional permite processar em tempo real. Posto isto, e como um dos requisitos mais importantes desta dissertação era desenvolver um sistema de localização subaquático capaz de estimar os estados em tempo real, foi utilizado o KF. Porém foi utilizado o EKF, pois o modelo de processo é não linear supramencionado no capítulo 3.

Posto isto, o vetor de estados é composto por:

$$\hat{x}_k = [x, y, z, v_x, v_y, v_z, b_x, b_y, b_z]^T \quad (6.18)$$

onde  $x, y, z$  corresponde à posição no referencial de navegação,  $v_x, v_y, v_z$  às velocidades no referencial de navegação, e  $b_x, b_y, b_z$  ao bias dos acelerómetros.

### 6.3.1 Inicialização do EKF

Os estados iniciais  $\hat{x}(0)$  necessitam ser obtidos antes do filtro iniciar. Após a obtenção da atitude e a realização do processo de calibração, a inicialização dos estados iniciais pode ser obtida a partir de duas formas:

1. O veículo necessita de ficar imóvel, ou seja, a velocidade é nula. A partir daí, inicializa-se os estados, sendo a posição  $xy$  inicializada com as medidas fornecidas pelo USBL, a posição no eixo do  $z$  através das medidas do sensor de pressão e a velocidade a 0 (zero).

Assim sendo, os estados iniciais e a sua incerteza associada podem ser representados da seguinte forma:

$$\hat{x}(0) = \begin{bmatrix} x_u \\ y_u \\ z_p \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ k_{b_x} \\ k_{b_y} \\ k_{b_z} \end{bmatrix}, P(0) = \begin{bmatrix} \sigma_{u_x}^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{u_y}^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_p^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma_{b_x}^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma_{b_y}^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma_{b_z}^2 \end{bmatrix}$$

onde  $u$  corresponde às medidas e variância do USBL,  $p$  ao sensor de pressão,  $b$  ao valor do bias.

2. Consiste em percorrer uma trajetória com uma velocidade constante e, através das medidas do GNSS em modo RTK, inicializar o filtro. Assim sendo, os estados iniciais e a sua incerteza associada podem ser representados da seguinte forma:

$$\hat{x}(0) = \begin{bmatrix} x_g \\ y_g \\ z_g \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ k_{b_x} \\ k_{b_y} \\ k_{b_z} \end{bmatrix}, P(0) = \begin{bmatrix} \sigma_{g_x}^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{g_y}^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{g_z}^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma_{b_x}^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma_{b_y}^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma_{b_z}^2 \end{bmatrix}$$

onde  $g$  corresponde às medidas e variância do GNSS e  $b$  ao bias.

Quanto menor o erro na inicialização, menos tempo necessitará o filtro para convergir, obtendo-se melhor performance. A inicialização dos estados iniciais é escolhida

mediante as possibilidades do meio de operação, ou seja, caso seja possível obter medidas GNSS o sistema será inicializado com a opção dois, caso necessite de ser inicializado no fundo do oceano ou não tenha possibilidade de obter medidas GNSS será inicializado com a opção um.

Os bias podem ser inicializados a zero, ou utilizar os bias estimados da última missão.

### 6.3.2 Modelo de Processo

No que diz respeito à fusão sensorial, assinala-se que se optou por utilizar as medidas dos acelerómetros para prever os estados do sistema de localização subaquática. Uma outra abordagem alternativa seria utilizar o modelo de velocidade constante para prever os estados [26, 37], no entanto, devido ao baixo ruído dos acelerómetros e ao modelo de velocidade constante não corresponder à realidade, optou-se por utilizar as medidas dos acelerómetros no corpo definido por:

$$a_b = [a_x, a_y, a_z]^T \quad (6.19)$$

Seguidamente, o modelo de processo é definido por:

$$\dot{x} = f(x, u) \quad (6.20)$$

onde  $u$  corresponde às medidas dos acelerómetros  $[a_x, a_y, a_z]^T$  e  $\hat{x}$  ao vetor de estados constituído por posição  $[x, y, z]^T$ , velocidade  $[v_x, v_y, v_z]^T$  e bias  $[b_x, b_y, b_z]^T$ . O modelo de processo é dado por:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ v_x \\ v_y \\ v_z \\ b_x \\ b_y \\ b_z \end{bmatrix}_k = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{k-1} + v_{x_k} dt \\ y_{k-1} + v_{y_k} dt \\ z_{k-1} + v_{z_k} dt \end{bmatrix} + R_b^n \begin{bmatrix} \frac{(a_{x_k} - b_{x_k} + \sigma_{a_x}) dt^2}{2} + \sigma_x \\ \frac{(a_{y_k} - b_{y_k} + \sigma_{a_y}) dt^2}{2} + \sigma_y \\ \frac{(a_{z_k} - b_{z_k} + \sigma_{a_z}) dt^2}{2} + \sigma_z \end{bmatrix} - g_g \\ \begin{bmatrix} v_{x_{k-1}} \\ v_{y_{k-1}} \\ v_{z_{k-1}} \end{bmatrix} + R_b^n \begin{bmatrix} \sigma_{a_x} - b_{x_k} dt \\ \sigma_{a_y} - b_{y_k} dt \\ \sigma_{a_x} - b_{z_k} dt \end{bmatrix} - g_g \\ \begin{bmatrix} b_{x_{k-1}} + \sigma_{b_x} \\ b_{y_{k-1}} + \sigma_{b_y} \\ b_{z_{k-1}} + \sigma_{b_z} \end{bmatrix} \end{bmatrix} \quad (6.21)$$

onde  $\sigma_p = [\sigma_x \sigma_y \sigma_z]^T$  ruído associado à posição,  $\sigma_v = [\sigma_{a_x} \sigma_{a_y} \sigma_{a_z}]^T$  ruído associado às acelerações e, por fim,  $\sigma_b = [\sigma_{b_x} \sigma_{b_y} \sigma_{b_z}]^T$  ruído associado ao bias e  $g_g$  é o vetor gravidade obtido pela equação 3.1.

A covariância do modelo de processo é representada pela matriz de ruído  $Q_k$  dada por:

$$Q_k = \begin{bmatrix} \sigma_x^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_y^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_z^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_{a_x}^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma_{a_y}^2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma_{a_z}^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma_{b_x}^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma_{b_y}^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma_{b_z}^2 \end{bmatrix} \quad (6.22)$$

Como já foi referido, o modelo é não linear sendo necessário recorrer ao EKF. Com a utilização desta variante KF, é necessário linearizar o modelo com recurso ao jacobiano.

Assim sendo a partir do modelo apresentado na equação 6.21, a matriz  $F_k$  representa a matriz de transição de estados linearizada dada por:

$$F_k = \frac{\partial f}{\partial x}(\hat{x}(k|k-1), u(k), 0) \quad (6.23)$$

$$F_k = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & dt & 0 & 0 & \frac{1}{2}dt^2((q_3^2 + q_2^2 - q_1^2 - q_0^2)) & -(dt^2(q_1q_2 - q_0q_3)) & -(dt^2(q_1q_3 + q_0q_2)) \\ 0 & 1 & 0 & 0 & dt & 0 & -(dt^2(q_0q_3 + q_1q_2)) & \frac{1}{2}dt^2(q_3^2 - q_2^2 + q_1^2 - q_0^2) & -(dt^2(q_2q_3 - q_0q_1)) \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & dt & -(dt^2 * (q_1q_3 - q_0q_2)) & -(dt^2(q_2q_3 + q_0q_1)) & \frac{1}{2}dt^2(-q_3^2 + q_2^2 + q_1^2 - q_0^2) \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & dt(q_3^2 + q_2^2 - q_1^2 - q_0^2) & -2dt(q_1q_2 - q_0q_3) & -2dt(q_1q_3 + q_0q_2) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -2dt(q_0q_3 + q_1q_2) & dt(q_3^2 - q_2^2 + q_1^2 - q_0^2) & -2dt(q_2q_3 - q_0q_1) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -2dt(q_1q_3 - q_0q_2) & -2dt(q_2q_3 + q_0q_1) & dt(-q_3^2 + q_2^2 + q_1^2 - q_0^2) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6.24)$$

e a matriz  $G_k$  relaciona os estados com o ruído linearizada dada por:

$$G_k = \frac{\partial f}{\partial \sigma}(\hat{x}(k|k-1), u(k), 0) \quad (6.25)$$

$$G_k = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \frac{1}{2}dt^2(-q_3^2 - q_2^2 + q_1^2 + q_0^2) & dt^2(q_1q_2 - q_0q_3) & dt^2(q_1q_3 + q_0q_2) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & dt^2(q_0q_3 + q_1q_2) & \frac{1}{2}dt^2(-q_3^2 + q_2^2 - q_1^2 + q_0^2) & dt^2(q_2q_3 - q_0q_1) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & dt^2(q_1q_3 - q_0q_2) & dt^2(q_2q_3 + q_0q_1) & \frac{1}{2}dt^2(q_3^2 - q_2^2 - q_1^2 + q_0^2) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & dt(-q_3^2 - q_2^2 + q_1^2 + q_0^2) & 2dt(q_1q_2 - q_0q_3) & 2dt(q_1q_3 + q_0q_2) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2dt(q_0q_3 + q_1q_2) & dt(-q_3^2 + q_2^2 - q_1^2 + q_0^2) & 2dt(q_2q_3 - q_0q_1) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2dt(q_1q_3 - q_0q_2) & 2dt(q_2q_3 + q_0q_1) & dt(q_3^2 - q_2^2 - q_1^2 + q_0^2) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6.26)$$

Posto isto, a matriz de covariância do modelo de processo é dada por:

$$P(k|k-1) = F(k)P(k-1)F^T(k) + G(k)Q(k)W^T(k) \quad (6.27)$$

### 6.3.3 Modelo das Observações

O modelo das observações consiste num modelo linear, pois os sensores observam diretamente os estados, ou seja, o sistema USBL observa os estados  $x$ ,  $y$  e  $z$  o sensor de pressão o  $z$  e o DVL as velocidades nos três eixos  $v_x, v_y, v_z$ . As posições em  $z$  só serão observadas pelo sensor de pressão, uma vez que as medidas do USBL em  $z$  são de baixa qualidade [26], enquanto o sensor de pressão tem uma exatidão e precisão elevada. Assim sendo, o modelo definido por:

$$z_k = Hx_k + \eta_k \quad (6.28)$$

sendo  $z$  as observações e  $\eta$  representa o ruído gaussiano de média zero afetando as observações. As observações são provenientes de diferentes sensores com diferentes *data rate* e diferentes modelos de observação. Assim sendo, a matriz do modelo de observações  $H$ , irá ser diferente para cada tipo de sensor.

As posições fornecidas pelo USBL são relativas ao *transponder*, no entanto, no modelo de observação assume-se que as posições já são referentes ao referencial de navegação. Assim sendo, a matriz  $H_{USBL}$  é dada por:

$$H_{USBL} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (6.29)$$

sendo a covariância dada por:

$$R_{USBL} = \begin{bmatrix} \sigma_{U_x}^2 & 0 \\ 0 & \sigma_{U_y}^2 \end{bmatrix} \quad (6.30)$$

As medidas do sensor de pressão correspondem a uma medida absoluta do nível da água, a correspondente matrix  $H$  em  $z$  é dada por:

$$H_{PRESSAO} = [0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0] \quad (6.31)$$

e a matriz de ruído é definida por:

$$R_{PRESSAO} = \sigma_P^2 \quad (6.32)$$

O DVL fornece as medidas de velocidade linear nos 3 DOF, no entanto, trata-se de velocidades referentes ao corpo do sensor e não ao referencial de navegação. Assumindo que as velocidades são fornecidas ao modelo de observação já no referencial de navegação do veículo, a matriz  $H_{DVL}$  é dada por:

$$H_{DVL} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (6.33)$$

e a matriz de ruído é dada por:

$$R_{DVL} = \begin{bmatrix} \sigma_{D_x}^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{D_y}^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{D_z}^2 \end{bmatrix} \quad (6.34)$$

No entanto, dependendo do *data rate* de cada sensor, por vezes, as medidas de diferentes sensores são obtidas em simultâneo, sendo necessário realizar o *update* no mesmo instante de tempo. Assim sendo, para lidar com múltiplas observações a matriz  $H$  e  $R$  é variável sendo necessário adicionar ou retirar a respetiva matriz  $H$  sendo elas representadas por:

$$H = \begin{bmatrix} H_{USBL} \\ H_{PRESSAO} \\ H_{DVL} \end{bmatrix}, R = \begin{bmatrix} R_{USBL} & 0 & 0 \\ 0 & R_{PRESSAO} & 0 \\ 0 & 0 & R_{DVL} \end{bmatrix} \quad (6.35)$$

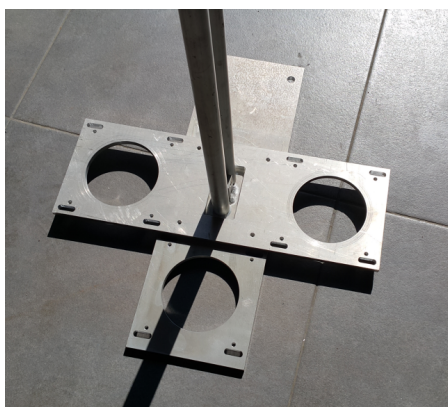
Posto isto a covariância estimada é dado por:

$$P(k) = (I - KH(k))P(k|k-1) \quad (6.36)$$

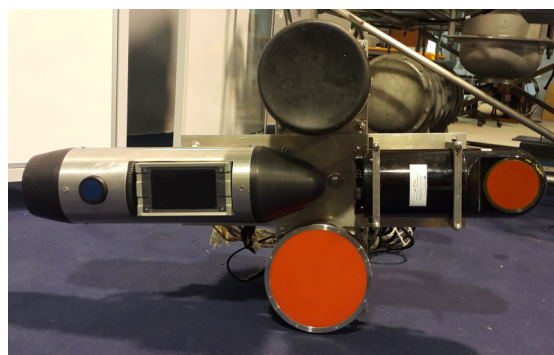
onde  $K$  é o ganho de kalman e  $I$  a matriz identidade de dimensão 9.

## 6.4 Setup experimental

Para a validação e caracterização do sistema de localização subaquático é necessário um *setup* experimental que permita a realização de experiências para a obtenção de dados sensoriais necessários para a validação dos diversos blocos desenvolvidos. Para tal, o *setup* experimental deve possibilitar o fornecimento de dados de *ground truth* que permita essa caracterização. Como já referido, o sistema LBL 300kHz também pode ser utilizado como *ground truth*, no entanto, a precisão e exatidão é menor, o tempo e a complexidade de instalação são extremamente elevados em comparação com o sistema GNSS. Assim sendo, foi utilizado o ASV ROAZII para a realização dos *datasets* uma vez que torna possível o uso do sistema GNSS bem como a incorporação dos sensores subaquáticos. O *ground truth* é obtido através de um software de referencia denominado por *Waypoint*, onde realiza a fusão sensorial entre o GNSS e os dados do IMU em pós processamento. Neste sentido, foi necessário construir um suporte para a integração física dos sensores subaquáticos inerciais e o sistema GNSS com o ROAZII apresentado na Figura 6.2. No entanto, devido às necessidades do laboratório, o suporte não foi desenvolvido exclusivamente para a validação do sistema de localização subaquático, sendo também projetado para acoplar o Multibeam e SBP (*Sub Bottom Profiler*).

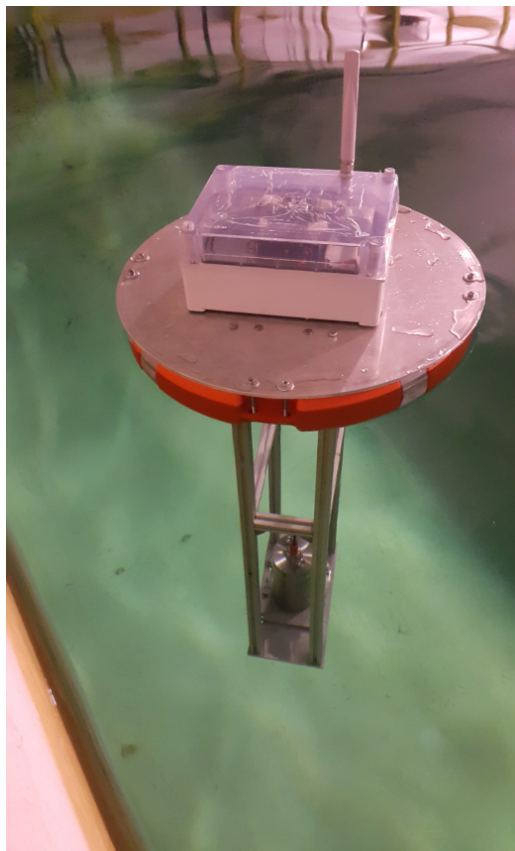


**Figura 6.1:** Suporte em alumínio para os sensores do sistema de localização subaquática.



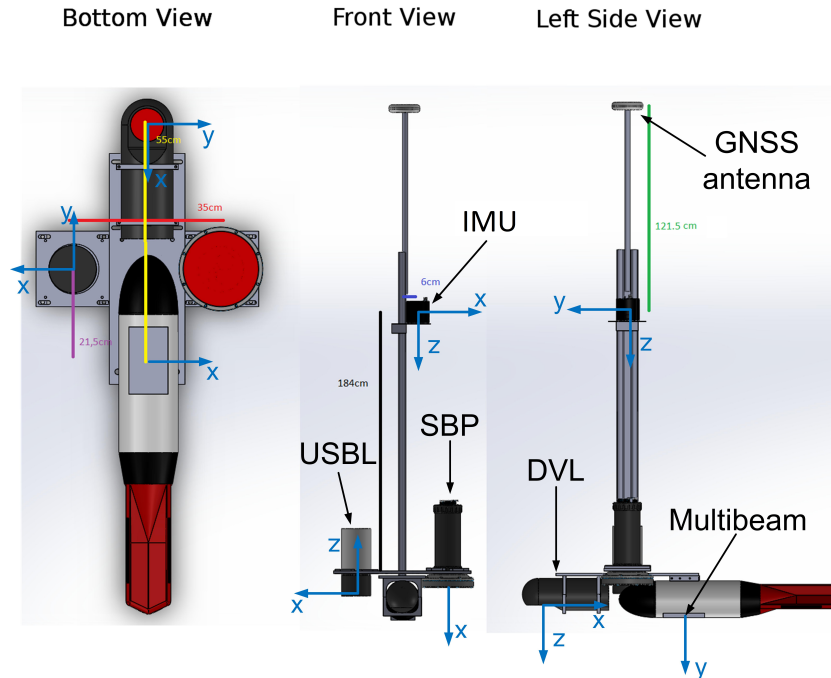
**Figura 6.2:** Suporte de alumínio com os sensores montados para a realização dos datasets.

Neste *setup* experimental também foi construído um suporte para o *transponder* do sistema USBL. O suporte possui uma boia para operar à superfície, um sistema computacional, um sistema GNSS, WiFi e baterias. A partir do sistema GNSS, é realizado o sincronismo da unidade de processamento e obtida a posição do *transponder*. A unidade de processamento guarda as posições em memória e comunica com a estação de controlo por WiFi. Na Figura 6.3 podemos ver o *setup* do *transponder* completo.



**Figura 6.3:** Boia com o *transponder* USBL acoplado.

Para que seja possível a integração correta dos sensores, é necessário conhecer os referenciais de cada um deles e quais as suas orientações e translações face ao referencial do veículo. Na Figura 6.4 encontram-se representadas as orientações e translações de cada sensor.



**Figura 6.4:** Configuração dos sensores com os correspondentes referenciais e translações do setup experimental.

Admitindo que o referencial do IMU é o referencial do veículo, as orientações e translações de cada sensor são apresentadas na tabela seguinte.

**Tabela 6.1:** Rotações e translações face ao referencial do veículo do setup experimental

Sensor	$T_x$	$T_y$	$T_z$	$R_x$	$R_y$	$R_z$
DVL	33.5cm	6cm	156cm	0°	180°	90°
USBL	-23.5cm	0cm	165cm	0°	180°	0°
GNSS	-6cm	0cm	121.5cm	0°	0°	0°

No entanto, estas translações e rotações são valores aproximados obtidos manualmente. No próximo capítulo, tendo presente a limitação dos dados obtidos, aborda-se a calibração demonstrando-se todas correções efetuadas a estas medidas obtidas.



# 7

## Resultados

Os métodos que têm vindo a ser descritos ao longo desta dissertação foram testados através de dois *datasets*, um realizado no Rio Douro e outro na Mina da Bejanca. A Mina da Bejanca é uma mina a céu aberto inundada. Estes *datasets* foram cruciais para a validação e caracterização do sistema de localização subaquático. O *dataset* realizado no Rio Douro teve como objetivo testar e validar a integração e o correto funcionamento dos sensores com ASV ROAZII, enquanto o *dataset* realizado na Mina da Bejanca foi realizado para validar todo o sistema de localização subaquática proposto nesta dissertação. Nestas experiências, o referencial do veículo foi assumido como sendo o referencial do IMU e todos os resultados foram comparados com os dados GNSS+IMU pós-processados, que serve como *ground truth*.

Na Figura 7.1 podemos observar o ROAZII a realizar o *dataset* na Mina da Bejanca.



Figura 7.1: ROAZII na Mina da Bejanca durante a realização do dataset 2.

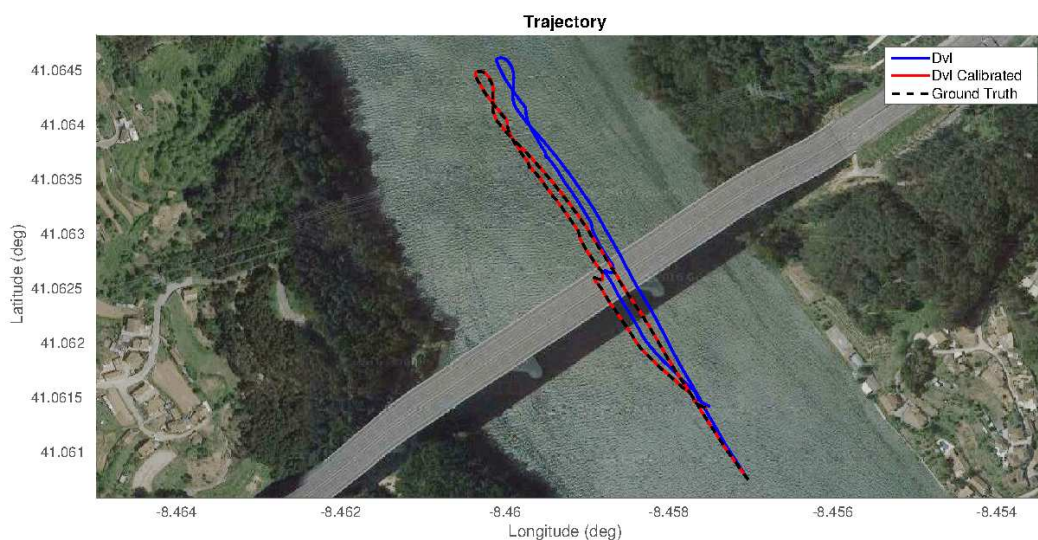
## 7.1 Validação do processo de calibração

Esta secção visa demonstrar a validação do processo de calibração do USBL e do DVL face ao referencial do IMU. Os referenciais de cada sensor foram apresentados no *setup* experimental no capítulo anterior. O algoritmo, tal como referido, procura encontrar a matriz de rotação e translação através do método SVD que minimiza o erro entre os pontos obtidos pelos sensores e *oground truth*.

### 7.1.1 Calibração DVL

A calibração do DVL consistiu em analisar os *logs* disponíveis referentes aos *datasets*, para validar o processo de calibração. No entanto, foram analisados dois *logs* em mais detalhe, um efetuado no Rio Douro e outro na Mina da Bejanca. A trajetória de ida e volta no Rio Douro resumiu-se a um percurso de 1316m. Na Figura 7.2 encontra-se ilustrada a trajetória efetuada, obtida pelo GNSS pós-processado, bem como a trajetória calculada através do DVL e a trajetória obtida com o DVL após

a calibração.



**Figura 7.2:** *Ground truth versus DVL com e sem calibração no Rio Douro.*

Facilmente é perceptível que o referencial do DVL está rodado no eixo vertical face ao referencial do veículo. Com o decorrer do percurso, a trajetória calculada através do DVL afasta-se gradualmente do *ground truth*. Após a calibração, é notório que a trajetória no plano horizontal calculada através do DVL melhora drasticamente. Nas Tabelas 7.1 e 7.2 resume-se o erro obtido e o desvio padrão de ambas as trajetórias face ao *ground truth*.

**Tabela 7.1:** *Erro e desvio padrão do DVL em cada eixo referente ao 1º percurso sem calibração*

	$x(m)$	$y(m)$	$z(m)$	$v_x(m/s)$	$v_y(m/s)$	$v_z(m/s)$
Erro médio	7.88	11.98	16.07	0.064	0.086	0.056
Erro máximo	14.15	22.16	26.95	0.217	0.238	0.224
Desvio Padrão	3.72	5.93	7.50	0.040	0.047	0.035

**Tabela 7.2:** Erro e desvio padrão do DVL em cada eixo referente ao 1º percurso com calibração

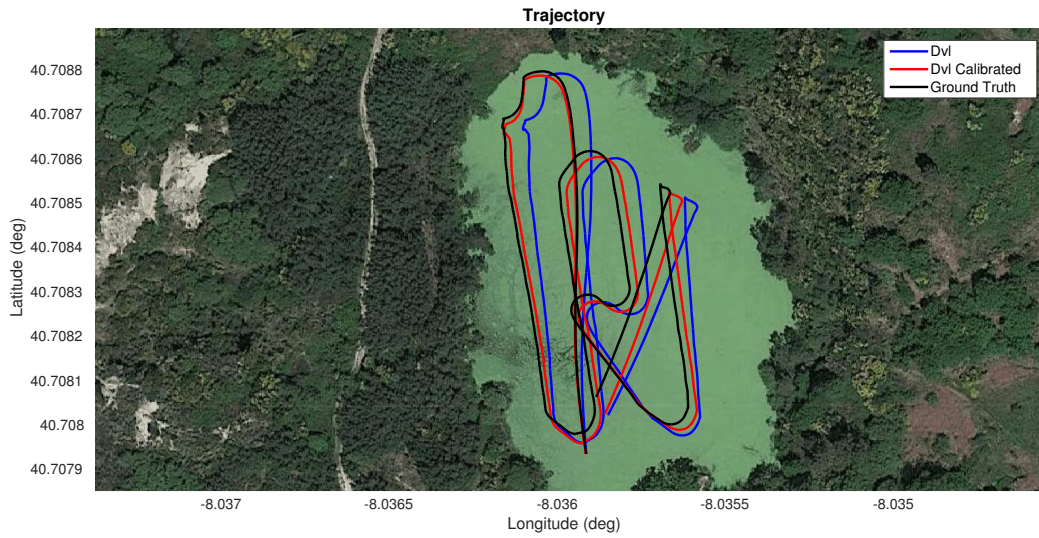
	$x(m)$	$y(m)$	$z(m)$	$v_x(m/s)$	$v_y(m/s)$	$v_z(m/s)$
Erro médio	0.532	0.279	0.834	0.033	0.029	0.021
Erro máximo	1.094	0.691	1.634	0.258	0.167	0.163
Desvio Padrão	0.578	0.238	0.464	0.029	0.023	0.019

Tal como referido, é notória a existência de um desalinhamento no plano vertical, no entanto, no plano horizontal o erro no eixo  $z$  também aumenta gradualmente, logo o DVL não está perfeitamente alinhado no plano horizontal. Neste contexto, os parâmetros extrínsecos obtidos foram os referidos na Tabela 7.3 sendo os parâmetros extrínsecos em três rotações independentes em torno de cada eixo do referencial do DVL.

**Tabela 7.3:** Parâmetros extrínsecos do DVL obtidos a partir da primeira trajetória efetuada no Rio Douro.

$Rx(^{\circ})$	$Ry(^{\circ})$	$Rz(^{\circ})$
1.496	0.078	3.029

De seguida, foi analisado um *log* realizado na Mina da Bejanca, em que o ambiente é completamente diferente do primeiro percurso no Rio Douro. Apesar da Mina possuir no máximo 100 metros navegáveis em linha reta, a trajetória realizada para o processo de calibração não foi idêntica à realizada no Rio Douro, sendo percorrido uma distância de 591m. Na Figura 7.3 ilustra-se a trajetória efetuada, obtida pelo GNSS, bem como a trajetória calculada através do DVL e a trajetória obtida com o DVL após a calibração.



**Figura 7.3:** *Ground truth versus DVL com e sem calibração na Mina da Bejanca.*

Nas Tabelas 7.4 e 7.5 resume-se o erro obtido e o desvio padrão de ambas as trajetórias face ao *ground truth*.

**Tabela 7.4:** *Erro e desvio padrão do DVL referente ao 2º percurso sem calibração*

	$x(m)$	$y(m)$	$z(m)$	$v_x(m/s)$	$v_y(m/s)$	$v_z(m/s)$
Erro médio	1.957	4.375	5.679	0.0436	0.069	0.026
Erro máximo	5.610	7.194	11.244	0.468	0.380	0.151
Desvio Padrão	1.229	1.391	2.738	0.053	0.0457	0.018

**Tabela 7.5:** *Erro e desvio padrão do DVL referente ao 2º percurso com calibração*

	$x(m)$	$y(m)$	$z(m)$	$v_x(m/s)$	$v_y(m/s)$	$v_z(m/s)$
Erro médio	1.752	1.705	0.800	0.0419	0.035	0.013
Erro máximo	4.314	3.456	1.746	0.483	0.387	0.151
Desvio Padrão	1.031	0.902	0.545	0.052	0.041	0.012

Antes de efetuar a calibração, é de destacar que a trajetória melhorou mesmo assim, obtendo-se idênticos parâmetros extrínsecos face à primeira trajetória, no entanto existem diferenças, pois os sensores foram transportados e fixos pela segunda vez no suporte.

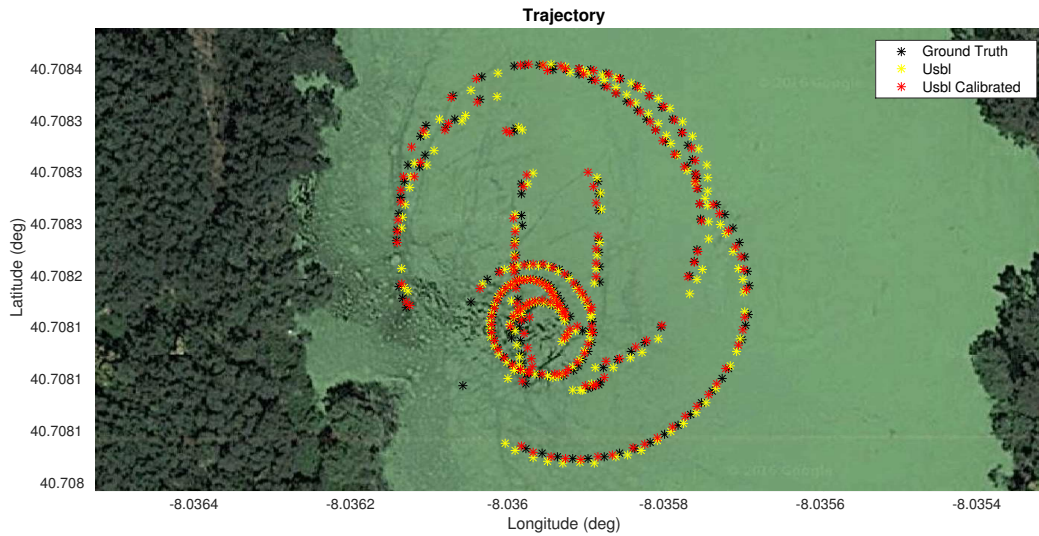
**Tabela 7.6:** *Parâmetros extrínsecos do DVL obtidos a partir da segunda trajetória efetuada no Rio Douro.*

$Rx(^{\circ})$	$Ry(^{\circ})$	$Rz(^{\circ})$
1.27	0.015	3.38

A distância percorrida no Rio Douro é superior à da Mina da Bejanca, no entanto, o erro obtido na Mina da Bejanca é maior, pois as condições ambientais são diferentes. Como a Mina da Bejanca ao pé das margens continha muita vegetação, as medições do DVL falhavam e, conseqüentemente, a posição degradava-se. Um outro facto é derivado às condições ambientais, uma vez que a obtenção da velocidade através do DVL seria de pior qualidade, devido às reflexões causadas pela geometria da Mina. No sentido de consolidar e validar o método de calibração, calculou-se os parâmetros extrínsecos de 11 *logs*, obtendo-se resultados consistentes, isto é, a rotação em  $x$  recebeu uma variação máxima de  $0.3^{\circ}$ , a rotação em  $z$  uma variação de  $0.8^{\circ}$ , enquanto o eixo  $y$  teve uma variação extremamente pequena de  $< 0.05^{\circ}$ . Por fim, é importante salientar que a calibração foi realizada a partir da análise e comparação das velocidades entre o GNSS e o DVL e não pela comparação das posições, pois estaríamos a calibrar o sistema de forma indireta e o algoritmo também tentaria corrigir para além dos parâmetros extrínsecos, o que não tornaria os resultados consistentes. Um outro fator influenciador para o correto funcionamento do algoritmo de calibração consistiu em descartar as medidas com elevada incerteza provenientes do DVL.

### 7.1.2 Calibração USBL

Enquanto os *datasets* possuíam inúmeros *logs* com o DVL, com o USBL só foi realizado um *log* na Mina da Bejanca. No entanto, é possível validar os resultados de calibração através das medidas do *ground truth*. O sistema USBL, tal como referido anteriormente, irá funcionar em modo iUSBL, sendo o *transponder* colocado numa boia com o sistema GNSS e a posição do *transponder* a origem do referencial de navegação (*North-East-Down*). A trajetória realizada para proceder à calibração dos parâmetros extrínsecos do USBL, possui a forma de um caracol, conforme se pode verificar na Figura 7.4.



**Figura 7.4:** *Ground truth versus USBL com e sem calibração na Mina da Bejanca.*

Nas Tabelas 7.7 e 7.8 são demonstrados o erro máximo, médio e o desvio padrão das posições obtidas com e sem calibração.

**Tabela 7.7:** *Erro e desvio padrão USBL em cada eixo sem calibração*

	$x(m)$	$y(m)$	$z(m)$
Erro médio	0.55	0.53	0.96
Erro máximo	2.88	3.01	4.45
Desvio Padrão	0.75	0.74	1.19

**Tabela 7.8:** *Erro e desvio padrão USBL em cada eixo com calibração*

	$x(m)$	$y(m)$	$z(m)$
Erro médio	0.26	0.28	0.80
Erro máximo	1.45	1.91	4.58
Desvio Padrão	0.27	0.30	0.94

É de assinalar que, tal como era esperado, a performance do USBL no eixo  $z$  é inferior à dos eixos  $x$  e  $y$ , sendo o erro médio, cerca de três vezes, maior. Uma das razões deve ao facto do USBL possuir menor exatidão no eixo  $z$  [63] e a outra é devido ao *transponder* estar virado para baixo no mesmo plano horizontal do *transceiver* não sendo a melhor configuração para obter a melhor performance. Porém, a posição no eixo  $z$  no sistema de localização subaquática será estimada com o sensor de pressão,

sendo a posições  $z$  do USBL descartadas. Na Tabela 7.9 apresenta-se os parâmetros extrínsecos obtidos através do algoritmo de calibração.

**Tabela 7.9:** *Parâmetros extrínsecos do USBL.*

$Rx(^{\circ})$	$Ry(^{\circ})$	$Rz(^{\circ})$	$Tx(m)$	$Ty(m)$	$Tz(m)$
-0.03	0.05	6.28	-0.269	0.002	-0.14

É, ainda, de assinalar que existe uma rotação em  $x$  e  $z$ , na qual se deve ao facto da estrutura metálica, tal como se pode observar na Figura 6.1, ter uma ligeira torção e os pontos de fixação não se encontrarem o mais alinhados possível. Por fim, através da análise da Figura 7.4 é, claramente, perceptível que o processo de calibração melhorou, consideravelmente, as medidas obtidas pelo USBL.

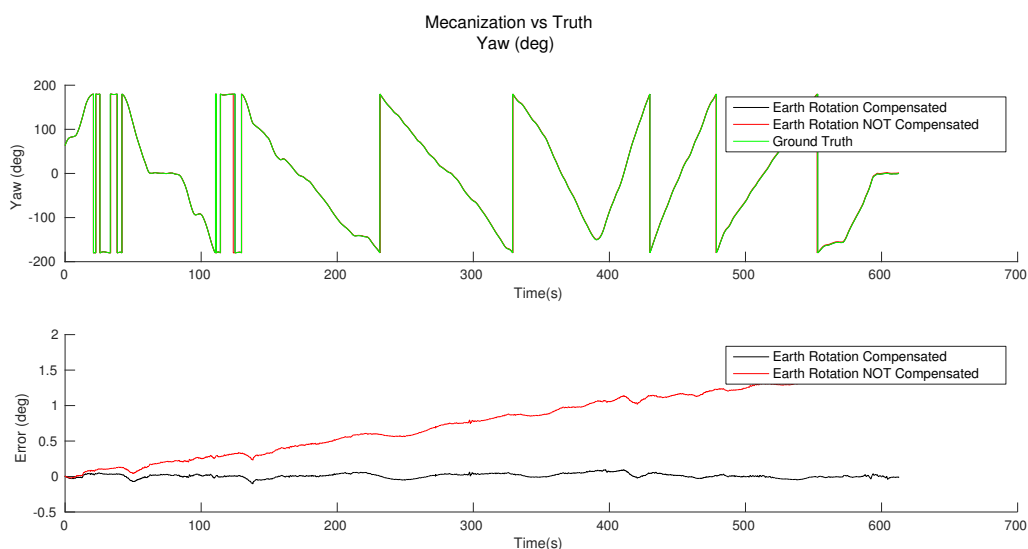
## 7.2 Caracterização da performance do AHRS

A caracterização do sistema AHRS consistiu em comparar a atitude do *ground truth* com a do sistema proposto. Ora, o sistema AHRS disponibiliza a atitude em quaterniões, porém, para maior clareza, a análise foi realizada em ângulos de Euler. Em teoria, é possível obter boa performance nos resultados através da integração, e para que tal seja possível é necessário compensar o ruído de cada giroscópio e a rotação da Terra. Para caracterizar o ruído dos giroscópios utilizou-se o método *Allan Variance*, sendo obtidos os seguintes resultados:

**Tabela 7.10:** *Random Walk e Instabilidade do Bias dos Giroscópios.*

	$x$	$y$	$z$
<i>Random Walk</i> ( $^{\circ}/h/\sqrt{Hz}$ )	0.5449	0.5442	0.5470
Instabilidade Bias ( $^{\circ}/h$ )	0.0429	0.0421	0.0270

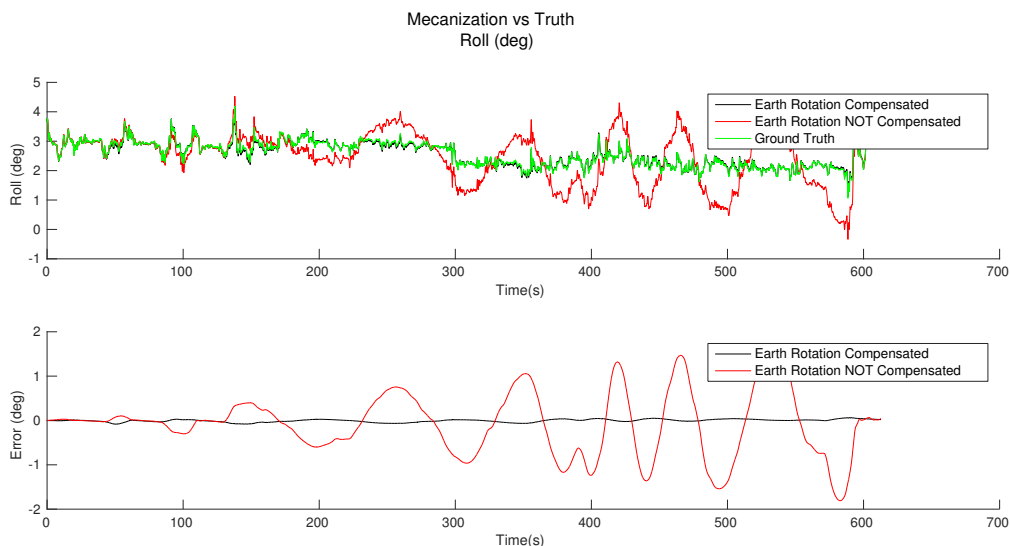
Como se pode verificar, os resultados obtidos são melhores comparativamente com os resultados apresentados pelos fabricantes (ver Tabela 5.1). Após uma correta inicialização do AHRS, os resultados obtidos em *yaw* são apresentados na Figura 7.5. É de referir, que a inicialização não foi realizada com o sistema GNSS, porque no *dataset* não foi possível efetuar uma trajetória retilínea a 5m/s, por esse motivo, na inicialização foi utilizada a atitude proveniente do *ground truth*.



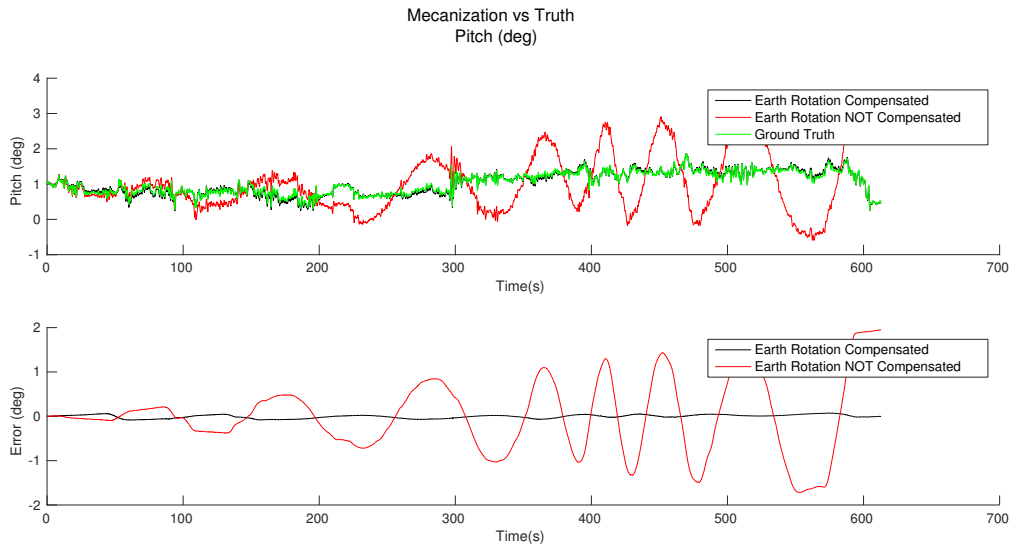
**Figura 7.5:** Comparação do yaw obtido através do AHRS com e sem compensação da rotação da Terra e ground truth.

Conforme podemos constatar na Figura 7.5, é perceptível o impacto que a rotação da Terra causa na obtenção do *yaw*. Porém contabilizando a rotação da Terra, os resultados são extremamente promissores. Em aproximadamente 10 minutos obteve-se um erro máximo de  $0.11^\circ$ .

Por fim, os resultados do *pitch* e *roll* são apresentados nas Figuras 7.6 e 7.7.



**Figura 7.6:** Comparação do roll obtido através do AHRS com e sem compensação da rotação da Terra e ground truth.



**Figura 7.7:** Comparação do *pitch* obtido através do AHRS com e sem compensação da rotação da Terra e ground truth.

Tal como se pode verificar nas Figuras 7.6 e 7.7 a rotação da Terra também tem um impacto negativo na obtenção da atitude em *roll* e *pitch*. Apresenta-se, de forma resumida, na Tabela 7.11 o erro máximo, médio e desvio padrão da atitude obtida pelo sistema AHRS.

**Tabela 7.11:** Erros e desvio padrão AHRS na atitude obtida.

	<i>roll</i>	<i>roll</i> rot.Terra	<i>pitch</i>	<i>pitch</i> rot.Terra	<i>yaw</i>	<i>yaw</i> rot.Terra
Erro médio (°)	0.540	0.026	0.638	0.034	0.778	0.026
Erro máximo (°)	1.809	0.084	1.949	0.085	1.556	0.103
Desvio Padrão (°)	0.483	0.020	0.527	0.023	0.449	0.020

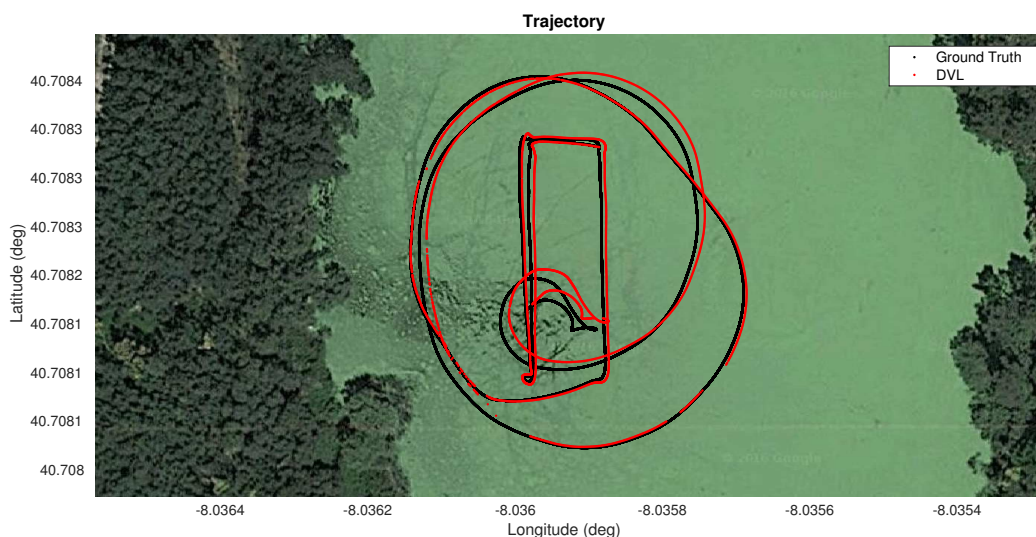
Em suma, com uma correta inicialização da atitude, os resultados obtidos demonstram que o modelo proposto é muito satisfatório. É de salientar, ainda, que o IMU revelou que possui a performance de um *north keeping*.

### 7.3 Caracterização do sistema de localização subaquático

Após a validação e caracterização do processo de calibração e do AHRS, de forma a caracterizar a solução proposta para o sistema de localização subaquático desenvolvido, foi utilizado o *dataset* da Mina da Bejanca, com uma duração de cerca de 10 minutos e uma distância percorrida de 722 metros. Neste *dataset*, de entre os

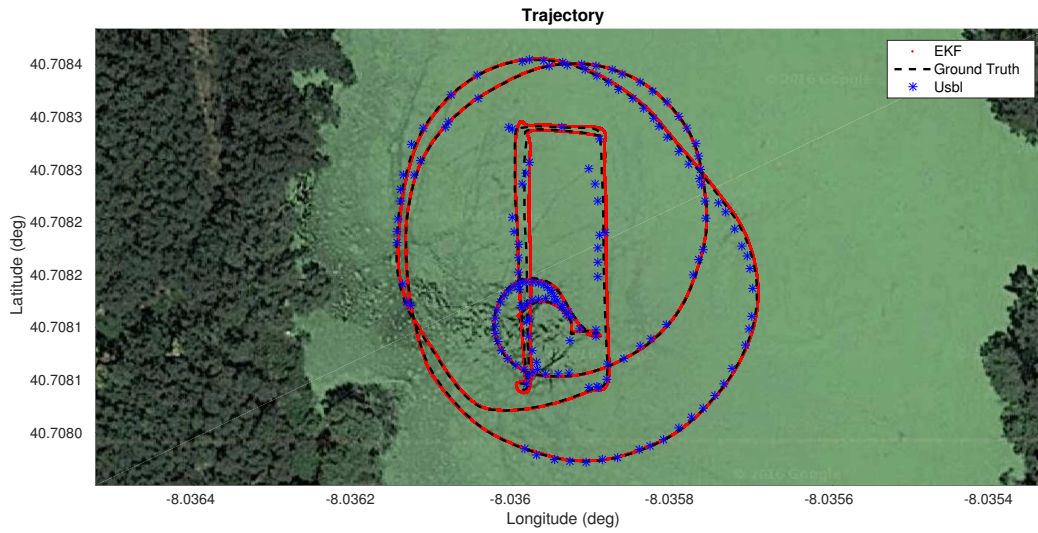
sensores referidos no capítulo 5, o sensor de pressão é o único que não foi utilizado. Porém, para validar a utilização do sensor de pressão no sistema, foram simulados os dados desse sensor, tendo em conta as medidas do GNSS, adicionado um ruído superior ao especificado pelo fabricante do sensor de pressão.

Posto isto, a primeira análise realizada consistiu em comparar as posições obtidas pela integração do DVL, já com calibração e o, *ground truth* presentes na Figura 7.8.



**Figura 7.8:** Comparação entre as posições obtidas pela integração do DVL com calibração e *ground truth*.

Conforme a figura apresenta, pode-se verificar que o DVL falha em determinadas zonas, cerca de 10%. Como referido anteriormente, a vegetação e a geometria da Mina pode impossibilitar o sistema de obter medidas. Um outro problema, devido à posição ser obtida por *dead reckoning* é o facto da degradação da posição aumentar com o decorrer do percurso ficando a trajetória, cada vez mais, deformada. Assim sendo, apresentam-se os resultados obtidos com a fusão sensorial a partir do EKF na Figura 7.9.



**Figura 7.9:** Comparação entre as posições obtidas pelo sistema de localização subaquático e ground truth.

Para uma melhor análise dos resultados, apresentam-se nas Tabelas 7.12 e 7.13 o erro e o desvio padrão em cada eixo bem como as posições e velocidades obtidas somente pela integração, a fusão DVL com as medidas dos acelerómetros e, por fim, a fusão sensorial com DVL, USBL, sensor de pressão e acelerómetros.

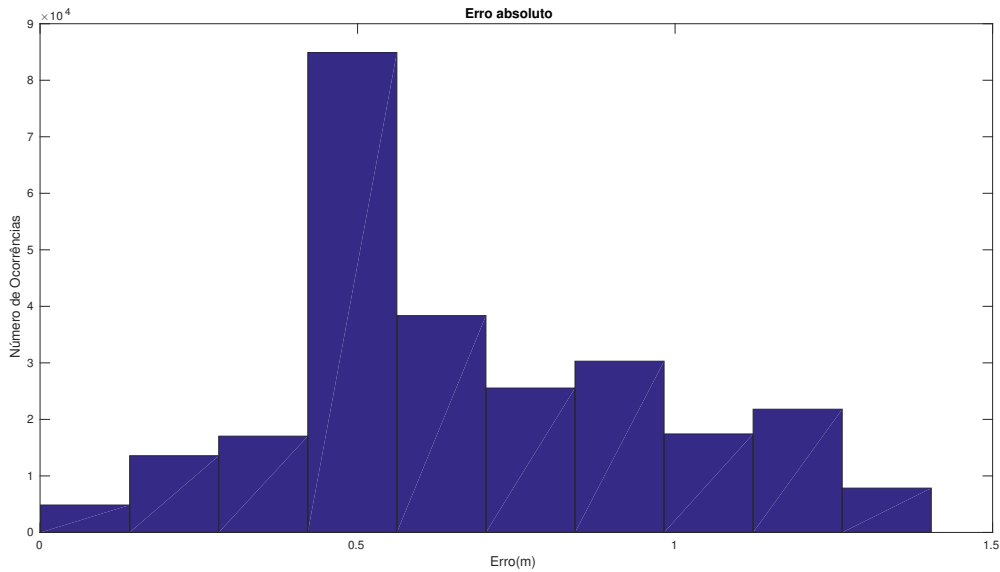
**Tabela 7.12:** Quantificação do erro e desvio padrão em posição do sistema de localização subaquático com e sem USBL e sensor de pressão.

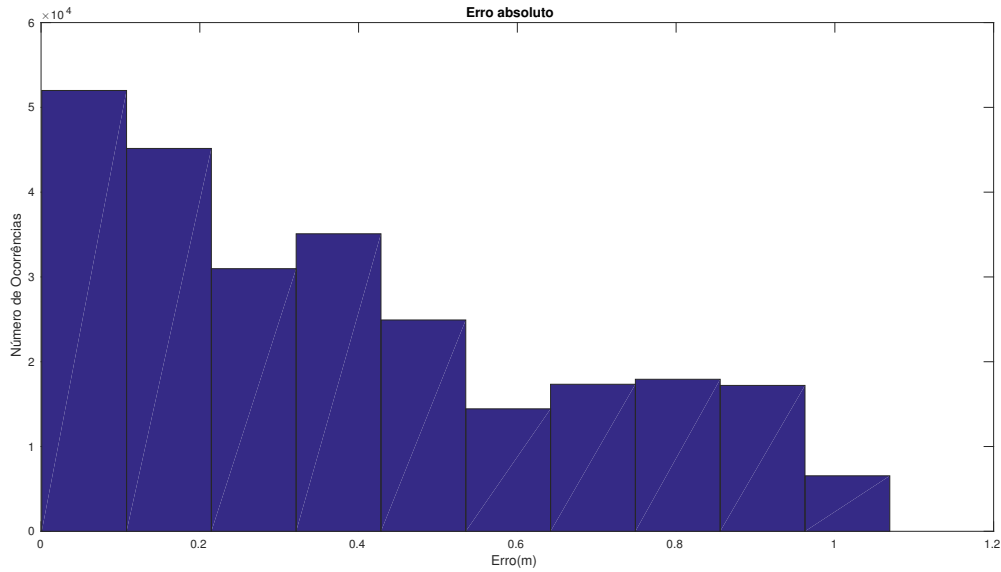
	DVL	EKF IMU+DVL	EKF IMU+DVL + Pressão + USBL
Erro médio $x(m)$	0.910	0.282	0.248
Erro médio $y(m)$	0.652	0.290	0.249
Erro médio $z(m)$	4.788	0.436	0.002
Erro máximo $x(m)$	2.706	0.959	0.816
Erro máximo $y(m)$	1.981	0.891	0.991
Erro máximo $z(m)$	10.098	1.099	0.193
Desvio Padrão $x(m)$	0.582	0.373	0.331
Desvio Padrão $y(m)$	0.419	0.271	0.341
Desvio Padrão $z(m)$	2.995	0.278	0.007
Erro médio $xy(m)$	1.173	0.530	0.479
Erro médio $xyz(m)$	4.972	0.740	0.479

**Tabela 7.13:** *Quantificação do erro e desvio padrão do mesmo das velocidades com e sem EKF.*

	DVL	EKF DVL + Pressão + USBL
Erro médio $v_x(m/s)$	0.036	0.024
Erro médio $v_y(m/s)$	0.035	0.023
Erro médio $v_z(m/s)$	0.020	0.003
Erro máximo $v_x(m/s)$	0.312	0.097
Erro máximo $v_y(m/s)$	0.350	0.086
Erro máximo $v_z(m/s)$	0.130	0.112
Desvio Padrão $v_x(m/s)$	0.030	0.033
Desvio Padrão $v_y(m/s)$	0.032	0.032
Desvio Padrão $v_z(m/s)$	0.012	0.010

Por fim, para uma melhor percepção dos resultados a dispersão do erro médio estimado pode ser observado através dos histogramas apresentados nas Figuras 7.10 e 7.11.

**Figura 7.10:** *Erro absoluto da posição estimada através do EKF utilizando IMU e DVL.*



**Figura 7.11:** Erro absoluto da posição estimada através do EKF utilizando IMU, DVL, USBL e sensor de pressão.

Tendo presente o sistema de localização subaquático proposto nesta dissertação, é de assinalar que foi possível melhorar, consideravelmente, os estados estimados, uma vez que a posição obtida por *dead reckoning*, conforme já referido, degrada-se com o decorrer do tempo. A solução proposta também demonstrou ser robusta, em caso de falhas de dados sensoriais, isto é, a fusão sensorial mesmo com cerca 10% de falhas no percurso ( $\pm 72m$ ) estimou os estados corretamente. No sentido de obter melhorias, com a introdução do USBL, a posição melhorou substancialmente em  $x$  e  $y$ . A melhoria poderia ser, ainda, mais substancial, caso o *transponder* tivesse fundeado no fundo da Mina com o hidrofone virado para cima, de forma a evitar as reflexões causadas pela superfície. Por fim, introduziu-se o sensor de pressão na fusão sensorial, o qual demonstrou que é um sensor indispensável para o alcance de precisões e exatidões elevadas no eixo  $z$ . É de salientar que o processamento do *log* com o sistema de localização proposto demorou cerca de um terço da duração *log* com um processador i5 a 2.26GHz, demonstrando que é possível processar em tempo real.

# 8

## Conclusão e Trabalho Futuro

Esta dissertação prendeu-se com o desenvolvimento de um sistema de localização subaquático para veículos autónomos. A existência de inúmeros projetos no meio aquático, no CRAS/INESC, conduziu à necessidade de explorar as tecnologias e técnicas existentes para a resolução dos problemas associados à localização subaquática.

Através do estudo realizado, assinala-se que o uso de sensores inerciais, DVL e sensor de pressão é dominante na literatura. Não obstante, a utilização destes três tipos de sensores só por si faz com que a localização se degrade com o decorrer do tempo. Para a resolução deste problema é necessário a inserção de um sistema ou sensor que forneça informação de posição. A localização acústica é a solução mais frequente para resolver esse problema, no entanto, os sistemas que oferecem maior precisão são os sistemas mais dispendiosos e que requerem uma mão de obra e logística considerável para a sua instalação. Neste sentido, o sistema acústico utilizado foi o USBL, refletindo-se um sistema mais flexível, de fácil implementação e que possui uma performance aceitável com uma correta calibração.

Neste contexto, foram realizados testes preliminares para a validação dos sensores adquiridos, verificando-se uma grande discrepância entre os resultados obtidos e as especificações dos fabricantes. O desalinhamento entre os sensores, ou mais concretamente os parâmetros extrínsecos não coerentes, é um fator importante a ter em conta quando se realiza a fusão de dados. No caso do USBL e DVL, tal desalinhamento tem um efeito negativo. Por essa razão, foi implementado um algoritmo

de calibração dos parâmetros extrínsecos de cada sensor, que contribui para uma melhoria significativa do sistema de localização.

Um outra componente fundamental do sistema de localização é a estimação da atitude do veículo, uma vez que caso exista um erro mínimo na atitude estimada, este propaga-se, afetando todos os sensores dependentes do sistema. Para contornar esta situação, foi escolhido um IMU com giroscópios de tecnologia FOG que obtivesse uma melhor performance na atitude estimada e, conseqüentemente, melhor performance do sistema de localização, permitindo o funcionamento por períodos mais longos sem recorrer a informação complementar para a correção da orientação. A não inicialização do *yaw* com magnetômetros é outro fator importante, pois em ambientes hostis, como os endereçados em alguns projetos (e.g. VAMOS, UNEX-MIN), teriam um efeito negativo no *yaw* estimado. O modelo proposto para a obtenção da atitude demonstrou-se notável, tendo um erro menor que  $< 0.1^\circ$ , sempre que a inicialização fosse efetuada corretamente e, simultaneamente, a compensação do bias e da rotação da Terra.

A utilização do EKF para a realização da fusão sensorial foi crucial para o desenvolvimento do sistema de localização subaquática. Conforme demonstrado nos resultados, a posição estimada não ultrapassou um erro médio de  $0.479\text{cm}$  num percurso de 722 metros com uma duração de cerca de 10 minutos. O filtro demonstrou-se robusto à falha de medidas sensoriais, pois quando as medidas do DVL falhavam por um grande período de tempo, o filtro continuou a estimar corretamente os estados sem divergir. A causa principal para a não divergência do filtro foi a utilização dos acelerômetros no modelo de previsão e a estimação correta dos bias dos acelerômetros. O sistema de localização subaquático proposto demorou cerca de um terço do tempo real para processar os dados com um processador i5 de primeira geração a 2.26GHz, demonstrando que é possível processar em tempo real. Esta performance deve-se ao uso, principalmente, do EKF e devido aos estados serem previstos através de quaterniões. Em suma, os objetivos propostos para esta dissertação foram concluídos com sucesso.

Sugere-se para investigação futura que o sistema de localização subaquático tenha, igualmente, a possibilidade de estimar os estados através da técnica geofísica, seja por acústica ou ótica. A introdução desta técnica irá proporcionar maior robustez ao sistema de localização subaquático e, irá contribuir em situações de falhas de posicionamento acústico.

Sugere-se, simultaneamente, que o AHRS tenha a capacidade de inicializar o *yaw* através do método *northseeking* de forma a garantir maior robustez e precisão na inicialização. Por último, no que concerne à estimação da orientação, propõem-se

---

a observação da rotação da Terra e as medidas dos acelerómetros para estimar a atitude.



## Bibliografia

- [1] Donald Thomson and International Product. Acoustic Positioning Systems WHY ACOUSTICS ? 2005.
- [2] A. Alcocer, P. Oliveira, and A. Pascoal. Study and implementation of an EKF GIB-based underwater positioning system. *Control Engineering Practice*, 15(6):689–701, 2007.
- [3] Ling Chen, Huosheng Hu, and United Kingdom. Towards Localization and Mapping of Autonomous Underwater Vehicles: A Survey. 2011.
- [4] KVH. Guide to comparing gyro and IMU technologies – Micro-electro-mechanical systems and fiber optic gyros. pages 1–10, 2014.
- [5] Teledyne RD Instruments. *Workhorse Navigator Doppler Velocity Log (DVL)*, 2015.
- [6] K. Vickery. Acoustic positioning systems. A practical overview of current systems. *Proceedings of the 1998 Workshop on Autonomous Underwater Vehicles (Cat. No.98CH36290)*, pages 5–17.
- [7] EDH Gamroth. Design, implementation and testing of an underwater global positioning system. *Zhurnal Eksperimental'noi i Teoreticheskoi Fiziki*, page 169, 2009.
- [8] Angelos Mallios. Pose-Based SLAM with Probabilistic Scan Matching Algorithm using a Mechanical Scanned Imaging Sonar. (July), 2009.
- [9] John J. Leonard, Andrew A. Bennett, Christopher M. Smith, and Hans Jacob S. Feder. Autonomous underwater vehicle navigation. *IEEE ICRA Workshop on Navigation of Outdoor Autonomous Vehicles*, pages 1–17, 1998.
- [10] Per Espen Hagen, Øivind Midtgaard, and Øistein Hasvold. Making AUVs truly autonomous. *Oceans Conference Record (IEEE)*, 2007.
- [11] *Aided Navigation: GPS with High Rate Sensors*. 2008.

- [12] Nak Yong Ko and Tae Yong Kuc. Fusing range measurements from ultrasonic beacons and a laser range finder for localization of a mobile robot. *Sensors (Switzerland)*, 15(5):11050–11075, 2015.
- [13] Liam Paull, Sajad Saeedi, Mae Seto, and Howard Li. AUV navigation and localization: A review. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 39(1):131–149, 2014.
- [14] Roberto Valenti, Ivan Dryanovski, and Jizhong Xiao. Keeping a Good Attitude: A Quaternion-Based Orientation Filter for IMUs and MARGs. *Sensors*, 15(8):19302–19330, 2015.
- [15] Yue Pan, Ping Song, Kejie Li, Yingcai Zhou, and Yiping Wang. Attitude estimation of miniature unmanned helicopter using unscented Kalman Filter. *Proceedings 2011 International Conference on Transportation, Mechanical, and Electrical Engineering, TMEE 2011*, pages 1548–1551, 2011.
- [16] D. Loebis, R. Sutton, and J. Chudley. Review of multisensor data fusion techniques and their application to autonomous underwater vehicle navigation. *Journal of Marine Engineering and Technology*, A(1):3–14, 2002.
- [17] N Bowditch. The American Practical Navigator. *Deffense Mapping Agency Hydrographic/Topographic*, (9):882, 2002.
- [18] Benedetto Allotta, Luca Pugi, Riccardo Costanzi, and Gregorio Vettori. Localization algorithm for a fleet of three AUVs by INS, DVL and range measurements. *IEEE 15th International Conference on Advanced Robotics: New Boundaries for Robotics, ICAR 2011*, pages 631–636, 2011.
- [19] M. Karimi, M. Bozorg, and A. R. Khayatian. A comparison of DVL/INS fusion by UKF and EKF to localize an autonomous underwater vehicle. *International Conference on Robotics and Mechatronics, ICRoM 2013*, pages 62–67, 2013.
- [20] Hao Yanling, Zhang Yi, and Sun Feng. An anomaly recognition algorithm for DVL. *2011 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, ICMA 2011*, pages 2423–2427, 2011.
- [21] Bjørn Jalving, Kenneth Gade, Kristian Svartveit, Are Willumsen, and Robert Sørhagen. DVL velocity aiding in the HUGIN 1000 integrated inertial navigation system. *Modeling, Identification and Control*, 25(4):223–235, 2004.

- [22] Wanli Li, Jinling Wang, Liangqing Lu, and Wenqi Wu. A novel scheme for DVL-aided SINS in-motion alignment using UKF techniques. *Sensors (Switzerland)*, 13(1):1046–1063, 2013.
- [23] Giancarlo Troni and Louis L. Whitcomb. Preliminary experimental evaluation of a Doppler-aided attitude estimator for improved Doppler navigation of underwater vehicles. *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 4134–4140, 2013.
- [24] Davide Fenucci Benedetto Allotta Riccardo Costanzi Niccolò Monni Luca Pugi Andrea Caiti, Francesco Di Corato and Alessandro Ridolfi. Experimental results with a mixed USBL / LBL system for AUV navigation. *UComms*, pages 1–4.
- [25] Pedro Batista, Carlos Silvestre, and Paulo Oliveira. GES Integrated LBL / USBL Navigation System for Underwater Vehicles. 2012.
- [26] Pere Ridao, David Ribas, Emili Hernández, and Alex Rusu. USBL/DVL navigation through delayed position fixes. *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 2344–2349, 2011.
- [27] Paul Rigby, Oscar Pizarro, and Stefan B. Williams. Towards geo-referenced AUV navigation through fusion of USBL and DVL measurements. *Oceans 2006*, (2), 2006.
- [28] Robert Melvin Thomas Hiller, Arnar Steingrímsson. Positioning Small AUVs for Deeper Water Surveys Using Inverted USBL. pages 1–5, 2011.
- [29] P. Krishnamurthy and F. Khorrami. A self-aligning underwater navigation system based on fusion of multiple sensors including DVL and IMU. *2013 9th Asian Control Conference, ASCC 2013*, 2013.
- [30] Min Cheol Lee, A Mems Gyro, and North Finding. Mobile Robot Autonomous Navigation Using MEMS Gyro North Finding Method in Global Urban System. pages 91–96, 2011.
- [31] J. G. Bellingham N. M. Patrikalakis C. Chryssostomidis S. T. Tuohy, J. J. Leonard. Map based navigation for autonomous underwater vehicles. *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, 1996.
- [32] Bartosz Brzozowski, Marta Wojda, and Konrad Wojtowicz. A concept of UAV indoor navigation system based on magnetic field measurements. pages 636–640, 2016.

- [33] Felix Goldenberg. Geomagnetic navigation beyond the magnetic compass. *Record - IEEE PLANS, Position Location and Navigation Symposium*, 2006:684–694, 2006.
- [34] Benjamin Armstrong, Jesse Pentzer, Douglas Odell, Thomas Bean, John Canning, Donald Pugsley, James Frenzel, Michael Anderson, and Dean Edwards. Field Measurement of Surface Ship Magnetic Signature Using Multiple AUVs. *Oceans 2009*, pages 1–9, 2009.
- [35] Mingyong Liu, Hong Li, and Kun Liu. Geomagnetic navigation of AUV without a priori magnetic map. *Oceans 2014 - Taipei*, (1), 2014.
- [36] Ove Kent Hagen, Kjetil Bergh Ånonsen, and Magne Mandt. The HUGIN real-time terrain navigation system. *MTS/IEEE Seattle, OCEANS 2010*, (2027), 2010.
- [37] David Ribas, Pere Ridao, and José Neira. Underwater SLAM for Structured Environments Using an Imaging Sonar. *Springer Tracts in Advanced Robotics*, (1):1–5, 2010.
- [38] António Pestana. Elementos de Geodesia. (1), 2013.
- [39] Ocean Engineering and Ji-hong Li. Design of an adaptive nonlinear controller for depth control of an autonomous underwater vehicle. (October 2016), 2005.
- [40] Tong Heng Guowei Cai, Ben M. Chen. Unmanned Rotorcraft Systems. 2011.
- [41] Fangpo He Andrew Lammas, Karl Sammut. 6-DoF Navigation Systems for Autonomous Underwater Vehicles. 2010.
- [42] Adriano Carvalho. Influência da modelagem dos componentes de bias instabilidade dos sensores inerciais no desempenho do navegador integrado sni/gps. 2011.
- [43] Xiaorong Shen and Suxia Meng. Allan variance segmented circular fitting method for laser gyroscopes random error analysis. *2014 IEEE Chinese Guidance, Navigation and Control Conference, CGNCC 2014*, pages 2053–2058, 2015.
- [44] Renu Bhardwaj, Vipran Kumar, and Neelesh Kumar. Allan variance the stability analysis algorithm for MEMS based inertial sensors stochastic error. *2015 International Conference and Workshop on Computing and Communication, IEMCON 2015*, 2015.

- [45] Improving planetary rover attitude estimation via MEMS sensor characterization. *Sensors*, 12(2):2219–2235, 2012.
- [46] Douglas Santana. Estimaco de trajetórias terrestres utilizando unidade de medio inercial de baixo custo e fuso sensorial. 2005.
- [47] Dylan Rudolph and Timothy A. Wilson. Doppler Velocity Log theory and preliminary considerations for design and construction. *Proceedings of 2012 IEEE Southeastcon*, pages 1–7, 2012.
- [48] Paul A. Miller, Jay A. Farrell, Yuanyuan Zhao, and Vladimir Djapic. Autonomous underwater vehicle navigation. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 35(3):663–678, 2010.
- [49] Teledyne RD Instruments. ADCP Coordinate Transformation. January.
- [50] R.L. Gordon. *Acoustic Doppler current profiler: Principles of operation, a practical primer.*, volume 00. 2011.
- [51] Pan-mook Lee, Bong-huan Jun, Kihun Kim, Jihong Lee, Taro Aoki, and Tadahiro Hyakudome. Simulation of an Inertial Acoustic Navigation System With Range Aiding for an Autonomous Underwater Vehicle. 32(2):327–345, 2007.
- [52] Teresa Silva. Análise de Erros em Receptores de GNSS. 2007.
- [53] Daniele Alves. Gnss: Conceitos, modelagem e prespectivas futuras do posicionamento por satélite. 2012.
- [54] H. Tomas. Gib buoys: an interface between space and depths of the oceans. *Proceedings Of The 1998 Workshop on*, 1998.
- [55] PH Milne. Underwater acoustic positioning systems. pages 1–33, 2007.
- [56] Antnio Ferreira. Report:Robot Localization in Dynamic Underwater Environments. 2016.
- [57] N Pic. Ultrashort Baseline Positioning System: Implementation and Tests at Sea.
- [58] Jayaprasad Bojja, Jussi Collin, Martti Kirkko-Jaakkola, Martin Payne, Ryan Griffiths, and Jarmo Takala. Compact north finding system. *IEEE Sensors Journal*, 16(8):2554–2563, 2016.

- [59] I. P. Prikhodko, A. A. Trusov, and A. M. Shkel. North-finding with 0.004 radian precision using a silicon MEMS quadruple mass gyroscope with Q-factor of 1 million. *Proceedings of the IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS)*, (February):164–167, 2012.
- [60] Xinxi Zhang, Rong Zhang, Meifeng Guo, Yongjian Zhang, Mingliang Song, and Xinxi Zhang. An Algorithm for Improving the Convergence Rate of Attitude by Using GPS Heading Angle in MEMS- INS/GPS Integrated Navigation. (1):2856–2860, 2013.
- [61] D.W. Eggert, A. Lorusso, and R.B. Fisher. Estimating 3-D rigid body transformations: a comparison of four major algorithms. *Machine Vision and Applications*, 9(5-6):272–290, 1997.
- [62] B. Matias, H. Oliveira, J. Almeida, A. Dias, H. Ferreira, A. Martins, and E. Silva. High-accuracy low-cost RTK-GPS for an unmanned surface vehicle. *MTS/IEEE OCEANS 2015 - Genova: Discovering Sustainable Ocean Energy for a New World*, pages 1–4, 2015.
- [63] Mikhail Arkhipov. An algorithm for improving the accuracy of Z-coordinate determination for USBL systems. *WSEAS Transactions on Systems*, 7(4):298–309, 2008.