



# Análise comparativa entre métodos de Northseeking para veículo de mineração subaquática

**CAIO TEIXEIRA LOMBA**

novembro de 2018



# Análise comparativa entre métodos de *Northseeking* para veículo de mineração subaquática

Caio Teixeira Lomba  
N<sup>o</sup> 1150078

Mestrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores -  
Área de Especialização de Sistemas Autónomos

14 de Novembro de 2018





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

Candidato: Caio Teixeira Lomba

Nº 1150078

Orientador: José Miguel Soares de Almeida

Mestrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores -  
Área de Especialização de Sistemas Autónomos

Esta página foi intencionalmente deixada em branco.

”If you run into a wall, don’t  
turn around and give up. Figure  
out how to climb it.”

---

Michael Jordan



# Agradecimentos

Este espaço é dedicado aqueles que deram a sua contribuição para que esta dissertação fosse realizada.

Em primeiro lugar, queria agradecer a toda a minha família, em especial meus pais e meu irmão, pelo apoio incondicional para a realização de mais uma etapa académica e pelo incentivo em seguir o meu sonho mesmo do outro lado do oceano.

Ao meu orientador Eng<sup>o</sup> José Almeida, por me ter proporcionado esta oportunidade e pelo suporte prestado ao longo deste percurso.

A toda "família" do laboratório de sistemas autónomos (LSA) que me acompanhou e forneceu ajuda durante este percurso, especialmente ao Bruno Matias e ao António Ferreira.

A todos meus amigos do mestrado que participaram nesta caminhada comigo, especialmente ao Henrique Silva, Eduardo Soares, Pedro Ribeiro, Diogo Pedrosa, Tiago Correia, Ricardo Pereira, Fábio Azevedo, Alexandre Amaral, Denys Sytnyk e Tiago Pereira.

Um enorme agradecimento aos meus amigos que fiz aqui em Portugal, em especial ao João Abreu, Julio Feltes, Juliana Fagundes, Marcos Pais, Brian Rodrigues, Ricardo Bastos, Müdje Akdeniz, Alexandra Nunes e Felipe Vieira por toda a amizade e companheirismo ao longo desta jornada.

A todos os meus sinceros agradecimentos.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco.

# Resumo

A navegação autónoma é um tópico muito importante em robótica móvel nos dias atuais, sendo que a orientação é um desafio quando a navegação é em ambientes subaquáticos, pois algumas tecnologias não podem ser utilizadas neste tipo de ambiente. Nas aplicações de mineração subaquáticas a utilização de magnetómetros para obter a orientação do veículo pode ser comprometida devido as interferências magnéticas presentes neste ambiente.

Sendo assim a comunidade robótica tem vindo a desenvolver métodos capazes de localizar o norte terrestre com a utilização de sensores como o giroscópio que são sensíveis a rotação angular da Terra. Este processo é denominado de *Northseeking*.

Esta dissertação propõe o desenvolvimento de um sistema composto por uma *turning table* e um sensor inercial que seja capaz de realizar diversos processos de *Northseeking* para um ambiente subaquático.

Foi realizado uma comparação de diversos métodos estáticos e dinâmicos apresentados no estado da arte. Esta comparação visa analisar os métodos em relação a precisão e a exatidão, e para isso foi desenvolvido um *setup* experimental que utiliza um sistema GPS para obter um valor real do ângulo em relação ao norte e poder comparar com os valores obtidos pelos métodos.

Por fim, estes métodos foram testados em ambiente real para validar o desempenho dos mesmos. Estes testes foram realizados em uma mina inundada a céu aberto na Irlanda, no âmbito do projeto ¡VAMOS!, onde o sistema desenvolvido foi fixado à máquina de mineração subaquática.

## **Palavras-Chave:**

Mineração subaquática, orientação, norte terrestre, *Northseeking*, giroscópio, *turning table*.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco.

# Abstract

Autonomous navigation is a very important topic in mobile robotics nowadays, and the heading is a challenge when navigating in underwater environments, since some technologies can not be used in this type of environment. In underwater mining applications the use of magnetometers to obtain vehicle orientation may be compromised due to the magnetic interference present in that environment.

Thus the robotic community come to develop methods capable of locating the true north with the use of sensors like the gyroscope that are sensitive to the angular rotation of the Earth. This process is called Northseeking.

This dissertation proposes the development of a system consisting of a turning table and an IMU that is capable of performing several Northseeking processes for an underwater environment.

A comparison was made of several static and dynamic methods presented in the state of the art. This comparison aims to analyze the methods in terms of precision and accuracy, and for this an experimental setup was developed that uses a GPS system to obtain a real value of the angle in relation to the north and to be able to compare with the values obtained by the methods.

Finally, these methods were tested in real environment to validate their performance. These tests were conducted in an open-pit mine in Ireland in the scope of the ¡VAMOS! Project, where the developed system was fixed to the underwater mining machine.

**Keywords:**

Underwater mining, heading, true north, Northseeking, gyroscope, turning table.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco.

# Conteúdo

|   |            |
|---|------------|
| <b>Agradecimentos</b>                         | <b>i</b>   |
| <b>Resumo</b>                                 | <b>iii</b> |
| <b>Abstract</b>                               | <b>v</b>   |
| <b>Lista de Figuras</b>                       | <b>ix</b>  |
| <b>Lista de Tabelas</b>                       | <b>xi</b>  |
| <b>Lista de Acrónimos</b>                     | <b>xiv</b> |
| <b>1 Introdução</b>                           | <b>1</b>   |
| 1.1 Enquadramento e motivação . . . . .       | 2          |
| 1.2 Objetivos . . . . .                       | 4          |
| 1.3 Estrutura do documento . . . . .          | 4          |
| <b>2 Estado da Arte</b>                       | <b>5</b>   |
| 2.1 Determinação do Norte terrestre . . . . . | 5          |
| 2.2 Métodos estáticos . . . . .               | 7          |
| 2.3 Métodos dinâmicos . . . . .               | 12         |
| <b>3 Fundamentos teóricos</b>                 | <b>17</b>  |
| 3.1 Sensores . . . . .                        | 17         |
| 3.1.1 Giroscópios . . . . .                   | 17         |
| 3.1.2 Acelerómetros . . . . .                 | 19         |
| 3.2 Erros dos sensores . . . . .              | 20         |
| 3.2.1 Fator de escala . . . . .               | 20         |

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| 3.2.2    | Bias constante . . . . .                              | 20        |
| 3.2.3    | <i>Random Walk</i> . . . . .                          | 20        |
| 3.2.4    | Instabilidade do bias . . . . .                       | 21        |
| 3.3      | Análise dos erros . . . . .                           | 22        |
| 3.4      | rotações tridimensionais . . . . .                    | 24        |
| 3.5      | Filtro de <i>Kalman</i> . . . . .                     | 26        |
| <b>4</b> | <b>Projeto</b>  | <b>29</b> |
| 4.1      | Arquitetura do sistema . . . . .                      | 29        |
| 4.2      | Descrição do <i>hardware</i> . . . . .                | 32        |
| 4.2.1    | Motor . . . . .                                       | 32        |
| 4.2.2    | <i>Encoder</i> . . . . .                              | 33        |
| 4.2.3    | Microcontrolador . . . . .                            | 34        |
| 4.2.4    | <i>Inertial Measurement Unit</i> (IMU) . . . . .      | 35        |
| 4.3      | Montagem mecânica . . . . .                           | 41        |
| 4.4      | Descrição do <i>software</i> . . . . .                | 42        |
| 4.4.1    | <i>Software</i> da <i>turning table</i> . . . . .     | 42        |
| 4.4.2    | <i>Software</i> do sistema computacional . . . . .    | 45        |
| <b>5</b> | <b>Comparativo dos métodos de <i>Northseeking</i></b> | <b>49</b> |
| 5.1      | <i>Setup</i> experimental . . . . .                   | 49        |
| 5.2      | Métodos estáticos . . . . .                           | 52        |
| 5.3      | Métodos dinâmicos . . . . .                           | 54        |
| 5.4      | Resumo da Comparação . . . . .                        | 62        |
| <b>6</b> | <b>Resultados</b>                                     | <b>63</b> |
| <b>7</b> | <b>Conclusão e Trabalho Futuro</b>                    | <b>73</b> |
|          | <b>Bibliografia</b>                                   | <b>75</b> |
| <b>A</b> | <b>Desenho técnico da <i>Turning Table</i></b>        | <b>79</b> |

# Lista de Figuras

|     |  |    |
|-----|--|----|
| 1.1 | Robôs desenvolvidos no LSA. . . . .  | 2  |
| 1.2 | Sistemas do projeto ¡VAMOS! . . . . .  | 3  |
| 2.1 | Diagrama esquemático do <i>Northseeking</i> . . . . .  | 6  |
| 2.2 | Processo de <i>Northseeking</i> multi-posições. [1] . . . . .  | 8  |
| 2.3 | (a) Método tradicional, (b) novo método com $\Delta\theta=40^\circ$ , (c) novo método com $\Delta\theta=80^\circ$ , (d) novo método com $\Delta\theta=160^\circ$ . [2] . . . . . | 10 |
| 2.4 | Princípio de funcionamento do método dinâmico de <i>Northseeking</i> . [3] . . . . .   | 12 |
| 2.5 | Sinal de saída do giroscópio antes e depois do filtro <i>Butterworth</i> . [4] . . . . .   | 14 |
| 2.6 | (a) Dados do encoder e do giroscópio com distúrbio aos 80 s; (b) Ângulo de <i>azimuth</i> com <i>Kalman Filter</i> (KF) e <i>Robust Kalman Filter</i> (RKF). [5] . . . . .       | 15 |
| 3.1 | Três diferentes tipos de giroscópios. . . . .  | 18 |
| 3.2 | Acelerómetro MEMS. [6] . . . . .   | 19 |
| 3.3 | Representação gráfica do <i>Allan Variance</i> . [7] . . . . .   | 23 |
| 3.4 | Representação dos ângulos de Euler. [8] . . . . .  | 24 |
| 4.1 | Arquitetura geral do sistema. . . . .  | 30 |
| 4.2 | Arquitetura detalhada da <i>Turning Table</i> . . . . .  | 30 |
| 4.3 | Motor Dynamixel MX-28AR. . . . .   | 32 |
| 4.4 | <i>Encoder</i> rotativo EC35. . . . .  | 33 |
| 4.5 | <i>Board</i> de desenvolvimento NUCLEO-F429ZI. . . . .   | 34 |
| 4.6 | IMU KVH 1775. . . . .  | 36 |
| 4.7 | Gráfico do <i>Allan Deviation</i> para o eixo <i>X</i> do giroscópio. . . . .  | 37 |
| 4.8 | Gráfico do <i>Allan Deviation</i> para o eixo <i>Y</i> do giroscópio. . . . .  | 37 |
| 4.9 | Gráfico do <i>Allan Deviation</i> para o eixo <i>Z</i> do giroscópio. . . . .  | 38 |

|      |   |    |
|------|---|----|
| 4.10 | Gráfico do <i>Allan Deviation</i> para o eixo <i>X</i> do acelerómetro. . . . .                                       | 39 |
| 4.11 | Gráfico do <i>Allan Deviation</i> para o eixo <i>Y</i> do acelerómetro. . . . .                                       | 39 |
| 4.12 | Gráfico do <i>Allan Deviation</i> para o eixo <i>Z</i> do acelerómetro. . . . .                                       | 40 |
| 4.13 | Vista explodida do projeto tridimensional da <i>turning table</i> . . . . .   | 41 |
| 4.14 | Arquitetura de <i>software</i> da <i>turning table</i> . . . . .  | 42 |
| 4.15 | Princípio de funcionamento de um <i>encoder</i> incremental. . . . .  | 44 |
| 4.16 | Arquitetura de <i>software</i> do sistema computacional com ROS. . . . .  | 46 |
| 4.17 | Interface gráfica para controlar a <i>turning table</i> . . . . .   | 47 |
| 5.1  | Diferentes vistas da <i>turning table</i> desenvolvida. . . . .   | 50 |
| 5.2  | <i>Setup</i> experimental com <i>turning table</i> e sistema GPS. . . . .   | 51 |
| 5.3  | Ângulos de <i>roll</i> e <i>pitch</i> estimados pelo KF. . . . .  | 58 |
| 5.4  | Vetor de estados estimados pelo KF. . . . .   | 59 |
| 5.5  | Ângulo de <i>azimuth</i> estimado pelo KF. . . . .  | 60 |
| 6.1  | Mina inundada à céu aberto em Silvermines, Irlanda. . . . .   | 63 |
| 6.2  | Diferentes vistas do sistema desenvolvido fixados ao MV. . . . .  | 64 |
| 6.3  | LARV posicionada na mina em Silvermines. . . . .  | 65 |
| 6.4  | MV com sistema <i>turning table</i> pousado na LARV. . . . .  | 66 |
| 6.5  | Histograma do ângulo de <i>azimuth</i> com o ajuste da distribuição normal<br>para o método dinâmico com SVD. . . . . | 67 |
| 6.6  | Aplicação de realidade virtual do projeto ¡VAMOS!. . . . .  | 69 |
| 6.7  | Visualização em tempo real dos sistemas do ¡VAMOS! em realidade virtual. . . . .                                      | 70 |
| 6.8  | Resultados do <i>Northseeking</i> obtidos quando o MV está em processo de<br>mineração. . . . .                       | 71 |

# Lista de Tabelas

|     |  |    |
|-----|--|----|
| 4.1 | Especificações técnicas do motor MX-28AR. . . . .  | 33 |
| 4.2 | Características técnicas do <i>encoder</i> EC35. . . . .   | 34 |
| 4.3 | Especificações técnicas do microcontrolador STM32F439ZI. . . . .   | 35 |
| 4.4 | Principais características técnicas dos sensores inerciais do KVH 1775. . .  | 35 |
| 4.5 | Medidas dos ruídos para os giroscópios. . . . .  | 36 |
| 4.6 | Medidas dos ruídos para os acelerômetros. . . . .  | 38 |
| 5.1 | Diversos testes de <i>Northseeking</i> de diferentes métodos estáticos para a<br>mesma posição. . . . .                              | 53 |
| 5.2 | Resultados dos testes de exatidão para os métodos estáticos. . . . .   | 53 |
| 5.3 | Diversos testes de <i>Northseeking</i> de diferentes métodos dinâmicos com di-<br>ferentes velocidades para a mesma posição. . . . . | 55 |
| 5.4 | Resultados dos testes de exatidão para os métodos dinâmicos LSM e SVD. .   | 55 |
| 5.5 | Resultados do <i>Northseeking</i> para o método dinâmico com KF. . . . .   | 61 |
| 5.6 | Resultados dos testes de exatidão para o método dinâmico com KF. . . .   | 61 |
| 6.1 | Resultados dos testes de <i>Northseeking</i> em ambiente real para diferentes<br>métodos para a mesma posição. . . . .               | 66 |
| 6.2 | Resultados dos testes de exatidão para o método dinâmico com SVD em<br>ambiente real. . . . .  | 68 |
| 6.3 | Resultados do <i>Northseeking</i> abaixo da superfície da água com o método<br>dinâmico SVD. . . . .                                 | 68 |

Esta página foi intencionalmente deixada em branco.

# Lista de Siglas e Acrónimos

**ARW** Angle Random Walk

**AUV** Autonomous Underwater Vehicle

**CRAS** Centro de Robótica e Sistemas Autónomos

**EVA** Exploration VAMOS AUV

**EKF** Extended Kalman Filter

**FOG** Fiber Optic Gyroscope

**GNSS** Global Navigation Satellite System

**GPS** Global Positioning System

**IMU** Inertial Measurement Unit

**INS** Inertial Navigation System

**INESC TEC** Instituto de Engenharia de Sistemas e Computadores, Tecnologia e Ciência

**ISEP** Instituto Superior de Engenharia do Porto

**KF** Kalman Filter

**LARV** Launch and Recovery Vessel

**LSM** Least Square Method

**MEMS** Micro-Electro-Mechanical System

**MV** Mining Vehicle

**RLG** Ring Laser Gyroscope

**ROS** Robot Operating System

**RKF** Robust Kalman Filter

**SBL** Short BaseLine

**SVD** Singular Value Decomposition

**TOV** Time Of Validity

**USBL** Ultra-Short BaseLine

**USART** Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter

**UDP** User Datagram Protocol

**VRW** Velocity Random Walk

**¡VAMOS!** Viable Alternative Mine Operating System

# Capítulo 1

## Introdução

A navegação autónoma é um tópico muito importante em robótica móvel nos dias atuais, principalmente em ambientes externos. Pode ser utilizado em aplicações como busca e salvamento, mapeamento de áreas, usos militares, por exemplo na orientação e lançamento de mísseis, podendo ser utilizado em veículos terrestres, aéreos e subaquáticos.

Com a melhoria na indústria de automação, houve um aumento na eficiência, na precisão e no desempenho de sensores importantes para a navegação autónoma, bem como o GPS (*Global Positioning System*), IMU (*Inertial Measurement Unit*), INS (*Inertial Navigation System*), entre outros. Além disso, o custo para desenvolver estes sistemas de navegação vem a reduzir, aumentando a velocidade e a precisão na locomoção de robôs, com o objetivo de concluir as missões com maior eficiência.

A orientação é muito importante em um sistema de navegação de veículos autónomos, pois este indicará a direção correta a seguir, ou para obter a própria orientação em relação à um referencial. A bússola é um instrumento muito utilizado pelos seres humanos para se orientar em relação ao Norte terrestre. Com base neste instrumento, a comunidade robótica tem vindo a desenvolver métodos capazes de localizar o Norte terrestre, como por exemplo, o processo de *Northseeking*, no qual utiliza sensores como o giroscópio que são sensíveis a rotação angular da Terra.

Porém a navegação de veículos subaquáticos pode ser um desafio, pois algumas tecnologias não podem ser utilizada neste tipo de ambiente, como por exemplo, a utilização de sensores GPS. Com o crescimento de aplicações no ambiente subaquático, replicar tecnologias e métodos, já conhecidos em outras áreas como terrestre e aérea, vem-se a tornar muito importante.

## 1.1 Enquadramento e motivação

Ao longo dos últimos anos, o Centro de Robótica e Sistemas Autónomos (CRAS) do INESC TEC (Instituto de Engenharia de Sistemas e Computadores, Tecnologia e Ciência) vem a participar de diversos projetos no âmbito nacional e europeu, em diversas áreas da robótica móvel, como aérea e aquática, ilustrado na figura 1.1. O CRAS é responsável pelo sistema de localização e navegação dos veículos do projeto ¡VAMOS! <sup>1</sup> (*Viable Alternative Mine Operating System*).



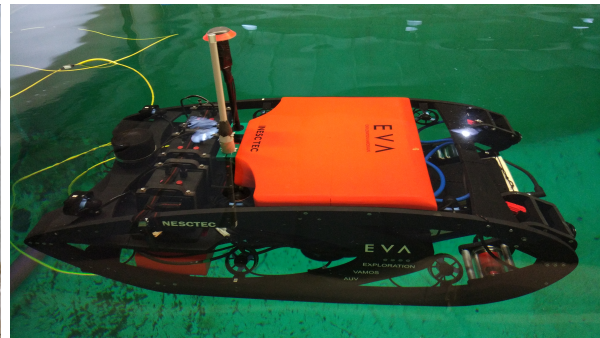
(a) ROAZ II.



(b) TURTLE.



(c) OTUS.



(d) EVA.

Figura 1.1: Robôs desenvolvidos no LSA.

O projeto ¡VAMOS! consiste em um sistema de mineração em minas inundadas a céu aberto, tendo um conjunto de veículos para a operação, tais como, um veículo de superfície denominado LARV (*Launch and Recovery Vessel*), um veículo de mineração MV (*Mining Vehicle*) e um AUV (*Autonomous Underwater Vehicle*) denominado EVA (*Exploration VAMOS AUV*), como ilustrado na figura 1.2.

<sup>1</sup><http://vamos-project.eu/>, acedido em 10/05/2018.



Figura 1.2: Sistemas do projeto ¡VAMOS! <sup>1</sup>.

Para que o MV seja lançado e recuperado do fundo da mina pela LARV, estes têm que estar alinhados para que as manobras sejam realizadas com segurança, ou seja a orientação do MV é muito importante, principalmente quando este está a trabalhar em conjunto com a LARV. A motivação para esta dissertação surgiu com a necessidade de desenvolver um sistema de *Northseeking* capaz de obter com precisão a orientação do MV mesmo este estando submerso.

## 1.2 Objetivos

Com base no problema e nas necessidades do projeto apresentados anteriormente, esta dissertação tem como principal objetivo desenvolver um sistema de *Northseeking*. A seguir são apresentados os objetivos que se pretendem alcançar no desenvolvimento deste projeto:

- Analisar o estado da arte para o processo de *Northseeking*;
- Desenvolver uma *turning table* para um ambiente subaquático;
- Realizar uma análise comparativa entre os métodos estudados;
- Validar o sistema em ambiente real e em tempo real;
- Analisar o desempenho do sistema desenvolvido.

## 1.3 Estrutura do documento

Este documento está organizado em sete capítulos. O segundo capítulo aborda o estudo do processo de *Northseeking*, e os trabalhos existentes para os diferentes métodos, o estático e o dinâmico. No terceiro capítulo são descritos os fundamentos teóricos que são fundamentais para a elaboração deste projeto.

A arquitetura geral do sistema, bem como o *hardware* utilizado e a descrição do *software*, são abordados no capítulo quatro. Em seguida, no capítulo cinco é detalhado a implementação dos métodos apresentados no estado da arte e é apresentada a comparação entre os resultados obtidos, além de ser apresentada um *setup* experimental para a realização dos testes.

A validação do sistema em ambiente real é apresentado no sexto capítulo, além de apresentar os resultados obtidos. Por fim no capítulo sete, são apresentadas as conclusões, juntamente com alguns trabalhos futuros.

## Capítulo 2

# Estado da Arte

Um estudo preliminar aprofundado da literatura existente sobre o tema em questão é essencial para a compreensão da mesma, sendo de extrema importância para decisões no decorrer do projeto. Deste modo, foram estudados diversos métodos para o processo de *Northseeking*, sendo estes divididos em dois grupos, estático e dinâmico. Primeiramente é apresentado o problema para a determinação do Norte terrestre. Em seguida são discutidos os métodos estáticos e dinâmicos.

### 2.1 Determinação do Norte terrestre

Atualmente o sistema de navegação de um veículo autônomo é muito importante, não apenas na sua localização como também na sua orientação. Relativamente a orientação do veículo em relação há um referencial, existem diversos processos capazes de determinar a própria orientação, e um destes processos é o *Northseeking*, que será discutido a seguir.

O processo de *Northseeking* consiste em determinar o ângulo entre o eixo de referência e o Norte terrestre. Os giroscópios são utilizados para este processo, pois podem ser sensíveis a rotação angular da Terra, dependendo da sua precisão. Para obter medidas apropriadas necessárias para determinar o Norte terrestre, o giroscópio tem de estar paralelo ao plano horizontal da Terra, e este tem de rodar perpendicularmente ao eixo de referência, conforme a figura 2.1.

Se o eixo de rotação do giroscópio estiver perpendicular ao plano horizontal da Terra, então é possível medir a velocidade angular da Terra, que é aproximadamente,  $15,041^\circ/\text{h}$ . Em geral, para a determinação do Norte terrestre, é necessário que o eixo de referência do giroscópio, que está paralelo ao plano horizontal da Terra, rode em torno do eixo de rotação do giroscópio.

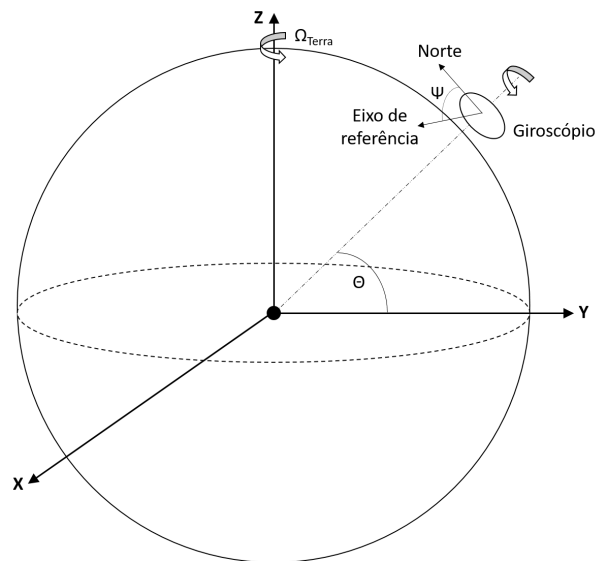


Figura 2.1: Diagrama esquemático do *Northseeking*.

A velocidade angular,  $\omega_i$ , obtida pelo giroscópio pode ser modelado com a equação 2.1, onde  $K$  é o fator de escala do giroscópio,  $\Omega$  é a velocidade angular da Terra,  $\Theta$  é a latitude local e  $\Psi$  é o ângulo de *azimuth*, que é o ângulo entre o eixo de referência do giroscópio e o Norte terrestre.

$$\omega_i = K\Omega \cos \Theta \cos \Psi \quad (2.1)$$

O modelo apresentado acima é apenas uma aproximação, pois não considera os erros de fatores externos como vibração e temperatura no processo de rotação do giroscópio, além do *random drift* e do *bias* do mesmo. Para calcular o ângulo de *azimuth* é necessário obter diversas leituras do giroscópio. Os métodos estático e dinâmico diferem na obtenção das medidas do giroscópio [9], e são apresentados a seguir.

## 2.2 Métodos estáticos

No método estático as velocidades angulares do giroscópio são obtidas quando este está parado, e para que o ângulo de *azimuth* possa ser calculado, é necessário adquirir diversas leituras em diferentes posições[10, 11]. A seguir são apresentados trabalhos já realizados utilizando o princípio do método estático.

Em [12] e [13] os dados do giroscópio são adquiridos apenas em duas posições, uma inicial, que será a de referência, e outra rodada a 180°. O ângulo de *azimuth*  $\Psi$  é então calculado como se segue:

$$\Psi = \arccos\left(\frac{\omega_{position} - \omega_{position+180^\circ}}{2\Omega_{earth} \cos \Theta}\right) \quad (2.2)$$

Este ângulo corresponde ao ângulo entre o eixo do giroscópio na posição inicial e o Norte terrestre. Nestes dois trabalhos é utilizado um giroscópio do tipo *Micro-Electro-Mechanical System* (MEMS), que apesar de ter um custo mais baixo, não possui uma elevada precisão. Em [12], é aplicado um filtro do tipo *Extended Kalman Filter* (EKF) para aprimorar a precisão do sistema. Nos dois casos obteve-se uma precisão de 1°.

Já em [9] é apresentado um método estático para três posições. As medidas do giroscópio para as três posições são representadas nas seguintes equações:

$$U_1 = K\Omega \cos \Theta \cos \phi \quad (2.3)$$

$$U_2 = K\Omega \cos \Theta \cos(\phi + \Phi_1) \quad (2.4)$$

$$U_3 = K\Omega \cos \Theta \cos(\phi + \Phi_2) \quad (2.5)$$

onde  $K$  é o fator de escala do sensor,  $\Omega$  é a velocidade angular da Terra,  $\Theta$  é a latitude local,  $\Phi_1$  é o ângulo entre a primeira e a segunda posição,  $\Phi_2$  é o ângulo entre a primeira e a terceira posição, e  $\phi$  é o ângulo de *azimuth*.

Então, em geral

$$\begin{aligned} U_1 - U_2 &= K\Omega \cos \Theta [\cos \phi - \cos(\phi + \Phi_1)], \\ U_1 - U_3 &= K\Omega \cos \Theta [\cos \phi - \cos(\phi + \Phi_2)] \end{aligned} \quad (2.6)$$

Para facilitar o cálculo do ângulo de *azimuth*, podemos assumir  $\Phi_1 = -\pi/2$  e  $\Phi_2 = \pi/2$ , e com isso temos

$$\frac{U_1 - U_2}{U_1 - U_3} = \frac{[\cos \phi + \sin \phi]}{[\cos \phi - \sin \phi]} \quad (2.7)$$

Podemos obter o ângulo de *azimuth*  $\phi$  resolvendo o sistema de equações acima.

Como o plano em que o giroscópio está instalado nem sempre se encontra perfeitamente paralelo ao plano horizontal da Terra, esta inclinação afetará os resultados do processo de *Northseeking*. A solução proposta por [14] utiliza um acelerômetro para compensar a inclinação em *roll* e *pitch*, e para que isso seja possível, é necessário obter medidas em quatro posições diferentes com ângulo de noventa graus entre cada, ou seja, nos ângulos de  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $180^\circ$  e  $270^\circ$ . Para melhores resultados é utilizado um giroscópio do tipo *Fiber Optic Gyroscope* (FOG), no qual possui maior resolução e sensibilidade, além disso é mais adequado à variações de temperatura. A duração do processo de *Northseeking* é de aproximadamente cinco minutos e com precisão de  $0,2447^\circ$ .

Um algoritmo de multi-posições é apresentado em [1] utilizando o *Singular Value Decomposition* (SVD), onde a *turning table* roda o sensor em  $n$  posições e em cada posição são adquiridos os dados do giroscópio, como mostra a figura 2.2.

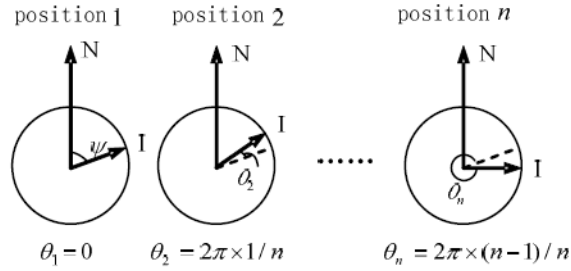


Figura 2.2: Processo de *Northseeking* multi-posições. [1]

Considerando o modelo da velocidade angular do giroscópio sendo como

$$y_i = R + \omega_N \cos(\theta_i - \Psi) + w_i. \quad (2.8)$$

Onde  $R$  é o *drift* do giroscópio,  $w_i$  é o ruído,  $\omega_N = \omega_e \cos \phi$ ,  $\omega_e$  é a velocidade angular da Terra,  $\phi$  é a latitude local,  $\theta_i$  é o ângulo do eixo de referência no instante  $i$  em relação a posição inicial, e  $\Psi$  é o ângulo de *azimuth*. Considerando  $a = \omega_N \cos \Psi$  e  $b = \omega_N \sin \Psi$ , podemos reescrever a equação 2.8:

$$y_i = R + a \cos \theta_i + b \sin \theta_i. \quad (2.9)$$

Representando a equação acima em forma de matriz e para  $n$  posições, temos

$$y = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta_1 & \sin \theta_1 & 1 \\ \cos \theta_2 & \sin \theta_2 & 1 \\ \dots & \dots & \dots \\ \cos \theta_n & \sin \theta_n & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a \\ b \\ R \end{pmatrix} \quad (2.10)$$

A partir da equação 2.10 podemos estimar os valores  $\hat{a}$ ,  $\hat{b}$  e  $\hat{R}$ . Com o teorema SVD uma matriz  $A$  de dimensão  $m \times n$  pode ser fatorizada da seguinte forma

$$A = USV^T \quad (2.11)$$

onde  $U$  é uma matriz unitária  $m \times m$ ,  $V$  é uma matriz unitária  $n \times n$  e considerando  $A$  sendo

$$A = \begin{pmatrix} \cos \theta_1 & \sin \theta_1 & 1 \\ \cos \theta_2 & \sin \theta_2 & 1 \\ \dots & \dots & \dots \\ \cos \theta_n & \sin \theta_n & 1 \end{pmatrix} \quad (2.12)$$

Podemos determinar os valores  $a$ ,  $b$  e  $R$  usando o SVD. Assim a equação 2.10 é equivalente a

$$y = USV^T X. \quad (2.13)$$

Como  $S$  é uma matriz  $n \times 3$  e não é inversível, podemos usar a definição de Moore-Penrose, no qual é possível obter a pseudo-inversa da matriz  $A$

$$A^+ = VS^{-1}U^T. \quad (2.14)$$

Assim sendo, podemos obter os valores de  $a$ ,  $b$  e  $R$  a partir da equação abaixo:

$$X = \begin{pmatrix} a & b & R \end{pmatrix}^T = VS^{-1}U^T y \quad (2.15)$$

O ângulo de *azimuth* é então calculado

$$\hat{\Psi} = \arctan\left(\frac{-b}{a}\right). \quad (2.16)$$

Para validar o método acima explicado, o número de posições escolhido  $n$  é 90, a duração do processo é aproximadamente 4,5min e a variância resultante é de 0,0067°.

Os métodos tradicionais assumem que o *bias* é constante e ignoram o seu *drift*. Em temperaturas severas o *bias drift* pode-se tornar tão grande que não se pode assumir como constante, sendo que se ignorarmos este *drift* a precisão do *Northseeking* irá se degradar. Para resolver este problema, um novo método multi-posições é apresentado em [2], no qual é introduzido uma nova posição que coincide com a posição inicial. A figura 2.3 compara o método multi-posições tradicionais com o método proposto pelos autores.

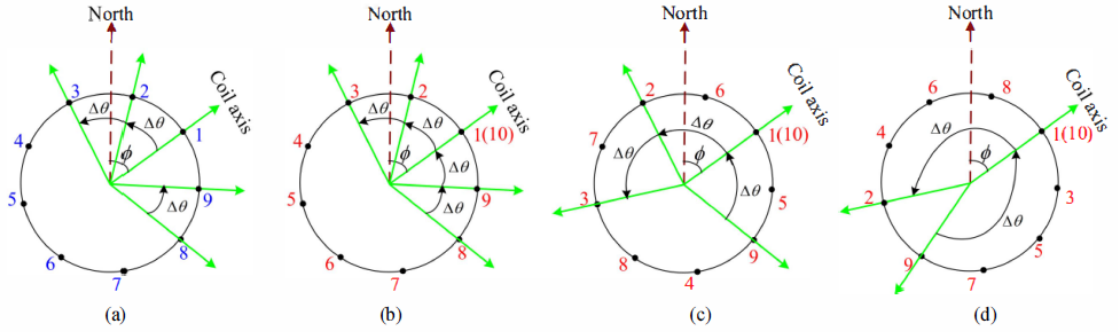


Figura 2.3: (a) Método tradicional, (b) novo método com  $\Delta\theta=40^\circ$ , (c) novo método com  $\Delta\theta=80^\circ$ , (d) novo método com  $\Delta\theta=160^\circ$ . [2]

Este método é flexível em relação ao número de posições  $N$  e o ângulo entre as posições  $\Delta\theta$ , sendo a última posição sempre a mesma que a primeira posição. Em cada posição  $i$  é obtido a média das velocidades angulares  $y_i$  representada como

$$y_i = \omega_e \cos \alpha \cos(\phi - \theta_i) + b_i + v_i \quad (2.17)$$

onde  $\omega_e$  é a velocidade angular da Terra,  $\alpha$  é a latitude local,  $\phi$  é o ângulo de *azimuth*,  $\theta_i$  é o ângulo da posição  $i$  em relação à posição inicial,  $b_i$  é o *bias* e  $v_i$  é o ruído branco. Para simplificar a equação 2.17, podemos obter  $y_i = a \cos \theta_i + c \sin \theta_i + b_i + v_i$ , onde  $a = \omega_e \cos \alpha \cos \phi$  e  $c = \omega_e \cos \alpha \sin \phi$ . Assim o ângulo de *azimuth* pode ser estimado por  $\hat{\phi} = \arctan(\hat{c}/\hat{a})$ .

Ao adicionar uma posição extra ( $N + 1$ ), podemos fazer a diferença entre posições consecutivas para suprimir o *bias drift*. Portanto a estimação dos coeficientes  $a$  e  $c$  para determinar o ângulo de *azimuth* pode ser obtida da seguinte forma:

$$\hat{a} = (1/(N - N \cos \Delta\theta)) \sum_{i=2}^{i=N+1} (y_i - y_{i-1})(\cos \theta_i - \cos \theta_{i-1}) \quad (2.18)$$

$$\hat{c} = (1/(N - N \cos \Delta\theta)) \sum_{i=2}^{i=N+1} (y_i - y_{i-1})(\sin \theta_i - \sin \theta_{i-1}) \quad (2.19)$$

A precisão do processo de *Northseeking* deste método proposto pode ser melhorado em três vezes comparado com o método tradicional de multi-posições.

## 2.3 Métodos dinâmicos

Diferente do método estático, no método dinâmico o eixo de referência do giroscópio está em constante movimento, ou seja, o sensor é rodado à uma velocidade angular constante utilizando, por exemplo, uma *turning table*, como mostra a figura 2.4. Com este método é possível reduzir o tempo do processo de *Northseeking* e aperfeiçoar a precisão do ângulo entre o eixo de referência e o Norte terrestre [15]. A seguir são apresentados trabalhos já realizados utilizando o princípio do método dinâmico.

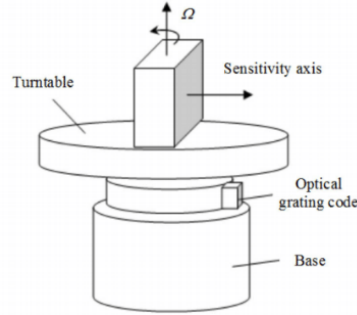


Figura 2.4: Princípio de funcionamento do método dinâmico de *Northseeking*. [3]

Em condições ideais, o eixo de referência do giroscópio está paralelo ao plano horizontal da Terra. Quando a *turning table* roda à uma velocidade angular constante ( $\Omega$ ) o modelo da saída do giroscópio pode ser dado como

$$\omega_{outi}(t_i) = K\omega_{ie} \cos L \cos(\Omega t_i + \Psi_0) + \epsilon_0 + \epsilon_i \quad (2.20)$$

onde  $\omega_{ie}$  é a velocidade angular da Terra,  $L$  é a latitude local,  $\Psi_0$  é o ângulo de *azimuth*,  $K$  é o fator de escala do giroscópio,  $\epsilon_0$  é o desvio zero constante do giroscópio e  $\epsilon_i$  é o *random drift* do giroscópio.

Para calcular o ângulo de *azimuth*, com base nos princípios acima descritos, os autores de [3] utilizaram o *Least Square Method* (LSM). De acordo com o modelo da saída do giroscópio para o método dinâmico em 2.20, este pode ser dividido em

$$\omega_{outi}(t_i) = K\omega_{ie} \cos L \cos \Omega t_i \cos \Psi_0 - K\omega_{ie} \cos L \sin \Omega t_i \sin \Psi_0 + \epsilon_0 + \epsilon_i. \quad (2.21)$$

Considerando  $A = K\omega_{ie} \cos L \cos \Psi_0$ ,  $B = K\omega_{ie} \cos L \sin \Psi_0$ ,  $\alpha_i = \Omega t_i$  e os efeitos dos erros ( $\epsilon_0$  e  $\epsilon_i$ ) são ignorados, então a equação 2.21 pode ser reescrita como:

$$\omega_{outi}(t_i) = A \cos \alpha_i + B \sin \alpha_i. \quad (2.22)$$

Para estimar os parâmetros  $A$  e  $B$ , é utilizado o LSM, e o ângulo de *azimuth* inicial pode ser calculado como a seguir:

$$\Psi_0 = \arctan(-\hat{B}/\hat{A}). \quad (2.23)$$

Para validar o algoritmo acima descrito, foram realizadas simulações para diferentes velocidades angulares da *turning table* e diferentes taxas de amostragens do giroscópio. Os resultados mostram que a precisão do processo de *Northseeking* é afetada quando a velocidade angular é muito baixa ou muito alta, ou seja, há um intervalo da velocidade angular onde é possível obter uma alta precisão, isto ocorre porque dependendo da velocidade angular o sistema torna-se mais sensível as perturbações externas. Em relação a taxa de amostragem, quanto maior a frequência menor será o erro de *northseeking*. Porém se a frequência for muito elevada, a precisão poderá ser comprometida.

Considerando o baixo custo e uma dimensão reduzida, muitas aplicações utilizam os sensores do tipo MEMS, porém estes não são tão precisos e possuem um elevado *drift* quando comparados com, por exemplo, os do tipo FOG. Para obter um melhor desempenho do processo dinâmico de *Northseeking* utilizando sensores do tipo MEMS, um novo método é apresentado em [4].

Neste método é implementado um filtro do tipo *Butterworth* de quinta ordem à saída do giroscópio para eliminar o ruído presente no sensor. Porém após um intervalo de tempo, a instabilidade do *bias* é afetado por erros como o *random walk* e pela variação da temperatura. Estes erros podem ser compensados com uma rotação contínua do giroscópio, este processo também é conhecido como *carouseling* [16]. Assim como em [3], o ângulo de *azimuth* é calculado utilizando o LSM. A figura 2.5 mostra o sinal de saída do giroscópio antes e depois do filtro digital.

Em um ambiente real, o giroscópio pode não estar paralelo ao plano horizontal da Terra, e portanto a gravidade pode afetar os dados de saída do giroscópio, comprometendo os resultados do processo de *Northseeking*. Para isso, os autores de [4] utilizam um acelerômetro para compensar o efeito da gravidade, assim como em [17] que também utilizam este sensor para corrigir o erro causado pela inclinação do plano da *turning table*.

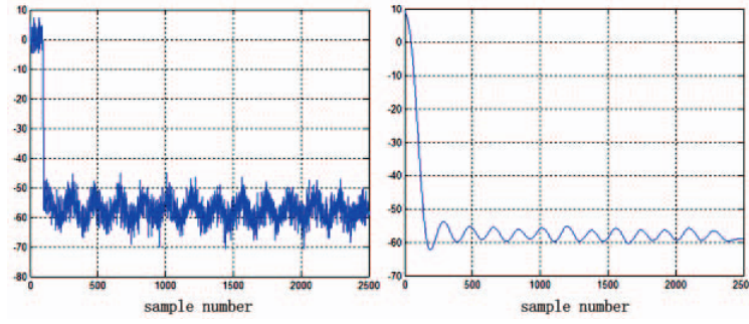


Figura 2.5: Sinal de saída do giroscópio antes e depois do filtro *Butterworth*. [4]

Para aumentar a robustez do sistema de *Northseeking*, os autores de [5] implementaram um método dinâmico no qual utilizam um *Robust Kalman Filter* (RKF) para estimar os parâmetros do sistema. Este método é aplicado utilizando apenas um giroscópio e um acelerômetro, posicionados perpendicularmente entre eles.

Considerando a saída do giroscópio como

$$W = \omega_{ie} \sin \alpha (\sin L \cos \theta \sin \gamma - \cos L \cos \phi \sin \gamma \sin \theta + \cos L \cos \gamma \sin \phi) + \omega_{ie} \cos \alpha (\sin L \sin \theta + \cos L \cos \theta \cos \phi) + E_b \quad (2.24)$$

onde  $\omega_{ie}$  é a rotação angular da Terra,  $\alpha$  é o ângulo de rotação dos sensores em relação a um eixo fixo,  $L$  é a latitude local,  $\theta$  é o ângulo de *pitch*,  $\gamma$  é o ângulo de *roll*,  $\phi$  é o ângulo de *azimuth* e  $E_b$  é o *bias* do giroscópio. Para simplificar a equação acima, podemos considerar

$$\begin{cases} A = \omega_{ie} \sin \alpha (\sin L \cos \theta \sin \gamma - \cos L \cos \phi \sin \gamma \sin \theta + \cos L \cos \gamma \sin \phi) \\ B = \omega_{ie} \cos \alpha (\sin L \sin \theta + \cos L \cos \theta \cos \phi) \end{cases} \quad (2.25)$$

Semelhante ao giroscópio, a saída do acelerômetro é representada como

$$f = g \cos \alpha \cos \theta \sin \gamma - g \sin \alpha \sin \theta + E_a \quad (2.26)$$

onde  $g$  é a aceleração da gravidade e  $E_a$  é o *bias* do acelerómetro. Para simplificar a equação acima, podemos reescrever

$$\begin{cases} C = -g \sin \theta \\ D = g \cos \theta \sin \gamma \end{cases} \quad (2.27)$$

Assim as equações 2.24 e 2.26 podem ser reescritas como

$$\begin{cases} W = A \sin \alpha + B \cos \alpha + E_b \\ f = C \sin \alpha + D \cos \alpha + E_a \end{cases} \quad (2.28)$$

Os parâmetros  $A, B, C, D, E_b$  e  $E_a$  são escolhidos como sendo os estados para o filtro RKF. Assim sendo, a cada atualização do filtro, os estados são calculados, enquanto  $A, B, C$  e  $D$  são calculados quando uma nova observação do giroscópio e do acelerómetro é obtida. Os ângulos de *roll* e *pitch* são calculados a partir de  $C$  e  $D$ . Com os valores destes ângulos e do  $A$  e do  $B$ , o ângulo de *azimuth*  $\phi$  pode ser obtido através da seguinte equação:

$$\tan \phi = \frac{(\frac{A}{\omega_{ie}} - \sin L \cos \theta \sin \gamma + \cos L \sin \gamma \sin \theta) / \cos \gamma}{(\frac{B}{\omega_{ie}} - \sin L \sin \theta) / \cos \theta} \quad (2.29)$$

O filtro RKF é robusto quando o sistema sofre distúrbios, como podemos ver na figura 2.6. Os resultados finais apresentados pelos autores mostram uma precisão do sistema de  $1^\circ$ , e o ângulo de *azimuth* é convergido após 40 s.

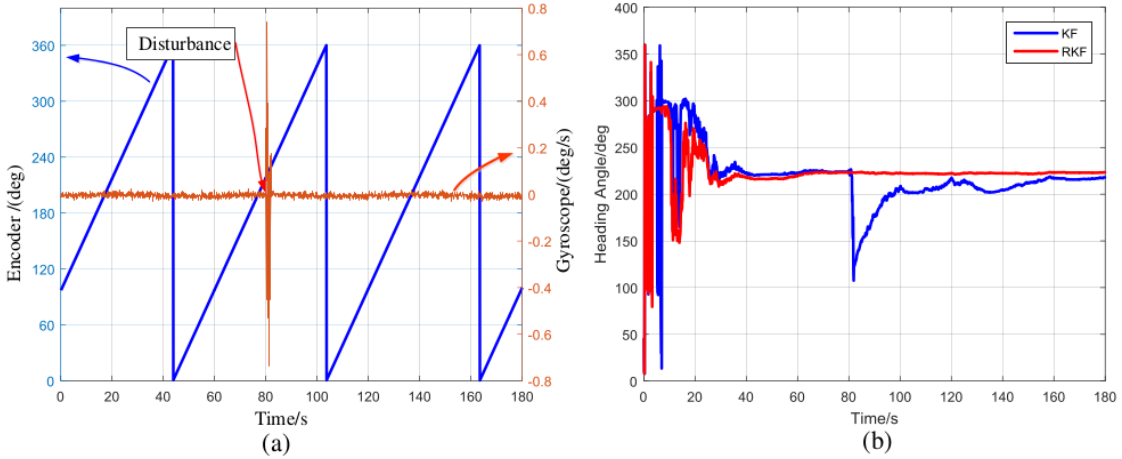


Figura 2.6: (a) Dados do encoder e do giroscópio com distúrbio aos 80 s; (b) Ângulo de *azimuth* com *Kalman Filter* (KF) e *Robust Kalman Filter* (RKF). [5]

Esta página foi intencionalmente deixada em branco.

## Capítulo 3

# Fundamentos teóricos

Neste capítulo serão apresentados os conceitos e fundamentos teóricos necessários para a compreensão do trabalho proposto e dos resultados. Primeiramente são discutidos os sensores necessários para a realização do *Northseeking*, bem como os respectivos erros associados à estes sensores, e um método para quantificar algum destes erros. Também são apresentados os conceitos sobre as rotações tridimensionais, e por último a base do filtro de Kalman.

### 3.1 Sensores

Para obter a orientação de um objeto, um IMU é frequentemente utilizado, e este normalmente é constituído por giroscópios, acelerómetros e em alguns casos também por magnetómetros. Nesta secção os conceitos de funcionamento dos giroscópios e dos acelerómetros são apresentados. Além disso, os erros típicos encontrados nestes sensores também serão abordados.

#### 3.1.1 Giroscópios

Os giroscópios medem a velocidade angular em relação a um eixo, e normalmente um IMU possui três giroscópios ortogonais para cobrir os eixos  $xyz$ . Existem vários tipos de giroscópios que utilizam diferentes tecnologias, sendo estas do tipo MEMS, FOG e RLG (*Ring Laser Gyroscope*). As principais diferenças entre estes tipos de sensores são o preço, o tamanho e a precisão das medidas. O princípio de funcionamento dos três tipos de sensores são ilustrados na figura 3.1.

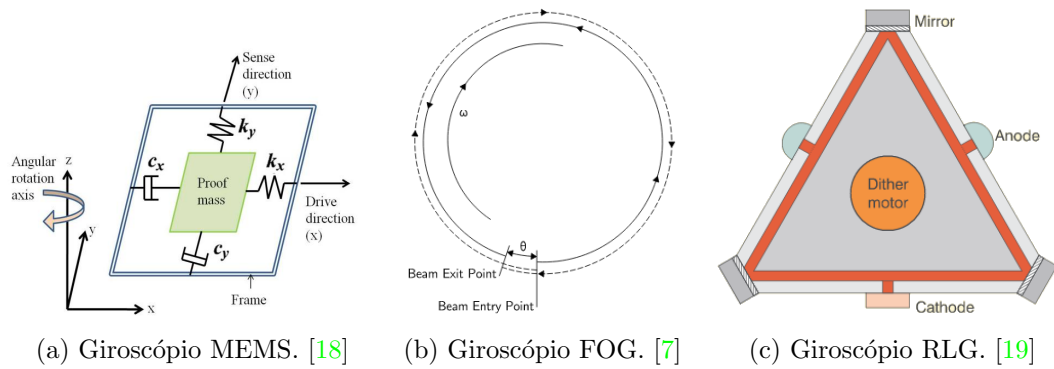


Figura 3.1: Três diferentes tipos de giroscópios.

Os giroscópios do tipo MEMS são fabricados em *chips* de silicone, sendo facilmente fabricados em grande escala, e por isso, são os mais baratos entre os citados acima. Estes sensores consistem em elementos vibratórios que medem o efeito de *Coriolis*. Quando o giroscópio é rodado uma vibração secundária é induzida perpendicularmente ao movimento devido a força de *Coriolis*. A velocidade angular pode ser calculada a partir desta vibração secundária. Uma das desvantagens deste tipo de sensor é que são sensíveis às mudanças de temperatura, e com isso possui menos exatidão comparado com os outros tipos.

Ao contrário dos sensores do tipo MEMS, os giroscópios do tipo FOG possuem maior precisão, porém não podem ser menores do que os sensores MEMS. Os sensores FOG utilizam a interferência da luz para calcular a velocidade angular, para isso é necessário uma bobina de fibra ótica. Dois feixes de luz são disparados pela bobina em direções opostas e quando o sensor é rodado um dos feixes irá demorar mais tempo do que o outro para percorrer a mesma trajetória, isso é causado devido ao efeito *Sagnac* [20]. Este efeito faz com que os feixes interfiram, resultando em um feixe combinado, e com isso é possível calcular a velocidade angular através da intensidade deste feixe resultante.

Já os giroscópios RLG são os que possuem mais exatidão, porém também são os mais caros. Assim como o sensor FOG, também utilizam o princípio do efeito *Sagnac*, mas ao invés de utilizar a luz, utilizam *laser* e espelhos para guiarem os feixes. Uma desvantagem dos RLG em relação aos FOG, é que possuem uma mecânica mais complexa, resultando em uma dimensão maior.

### 3.1.2 Acelerómetros

Os acelerómetros medem a aceleração linear de um objeto, com base no comportamento de um conjunto massa-mola. Com o deslocamento da massa, é possível calcular a aceleração linear, quanto maior a aceleração maior será o deslocamento da massa. A aceleração resultante será afetada pela aceleração gravitacional, para isso é necessário compensar tal aceleração. Com os acelerómetros também é possível estimar a posição integrando duas vezes as medidas obtidas, no entanto isso causará em um erro de segunda ordem. Na maioria dos IMUs os acelerómetros utilizados são do tipo MEMS. A figura 3.2 mostra uma visão microscópica de um acelerómetro do tipo MEMS.

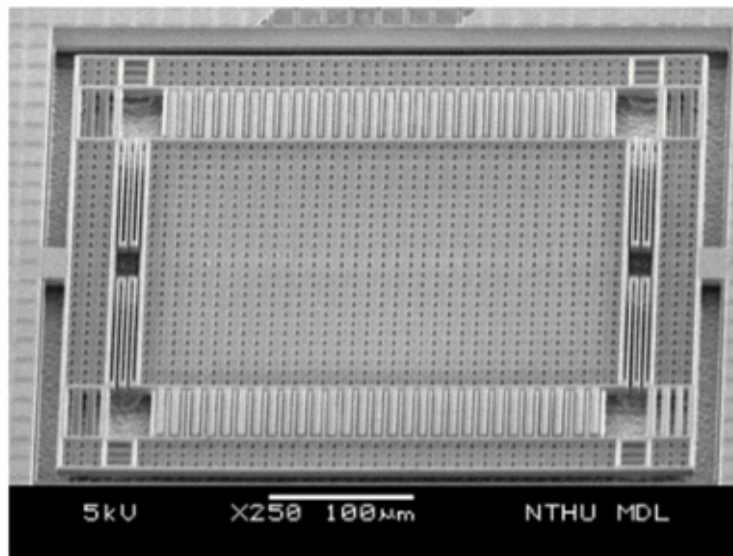


Figura 3.2: Acelerómetro MEMS. [6]

## 3.2 Erros dos sensores

A seguir serão descritos os principais erros e ruídos associado aos sensores giroscópio e acelerómetro.

### 3.2.1 Fator de escala

O fator de escala é um erro relacionado com a calibração do sensor, que pode ser considerado como uma constante. Este erro relaciona o sinal medido pelo sensor com o sinal de entrada. Idealmente o fator de escala deve ser nulo, no entanto isto não acontece em um mundo real.

### 3.2.2 Bias constante

O bias constante é um *offset* da saída do sensor em relação ao valor real. No caso do giroscópio este erro é expressado em  $^{\circ}/h$ , e quando integrado, provoca um erro angular que cresce linearmente com o tempo. Além disso o erro do bias constante pode ser estimado obtendo a média dos valores de saída do giroscópio, enquanto este está parado, após um longo período. Já no caso do acelerómetro, este erro é expressado em  $m/s^2$ , e quando integrado duas vezes, gera um erro de posição que cresce quadraticamente com o tempo. No caso do acelerómetro é mais difícil estimar o erro do bias constante, pois mesmo quando está parado a aceleração da gravidade é medida pelo sensor, para tanto é necessário conhecer a orientação do sensor com precisão para conseguir estimar corretamente o valor do bias constante.

### 3.2.3 *Random Walk*

As medidas obtidas pelos sensores são perturbadas por ruído branco, que basicamente descreve o quanto a medida do sensor será desviada se o sinal for integrado, ou seja, uma maneira de medir o *drift* das medidas do sensor causadas pelo ruído branco em um determinado período. No caso do giroscópio é denominado de *Angle Random Walk* (ARW), e é normalmente expressado em  $^{\circ}/\sqrt{h}$ . Já no caso do acelerómetro, este é denominado de *Velocity Random Walk* (VRW), e é normalmente expressado em  $m/s/\sqrt{h}$ . Existem diversos métodos para quantificar este tipo de erro, um destes métodos é o *Allan Variance* [21, 22, 23], que será detalhado na secção 3.3.

### 3.2.4 Instabilidade do bias

A instabilidade do bias representa um ruído de baixa frequência existente nos sensores inerciais, basicamente descreve como o bias nos sensores variam ao longo do tempo. Geralmente a instabilidade do bias possui valores em unidades de  $^{\circ}/h$  nos giroscópios e  $m/s^2$  nos acelerómetros. Para calcular a instabilidade do bias também podemos utilizar o método de *Allan Variance*, que será apresentado a seguir.

### 3.3 Análise dos erros

Em 1966, David Allan propôs um método para análise da estabilidade e para a caracterização dos ruídos em sistemas oscilatórios [24], conhecido como *Allan Variance*. Esta técnica pode ser aplicada para qualquer sinal para determinar as características dos ruídos presente neste sinal, sendo assim muito utilizado nos sensores inerciais [25, 26, 27]. Para calcular o *Allan Variance* é necessário os seguintes passos:

- Adquirir uma quantidade muito grande de dados e dividi-los em conjuntos com tamanho  $t$  segundos. É necessários pelo menos 9 conjuntos de dados.
- Obter a média dos dados para cada conjunto e obter uma lista de médias  $(y(t)_1, y(t)_2, \dots, y(t)_n)$ , onde  $n$  é o número de conjuntos.
- O *Allan Variance* é então dado por

$$AVAR(t) = \frac{1}{2(n-1)} \sum_i (y(t)_{i+1} - y(t)_i)^2. \quad (3.1)$$

Para determinar as características dos ruídos nos sinais dos sensores, é necessário obter o gráfico do *Allan Deviation*, equação 3.2, em função do tempo em uma escala *log-log*. Os diferentes tipos de erros, como o *random walk* e a instabilidade do bias, pode ser obtida através do gráfico como mostra a figura 3.3.

$$AD(t) = \sqrt{AVAR(t)} \quad (3.2)$$

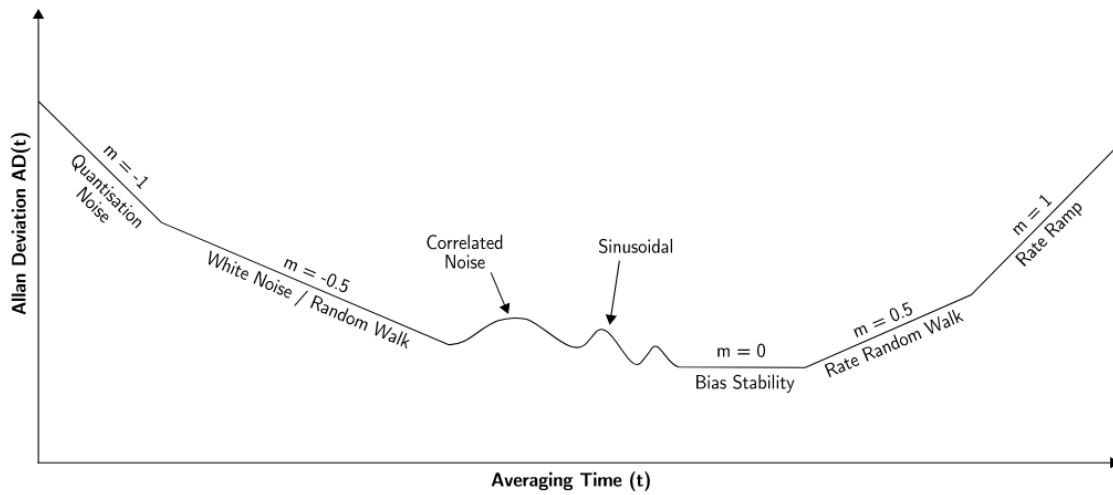


Figura 3.3: Representação gráfica do *Allan Variance*. [7]

O ruído branco aparece no gráfico do *Allan Variance* onde a inclinação é de  $-0,5$ . O *random walk* (ARW para o giroscópio e VRW para o acelerómetro) é obtido pelo ajuste de uma linha reta através desta inclinação e lendo o seu valor em  $t = 1$ .

Já a instabilidade do bias aparece no gráfico como o valor mínimo da região mais plana da curva do *Allan Variance*.

### 3.4 Rotações tridimensionais

A forma mais intuitiva de representar uma orientação tridimensional de um corpo rígido é através dos ângulos de Euler. As três rotações são denominadas por *roll* ( $\phi$ ), *pitch* ( $\theta$ ) e *yaw* ( $\psi$ ), referentes aos eixos  $X$ ,  $Y$  e  $Z$  respectivamente, como é mostrado na figura 3.4.

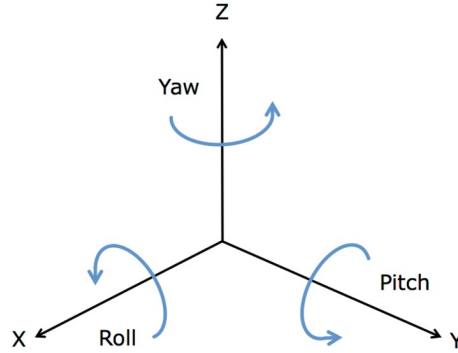


Figura 3.4: Representação dos ângulos de Euler. [8]

A representação das rotações em torno dos eixos  $X$ ,  $Y$  e  $Z$  na forma matricial são descritas nas equações 3.3, 3.4 e 3.5.

$$R_x(\phi) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\phi) & -\sin(\phi) \\ 0 & \sin(\phi) & \cos(\phi) \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

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

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

A rotação nos três eixos é representada por:

$$R(\phi, \theta, \psi) = R_x(\phi)^T R_y(\theta)^T R_z(\psi)^T \quad (3.6)$$

$$R = \begin{bmatrix} \cos(\theta) \cos(\psi) & \cos(\theta) \sin(\psi) & -\sin(\theta) \\ \sin(\phi) \sin(\theta) \cos(\psi) - \cos(\phi) \sin(\psi) & \sin(\phi) \sin(\theta) \sin(\psi) + \cos(\phi) \cos(\psi) & \sin(\phi) \cos(\theta) \\ \cos(\phi) \sin(\theta) \cos(\psi) + \sin(\phi) \sin(\psi) & \cos(\phi) \sin(\theta) \sin(\psi) - \sin(\phi) \cos(\psi) & \cos(\phi) \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

Os ângulos de Euler são frequentemente utilizados pela sua simplicidade quando comparado com outras formas de representação como é o caso dos quatérnios. Porém, os ângulos de Euler possuem uma limitação relacionada com a existência de singularidades. Esta limitação é conhecida como *Gimbal Lock*, que representa a perda de um grau de liberdade em um espaço tridimensional, no qual acontece quando dois dos três eixos estão em uma configuração paralela. Esta limitação impossibilita o uso quando o ângulo de *pitch* atinge  $\pm 90$  graus.

### 3.5 Filtro de *Kalman*

O *Kalman Filter* (KF) é um dos métodos mais comum para fusão sensorial e é um algoritmo que tem como base o modelo dinâmico do sistema e dos sensores. É utilizado para estimar os estados do sistema utilizando as medidas das observações afetados por ruídos e incertezas [28, 29]. O KF é um filtro recursivo em que para cada instante de tempo prevê o próximo estado a partir do modelo da dinâmica e atualiza o estado atual utilizando a previsão e as medidas atuais. Estas duas etapas do KF são denominadas de previsão e atualização.

O estado previsto  $\hat{x}(k|k-1)$  no instante  $k$  e a sua covariância  $P(k|k-1)$  são obtidos por

$$\hat{x}(k|k-1) = F(k)\hat{x}(k-1|k-1) + B(k)u(k) \quad (3.8)$$

$$P(k|k-1) = F(k)P(k-1|k-1)F^T(k) + Q(k) \quad (3.9)$$

onde  $F(k)$  é a matriz do modelo do sistema, que correlaciona os estados anteriores com os estados atuais,  $\hat{x}(k-1|k-1)$  é o estado estimado,  $B(k)$  é a matriz de entrada,  $u(k)$  é o controle aplicado ao sistema,  $P(k-1|k-1)$  é a covariância estimada e  $Q(k)$  é a covariância do ruído do processo.

A observação prevista é obtida através da seguinte equação

$$\hat{z}(k|k-1) = H(k)\hat{x}(k|k-1) \quad (3.10)$$

onde  $H(k)$  é a matriz do modelo da observação, que correlaciona os estados com as observações. A diferença entre a observação atual  $z(k)$  e a observação prevista  $H(k)\hat{x}(k|k-1)$  é denominada de inovação  $\nu(k)$ :

$$\nu(k) = z(k) - H(k)\hat{x}(k|k-1) \quad (3.11)$$

A covariância da inovação  $S(k)$  é representado por

$$S(k) = H(k)P(k|k-1)H^T(k) + R(k) \quad (3.12)$$

onde  $R(k)$  é a covariância do ruído das observações.

A etapa de atualização permite obter o estado estimado  $\hat{x}(k|k)$  e a covariância do estado estimado  $P(k|k)$ , e são apresentados como a seguir:

$$\hat{x}(k|k) = \hat{x}(k|k-1) + W(k)\nu(k) \quad (3.13)$$

$$P(k|k) = P(k|k-1) - W(k)S(k)W^T(k) \quad (3.14)$$

onde  $W(k)$  é o ganho do KF e é expressado por

$$W(k) = P(k|k-1)H(k)S^{-1}(k) \quad (3.15)$$

Esta página foi intencionalmente deixada em branco.

# Capítulo 4

## Projeto

Após analisar os métodos de *Northseeking* apresentados no capítulo 2, verificou-se a necessidade de desenvolver um sistema que seja capaz de realizar o *Northseeking* a partir de sensores inerciais, para obter uma orientação com elevada precisão. Nos sub-capítulos seguintes, são apresentados a arquitetura geral do sistema, bem como a descrição do *software* e o *hardware* utilizado.

### 4.1 Arquitetura do sistema

No presente sub-capítulo é apresentada a arquitetura geral do sistema, como ilustrado na figura 4.1, sendo este dividido em dois módulos, o sistema da *turning table* e o sistema computacional. O sistema da *turning table* é constituído por um servomotor, uma caixa de redução, um sensor IMU, um *encoder* e um microcontrolador. O tamanho do sistema da *turning table* é um ponto crítico, pois este deve ser instalado em um cilindro com 27cm de comprimento e 20cm de diâmetro, que será fixado ao MV do projeto ¡VAMOS!. A descrição do *hardware* utilizado será apresentada na secção 4.2.

O microcontrolador é responsável por adquirir os dados do sensor IMU, controlar o servomotor, obter a leitura do *encoder* e, enviar e receber os dados necessários para/do sistema computacional. Estes dados são enviados através de uma ligação *Ethernet*, sendo UDP (*User Datagram Protocol*) o protocolo escolhido para a comunicação.

Como podemos observar na figura 4.2, o motor comunica com o microcontrolador por RS-485, sendo este responsável por enviar os comandos de controlo para o motor. A leitura do *encoder* é realizada analisando três sinais ligados diretamente aos I/O's do microcontrolador, sendo dois sinais para a leitura da quadratura e um sinal para obter o zero absoluto do *encoder*. Já o IMU comunica com o microcontrolador por RS-422,

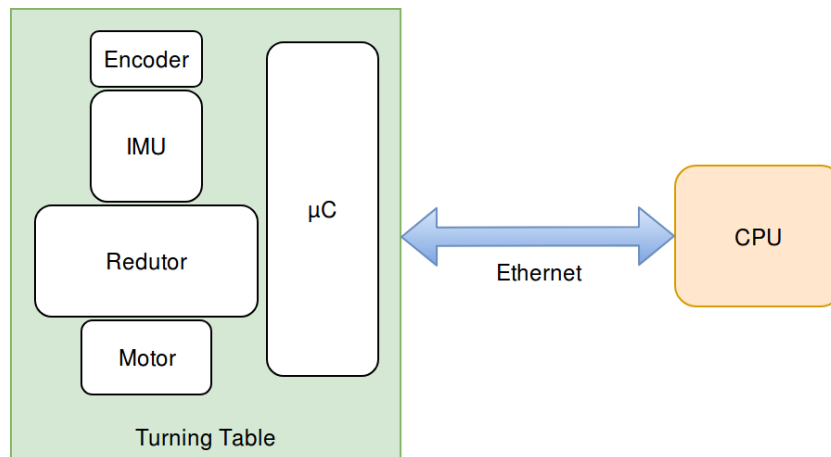
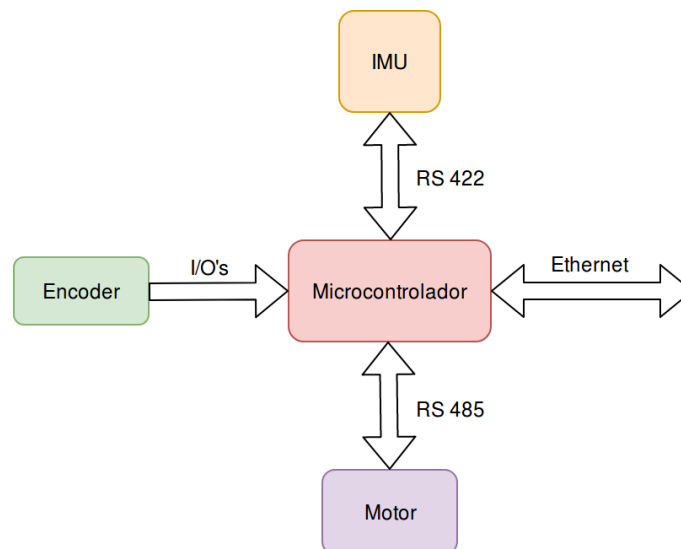


Figura 4.1: Arquitetura geral do sistema.

sendo os sinais constituídos por envio e recepção dos dados, um sinal de sincronismo no qual o microcontrolador poderá decidir quando o IMU enviará os dados, além de um sinal que o IMU envia para o microcontrolador quando este adquire os dados dos sensores inerciais, este último sinal é denominado de *Time of Validity (TOV)*.

Figura 4.2: Arquitetura detalhada da *Turning Table*.

Já o sistema computacional é responsável por receber os dados enviados pela *turning table*, calcular o ângulo de *azimuth* através de um dos métodos, e disponibilizar os dados resultantes do processo de *Northseeking* para o sistema de navegação do MV, sendo que este sistema não faz parte desta dissertação. Além disso, a *turning table* também é controlada pelo sistema computacional, ou seja, podemos configurar a velocidade, a direção de rotação, a posição relativa à uma posição inicial e também realizar a calibração do sistema a qualquer instante. Assim sendo, o controlo do sistema fica distribuído, onde o controlo de baixo nível é realizado todo na *turning table*, e o controlo de alto nível e o processamento do *Northseeking* é realizado no sistema computacional. Toda a comunicação entre a *turning table* e o sistema computacional é realizada através do protocolo UDP por uma ligação *Ethernet*.

## 4.2 Descrição do hardware

### 4.2.1 Motor

Para realizar o processo de *Northseeking* de forma rápida e eficaz, é necessário rodar o sensor IMU em diferentes posições, ou até mesmo, rodar continuamente com uma velocidade fixa para o caso do método dinâmico. Com isso foi necessário selecionar um motor capaz de suportar uma carga de aproximadamente 600g, ter um torque necessário para rodar o sensor, rodar livremente 360°, ser leve e compacto, além de ter uma boa relação custo-benefício. Com base nestes requisitos, foi selecionado o motor Dynamixel<sup>1</sup> modelo MX-28AR, ilustrado na figura 4.3, no qual já possui um controlador integrado, reduzindo a dimensão do hardware necessário. A tabela 4.1 apresenta as características técnicas mais relevantes do motor.



Figura 4.3: Motor Dynamixel MX-28AR<sup>1</sup>.

<sup>1</sup><http://en.robotis.com>, acessado em 19/07/2018.

|             | Valor              | Unidade |
|-------------|--------------------|---------|
| Peso        | 77                 | g       |
| Dimensão    | 35,6 x 50,6 x 35,5 | mm      |
| Comunicação | RS-485             | -       |
| Alimentação | 10~14,8            | V       |
| Torque      | 2,5                | Nm      |

Tabela 4.1: Especificações técnicas do motor MX-28AR.

### 4.2.2 Encoder

Obter o posicionamento correto do IMU em relação a um eixo fixo da *turning table* é essencial para realizar o cálculo do ângulo de *azimuth*, tanto para o método estático como para o método dinâmico. Para isso é necessário um *encoder* de alta precisão, capaz de ler pequenas variações angulares. Foi então selecionado o *encoder* incremental do tipo rotativo EC35 da US Digital<sup>2</sup>, como ilustrado na figura 4.4. Apesar de ser um *encoder* incremental, este possui uma posição de referência, um zero absoluto, e cada vez que o sensor lê esta posição, um sinal é gerado. A resolução máxima deste *encoder* é de 0,009°. A tabela 4.2 apresenta as principais características técnicas.

Figura 4.4: Encoder rotativo EC35<sup>2</sup>.

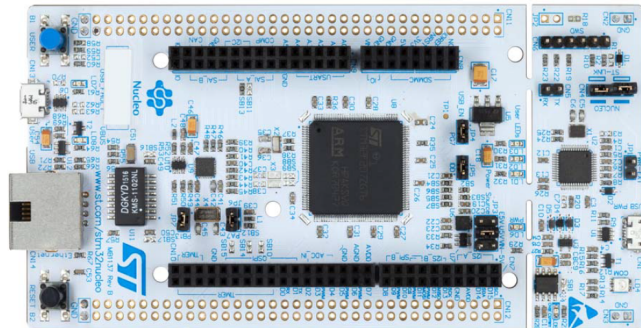
<sup>2</sup><http://usdigital.com>, acessado em 20/07/2018.

|                        | Valor          | Unidade  |
|------------------------|----------------|----------|
| Frequência de resposta | 1              | MHz      |
| Quadratura             | 2000 até 40000 | posições |
| Máxima rotação         | 12000          | RPM      |
| Diâmetro do veio       | 10             | mm       |
| Alimentação            | 5              | V        |

Tabela 4.2: Características técnicas do *encoder* EC35.

### 4.2.3 Microcontrolador

Uma unidade de processamento é necessário na *turning table* para adquirir os dados dos sensores inerciais, do *encoder*, controlar o motor e enviar as informações necessárias para o sistema computacional. Por se tratar de um controlo de baixo nível, os microcontroladores são frequentemente utilizados, facilitando a integração com o *hardware*. Optou-se por adquirir um microcontrolador da família STM32, pois este possui um processador Arm<sup>®</sup> 32-bit Cortex<sup>®</sup>-M4 de alto desempenho. As especificações técnicas do microcontrolador modelo STM32F439ZI são apresentadas na tabela 4.3. Para facilitar a utilização do microcontrolador escolhido, optou-se por utilizar uma *board* de desenvolvimento NUCLEO-F429ZI<sup>3</sup> (figura 4.5), que possui conectores para os I/O's, conector *Ethernet* e um programador embebido.

Figura 4.5: *Board* de desenvolvimento NUCLEO-F429ZI<sup>3</sup>.

<sup>3</sup><https://www.st.com/en/evaluation-tools/nucleo-f429zi.html>, acedido em 20/07/2018.

|                   |   |
|-------------------|---|
| Processador       | Arm <sup>®</sup> 32-bit Cortex <sup>®</sup> -M4 |
| Frequência do CPU | 180 MHz   |
| Memória Flash     | até 2 MB  |
| Timers            | até 17  |
| I/O               | 168   |
| Comunicação       | 4 USARTs, Ethernet                              |

Tabela 4.3: Especificações técnicas do microcontrolador STM32F439ZI.

#### 4.2.4 Inertial Measurement Unit (IMU)

Conforme explicado anteriormente, o uso de sensores inerciais é de extrema importância para a realização do processo de *Northseeking*, pois é através destes que se obtêm o ângulo de *azimuth*. Para aumentar a precisão do sistema e obter um correto ângulo em relação ao norte, é de extrema importância utilizar sensores com elevada precisão. Como já mencionado anteriormente, os giroscópios do tipo FOG possuem maior precisão em relação ao MEMS, são mais baratos quando comparados com os RLG, e são menos sensíveis ao campo magnético, este último fator é muito importante pois este sistema deverá trabalhar no MV do projeto ¡VAMOS!. Além disso tanto os giroscópios quanto os acelerômetros devem possuir baixo ruído (*bias* e *random walk*), para que no caso do giroscópio possa medir a velocidade angular da Terra.

Com base nas características acima descritas, optou-se por escolher um IMU da KVH Industries modelo 1775<sup>4</sup> (ver figura 4.6), que possui giroscópios do tipo FOG, acelerômetros e magnetômetros, todos nos três eixos *XYZ*. As principais características técnicas dos sensores inerciais são apresentadas na tabela 4.4.

|                              | Giroscópio               | Acelerômetro              |
|------------------------------|--------------------------|---------------------------|
| <i>Input rate (max)</i>      | $\pm 490^\circ/\text{s}$ | $\pm 10\text{g}$          |
| Instabilidade do <i>Bias</i> | $0,05^\circ/\text{h}$    | $0,05\text{mg}$           |
| <i>Bias offset</i>           | $\pm 0,5^\circ/\text{h}$ | $\pm 0,5\text{mg}$        |
| ARW/VRW                      | $0,012^\circ/\sqrt{h}$   | $0,12\text{mg}/\sqrt{Hz}$ |
| <i>Data rate</i>             | até 5000Hz               |                           |

Tabela 4.4: Principais características técnicas dos sensores inerciais do KVH 1775.

<sup>4</sup><https://www.kvh.com/Commercial-and-OEM/Gyros-and-Inertial-Systems-and-Compasses/Gyros-and-IMUs-and-INS/IMUs/1775-IMU.aspx>, acessado em 23/07/2018.



Figura 4.6: IMU KVH 1775<sup>4</sup>.

Para validar o desempenho do sensor KVH 1775 e caracterizar os ruídos presentes, foi realizado um ensaio para aplicar o método de *Allan Variance* explicado na secção 3.3. Este ensaio teve duração de aproximadamente nove horas, onde o IMU esteve parado à uma temperatura ambiente.

As figuras 4.7, 4.8 e 4.9 representam os gráficos do *Allan Deviation* para os eixos  $X$ ,  $Y$  e  $Z$  dos giroscópios. A tabela 4.5 apresenta os valores do ARW e a instabilidade do *bias*.

|          | Instabilidade do <i>Bias</i> | <i>Angle Random Walk</i> |
|----------|------------------------------|--------------------------|
| Eixo $X$ | 0,096912 °/h                 | 0,00876 °/ $\sqrt{h}$    |
| Eixo $Y$ | 0,097704 °/h                 | 0,00879 °/ $\sqrt{h}$    |
| Eixo $Z$ | 0,084276 °/h                 | 0,00864 °/ $\sqrt{h}$    |

Tabela 4.5: Medidas dos ruídos para os giroscópios.

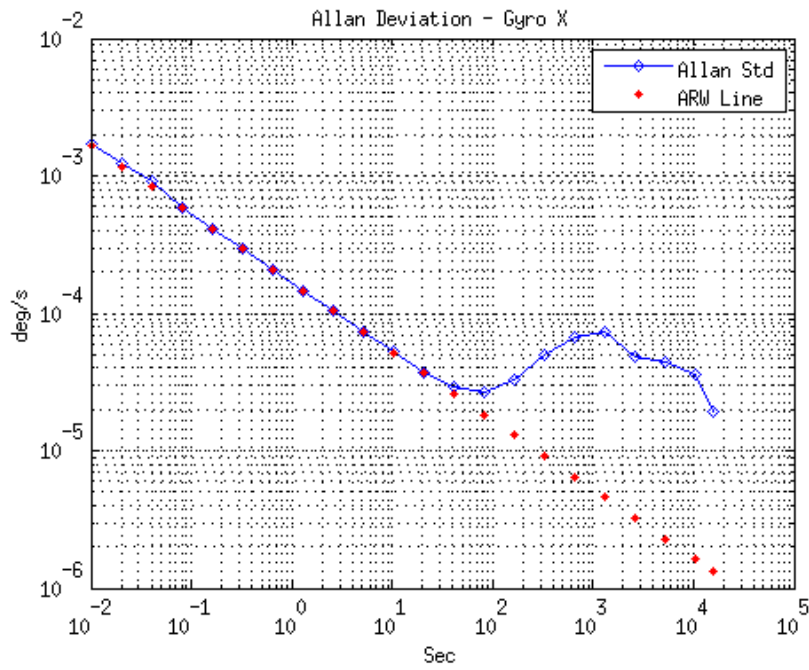


Figura 4.7: Gráfico do *Allan Deviation* para o eixo X do giroscópio.

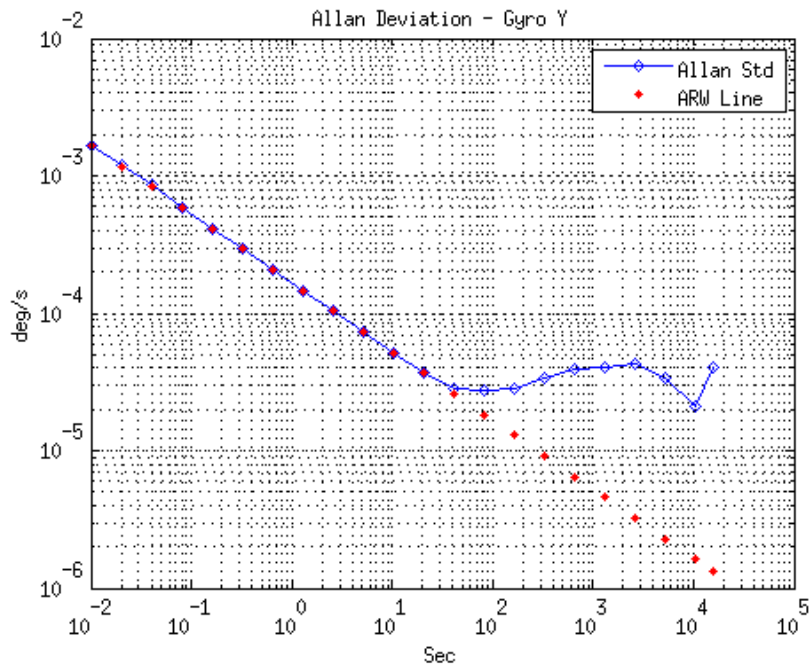


Figura 4.8: Gráfico do *Allan Deviation* para o eixo Y do giroscópio.

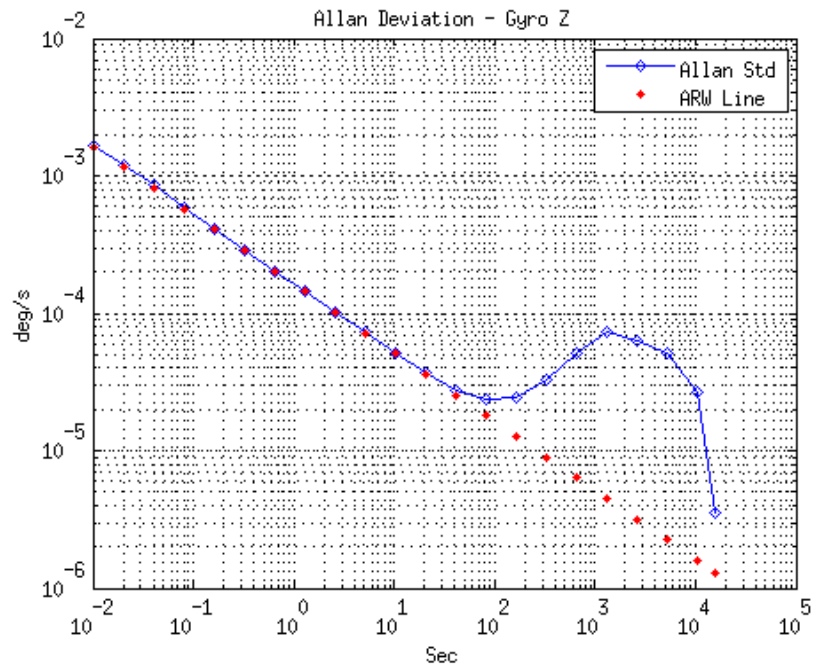


Figura 4.9: Gráfico do *Allan Deviation* para o eixo *Z* do giroscópio.

Já as figuras 4.10, 4.11 e 4.12 representam os gráficos do *Allan Deviation* para os eixos *X*, *Y* e *Z* dos acelerómetros. A tabela 4.6 apresenta os valores do VRW e a instabilidade do *bias*.

|               | Instabilidade do <i>Bias</i> | <i>Velocity Random Walk</i>    |
|---------------|------------------------------|--------------------------------|
| Eixo <i>X</i> | 0,041013mg                   | $0,0800069\text{mg}/\sqrt{Hz}$ |
| Eixo <i>Y</i> | 0,037077mg                   | $0,0835555\text{mg}/\sqrt{Hz}$ |
| Eixo <i>Z</i> | 0,041523mg                   | $0,0818118\text{mg}/\sqrt{Hz}$ |

Tabela 4.6: Medidas dos ruídos para os acelerómetros.

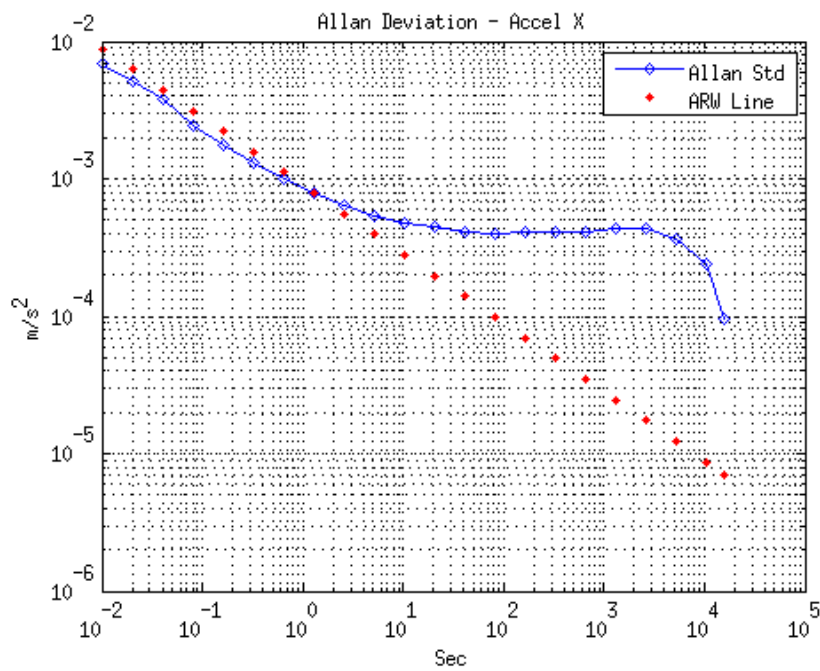


Figura 4.10: Gráfico do *Allan Deviation* para o eixo X do acelerómetro.

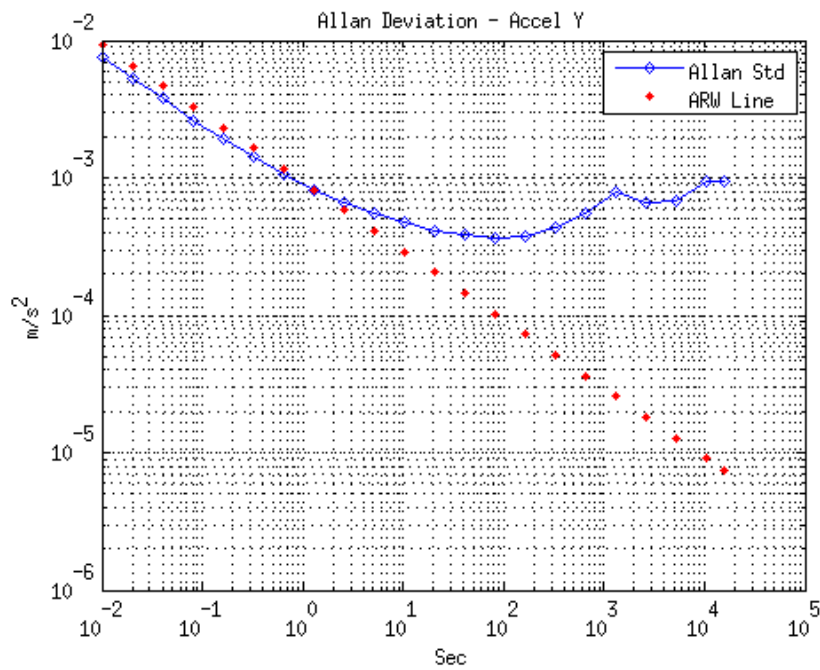


Figura 4.11: Gráfico do *Allan Deviation* para o eixo Y do acelerómetro.

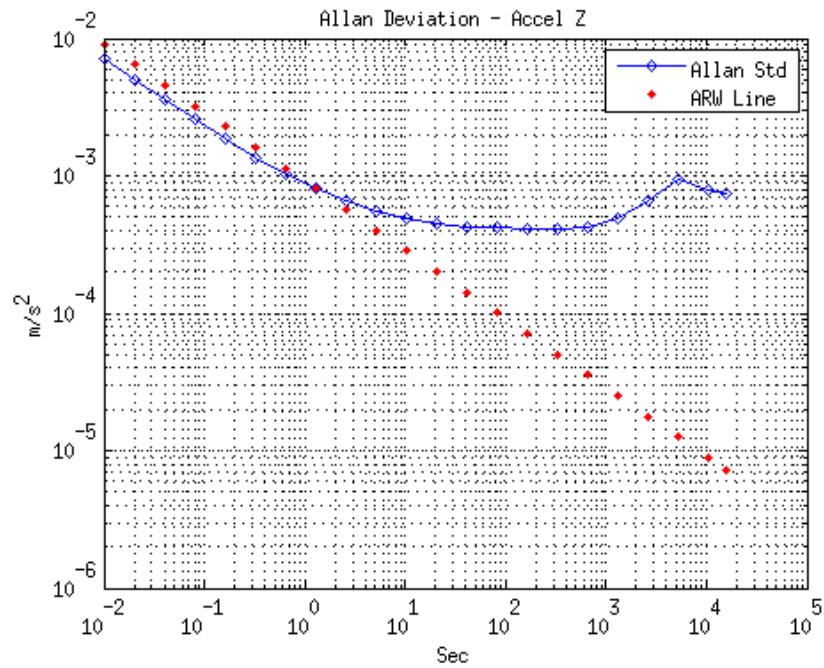


Figura 4.12: Gráfico do *Allan Deviation* para o eixo *Z* do acelerómetro.

Para validar os resultados, os valores das tabelas acima foram comparados com os valores da tabela 4.4 e estes valores obtidos estão abaixo dos valores do *datasheet*.

### 4.3 Montagem mecânica

Para facilitar a realização do processo de *Northseeking*, decidiu-se projetar e desenvolver uma *turning table*, que é um sistema capaz de posicionar o sensor IMU em diferentes posições, para o método estático, e rodar o sensor IMU à uma velocidade angular constante.

Após selecionar o *hardware* necessário para calcular o ângulo de *azimuth* com um dos métodos de *Northseeking*, é então projetado uma estrutura mecânica para a fixação dos componentes.

Para aumentar a resolução no movimento, optou-se por utilizar uma caixa redutora, com fator de redução 1:38. O motor é acoplado à caixa redutora, e esta é fixada à um disco. O sensor IMU é fixado à parte rotativa da caixa redutora.

O ângulo em que o sensor IMU é rodado, é obtido através do *encoder*. Para isso é utilizado um veio, que é fixado ao sensor IMU e este veio é acoplado ao *encoder*, este último é fixado à estrutura.

É utilizado um *slip ring* para a ligação do sensor IMU com o microcontrolador. Um *slip ring* é um dispositivo eletromecânico que permite a transmissão de sinais elétricos de uma estrutura estática para uma rotativa.

A figura 4.13 representa uma vista explodida do projeto tridimensional da *turning table* desenvolvida em SolidWorks<sup>5</sup>. O desenho técnico mais detalhado da estrutura mecânica é apresentado no apêndice A.

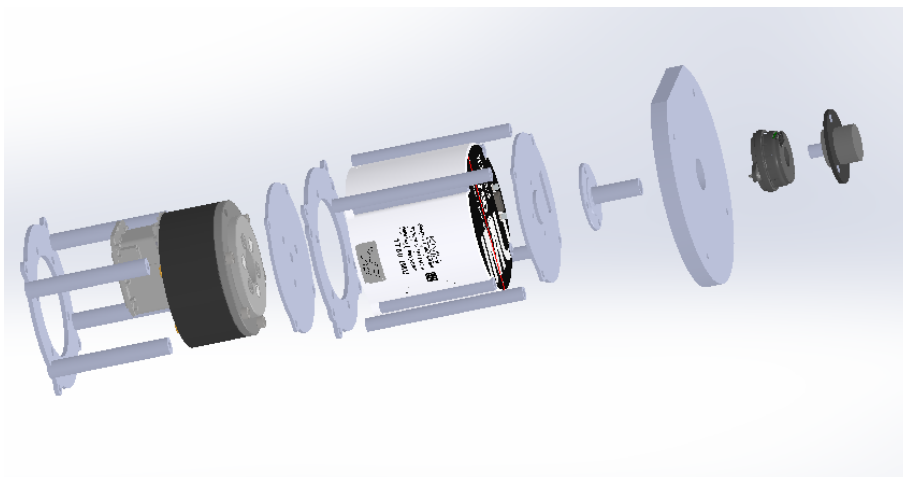


Figura 4.13: Vista explodida do projeto tridimensional da *turning table*.

<sup>5</sup><https://www.solidworks.com/>, acessado em 19/07/2018.

## 4.4 Descrição do *software*

Neste sub-capítulo são detalhados os *softwares* da *turning table* e do sistema computacional, responsáveis por todo o funcionamento do sistema.

### 4.4.1 *Software da turning table*

Para o *software* do microcontrolador da *turning table*, optou-se por utilizar um sistema operativo em tempo real que permite executar múltiplas tarefas ao mesmo tempo e de forma sincronizada. Com esta abordagem podemos melhorar o desempenho no processamento do microcontrolador. Neste projeto é utilizado o FreeRTOS<sup>6</sup>, pois este é *open source*, simples e fácil de utilizar, ocupa pouco espaço de memória, além de ser muito utilizado mundialmente.

Com o FreeRTOS é possível criar múltiplas tarefas, denominada *task*, de forma muito fácil. Além disso é possível configurar as *tasks* quanto a prioridade de execução e a frequência em que esta irá executar. As *tasks* irão executar tarefas específicas e interagir com o *hardware*, conforme ilustrado na arquitetura de *software* apresentado na figura 4.14.

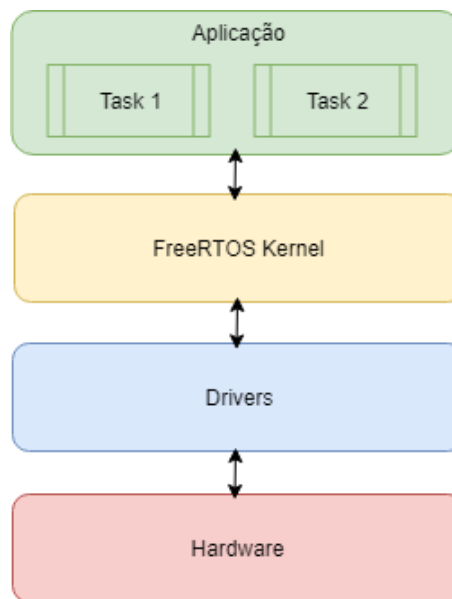


Figura 4.14: Arquitetura de *software* da *turning table*.

<sup>6</sup><https://www.freertos.org/index.html>, acedido em 24/07/2018.

Foram então criadas duas *tasks*, sendo uma responsável por receber os dados do KVH, do *encoder*, criar uma mensagem com as informações necessárias e enviar esta mensagem para o sistema computacional através da porta *Ethernet*. A mensagem criada nesta *task* possui o seguinte formato:

- *Timestamp* do microcontrolador;
- Posição do *encoder*;
- Direção do movimento;
- *Bit* do movimento (0=parado, 1=em movimento);
- Dados *raw* do IMU.

Esta *task* possui alta prioridade e é executada à uma frequência igual à taxa de amostragem do IMU, que neste caso é de 250Hz. A leitura dos dados recebidos pelo IMU são realizados em uma interrupção da USART (*Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter*) do microcontrolador, e nesta interrupção os dados *raw* do IMU são enviados para a *task* através de uma *queue*. Esta *task* é inicializada quando a conexão UDP é estabelecida.

Como referido anteriormente, o IMU envia um sinal para o microcontrolador, quando obtém as medidas dos sensores inerciais, este sinal é denominado de TOV. Uma interrupção é configurada no microcontrolador para detectar este sinal, e então, enviar os dados do *encoder* para a *task* através de uma *queue*. Além disso o *timestamp* do microcontrolador é atualizado quando este recebe o sinal TOV e também é aviado para a *task* na mesma *queue*.

A leitura do *encoder* é realizada através da interpretação dos sinais enviados deste para o microcontrolador. O *encoder* envia três sinais, sendo dois para a quadratura e um para o zero absoluto. Um *timer* é configurado no microcontrolador e o contador é incrementado a cada pulso de ambos os sinais de quadratura, e a direção do movimento pode ser obtida, dependendo da ordem em que os pulsos são lidos, conforme mostra a figura 4.15. O sinal do zero absoluto é interpretado através de uma interrupção do microcontrolador, e quando este sinal é recebido, o valor do contador é reiniciado.

---

<sup>7</sup>Application note AN4013 encontrado em <https://www.st.com>, acessado em 25/07/2018.

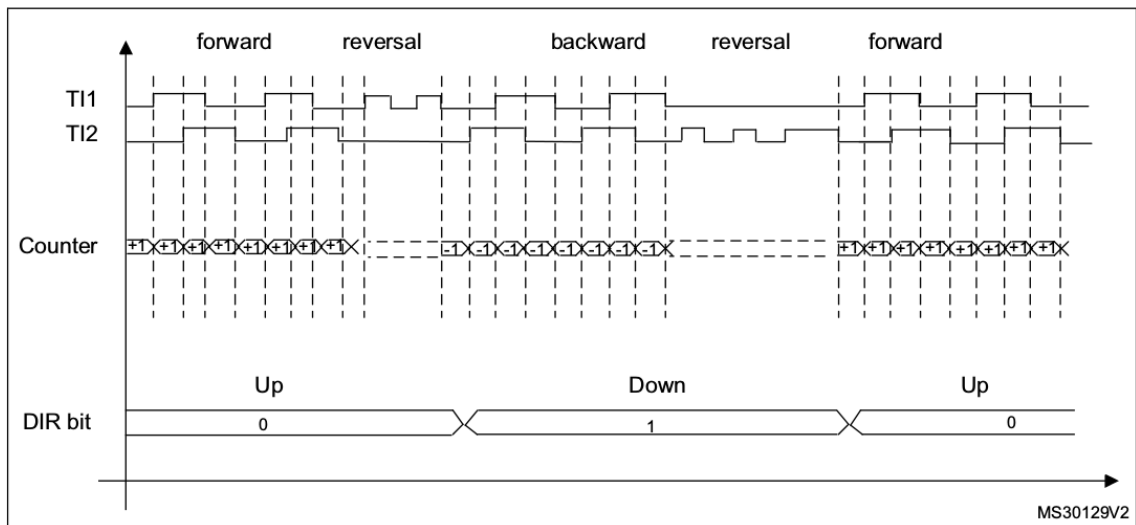


Figura 4.15: Princípio de funcionamento de um *encoder* incremental.<sup>7</sup>

A segunda *task* é responsável por verificar se há algum pacote recebido pela porta *Ethernet* e interpretar este pacote. Como mencionado anteriormente, o protocolo de comunicação utilizado é o UDP, e este baseia-se numa comunicação cliente-servidor. Para tanto o cliente precisa enviar uma mensagem para se conectar com o servidor e iniciar a transmissão dos dados. Neste caso o servidor está configurado no microcontrolador e o cliente será o sistema computacional. Para facilitar a interpretação dos dados recebidos, foi criada uma mensagem padrão com os seguintes campos:

- *Header*;
- Número de *bytes*;
- Tipo;
- Comando;
- Parâmetros;
- *Checksum*.

Onde o *Header* é definido como um número em hexadecimal, neste caso o *F0*, o número de *bytes* inclui o tamanho total de *bytes* dos campos tipo, comando e parâmetros, o tipo refere-se ao motor ou sistema, o comando pode ser por exemplo controlo do motor, *reset* do sistema ou calibração do *encoder*, os parâmetros estão relacionados com

as configurações necessárias para executar o comando, e o *checksum* é uma forma de verificar a integridade dos dados transmitidos.

Para controlar o motor foi desenvolvido um *driver* com base na tabela de controlo da Dynamixel<sup>8</sup>. Neste *driver* foram criadas diversas funções correspondente a cada comando do motor, preenchem uma mensagem com as informações necessárias e envia esta mensagem para o motor através da USART do microcontrolador.

#### 4.4.2 Software do sistema computacional

Já para o *software* do sistema computacional, optou-se por utilizar o *middleware* ROS (*Robot Operating System*)[30], pois os outros sistemas do projeto ¡VAMOS! também utilizam o ROS, facilitando a integração entre os sistemas. O ROS é um conjunto de ferramentas e bibliotecas que visam a simplificar a tarefa e comportamentos complexos e robustos de plataformas robóticas, além de ser *open source* e muito utilizado pela comunidade robótica. Os conceitos fundamentais do ROS são:

- **Nós:** processos que executam uma determinada tarefa;
- **Mensagens:** são tipos de dados usados para os Nós se comunicarem;
- **Tópicos:** são o caminho por onde as mensagens passam. Nós podem subscrever e publicar mensagens através dos tópicos.
- **Ações:** tarefas que são executadas por um servidor após um pedido de um cliente. O servidor fornece informações como estado, *feedback* e resultado para o cliente.

Neste projeto foram criados dois Nós, um responsável por gerir as mensagens enviadas e recebidas para a *turning table* e outro responsável por calcular o ângulo de *azimuth* utilizando um determinado método de *Northseeking*. Além disso foram criados duas ações, uma para o controlo da *turning table* e outro para executar o Nó de *Northseeking*. Na figura 4.16 é apresentado um exemplo da arquitetura de *software* do sistema computacional com base no funcionamento do ROS.

---

<sup>8</sup>[http://support.robotis.com/en/product/actuator/dynamixel/mx\\_series/mx-28at\\_ar.htm#Actuator\\_Address\\_1E](http://support.robotis.com/en/product/actuator/dynamixel/mx_series/mx-28at_ar.htm#Actuator_Address_1E), acedido em 25/07/2018

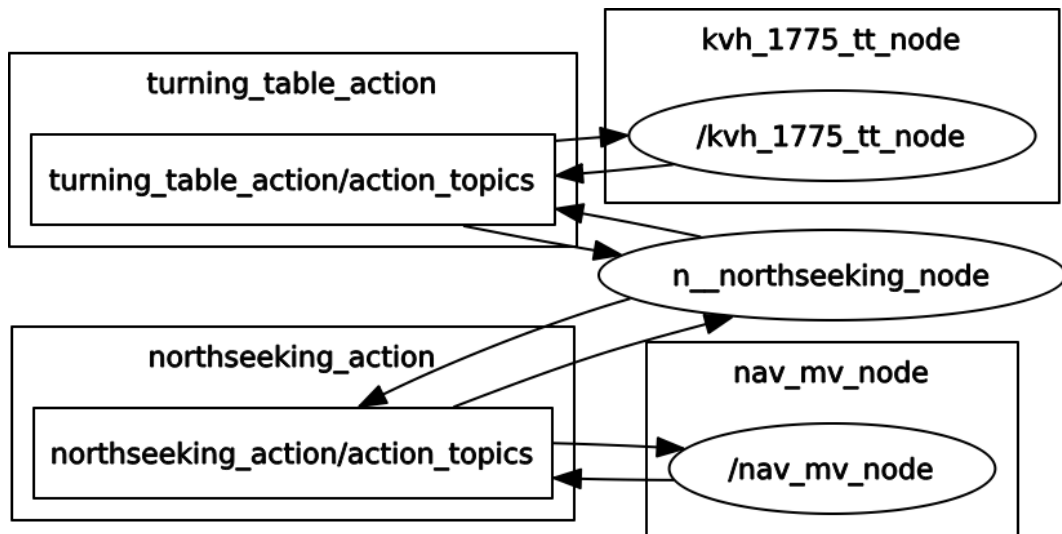
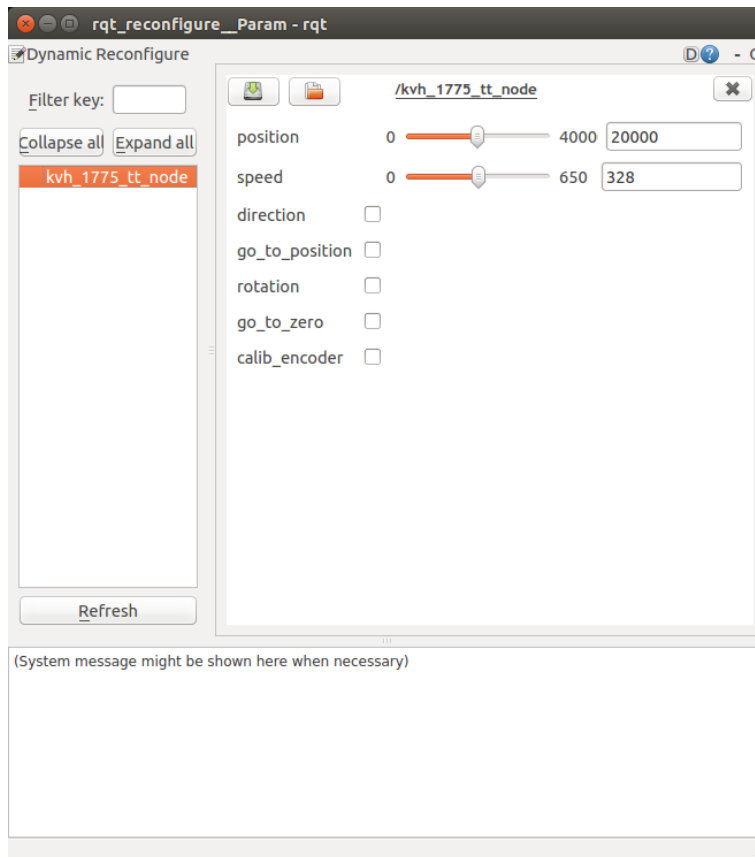


Figura 4.16: Arquitetura de *software* do sistema computacional com ROS.

O Nó *kvh\_1775\_tt\_node* possui uma *thread* de leitura dos dados recebidos pela *turning table*, verificando sempre a integridade dos dados através do *checksum* e estes dados são publicados através do tópico */kvh\_imu*. Além disso possui uma *thread* para enviar comandos de controlo para a *turning table*. Neste Nó também é criado um servidor para a ação *turning\_table\_action*, que é responsável por executar os comandos da *turning table* requisitados por um cliente, que neste caso é requisitado pelo Nó *northseeking\_node*.

Enquanto isso, o Nó *northseeking\_node* cria um servidor para a ação *northseeking\_action* que fica à espera do pedido de um cliente, executa um determinado método de *Northseeking*, e publica o ângulo de *azimuth* calculado, através do resultado da ação. O nó *nav\_mv\_node*, no qual não faz parte desta dissertação, é responsável por fazer o pedido da ação de *Northseeking* quando este for necessário, e subscreve o resultado da ação.

Para facilitar o controlo manual da *turning table* foi desenvolvido uma interface gráfica utilizando a ferramenta *dynamic reconfigure* do ROS. Esta interface gráfica, com as possíveis configurações e comandos, é ilustrada na figura 4.17. Nesta interface podemos calibrar o *encoder*, que é um processo muito importante para obter uma posição correta, podemos controlar a *turning table* através da posição ou da velocidade, além de executar um comando para ir a posição inicial, que neste caso é o zero do *encoder*.

Figura 4.17: Interface gráfica para controlar a *turning table*.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco.

## Capítulo 5

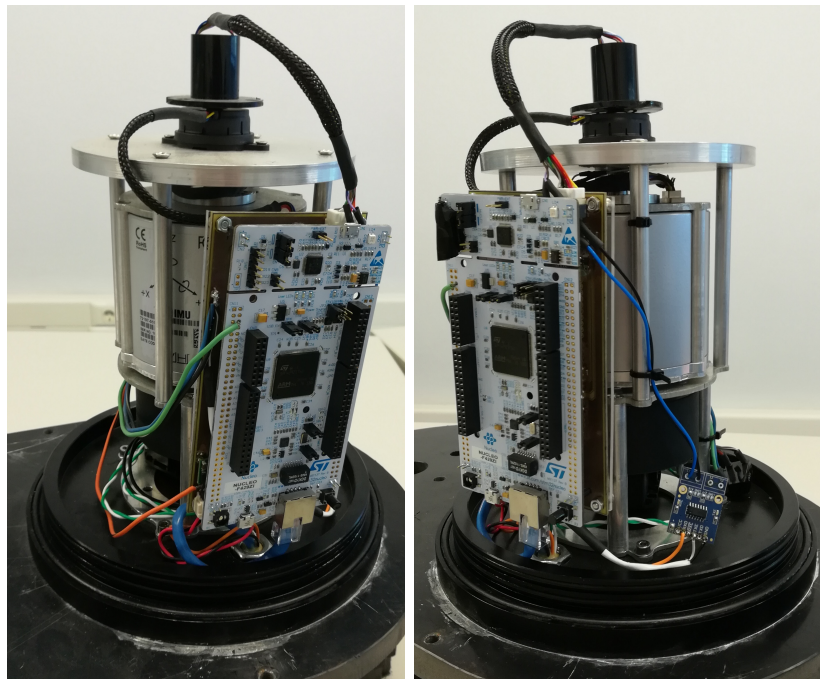
# Comparativo dos métodos de *Northseeking*

O presente capítulo apresenta a implementação de alguns métodos escolhidos abordados no estado da arte, bem como a análise e comparação entre estes métodos. Além disso será apresentado o *setup* experimental utilizado para a validação dos métodos implementados.

### 5.1 *Setup* experimental

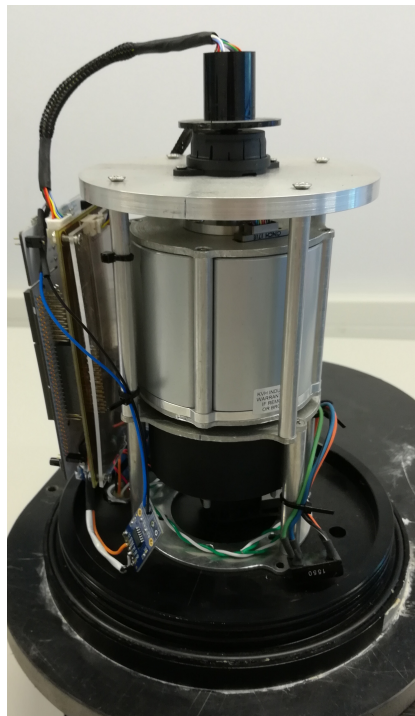
Para a validação dos métodos de *Northseeking* é necessário um *setup* experimental que permita a realização de experiências para a obtenção dos dados sensoriais necessários para o cálculo do ângulo de *azimuth*. Como parte dos objetivos desta dissertação, foi projetado e desenvolvido uma *turning table* com o *hardware* apresentado no capítulo anterior. Para que o sistema desenvolvido possa ser utilizado no MV do projeto ¡VAMOS!, é necessário a utilização de um cilindro estanque que permite a utilização do sistema em meios aquáticos.

Na figura 5.1 pode-se observar o sistema desenvolvido em diversas perspectivas. A estrutura desenvolvida é capaz de suportar a *turning table* e também um sensor USBL (*Ultra-Short BaseLine*), que não faz parte desta dissertação, e sendo esta estrutura fixada ao MV.



(a) Vista 1.

(b) Vista 2.



(c) Vista 3.

Figura 5.1: Diferentes vistas da *turning table* desenvolvida.

Com o intuito de validar os métodos quanto a exatidão é necessário obter um *ground truth*, ou seja, obter um ângulo de *azimuth* mais exato para comparar com os ângulos obtidos pelos métodos. Para isso é utilizado um sistema GPS, com duas antenas e o *ground truth* é obtido através do *software* RTKLIB [31]. Podemos observar na figura 5.2 a instalação das duas antenas GPS, sendo que a *baseline* entre as antenas é usada como referência, e a *turning table* é fixada entre as antenas para facilitar a comparação entre os ângulos obtidos pelo sistema GPS e pelo sistema da *turning table*.



Figura 5.2: Setup experimental com *turning table* e sistema GPS.

Foram realizados testes para verificar a repetibilidade de cada método, ou seja, para uma mesma posição foi calculado o ângulo de *azimuth* em diversas iterações. No caso dos métodos dinâmicos foram realizados testes com diferentes rotações angulares. Também foram realizados testes para verificar a exatidão dos métodos, e para isso, os resultados foram comparados com o ângulo obtido pelo sistema GPS. Estes testes foram realizados no terraço do edifício F do ISEP (Instituto Superior de Engenharia do Porto) para obter um melhor resultado de *ground truth*, já que é um espaço aberto possibilitando

receber sinais de mais satélites. Todos os métodos foram implementados primeiramente utilizando o *software* MATLAB<sup>1</sup> e posteriormente em C++ utilizando o *middleware* ROS, para facilitar a realização dos testes.

## 5.2 Métodos estáticos

Com o objetivo de testar métodos estáticos com diferentes números de posições, foram escolhidos os seguintes métodos apresentados no estado da arte:

- Método de 2 posições; [12, 13]
- Método de 3 posições; [9]
- Método de  $N + 1$  posições. [2]

Em todos os métodos o giroscópio permaneceu estático durante trinta segundos para cada posição, sendo que o IMU foi configurado com uma taxa de amostragem de 250Hz, portanto para cada posição foram obtidas 7500 medidas do sensor. Para obter o ângulo de *azimuth* foi calculado a média das medidas do giroscópio para cada posição. Como os testes foram realizados no ISEP, a latitude local é de aproximadamente 41,179°. No caso do método  $N + 1$  posições, optou-se por realizar os testes com 10 posições e com ângulo de 40° entre cada posição. Em todos os métodos o eixo de referência é o eixo  $X$  do IMU.

Para testar a precisão dos métodos estáticos foi realizado um teste de repetibilidade, ou seja, para uma mesma posição foi calculado o ângulo de *azimuth* diversas vezes para cada método. Os resultados dos testes de precisão são apresentados na tabela 5.1.

Da tabela 5.1 podemos observar que o método com melhor precisão é o método  $N + 1$  posições, que possui um desvio padrão de 0,21517°. Além disso, podemos observar que os métodos de 2 posições e o método de  $N + 1$  posições apresentaram médias próximas do ângulo de 98°, porém o método de 3 posições obteve uma média abaixo deste valor. Para isso foram realizados testes para avaliar a exatidão dos métodos.

Os testes de exatidão foram realizados juntamente com o sistema de GPS, para que seja possível obter um *ground truth* e poder comparar com os resultados dos métodos. Para isso foram realizados diversos testes em diferentes posições para cada método, e em cada posição foi obtido o ângulo de *azimuth* tanto com o sistema da *turning table* quanto com o sistema GPS. Os resultados dos testes de exatidão são apresentados na tabela 5.2.

<sup>1</sup><https://www.mathworks.com/products/matlab.html>, acessado em 30/07/2018.

| Iterações | Método 2 posições | Método 3 posições | Método $N + 1$ posições |
|-----------|-------------------|-------------------|-------------------------|
| 1         | 97,7549°          | 94,6232°          | 98,7022°                |
| 2         | 97,7571°          | 91,9087°          | 98,3213°                |
| 3         | 98,4135°          | 93,7176°          | 98,6508°                |
| 4         | 98,0967°          | 94,7362°          | 98,2743°                |
| 5         | 97,5599°          | 93,6926°          | 98,0343°                |
| 6         | 97,7056°          | 94,0419°          | 98,1824°                |
| 7         | 98,5879°          | 92,784°           | 98,239°                 |
| 8         | 97,4364°          | 92,9166°          | 98,2458°                |
| 9         | 98,7421°          | 93,8097°          | 98,6306°                |
| 10        | 98,1825°          | 93,4912°          | 98,3576°                |
| 11        | 97,2185°          | 93,9112°          | 98,4502°                |
| 12        | 98,2498°          | 93,8702°          | 97,9785°                |
| 13        | 97,8813°          | 93,9621°          | 98,0548°                |
| 14        | 98,5127°          | 93,6765°          | 98,3174°                |
| 15        | 97,7523°          | 92,6073°          | 98,2605°                |
| 16        | 98,5022°          | 93,0369°          | 98,5593°                |
| 17        | 98,3765°          | 93,481°           | 98,5286°                |
| 18        | 97,7698°          | 93,5787°          | 98,4721°                |
| 19        | 97,678°           | 92,6784°          | 98,0461°                |
| 20        | 98,2513°          | 93,0417°          | 98,2449°                |
| média     | 98,0214°          | 93,4783°          | 98,3275°                |
| variância | 0,1812°           | 0,4786°           | 0,0463°                 |
| std       | 0,42568°          | 0,69181°          | 0,21517°                |

Tabela 5.1: Diversos testes de *Northseeking* de diferentes métodos estáticos para a mesma posição.

| <i>Ground Truth</i> | Método 2 posições | Método 3 posições | Método $N+1$ posições |
|---------------------|-------------------|-------------------|-----------------------|
| -12,9435°           | -16,8205°         | -14,3438°         | -14,2583°             |
| 23,3188°            | 23,7250°          | 19,1259°          | 20,5209°              |
| -83,1525°           | -85,1103°         | -82,8360°         | -86,4269°             |
| 106,4584°           | 105,5776°         | 104,0812°         | 104,2095°             |
| -156,7139°          | -155,9799°        | -158,4880°        | -158,4152°            |
| 167,0160°           | 159,8854°         | 162,4535°         | 163,2837°             |
| <b>Erro médio</b>   | -0,4174°          | -2,33175°         | -2,5116°              |

Tabela 5.2: Resultados dos testes de exatidão para os métodos estáticos.

Os valores dos ângulos para os métodos estáticos apresentados na tabela 5.2, representam uma média de cinco medições para a mesma posição. Já os valores do *ground truth* representam uma média das medidas obtidas durante aproximadamente uma hora e meia. Podemos observar na tabela 5.2 que o método estático com mais exatidão é o método com 2 posições, com um erro médio de  $-0,4174^\circ$ .

### 5.3 Métodos dinâmicos

Com o objetivo de avaliar o desempenho dos métodos dinâmicos, foram implementados os seguintes métodos abordados no estado da arte:

- Método dinâmico com LSM; [3]
- Adaptação do método estático com SVD; [1]
- Método dinâmico com KF. [5]

Em todos os métodos o giroscópio é rodado à uma velocidade angular constante, e os dados são adquiridos durante uma volta completa de  $360^\circ$ . Os valores do *encoder* são capturados à mesma taxa de amostragem do IMU e a partir destes valores são obtidos os ângulos para cada instante, sendo que a posição inicial é tomada como referência. Após uma volta completa do IMU é possível calcular o ângulo de *azimuth*.

Para o método multi-posições utilizando o SVD, foi feita uma adaptação para funcionar como método dinâmico, ou seja, para cada amostra do IMU é obtido o valor do *encoder* e o número de posições passa a ser um número total de dados recebidos pelo sensor, enquanto o sensor é rodado à uma velocidade angular constante. No caso do *software* desenvolvido em MATLAB, para computar as matrizes do SVD é utilizado a função *svd* da própria plataforma. Já no caso do *software* desenvolvido no ambiente ROS, é utilizado a função *svd* da biblioteca OpenCV<sup>2</sup>.

Com o intuito de avaliar a precisão dos métodos dinâmicos foi realizado um teste de repetibilidade, para a mesma posição, após o IMU completar uma volta de  $360^\circ$ . Os testes foram realizados com diferentes velocidades angulares, para observar o comportamento dos métodos dinâmicos em diferentes situações. Os resultados dos testes para 10 iterações são apresentadas na tabela 5.3.

---

<sup>2</sup><https://opencv.org/>, acedido em 02/08/2018

| Iterações | LSM<br>0,18°/s | LSM<br>1,8°/s | LSM<br>8,5°/s | SVD<br>0,18°/s | SVD<br>1,8°/s | SVD<br>8,5°/s |
|-----------|----------------|---------------|---------------|----------------|---------------|---------------|
| 1         | 97,6326°       | 96,4029°      | 90,2436°      | 97,3572°       | 96,3889°      | 91,5892°      |
| 2         | 98,6029°       | 96,5946°      | 90,6424°      | 98,7706°       | 96,1032°      | 89,2441°      |
| 3         | 98,7685°       | 97,1392°      | 91,3494°      | 98,3603°       | 96,8972°      | 89,4496°      |
| 4         | 98,4223°       | 96,6306°      | 89,4743°      | 98,6096°       | 96,264°       | 90,5753°      |
| 5         | 99,0188°       | 97,5568°      | 89,1383°      | 98,6305°       | 96,2695°      | 89,4615°      |
| 6         | 98,6546°       | 96,6313°      | 90,6625°      | 97,9679°       | 96,3883°      | 89,2965°      |
| 7         | 98,795°        | 96,891°       | 90,268°       | 98,2413°       | 96,2114°      | 89,116°       |
| 8         | 98,1973°       | 96,4118°      | 90,34°        | 98,7269°       | 96,359°       | 88,6445°      |
| 9         | 98,7261°       | 96,1595°      | 90,7969°      | 98,6294°       | 96,2315°      | 89,8144°      |
| 10        | 98,5448°       | 96,1975°      | 90,203°       | 98,6044°       | 96,135°       | 89,6677°      |
| média     | 98,53629°      | 96,66152°     | 90,31184°     | 98,38981°      | 96,3248°      | 89,68588°     |
| variância | 0,15031°       | 0,18726°      | 0,40466°      | 0,19284°       | 0,05004°      | 0,69919°      |
| std       | 0,38769°       | 0,43273°      | 0,63613°      | 0,43913°       | 0,22371°      | 0,83618°      |

Tabela 5.3: Diversos testes de *Northseeking* de diferentes métodos dinâmicos com diferentes velocidades para a mesma posição.

Da tabela 5.3 podemos observar que o método dinâmico com maior precisão é o método com SVD para a velocidade angular de 1,8°/s, no qual possui um desvio padrão de 0,22371. Porém podemos observar que os valores médios para o mesmo método com velocidades angulares diferentes variam muito. Para isso foram realizados testes para avaliar a exatidão de cada método.

Assim como para os método estáticos, também foram realizados testes de exatidão para os métodos dinâmicos. Foi utilizado o mesmo *setup* experimental, e os testes foram realizados para diferentes posições. Os resultados são apresentados na tabela 5.4.

| <i>Ground Truth</i> | Dinâmico LSM | Dinâmico SVD |
|---------------------|--------------|--------------|
| -12,9435°           | -14,7186°    | -13,0797°    |
| 23,3188°            | 22,9219°     | 26,9124°     |
| -83,1525°           | -84,9497°    | -86,1484°    |
| 106,4584°           | 106,0799°    | 108,8569°    |
| -156,7139°          | -157,9383°   | -156,5458°   |
| 167,016°            | 166,5333°    | 166,9853°    |
| <b>Erro médio</b>   | -1,00913°    | 0,49957°     |

Tabela 5.4: Resultados dos testes de exatidão para os métodos dinâmicos LSM e SVD.

Para os testes de exatidão, optou-se por realizar os métodos dinâmicos com velocidade angular de  $1,8^\circ/\text{s}$ . Os valores apresentados na tabela 5.4 representam a média de cinco medições para a mesma posição, enquanto que os valores do *ground truth* são representadas pela média das medidas obtidas durante aproximadamente uma hora e meia. Podemos observar que o método dinâmico com SVD é mais exato quando comparado com o método dinâmico com LSM, com um valor do erro médio de  $0,49957^\circ$ .

Já para o método dinâmico apresentado em [5] foi implementado o KF. Como mencionado no estado da arte, as equações para a saída do giroscópio  $W$  e do acelerómetro  $f$  são dadas por:

$$\begin{cases} W = A \sin \alpha + B \cos \alpha + E_b \\ f = C \sin \alpha + D \cos \alpha + E_a \end{cases} \quad (5.1)$$

O vetor de estado pode ser expressado como:

$$X = [A \quad B \quad E_b \quad C \quad D \quad E_a] \quad (5.2)$$

A equação do sistema é linear e é dado por:

$$X_{k+1} = X_k \quad (5.3)$$

Sendo assim a matriz do modelo do sistema é uma matriz identidade e é expressada por:

$$F_k = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.4)$$

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

$$Q_k = \begin{bmatrix} \sigma_A^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_B^2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{E_b}^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_C^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma_D^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma_{E_a}^2 \end{bmatrix} \quad (5.5)$$

As observações são provenientes dos sensores giroscópio e acelerómetro. A equação do modelo das observações é representada por:

$$Z_k = h_k X_k \quad (5.6)$$

A matriz do modelo das observações  $h_k$  é obtida a partir da equação 5.1 e é dada por:

$$h_k = \begin{bmatrix} \sin \alpha_k & \cos \alpha_k & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sin \alpha_k & \cos \alpha_k & 1 \end{bmatrix} \quad (5.7)$$

onde  $\alpha_k$  é o ângulo entre a posição inicial e a posição no instante  $k$ . Este ângulo é obtido através da leitura do *encoder*.

A covariância do ruído das observações é representada por:

$$R_k = \begin{bmatrix} \sigma_W^2 & 0 \\ 0 & \sigma_f^2 \end{bmatrix} \quad (5.8)$$

A inicialização do filtro é realizada de maneira com que o filtro leve menos tempo para convergir, obtendo um melhor desempenho. As matrizes de covariância  $Q_k$  e  $R_k$  são inicializadas manualmente. O vetor de estados  $X$  é atualizado à cada iteração do KF, com isso é possível calcular os ângulos de *roll* e *pitch*, e então é calculado o ângulo de *azimuth*.

Na figura 5.3 são apresentados os ângulos de *roll* e *pitch* estimados. Já na figura 5.4 é apresentado o vetor de estado estimado. Por fim na figura 5.5 é apresentado o ângulo de *azimuth* estimado.

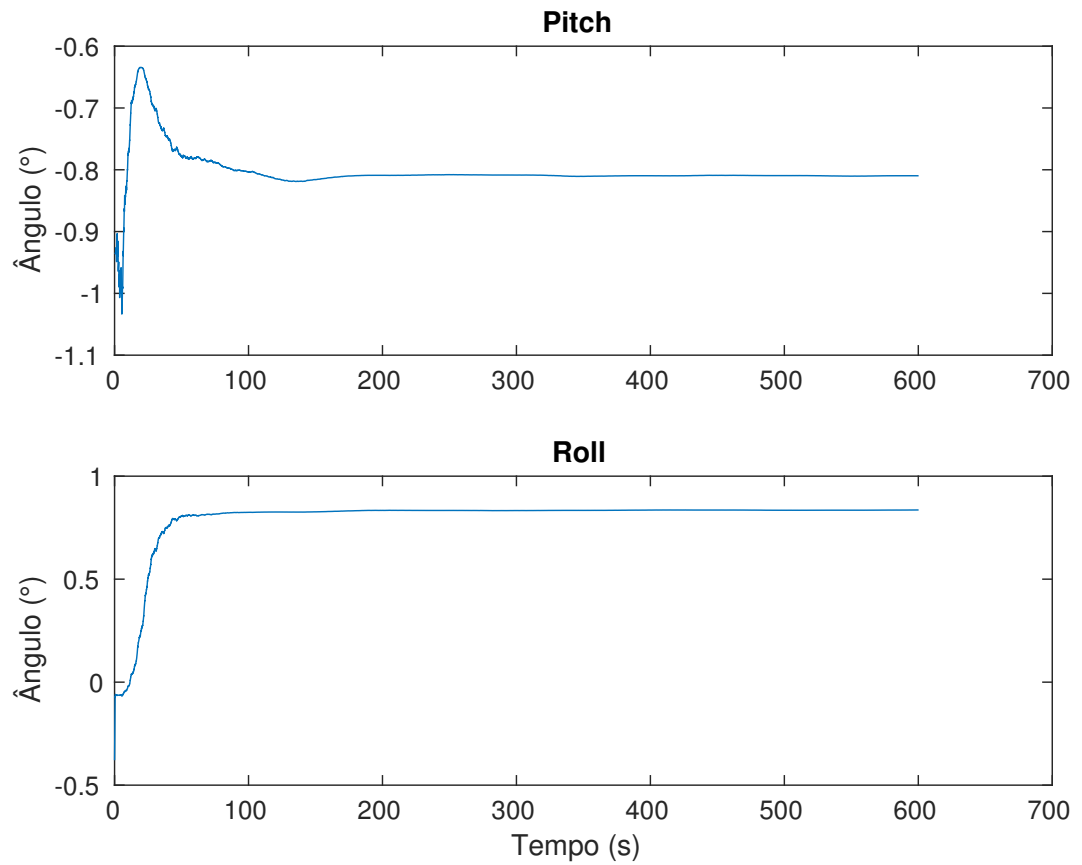


Figura 5.3: Ângulos de *roll* e *pitch* estimados pelo KF.

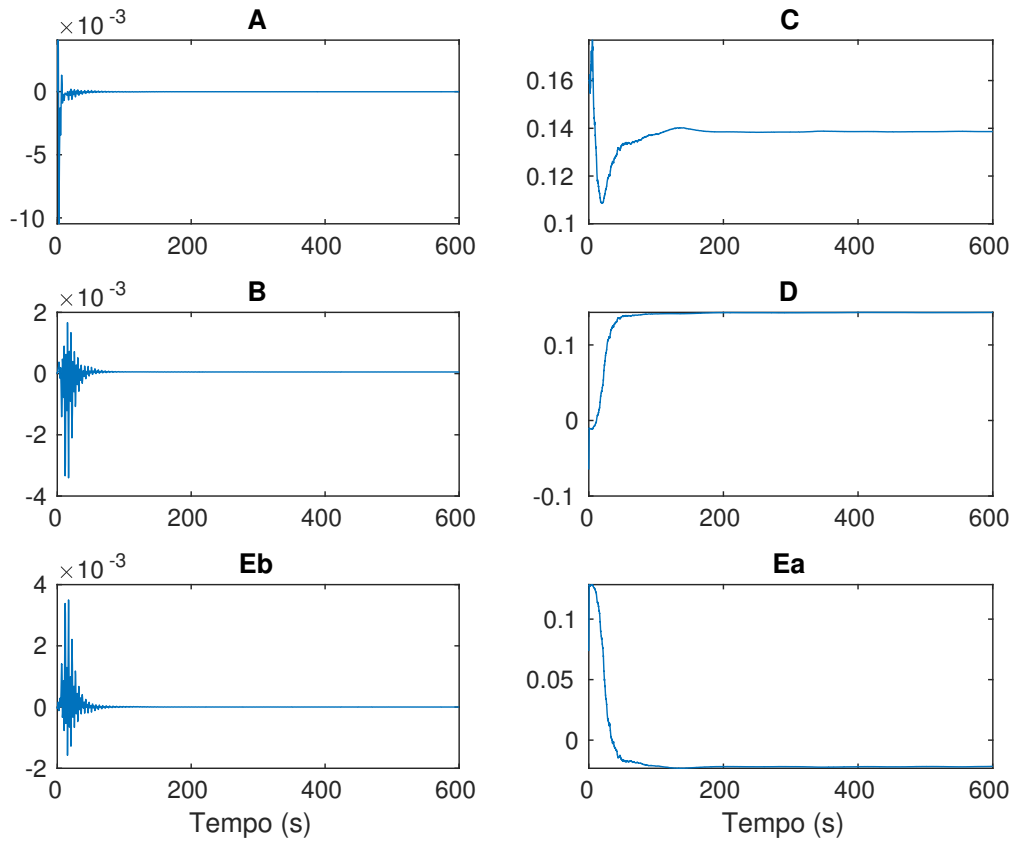


Figura 5.4: Vetor de estados estimados pelo KF.

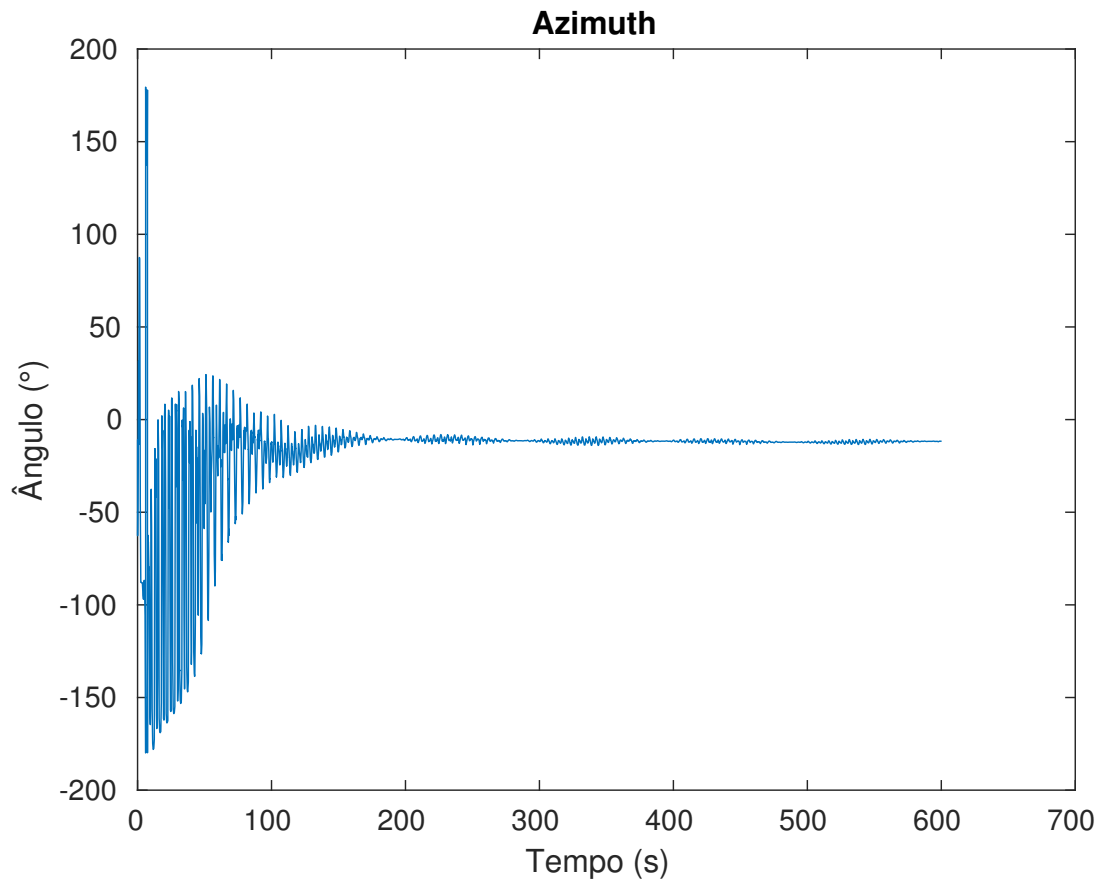


Figura 5.5: Ângulo de *azimuth* estimado pelo KF.

Para analisar a precisão deste método, foi realizado um teste de repetibilidade para a mesma posição. Neste caso optou-se por uma velocidade angular de  $1,8^\circ/\text{s}$ . Os resultados são apresentados na tabela 5.5.

| Iterações | KF $1,8^\circ/\text{s}$ |
|-----------|-------------------------|
| 1         | $-11,6778^\circ$        |
| 2         | $-12,1254^\circ$        |
| 3         | $-12,4343^\circ$        |
| 4         | $-12,3150^\circ$        |
| 5         | $-11,7992^\circ$        |
| 6         | $-11,9586^\circ$        |
| média     | $-12,05171^\circ$       |
| variância | $0,08667^\circ$         |
| std       | $0,29440^\circ$         |

Tabela 5.5: Resultados do *Northseeking* para o método dinâmico com KF.

Assim como para os outros dois métodos dinâmicos, foram realizados testes de exatidão para o método dinâmico com KF. Estes testes foram realizados com uma velocidade angular de  $1,8^\circ/\text{s}$ . Os resultados destes testes são apresentados na tabela 5.6.

| <i>Ground Truth</i> | Dinâmico KF       |
|---------------------|-------------------|
| $-12,9435^\circ$    | $-12,5647^\circ$  |
| $-83,1525^\circ$    | $85,0862^\circ$   |
| $106,4584^\circ$    | $-103,1679^\circ$ |
| $-156,7139^\circ$   | $-153,1147^\circ$ |
| $167,016^\circ$     | $-166,3825^\circ$ |
| <b>Erro médio</b>   | $1,96714^\circ$   |

Tabela 5.6: Resultados dos testes de exatidão para o método dinâmico com KF.

Os valores dos ângulos para o método dinâmico com KF apresentados na tabela 5.6, representam uma média de cinco medições para a mesma posição. Já os valores do *ground truth* representam uma média das medidas obtidas durante aproximadamente uma hora e meia. Podemos observar na tabela 5.6 que o método dinâmico com KF possui um erro médio de  $1,96714^\circ$ .

## 5.4 Resumo da Comparação

Conforme apresentado nas secções anteriores, foram realizados diversos testes para os diferentes métodos, tanto para os estáticos quanto para os dinâmicos. De uma forma geral estes testes têm como objetivo analisar os métodos em relação a precisão e a exatidão.

Analisando os métodos estáticos, o que apresentou uma melhor precisão foi o método  $N + 1$  posições, com um desvio padrão de  $0,21517^\circ$ . Porém este não é o método mais exato, neste caso o método que apresentou mais exatidão foi o método de 2 posições, com um erro médio de  $-0,4174^\circ$ .

Já no caso dos métodos dinâmicos, o que apresentou uma melhor precisão foi o método com SVD com velocidade angular de  $1,8^\circ/\text{s}$ , apresentando um desvio padrão de  $0,22371^\circ$ . Neste caso, este método também apresentou melhores resultados em relação a exatidão, com um erro médio de  $0,49957^\circ$ .

De um modo geral os métodos estáticos apresentaram melhores resultados tanto em relação a precisão quanto em relação a exatidão.

## Capítulo 6

# Resultados

Os métodos que apresentaram melhores resultados nos testes em laboratório, apresentados no capítulo anterior, são testados e validados em um ambiente real, e os resultados obtidos são apresentados no presente capítulo. Estes foram obtidos durante os testes em campo do projeto ¡VAMOS! que decorreram em uma mina inundada à céu aberto em Silvermines, Condado de Tipperary, na Irlanda. Na figura 6.1 podemos observar a mina em Silvermines, no qual está situada em uma latitude de aproximadamente  $52,79^\circ$ .



Figura 6.1: Mina inundada à céu aberto em Silvermines, Irlanda.

Como mencionado anteriormente o projeto ¡VAMOS! consiste em um sistema de mineração subaquática, no qual o veículo de superfície LARV é responsável por lançar e recuperar a máquina de mineração MV do fundo da mina. O sistema desenvolvido nesta dissertação tem como objetivo obter a orientação do MV em relação ao norte, para que a operação possa ser realizada com segurança.

Com o objetivo de validar o sistema desenvolvido em um ambiente real, a *turning table*, apresentada no capítulo anterior, é fixada ao MV conforme é apresentado na figura 6.2. Para se obter a correta orientação do MV em relação ao norte, o eixo  $X$  do giroscópio, que será o eixo de referência para os métodos de *Northseeking*, é alinhado com o eixo  $X$  da máquina, no qual corresponde à frente do veículo, onde se encontra a cabeça de corte.



(a) Vista 1.

(b) Vista 2.

Figura 6.2: Diferentes vistas do sistema desenvolvido fixados ao MV.

Na figura 6.3 podemos observar a LARV posicionada na mina, juntamente com o MV pousado sobre a sua plataforma. A LARV está equipada com um sistema GNSS (*Global Navigation Satellite System*), no qual é capaz de obter um posicionamento e uma orientação com elevada precisão, sendo importante para servir como referência ao posicionamento e orientação do MV. Além disso também possui um sistema acústico do tipo *Short Baseline* (SBL), no qual auxilia na obtenção da posição e orientação do MV, quando este está submerso.



Figura 6.3: LARV posicionada na mina em Silvermines.

Inicialmente foram realizados testes de repetibilidade para os diferentes métodos, e para isso, o MV manteve-se pousado sobre a LARV, conforme ilustrado na figura 6.4. Para cada método, foram realizados dez vezes o processo de *Northseeking* para a mesma posição, que neste caso o eixo de referência corresponde a frente da máquina. Na tabela 6.1 podemos observar os ângulos de *azimuth* obtidos para cada método.



Figura 6.4: MV com sistema *turning table* pousado na LARV.

| Iterações | Método 2 posições | Método $N + 1$ posições | SVD $1,8^\circ/s$ |
|-----------|-------------------|-------------------------|-------------------|
| 1         | $-10,7005^\circ$  | $16,4737^\circ$         | $-9,2180^\circ$   |
| 2         | $-15,9725^\circ$  | $7,5862^\circ$          | $-9,8836^\circ$   |
| 3         | $-8,3293^\circ$   | $7,1635^\circ$          | $-8,7418^\circ$   |
| 4         | $-8,6964^\circ$   | $15,4513^\circ$         | $-7,7452^\circ$   |
| 5         | $-6,7506^\circ$   | $21,4203^\circ$         | $-9,5624^\circ$   |
| 6         | $-11,1661^\circ$  | $3,8616^\circ$          | $-8,7335^\circ$   |
| 7         | $-10,8474^\circ$  | $16,7108^\circ$         | $-8,4728^\circ$   |
| 8         | $-8,7936^\circ$   | $8,1067^\circ$          | $-9,6231^\circ$   |
| 9         | $-8,9150^\circ$   | $12,3999^\circ$         | $-9,4851^\circ$   |
| 10        | $-6,3781^\circ$   | $12,9827^\circ$         | $-8,6343^\circ$   |
| média     | $-9,6550^\circ$   | $12,2157^\circ$         | $-9,0100^\circ$   |
| variância | $7,5388^\circ$    | $29,7541^\circ$         | $0,4324^\circ$    |
| std       | $2,7457^\circ$    | $5,4547^\circ$          | $0,6575^\circ$    |

Tabela 6.1: Resultados dos testes de *Northseeking* em ambiente real para diferentes métodos para a mesma posição.

Da tabela 6.1 podemos observar que o método com maior precisão é o método dinâmico com SVD para uma velocidade de  $1,8^\circ/\text{s}$ , com um desvio padrão de  $0,6575^\circ$ . A partir destes resultados, optou-se por realizar mais testes com o método dinâmico, sempre para a mesma posição. O histograma da densidade de probabilidade é ilustrado na figura 6.5. Foram obtidos 50 ângulos de *azimuth* e a distribuição destes valores foi testada pela distribuição normal. O ângulo médio obtido foi de  $-9,3991^\circ$  e desvio padrão de  $1,1420^\circ$ .

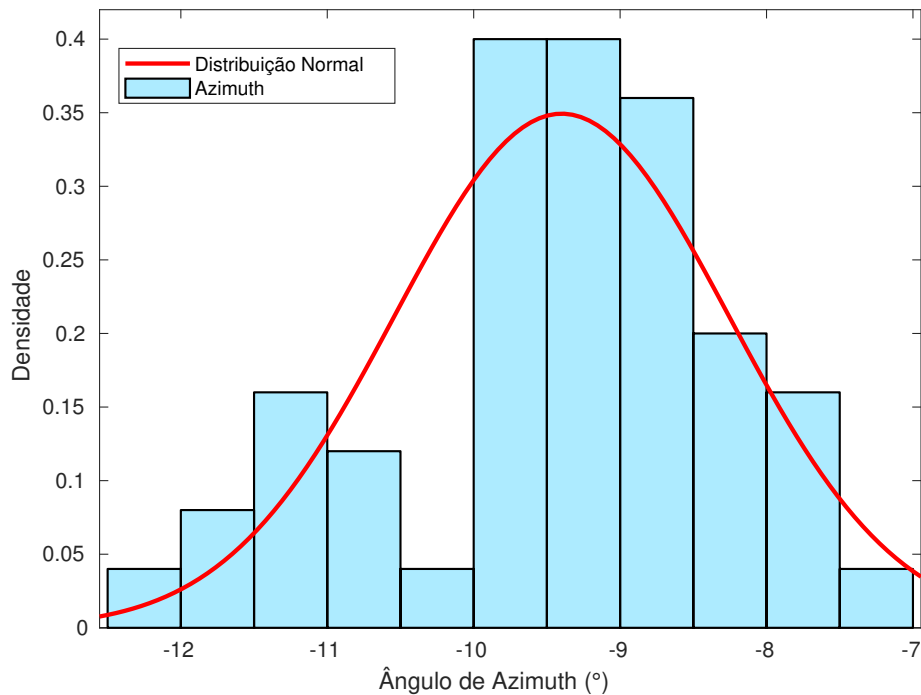


Figura 6.5: Histograma do ângulo de *azimuth* com o ajuste da distribuição normal para o método dinâmico com SVD.

Com o objetivo de avaliar a exatidão do método dinâmico com SVD em um ambiente real, foram realizados testes com o MV pousado na LARV, utilizando o valor de *heading* da LARV como *ground truth*, sendo este valor obtido pelo sistema GNSS. Para conseguir uma boa comparação entre os ângulos de *azimuth* do MV e da LARV, o MV tem de estar alinhado com a LARV, porém não é uma tarefa muito fácil.

Na tabela 6.2 podemos observar os valores obtidos com o *Northseeking* no MV e com o sistema GNSS na LARV, bem como o erro entre os ângulos obtidos. Nestes testes o eixo  $X$  do MV está aproximadamente a  $180^\circ$  em relação ao eixo  $X$  da LARV, e foram realizados testes em diferentes posições da LARV na mina. Os valores do erro apresentados na tabela 6.2 foram calculados subtraindo  $180^\circ$  ao valor do *heading* da LARV, porém este valor não é exato visto que o alinhamento do MV em relação à LARV não é perfeito, este alinhamento era realizado manualmente.

| <i>Northseeking</i> | LARV <i>heading</i> | Erro    |
|---------------------|---------------------|---------|
| 26,4767°            | 204,4103°           | 2,0664° |
| 11,5787°            | -167,5703°          | 0,8510° |
| 12,6615°            | 192,3086°           | 0,3529° |
| 24,0533°            | 201,0753°           | 2,9780° |
| -9,6355°            | 170,9629°           | 0,5984° |

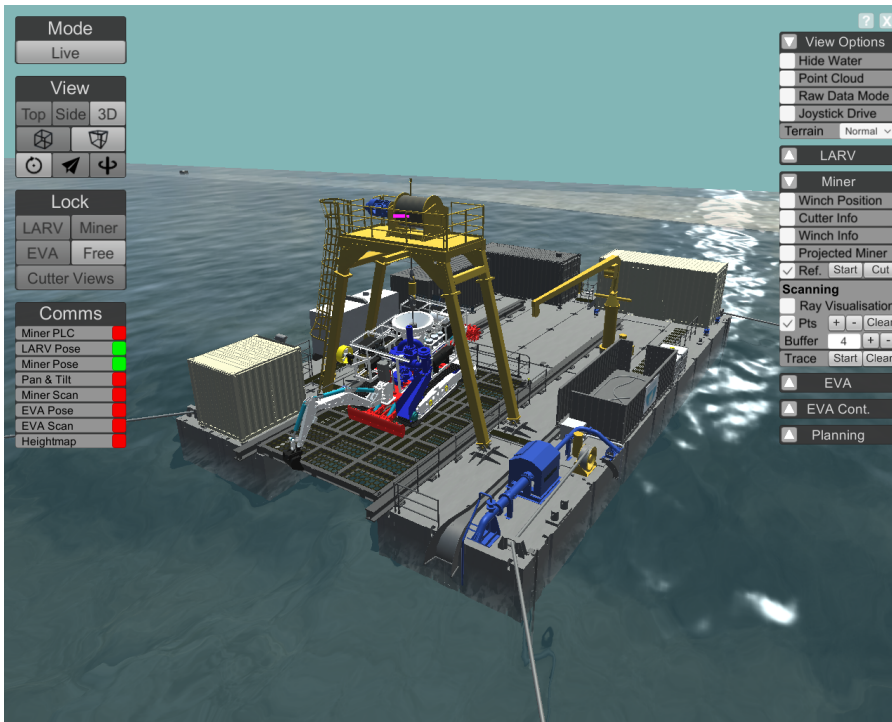
Tabela 6.2: Resultados dos testes de exatidão para o método dinâmico com SVD em ambiente real.

De maneira a validar o funcionamento do sistema abaixo da superfície da água, foram realizados testes quando o MV esteve submerso em diferentes profundidades. O processo de *Northseeking* foi realizado quando o MV esteve pousado no fundo da mina, antes de começar a operação de mineração. Os resultados destes testes subaquáticos são apresentados na tabela 6.3, para o método dinâmico com SVD. Podemos observar que foi possível realizar com sucesso o processo de *Northseeking* quando o sistema esteve submerso.

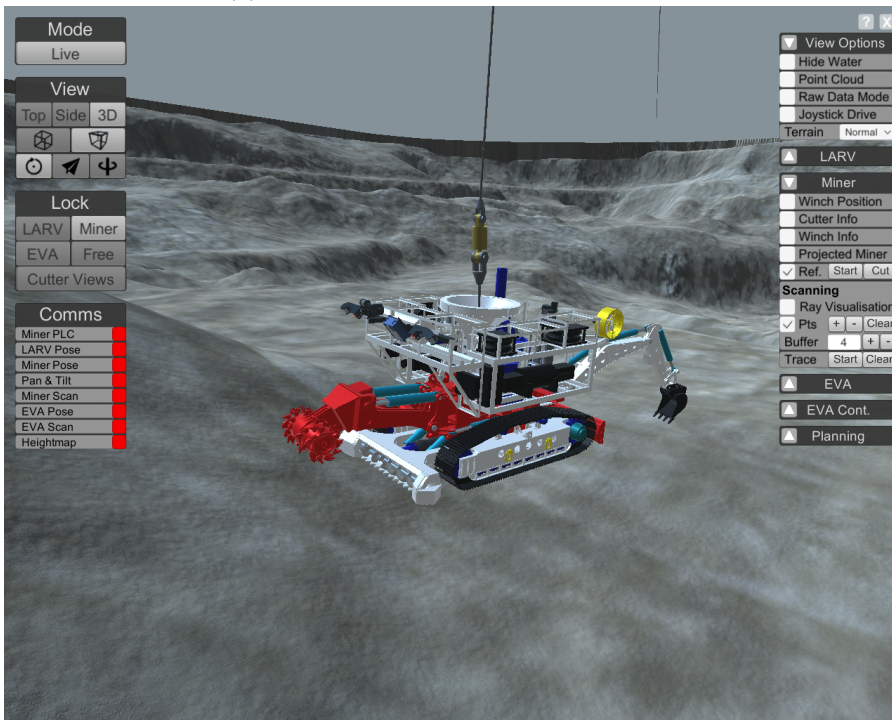
| Profundidade | Ângulo de <i>azimuth</i> |
|--------------|--------------------------|
| 25m          | -11,9586°                |
| 30m          | 3,5638°                  |
| 30m          | 4,1463°                  |
| 30m          | 102,8540°                |

Tabela 6.3: Resultados do *Northseeking* abaixo da superfície da água com o método dinâmico SVD.

Mesmo não sendo possível obter um *ground truth* quando o sistema está submerso, o processo de *Northseeking* foi acompanhado pela visualização em tempo real desenvolvida por um dos parceiros do projeto ¡VAMOS!, como podemos ver nas figuras 6.6 e 6.7. Podemos validar o resultado do *Northseeking* com os valores obtidos previamente pelo sistema de navegação do MV, no qual utiliza o mesmo sensor IMU da *turning table*.

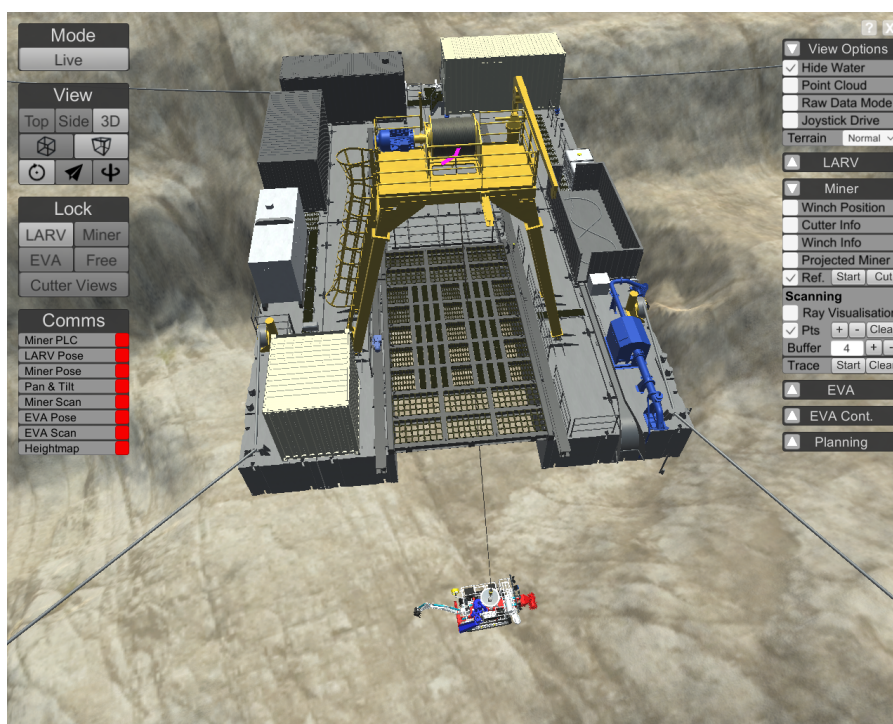


(a) LARV e MV posicionados na mina.

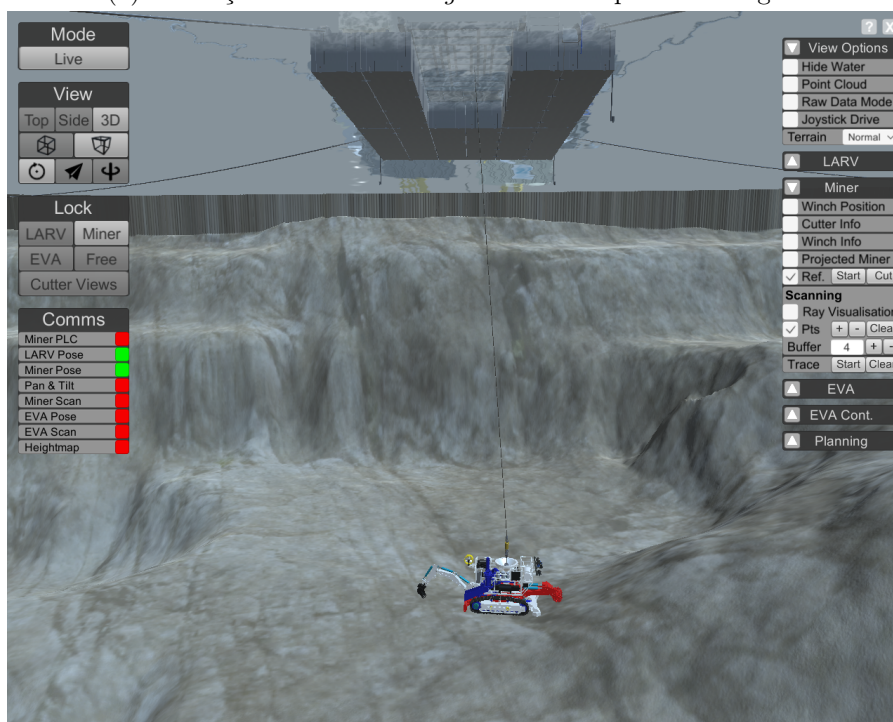


(b) MV em processo de mineração.

Figura 6.6: Aplicação de realidade virtual do projeto ¡VAMOS!.



(a) Validação do *Northseeking* abaixo da superfície da água.



(b) MV à 30 metros de profundidade.

Figura 6.7: Visualização em tempo real dos sistemas do ¡VAMOS! em realidade virtual.

Por fim, foram realizados testes de *Northseeking* quando o MV estava em processo de mineração, para avaliar o desempenho do sistema desenvolvido quando este sofre de perturbações externas. Na figura 6.8 podemos observar os valores do ângulo de *azimuth* obtidos pelo método dinâmico com SVD, e podemos notar que quando a bomba de dragagem é ligada, os ângulos saltam para valores inesperados e que não correspondem com o valor esperado. Isto acontece pois ao ligar a bomba de dragagem, o MV sofre com elevadas forças gravitacionais, no qual é sentida pelos giroscópios, e portanto o cálculo do ângulo de *azimuth* é afetado, já que as medidas dos giroscópios também são afetadas.

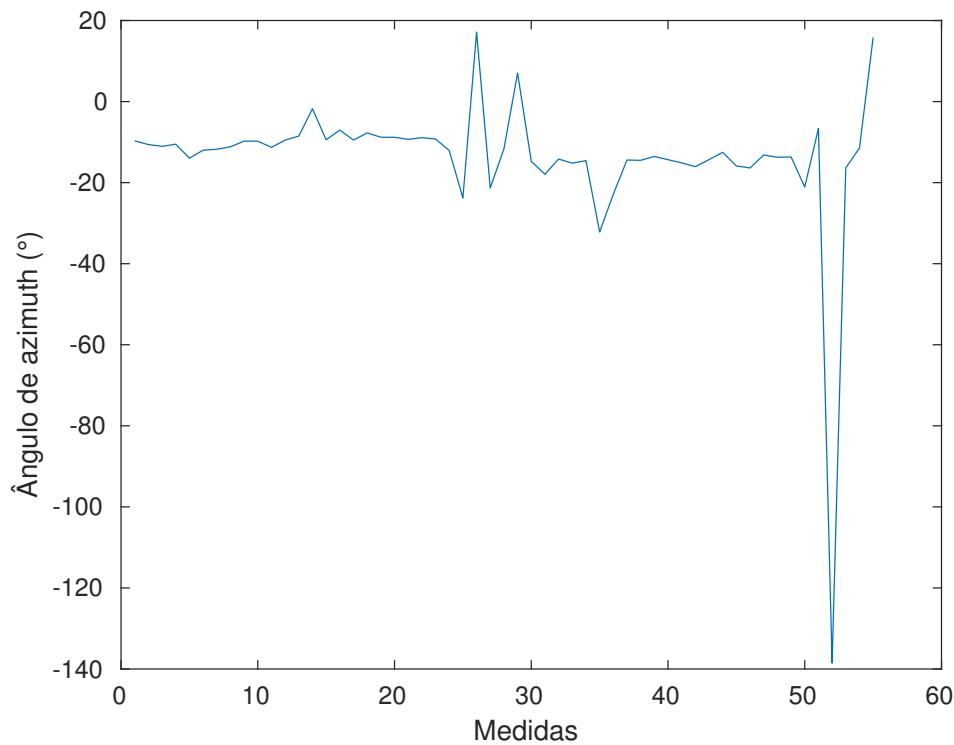


Figura 6.8: Resultados do *Northseeking* obtidos quando o MV está em processo de mineração.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco.

## Capítulo 7

# Conclusão e Trabalho Futuro

Esta dissertação abordou o desenvolvimento de um sistema capaz de realizar o processo de *Northseeking* em um ambiente subaquático. Com o objetivo de obter uma correta orientação da máquina de mineração do projeto ¡VAMOS!, surgiu a necessidade de explorar as técnicas existentes para a resolução de problemas associados ao processo de *Northseeking*.

Em uma fase inicial, efetuou-se um estudo com o objetivo de analisar os métodos já existentes para o processo de *Northseeking*. Esta análise permitiu conhecer os diferentes métodos estáticos e dinâmicos, e perceber qual a melhor abordagem ao problema.

Deste estudo foram escolhidos alguns métodos tanto estáticos quanto dinâmicos para avaliar o desempenho e realizar uma análise comparativa entre os métodos. Para isso foi desenvolvida uma *turning table*, que é constituída por um servomotor, uma caixa de redução, um sensor IMU, um *encoder* e um microcontrolador. Além disso, foi desenvolvido um *setup* experimental que inclui a *turning table* e um sistema GPS, para avaliar os métodos quanto a precisão e exatidão.

Com base nos resultados obtidos na análise comparativa entre os métodos, foram escolhidos 3 métodos, que apresentaram melhores resultados tanto em precisão quanto em exatidão, para serem validados e avaliados em um ambiente real. Estes testes foram realizados em uma mina inundada à céu aberto, em Silvermines, na Irlanda, no âmbito do projeto ¡VAMOS!. O resultado da comparação comprovou que o método dinâmico com SVD obteve um melhor desempenho neste tipo de cenário. Além disso demonstrou-se que o sistema desenvolvido foi capaz de realizar com sucesso o processo de *Northseeking* abaixo da superfície da água. Em suma, os objetivos propostos para esta dissertação foram concluídos com sucesso.

Relativamente ao trabalho futuro, existem várias abordagens que podem melhorar o desempenho do sistema. As seguintes tarefas são propostas como trabalho futuro:

- Desenvolver uma *turning table* com maior precisão no movimento, para diminuir o ruído mecânico no qual afeta as medidas dos giroscópios;
- Desenvolver um sistema mais robusto, capaz de suportar elevadas forças gravitacionais, sem afetar o resultado do *Northseeking*;
- Otimizar os métodos de *Northseeking* já existentes para obter maior precisão e exatidão;
- Diminuir o tempo de processamento do *Northseeking* que atualmente é de aproximadamente 3 minutos;
- Integrar outros sensores inerciais para corrigir erros no cálculo do ângulo de *azimuth*.

Com a implementação destas melhorias, será conseqüentemente obtido um sistema mais completo e com melhor desempenho.

# Bibliografia

- [1] Shen Cheng-wu, Liu Chang, Yu Shuai-bei, Wang Zhi-qian, and Li Jian-rong. Data processing method of multi-position strap-down north seeking system based on svd. In *Mechatronic Science, Electric Engineering and Computer (MEC), 2011 International Conference on*, pages 994–997. IEEE, 2011.
- [2] Changhong He, Chuanchuan Yang, and Ziyu Wang. Method to suppress bias drift and improve the accuracy of north finding with fiber optic gyroscopes. In *Asia Communications and Photonics Conference*, pages AF4B–8. Optical Society of America, 2012.
- [3] Zhengyi Zhang and Chuntong Liu. Fiber optic gyroscope dynamic north-finder algorithm modeling and analysis based on simulink. *Photonic Sensors*, 7(3):283–288, 2017.
- [4] Yuanlong Wei and Mincheol Lee. A new mems gyro north finding approach using lsm for mobile robot heading detection. In *SICE Annual Conference (SICE), 2012 Proceedings of*, pages 2262–2267. IEEE, 2012.
- [5] Yongjian Zhang, Bin Zhou, Mingliang Song, Bo Hou, Haifeng Xing, and Rong Zhang. A novel mems gyro north finder design based on the rotation modulation technique. *Sensors*, 17(5):973, 2017.
- [6] Yu-Chia Liu, Ming-Han Tsai, and Weileun Fang. Pure oxide structure for temperature stabilization and performance enhancement of cmos-mems accelerometer. In *Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), 2012 IEEE 25th International Conference on*, pages 591–594. IEEE, 2012.
- [7] Oliver J Woodman. An introduction to inertial navigation. Technical report, University of Cambridge, Computer Laboratory, 2007.

- [8] Katherine Ellis, Suneeta Godbole, Simon Marshall, Gert Lanckriet, John Staudenmayer, and Jacqueline Kerr. Identifying active travel behaviors in challenging environments using gps, accelerometers, and machine learning algorithms. *Frontiers in public health*, 2:36, 2014.
- [9] G Eduardo Sandoval-Romero and Victor Argueta-Diaz. A simple theoretical comparison between two basic schemes in function of the earth's north pole detection: the static method. *Journal of Sensors*, 2010, 2010.
- [10] Richard B Dyott and DE Allen. Fiber optic gyroscope north finder. In *Tenth International Conference on Optical Fibre Sensors*, volume 2360, pages 442–449. International Society for Optics and Photonics, 1994.
- [11] RB Dyott. Method for finding true north using a fibreoptic gyroscope. *Electronics Letters*, 30(13):1087–1088, 1994.
- [12] Lucian Ioan Iozan, Martti Kirkko-Jaakkola, Jussi Collin, Jarmo Takala, and Corneliu Rusu. North finding system using a mems gyroscope. In *Proceedings of European Navigation Conference on Global Navigation Satellite Systems, Braunschweig, Germany*, pages 19–21, 2010.
- [13] Yuan Long Wei and Min Cheol Lee. Mobile robot autonomous navigation using mems gyro north finding method in global urban system. In *Mechatronics and Automation (ICMA), 2011 International Conference on*, pages 91–96. IEEE, 2011.
- [14] Hua Sun, Fang Zhang, and Haojun Li. Design and implementation of fiber optic gyro north-seeker. In *Mechatronics and Automation (ICMA), 2010 International Conference on*, pages 1058–1062. IEEE, 2010.
- [15] Hai-gang Xu and Zong-ben Guo. Research on rotating fog north-finder. *Piezoelectrics & Acousto-optics*, 1:014, 2010.
- [16] Jussi Collin, Martti Kirkko-Jaakkola, and Jarmo Takala. Effect of carouseling on angular rate sensor error processes. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 64(1):230–240, 2015.
- [17] Zhijun Zhang, Jiyu Sun, and Keyong Wu. Study on technology of orientation and north-finding based on fiber optic gyroscope. In *Mechatronics and Automation, 2007. ICMA 2007. International Conference on*, pages 2252–2257. IEEE, 2007.

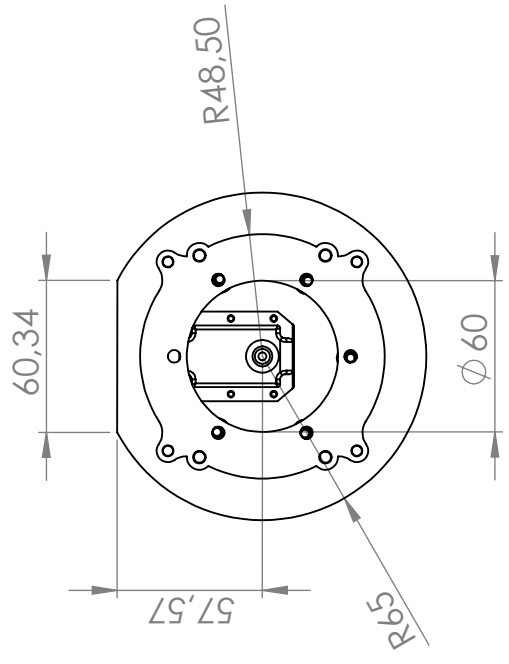
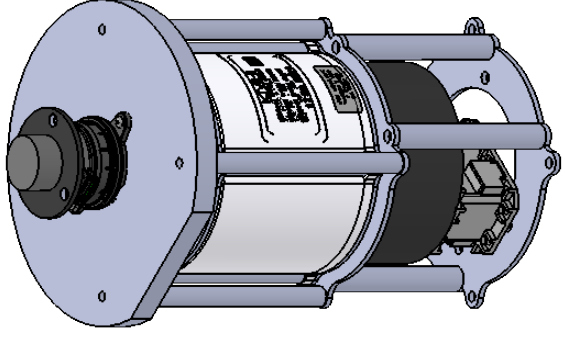
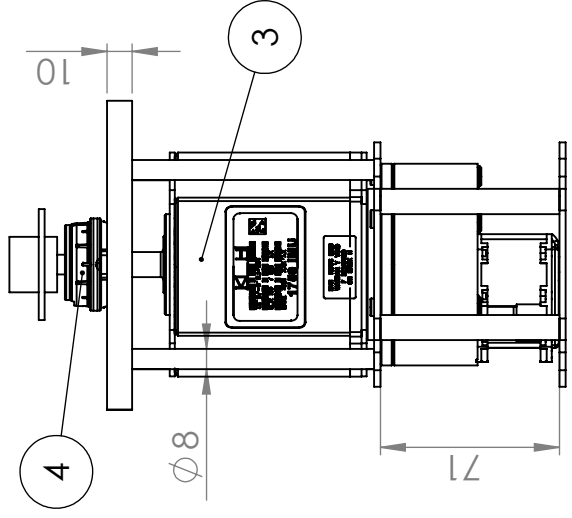
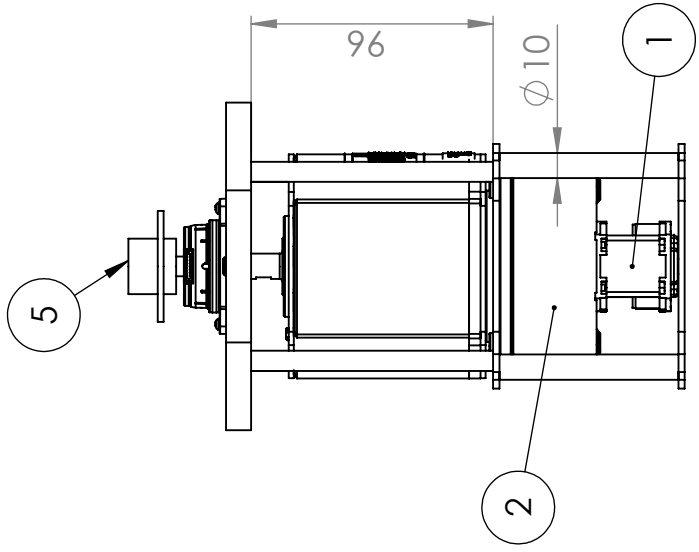
- [18] Chandradip Patel and Patrick McCluskey. Combined temperature and humidity effects on mems vibratory gyroscope sensor. In *ASME 2011 Pacific Rim Technical Conference and Exhibition on Packaging and Integration of Electronic and Photonic Systems*, pages 395–399. American Society of Mechanical Engineers, 2011.
- [19] AD King. Inertial navigation-forty years of evolution. *GEC review*, 13(3):140–149, 1998.
- [20] TL Gustavson, A Landragin, and MA Kasevich. Rotation sensing with a dual atom-interferometer sagnac gyroscope. *Classical and Quantum Gravity*, 17(12):2385, 2000.
- [21] Xiaorong Shen and Suxia Meng. Allan variance segmented circular fitting method for laser gyroscopes random error analysis. In *Guidance, Navigation and Control Conference (CGNCC), 2014 IEEE Chinese*, pages 2053–2058. IEEE, 2014.
- [22] Renu Bhardwaj, Vipin Kumar, and Neelesh Kumar. Allan variance the stability analysis algorithm for mems based inertial sensors stochastic error. In *Computing and Communication (IEMCON), 2015 International Conference and Workshop on*, pages 1–5. IEEE, 2015.
- [23] Javier Hidalgo, Pantelis Poulakis, Johan Köhler, Jaime Del-Cerro, and Antonio Barrientos. Improving planetary rover attitude estimation via mems sensor characterization. *Sensors*, 12(2):2219–2235, 2012.
- [24] David W Allan. Statistics of atomic frequency standards. *Proceedings of the IEEE*, 54(2):221–230, 1966.
- [25] Haiying Hou and Naser El-Sheimy. Inertial sensors errors modeling using allan variance. In *Proceedings of the 16th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GPS/GNSS 2003)*, pages 2860–2867, 2001.
- [26] Walter Stockwell. Bias stability measurement: Allan variance. *Crossbow Technology, Inc., Tech. Rep*, 2004.
- [27] Lawrence C Ng and Darryll J Pines. Characterization of ring laser gyro performance using the allan variance method. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 20(1):211–214, 1997.

- 
- [28] Hugh Durrant-Whyte and Thomas C Henderson. Multisensor data fusion. In *Springer handbook of robotics*, pages 585–610. Springer, 2008.
- [29] Sebastian Thrun, Wolfram Burgard, and Dieter Fox. *Probabilistic robotics*. MIT press, 2005.
- [30] Morgan Quigley, Ken Conley, Brian Gerkey, Josh Faust, Tully Foote, Jeremy Leibs, Rob Wheeler, and Andrew Y Ng. Ros: an open-source robot operating system. In *ICRA workshop on open source software*, volume 3, page 5. Kobe, Japan, 2009.
- [31] Tomoji Takasu and Akio Yasuda. Development of the low-cost rtk-gps receiver with an open source program package rtklib. In *International symposium on GPS/GNSS*, pages 4–6. International Convention Center Jeju Korea, 2009.

## Apêndice A

# Desenho técnico da *Turning Table*

A seguir é apresentado um desenho técnico da *Turning table* com diferentes vistas, incluindo algumas dimensões da estrutura e a lista dos componentes utilizados.



| Num | Item                |
|-----|---------------------|
| 1   | Dynamixel MX-28AR   |
| 2   | Caixa redutora 1:38 |
| 3   | IMU KVH 1775        |
| 4   | Encoder EC35        |
| 5   | Slip Ring           |

TÍTULO: Turning Table

AUTOR: Caio Teixeira Lomba A4

ESCALA: 1:3 FOLHA 1 DE 1

D

C

B

A

6

5

4

3

2

1

6

5

4

3

2

1