



Sistema de Parametrização Automática e Mapeamento em Tempo Real com Recurso a Sonares Multi-feixe

RICARDO DANIEL CARNEIRO PEREIRA

novembro de 2018



Sistema de Parametrização Automática e Mapeamento em Tempo Real com Recurso a Sonares Multi-feixe

Ricardo Daniel Carneiro Pereira,
N^o 1120687

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

21 de Novembro de 2018



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

Candidato: Ricardo Daniel Carneiro Pereira,
N^o 1120687

Orientador: Eduardo Alexandre Pereira da Silva

Co-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.

À minha noiva, aos meus pais e irmãos.

Agradecimentos

Gostaria de utilizar esta secção para, em primeiro lugar, agradecer ao meu orientador e co-orientador Eng.^o Eduardo Silva e Eng.^o José Almeida por me ter proporcionado esta oportunidade e pela ajuda disponibilizada ao longo deste projeto.

A toda a "família" do Laboratório de Sistemas Autónomos que me acompanhou durante estes últimos dois anos.

Aos meus pais, pela educação que me proporcionaram e pelos esforços efetuados na minha formação académica.

Por fim, um agradecimento muito especial à minha noiva, Joana Sousa, pela paciência, amizade, apoio e incentivo durante a elaboração desta dissertação.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco.

Resumo

Ao longo dos últimos anos, o Laboratório de Sistemas Autónomos (LSA) sediado no Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP), tem vindo a participar em diversos projetos nacionais e europeus, nas múltiplas áreas da robótica móvel. Fruto deste trabalho faz agora parte de um projeto europeu, cujo propósito é o desenvolvimento de um sistema de mineração subaquático capaz de operar em minas inundadas a céu aberto, no qual é responsável pelo desenvolvimento dos sistemas de localização e mapeamento

No âmbito desta dissertação foi desenvolvido o sistema responsável por realizar o mapeamento em tempo real de todo o ambiente subaquático, requerido para a operação do veículo de mineração. Todavia, de modo a possibilitar a implementação do mesmo, várias camadas de software responsáveis por parametrizar, filtrar, reconstruir e visualizar, foram desenvolvidas. Com base numa análise da literatura, o sensor escolhido para a implementação deste sistema foi o sonar multi-feixe. Contudo, tal como as câmaras, também os sonares necessitam de ser calibrados e parametrizados, sendo em muitos casos, necessária uma parametrização dinâmica e constante do sensor.

Foi este problema que levou ao desenvolvimento do sistema capaz de parametrizar os sonares automaticamente, definindo parâmetros como alcances e ganhos. Com este objetivo, foram utilizados não só a informação do próprio sensor, mas também informações externas, como dados da navegação do veículo a qual os sonares estavam acoplados. Paralelamente ao sistema de parametrização, foi também desenvolvido o sistema de mapeamento e visualização, responsável por reconstruir o mundo em tempo real.

Os resultados obtidos demonstraram que o sistema foi capaz de realizar os objetivos propostos, tendo sido o mesmo implementado e testado na demonstração final do projeto

no qual esta dissertação se enquadra, o VAMOS.

Palavras-Chave:

Percepção subaquática, sonar *multibeam*, parametrização automática, tempo real, reconstrução tridimensional, VAMOS, ROS.

Abstract

Over the last few years, the LSA based in ISEP has been participating in several national and European projects in the multiple mobile robotics areas. As result of this work, the research laboratory is now participating in a European project whose purpose is the development of an underwater mining system capable of operating in open-pipe mines, in which is responsible for the development of the mapping and localization systems.

In the scope of this dissertation, a system capable of making a real time 3D mapping of the the entire underwater environment required for the operation of the mining vehicle, was developed. However, in order to enable its implementation, several layers of software responsible for tuning, filtering, reconstruction and visualization have been developed. Based on a studied literature, the chosen sensor for the implementation of this system was the multibeam sonar. However, just like the cameras, the sonars also need to be calibrated and parameterized, and in many cases, dynamic and constant parameterization of the sensor is required.

Was this problem that led to the development of the multibeam sonar automatic tuning system, defining parameters as ranges and gains. For this purpose, not only information from the sensor itself, but also external information such as navigation data of the vehicle which the sonars were coupled, was used. Parallel to the parameterization system, the mapping and visualization system was also developed, responsible for the real time 3D reconstruction of the environment.

The results obtained demonstrated that the system was able to accomplish the proposed objectives, having been implemented and tested in the *Viable Alternative Mine Operating System* (VAMOS) project final demonstration.

Keywords:

Underwater perception, multibeam sonar, automatic tuning, real time, 3D reconstruction, VAMOS, ROS.

Conteúdo

Agradecimentos	i
Resumo	iv
Abstract	vi
Lista de Figuras	xi
Lista de Tabelas	xiii
Lista de Acrónimos	xvi
1 Introdução	1
1.1 Enquadramento e motivação	1
1.2 Problema	4
1.3 Objetivos	4
1.4 Estrutura do documento	5
2 Estado da Arte	7
2.1 O problema do mapeamento subaquático	7
2.1.1 Sonares	7
2.2 Conceitos de um sonar	11
2.2.1 Acústica	12
2.2.2 Princípios de Funcionamento	13
3 Fundamentos teóricos	15
3.1 Referenciais	15

3.1.1	Referencial Local	15
3.1.2	Referencial do Corpo	16
3.2	Rotações Tridimensionais	16
3.2.1	Ângulos de Euler	17
3.2.2	Quaterniões	18
3.3	Transformações de Referenciais	19
4	Projeto	21
4.1	Arquitetura do sistema	21
4.2	Descrição do Hardware	25
4.2.1	<i>Sonar Multibeam 2D</i>	25
4.2.2	<i>Sonar Multibeam 3D</i>	26
4.2.3	<i>Sonar Multibeam 2D + Pan & Tilt</i>	28
4.3	Descrição do Software	29
5	Implementação	33
5.1	<i>Setup VAMOS</i>	33
5.1.1	<i>Exploration VAMOS AUV (EVA)</i>	33
5.1.2	<i>Veículo de Mineração</i>	34
5.2	Sistema de interface com os sonares	36
5.2.1	<i>Kongsberg M3</i>	36
5.2.2	<i>Coda Octopus Echoscope</i>	37
5.3	Sistema de parametrização automática	38
5.4	Sistema de pré filtragem de dados	40
5.5	Sistema de Reconstrução	40
5.6	Visualização	42
6	Resultados	45
6.1	Mapeamento com o <i>Autonomous Underwater Vehicle (AUV) EVA</i>	46
6.1.1	Resultados com M3	47
6.1.2	Resultados com Echoscope	53
6.2	Veículo de Mineração	56
6.3	Realidade Virtual	64
7	Conclusão e Trabalho Futuro	67

CONTEÚDO

ix

Bibliografía

71

Esta página foi intencionalmente deixada em branco.

Lista de Figuras

1.1	Projeto VAMOS	2
1.2	Cabine de Controlo	3
1.3	Diagrama de Comunicações	3
2.1	Sonar ativo vs. passivo. [1]	8
2.2	Retorno característico de três diferentes tipos de sonar.	9
2.3	Tipos de Sonar	10
2.4	MBS montado num <i>pan&tilt</i>	11
2.5	Típica forma do feixe de um <i>imaging</i> sonar	12
2.6	sonar <i>multibeam</i> [2]	14
3.1	Referencial <i>North East Down</i> (NED) [3]	16
3.2	Referencial do corpo [4]	17
3.3	Ângulos de Euler [5]	17
4.1	Arquitetura Geral	22
4.2	<i>Peception Navigation and Awareness</i> (PNA) do Veículo de Mineração	23
4.3	Desenho 3D do EVA	23
4.4	Desenho 3D do EVA com os diferentes sonares	24
4.5	Kongsberg M3 Sonar® Multibeam Echosounder	25
4.6	CodaOctopus Echoscope® 3D sonar	27
4.7	<i>Pan & Tilt</i> com um <i>multibeam</i> M3 (lado direito)	28
4.8	<i>Arquitetura de Software</i>	29
5.1	EVA	34
5.2	Veículo de Mineração do projeto VAMOS	35

5.3	Sonares <i>Multibeam</i> no <i>Mining Vehicle</i> (MV)	36
5.4	Interface com o sonar M3	37
5.5	Interface com o sonar Echoscope	38
5.6	Diagrama Geral do Sistema de Parametrização Automática	38
5.7	Modelo do EVA e do MV definido num ficheiro <i>Unified Robot Description Format</i> (URDF)	41
5.8	Exemplo de uma janela do visualizador RViz	42
6.1	Silver Mines, VAMOS 2018	45
6.2	Sistema de Mapeamento	46
6.3	EVA Silver Mines	46
6.4	Mapeamento a curta distância com o <i>multibeam</i> M3	47
6.5	Mapeamento parcial com o <i>multibeam</i> M3	48
6.6	Vista de topo de parte do mapeamento realizado com o <i>multibeam</i> M3	49
6.7	Mapeamento com o <i>multibeam</i> M3	50
6.8	Carros no fundo do lago	51
6.9	Range automático M3	52
6.10	Scan Echoscope colina	53
6.11	Scan Echoscope	54
6.12	EVA a mapear a zona escavada	55
6.13	Mapeamento com o <i>multibeam</i> M3 no MV	56
6.14	Corte mapeado com o <i>multibeam</i> M3	57
6.15	Mapeamento com o Veículo de Mineração utilizando o Echoscope	58
6.16	Mapeamento simultâneo com o <i>multibeam</i> Echoscope e M3 vertical	59
6.17	Mapeamento simultâneo com o <i>multibeam</i> Echoscope e M3 vertical (maior abertura)	60
6.18	Mapeamento com o Veículo de Mineração	61
6.19	Mapeamento simultâneo com o <i>multibeam</i> Echoscope e M3 horizontal	62
6.20	Modelo do MV no Rviz	63
6.21	Mapeamento com o Veículo de Mineração	64
6.22	Ambiente de Realidade Virtual	65

Lista de Tabelas

4.1	Especificações técnicas do Konsberg M3	26
4.2	Modos de operação do Konsberg M3	26
4.3	Especificações técnicas da CodaOctopus Echoscope	28
4.4	Especificações técnicas do Sidus SS109	29
5.1	Especificações técnicas do EVA	34

Esta página foi intencionalmente deixada em branco.

Lista de Siglas e Acrónimos

AUV *Autonomous Underwater Vehicle*

CC *Control Cabin*

CRAS *Centre for Robotics and Autonomous Systems*

DVL *Doppler Velocity Log*

ENU *East North Up*

EVA *Exploration VAMOS AUV*

FOV *Field Of View*

GPS *Global Positioning System*

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

INS *Inertial Navigation System*

IP *Internet Protocol*

ISEP Instituto Superior de Engenharia do Porto

LARV *Launch and Recovery Vessel*

LIDAR *Light Detection And Ranging*

LSA Laboratório de Sistemas Autónomos

LTP *Local Tangent Plane*

MBS *Multi Beam Sonar*

MV *Mining Vehicle*

NED *North East Down*

NTP *Network Time Protocol*

PCL *Point Cloud Library*

PNA *Peception Navigation and Awareness*

PPS *Pulse Per Second*

ROS *Robotic Operating System*

SBS *Single Beam Sonar*

SLAM *Simultaneous Localization And Mapping*

SLS *Structured Light System*

SMD *Soil Machine Dynamics*

SSS *Side Scan Sonar*

TCP *Transmission Control Protocol*

UDP *User Datagram Protocol*

URDF *Unified Robot Description Format*

USBL *Ultra-short baseline*

VAMOS *Viable Alternative Mine Operating System*

Capítulo 1

Introdução

Esta dissertação tem como principal foco desenvolver um sistema de parametrização e mapeamento em tempo real com auxílio de múltiplos sonares para a utilização em veículos subaquáticos.

1.1 Enquadramento e motivação

Ao longo dos últimos anos, o LSA localizado no ISEP, vem a participar em diversos projetos nacionais e europeus, nas múltiplas áreas da robótica móvel. Neste laboratório está localizado um dos centros do Instituto de Engenharia de Sistemas e Computadores, Tecnologia e Ciência (INESC TEC), o *Centre for Robotics and Autonomous Systems* (CRAS), cujo core é desenvolver soluções robóticas inovadoras para ambientes complexos, fazendo parte destas a recolha de dados, inspeção e mapeamento. Fruto deste trabalho o INESC TEC faz agora parte do projeto europeu ¡VAMOS!¹ no qual é responsável pelos diversos sistemas de localização e pelo mapeamento do ambiente subaquático envolvente.

Este projeto consiste num sistema de mineração concebido para operar em minas inundadas a céu aberto, a profundidades que podem atingir os quinhentos metros. Para tal, para além do Veículo de Mineração (MV), foram projetados uma embarcação denominado de *Launch and Recovery Vessel* (LARV), concebida com o propósito de colocar e retirar a máquina do fundo da mina, e um AUV posteriormente denominado de EVA, desenvolvido pelo INESC TEC. Não só o AUV, mas todos os sistemas de localização (presentes nos outros dois veículos) e de mapeamento, presentes no MV foram desenvolvidos pelo INESC TEC. Na figura 1.1, é perceptível os 3 veículos descritos.

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

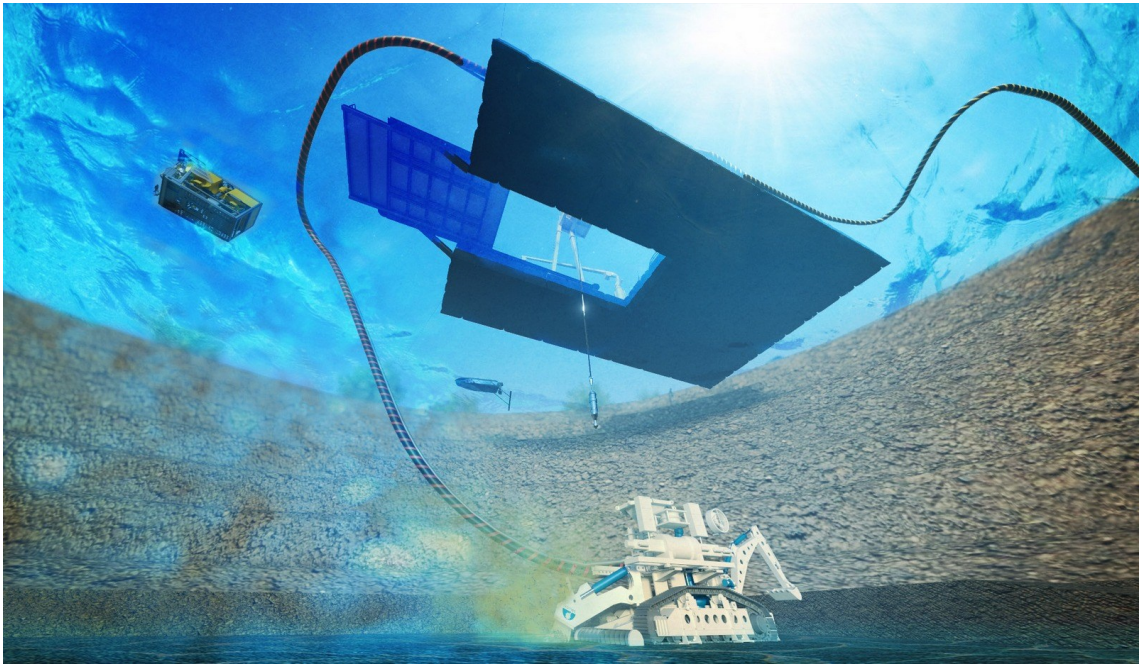


Figura 1.1: Projeto VAMOS

Para centralizar todos os dados, e operar o sistema, foi desenvolvido em terra uma Cabine de Controlo ou *Control Cabin* (CC). Nesta cabine estão instalados todos os instrumentos necessários para visualizar todas as informações do sistema e para controlar tanto a maquina de mineração como a LARV.

A comunicação entre todos estes sistemas é realizada por diversos meios. O veículo de mineração e a LARV estão ligados por um cabo umbilical que permite para além de alimentar o MV, estabelecer comunicação ethernet e série, via fibra ótica entre ambos os sistemas. Ora também a LARV e a Cabine de Controlo estão conectados por um cabo subaquático que contem diversas fibras óticas. Este cabo não só envia as informações da LARV para terra, como também reencaminha todos os dados do veículo de mineração.

Por sua vez o EVA dispõe de diversos modos de comunicação. O primeiro é estabelecido por um cabo de rede subaquático, que conecta o EVA a uma pequena plataforma flutuante, reencaminhando esta os dados por Wi-Fi tanto diretamente para terra como para a LARV, dependendo da posição do veículo. Este cabo subaquático permite obter dados em tempo real quando o veículo está posicionado a meio da coluna de água. Para além da comunicação por cabo, o EVA possui dois sistemas Wi-Fi. O tradicional, através de uma antena posicionada acima do nível da água, e o segundo com recurso a antenas subaquáticas. Enquanto que o primeiro foi projetado para obter dados em



Figura 1.2: Cabine de Controlo

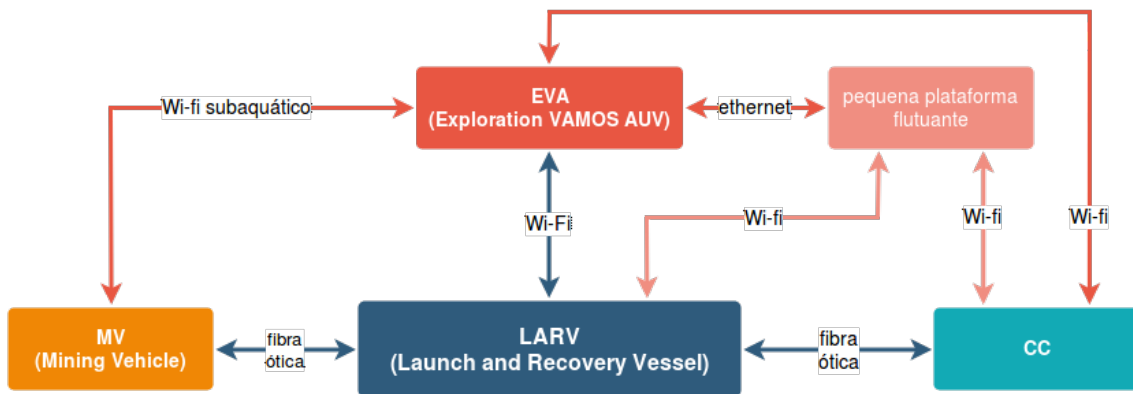


Figura 1.3: Diagrama de Comunicações

tempo real quando o veículo navega à superfície, o segundo foi desenvolvido para o EVA comunicar com o MV de baixo de água a distâncias que podem chegar aos dez metros. Todavia o EVA quando opera em modo cem por cento autónomo, não possui qualquer comunicação nem ligação física com qualquer outro sistema. Na figura 1.3 é possível visualizar o sistema de comunicações descrito.

1.2 Problema

Para todo este sistema funcionar é necessário um piloto para operar o veículo de mineração e a LARV. Mas como é possível operar uma máquina que pesa mais de vinte e cinco toneladas e que pode estar localizada duzentos metros a baixo da superfície da água? Para endereçar este problema foi desenvolvido um ambiente de realidade virtual, cujo objetivo é visualizar toda a informação processada em tempo real dos diversos sensores de localização e mapeamento, bem como todos os outros sensores presentes no sistema, e possibilitar ao operador ter a percepção de todo o ambiente envolvente, e do resultado das suas ações. Todavia se o sistema ficasse reduzido aos sensores instalados na máquina de mineração, toda a informação sobre o ambiente ia ser bastante diminuta, devido a todos os sonares estarem demasiado perto dos objetos, o que torna a linha de vista bastante reduzida. Para combater esta lacuna o EVA é também uma mais valia, pois possibilita mapear o cenário a uma maior distância, aumentando assim o campo de visão.

Mas ao contrário do apresentado na figura 1.1, no mundo real a água de uma mina não é transparente, o que leva a diversos problemas para o sensor mais utilizado para visão robótica, as câmaras. Para combater essa lacuna outras soluções como Sonares tiveram de ser exploradas.

Todavia, tal como as câmaras, também os sonares possuem diversos parâmetros de configuração, tais como alcance, diversos ganhos e modos de funcionamento. Visto que vários aspetos do ambiente envolvente, tais como distâncias aos objetos, refletividade do solo, partículas na coluna de água, velocidade do som na água, que é influenciada pela temperatura e a pressão, estão em constante alteração, surge a necessidade de uma constante recalibração dos parâmetros de funcionamento dos sonares.

Mas ao contrário da MV e LARV que são controlados por um operados, o mesmo não acontece com a parametrização dos sonares. Ora isto levou à necessidade de uma calibração automática de ganhos e *ranges* em tempo real. No entanto de modo a ser possível fundir os dados de todos os sensores no ambiente de realidade virtual, os mesmos têm de estar num referencial comum, o que por sua vez, obriga à sincronização de todos os sistemas e a ter a posição em tempo real dos diversos sensores instalados na MV e no EVA.

1.3 Objetivos

Com base no problema e nas necessidades do projeto, apresentados nas secções 1.1 e

1.2, esta dissertação tem como principal objetivo desenvolver um sistema que possibilite a interface, parametrização e filtragem em tempo real dos dados dos sonares, tornando possível reconstruir e visualizar, também em tempo real, o cenário envolvente.

Posto isto, em seguida são apresentados os objetivos que se pretendem alcançar no desenvolvimento deste projeto:

- Desenvolver a interface com os sensores utilizados
- Desenvolver um sistema capaz de automaticamente parametrizar os *ranges* dos sonares;
- Desenvolver um sistema capaz de automaticamente redefinir os ganhos apropriados ao ambiente;
- Filtrar os dados retornados pelos sonares;
- Reconstruir e visualizar o "mundo" em tempo real;
- Validar o sistema em ambiente real;

1.4 Estrutura do documento

O presente documento encontra-se organizado em sete capítulos. No primeiro capítulo contextualiza-se o tema, descreve-se o problema, os objetivos e a estrutura desta tese. O segundo capítulo aborda o problema do mapeamento subaquático, com foco no mapeamento com recurso a sonares, referindo quais as tecnologias e sensores disponíveis para a resolução do problema. De forma a fundamentar esta tese, no terceiro capítulo são descritos os fundamentos teóricos que são essenciais para a elaboração deste projeto. A arquitetura geral do sistema, bem como a arquitetura de software, numa abordagem de alto nível, e o *hardware* utilizado, com foco nos sonares, são abordados no capítulo quatro. A implementação é exposta no capítulo cinco, sendo explicado detalhadamente cada módulo do sistema de parametrização e mapeamento subaquático e os veículos utilizados no projeto. A validação do sistema é apresentado no sexto capítulo. Neste, são apresentados os resultados obtidos na demonstração do projeto VAMOS. Por fim, no sétimo capítulo, são apresentadas as conclusões sobre o projeto desenvolvido, juntamente com algumas sugestões de trabalhos futuros. A encerrar o documento, temos as referências bibliográficas que acrescentam valor e dão suporte ao presente documento.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco.

Capítulo 2

Estado da Arte

Um estudo preliminar aprofundado da literatura existente sobre o tema em questão é essencial para a compreensão do mesmo, sendo este de extrema importância para as decisões no decorrer do projeto. Com esse objetivo, foram estudados e analisados vários métodos e processos que irão possibilitar o desenvolvimento do sistema de mapeamento proposto no projeto.

2.1 O problema do mapeamento subaquático

É indiscutível que para os seres humanos conseguirem-se orientar e navegar no dia a dia, precisam de ter a percepção do meio envolvente, e para tal, fazem principalmente uso de dois dos cinco sentidos, a visão e a audição. Ora, tal como os seres humanos os veículos autónomos, em grande parte dos casos, quando andam em locais desconhecidos também precisam de construir um mapa do cenário envolvente.

Na percepção robótica são essencialmente usados três tipos de sistemas, câmaras, *Light Detection And Ranging* (LIDAR), e sonares, todavia no caso dos veículos subaquáticos passamos a ter uma condicionante adicional, a água. Neste contexto, deparamos-nos com várias condicionantes tais como o índice de refração, a ausência de luminosidade, partículas na água, a necessidade de os sistemas serem estanques, entre outros. Com estes pressupostos conseguimos perceber que não é direta a aplicação dentro de água de sensores de percepção usados em ambientes secos, como o terrestre e aéreo.

2.1.1 Sonares

O termo sonar significa *sound, navigation and ranging*, ou em português, navegação e localização pelo som. Esta tecnologia é tipicamente usada para explorar e mapear

os vários meios subaquáticos, pois as ondas sonoras alcançam distâncias maiores que os radares e sistemas de luz. O Sonar tem uma grande variedade de usos, como o desenvolvimento de cartas náuticas, a localização de perigos submarinos, a busca de objetos no fundo do mar, como naufrágios de navios, ou a monitorização de espécies marinhas.

Podemos caracterizar a tecnologia sonar em dois tipos. Os sonares ativos e os passivos.

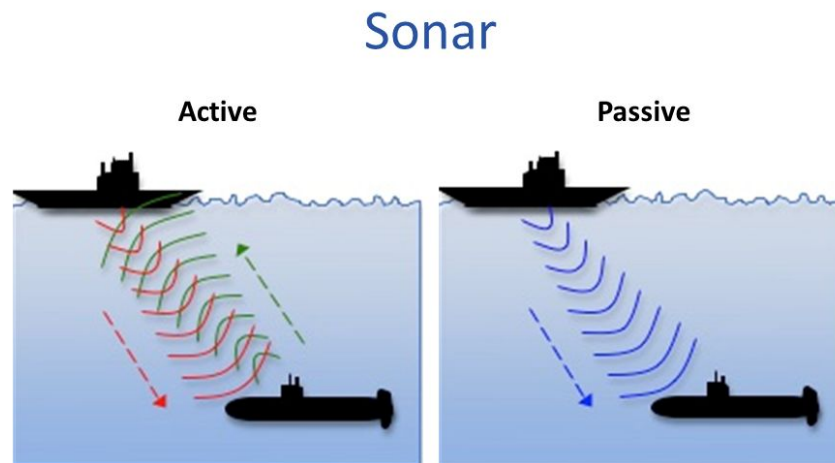


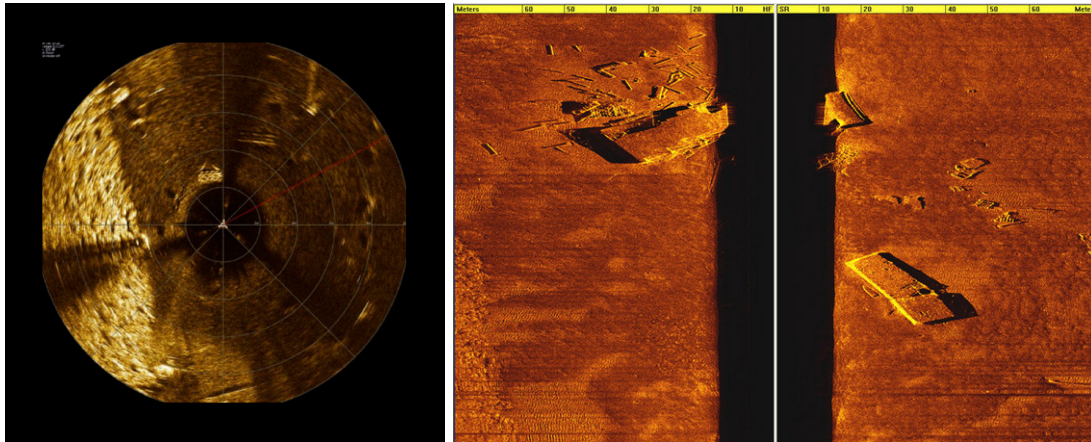
Figura 2.1: Sonar ativo vs. passivo. [1]

Os sistemas de sonar passivos, ao contrário dos sonares ativos, não produzem qualquer tipo de som, apenas escutam o meio os sons existentes. Estes geralmente possuem grandes bases de dados com assinaturas sonoras, e por sua vez, um sistema computacional, usa essas bases de dados para a identificar várias características como a classe de navios, a sua velocidade e até mesmo para identificar navios específicos [6, 7, 8]. Todavia este tipo de sonares não são usados para reconstruções tridimensionais.

Ao invés dos sonares passivos, os sonares ativos criam um pulso de som, geralmente chamado de *ping*, e escutam os reflexos desse pulso. O pulso pode possuir uma frequência constante ou alternar entre diferentes frequências, sendo que no segundo caso o recetor correlaciona a frequência das reflexões ao sinal conhecido. Em geral, os sonares ativos de longo alcance utilizam frequências mais baixas (na ordem dos kHz), enquanto que os sonares de alta resolução de curta distância utilizam altas frequências (na ordem dos MHz).

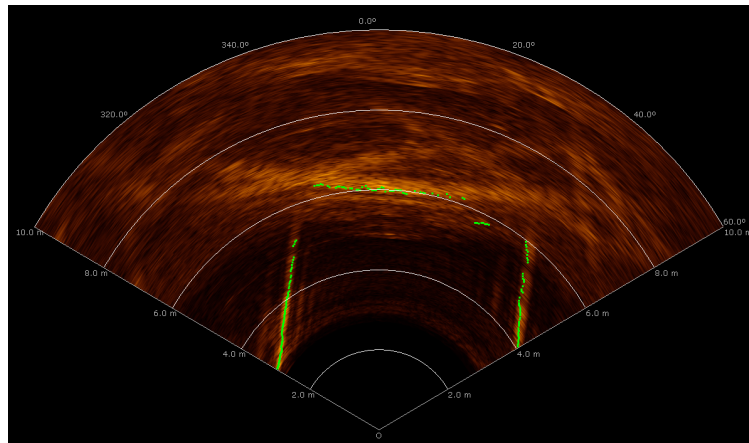
Na categoria dos sonares ativos, podemos encontrar três principais tipos de sonares: o *Multi Beam Sonar* (MBS), que possui múltiplos *beams*, o sonar de apenas um *beam* *Single Beam Sonar* (SBS) e o *Side Scan Sonar* (SSS) (Figura 2.3). Na Figura 2.2 estão

presentes o retorno comum dos três tipos de sonares referenciados.



(a) SBS.

(b) SSS.



(c) MBS.

Figura 2.2: Retorno característico de três diferentes tipos de sonar.

Uma das principais vantagens dos sonares é o seu longo alcance, tornando-os num sensor viável para recolher dados de batimetria, mesmo a milhares de metros de profundidade. Todavia com o diminuir da distancia é possível melhorar a resolução, chegando a resoluções na ordem dos centímetros.

Um dos sonares mais usados para fazer batimetria é o MBS, como em [9] em que é usado o Kongsberg M3 Multibeam Sonar. É também possível correlacionar os dados de um *multibeam* sonar com os de uma câmara RGB para agregar cor às informações de distancias e ângulos [10]. No entanto, neste caso, o seu alcance é reduzido para o alcance visual disponível. Enquanto que o retorno da maior parte dos sonares *multibeam* consiste num vetor de intensidades ou distâncias, existem alguns sonares *multibeam* que

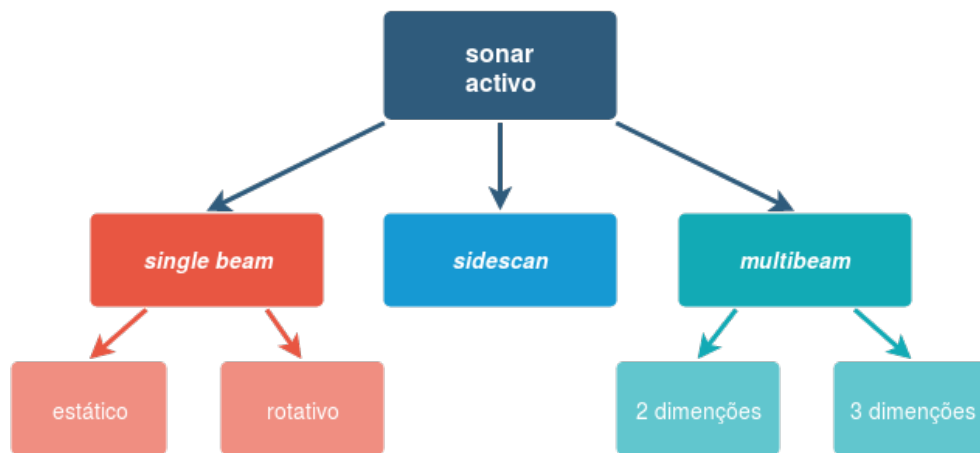


Figura 2.3: Tipos de Sonar

retornam não um vetor, mas sim uma matriz de distâncias [11][12]. Os MBS também podem ser montados em sistemas de *pan&tilt* para realizar um varrimento 3D completo.

Dentro da categoria do SBS temos ainda os sonares de *beam* estático e os que possuem um *beam* rotativo [13], com o qual também é possível implementar algoritmos de mapeamento [14]. Estes últimos têm a vantagem de possibilitar uma "fatia" de 360 graus do mundo, todavia possuem a desvantagem de serem mais lentos que os MBS a fazer um varrimento completo. Para além dos MBS e dos SBS temos ainda os SSS que apesar de ser principalmente usado como um sonar de imagem, também pode ser utilizado como um *profiling* sonar [15].

Dentro da categoria dos sonares ativos temos ainda outra distinção, os sonares *imaging* e os *profiling*. Ora, os primeiros são normalmente usados para fornecer uma imagem do fundo do mar ou da coluna de água, tal como faz um radar em terra. Estes fornecem vários retornos por *beam*, fazendo uso de uma paleta de cores para destingir os ecos mais fortes dos ecos mais fracos. Por exemplo, no caso do cenário de um naufrágio de aço, o mesmo vai ser fácil der destingir do leito de areia devido à diferença de intensidades. Todavia estes também podem ser usados para algoritmos de *Simultaneous Localization And Mapping* (SLAM) como em [16].

Por outro lado, um *profiling* sonar é principalmente usado para obter dados batimétricos. Ao invés do anterior, analisa o sinal de retorno de cada pulso e é tomada a decisão de onde, ao longo do tempo de retorno do pulso, está o retorno mais apropriado. Podem neste caso ser usados vários métodos de escolha, sendo os mais usuais, o ponto de maior intensidade, ou a primeira deteção mediante um limite predefinido. Ora, em vez de fornecer um conjunto de intervalos analógicos para cada pulso, este retorna uma



Figura 2.4: MBS montado num *pan&tilt*

única distancia por feixe, ou nalguns casos também a intensidade do retorno.

Outro fator de distinção entre os sonares *profiling* e *imaging* é a forma do feixe dos transdutores (figura 2.6). Um sonar de imagem possui tipicamente um feixe em forma de leque com uma grande abertura vertical (tipicamente ronda os 30 graus), para garantir que todos os alvos acima e abaixo da horizontal são detetados, enquanto o *profiling* emite um feixe com uma abertura vertical mais reduzida (rondando esta os 3 graus), o que significa que este é capaz de fornecer medições de alta resolução tanto em termos de plano horizontal como vertical. No caso específico dos sonares mecânicos, enquanto que a mesma metodologia se aplica para a abertura horizontal, a resolução vertical é também afetada pela resolução do motor.

2.2 Conceitos de um sonar

Este subcapítulo descreve o funcionamento de um sistema de eco-som e as características do seu meio operacional. Começa por introduzir os conceitos básicos associa-

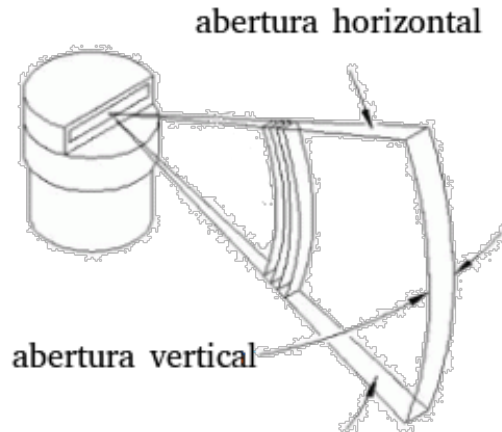


Figura 2.5: Típica forma do feixe de um *imaging* sonar

dos à tecnologia de um sonar, sendo depois abordado o funcionamento de um sonar de feixe único, para mostrar os componentes e procedimentos comuns a todos os sistemas sonar. As limitações deste sistema são usadas como justificação para a complexidade do sonar *multibeam*.

2.2.1 Acústica

É claro para qualquer um que tenha mergulhado numa piscina ou num oceano que os sons são audíveis dentro de água. Ruídos de ondas, barcos a motor, e até outros banhistas podem ser ouvidos com clareza, mesmo a longas distâncias. Mesmo na natureza, vários animais marinhos usam o som para comunicar dentro de água, incluindo a grandes distâncias, e é esta capacidade de o som viajar por distâncias tão grandes que possibilita a deteção de alvos em ambientes subaquáticos. Podemos concluir que o som se move mais eficientemente dentro de água do que no ar.

Ora, os sensores que usam sons como fonte de deteção, pertencem à família de instrumentos conhecidos como sonares, e para entender este tipo de sensor, devemos primeiro entender como o som se move na água. As ondas sonoras propagam-se a uma velocidade específica na água, que pode mudar dependendo das condições da água, como a salini-

dade, pressão e a temperatura, mas é independente das características do próprio som. Num ambiente oceânico típico, a velocidade do som está na vizinhança dos 1500 metros por segundo.

2.2.2 Princípios de Funcionamento

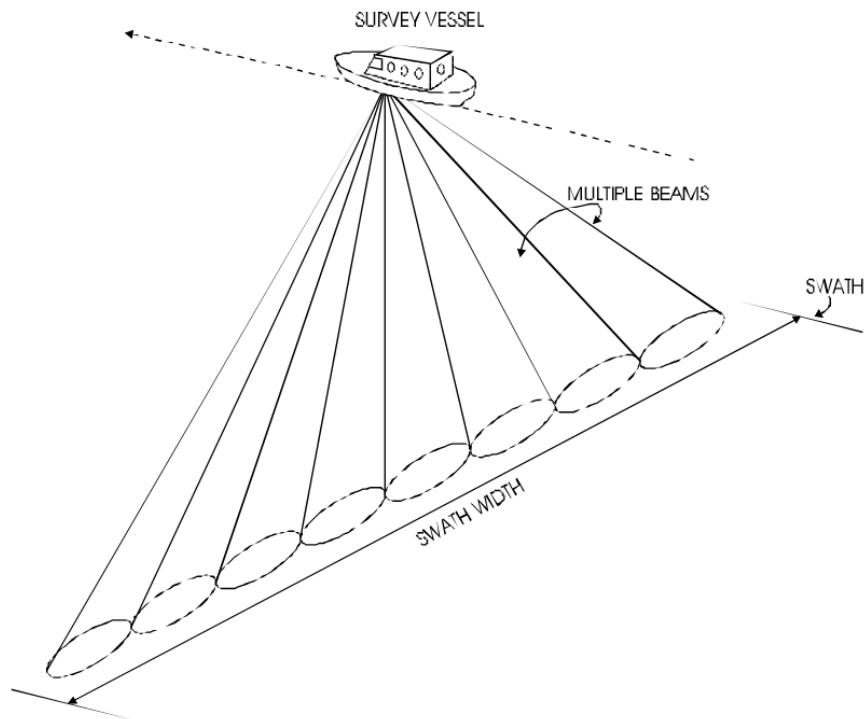
Os sonares medem a profundidade gerando um pulso curto de som, também denominado por *ping*, e em seguida, escutam o eco do pulso refletido no fundo. O tempo entre a transmissão de um pulso e o retorno de seu eco, representa o tempo que o som demora a percorrer a distância até ao fundo, ser refletido, e voltar para trás. Sabendo este tempo e a velocidade do som na água é então possível calcular a distancia ao fundo. Por exemplo, se a onda sonora levar dois segundos entre o momento em que o *ping* é transmitido e quando recebemos o seu eco, então usando a velocidade de som de 1500 metros por segundo, é facilmente calculada a distancia de 1500 metros ao fundo pois a distancia ao fundo representa apenas metade do tempo que a onda sonora demorou a retornar. Podemos então concluir que:

$$Dist_{fundo} = \frac{1}{2} * velocidade_{som} * tempo_{echo} \quad (2.1)$$

Para produzir uma onda sonora, o sonar usa um dispositivo chamado projetor que gera um pulso sonoro que se expande de forma esférica em relação à sua fonte, e por consequência, a sua energia viaja de maneira uniforme em todas as direções. À medida que a onda sonora se expande, a sua energia será espalhada por uma área maior, causando perdas de energia. Visto a quantidade total de perdas na transmissão depender da distância percorrida, quanto mais uma onda se propaga, mais fraca ela se irá tornar. Após refletir no fundo, o retorno da onda sonora sofre ainda mais perdas de transmissão, e por fim, quando a onda sonora alcança de novo o sonar, é detetado com auxilio de um hidrofone. Como em qualquer sensor, o nível de ruído limita o alcance máximo, e enquanto que num mundo silencioso, o menor retorno no fundo do mar poderia ser detetado, no mundo real e barulhento, os retornos acabam por se tornar tão fracos que não se distinguem do nível de ruído tornando-se indetetáveis.

Embora seja simples de construir e fácil de usar e entender, um sonar de feixe único possui uma série de limitações que o tornam um instrumento inadequado para o levantamento batimétrico em larga escala, e são estas limitações que levaram ao desenvolvimento de sonares *multibeam*.

Ora, visto que o objetivo de um levantamento batimétrico é produzir várias medições simultâneas e precisas de profundidade, de modo a estabelecer uma imagem precisa da

Figura 2.6: sonar *multibeam* [2]

geografia do fundo, para fazer um levantamento batimétrico de forma eficiente, duas características são necessárias no sonar usado. O sensor deve produzir medições de profundidade precisas que correspondam a locais bem definidos no fundo e deve ser capaz de fazer um grande número de medições num curto espaço de tempo. Estas características tornaram o sonar *multibeam* a melhor opção para a realização de mapeamentos subaquáticos.

Capítulo 3

Fundamentos teóricos

Neste capítulo, com o intuito de consolidar as bases teóricas do presente estudo serão apresentados os conceitos e fundamentos teóricos necessários. Serão abordados os conceitos base sobre as transformações de referenciais, alguns referenciais, os ângulos de Euler e os quaterniões.

3.1 Referenciais

Num sistema de mapeamento que faz uso de diferentes sensores, deparamos-nos com medidas provenientes de diferentes referenciais. Existem vários referenciais considerados de padrão e estes são úteis na medida em que tornam possível a conjugação de medidas provenientes de cada sistema, pois é conhecida a relação entre eles.

3.1.1 Referencial Local

Um dos referenciais mais utilizados é o referencial local, este, também designado por *Local Tangent Plane* (LTP) é definido por uma superfície plana, tangencial a um ponto no planeta Terra. Os referenciais locais mais utilizados pela literatura e pelos sistemas de localização são o *East North Up* (ENU) e *North East Down* (NED), sendo o referencial ENU mais utilizado em veículos terrestres e o referencial NED mais utilizado em veículos aéreos e subaquáticos ou de superfície. Como os sistemas deste projeto são sistemas subaquáticos o referencial que será utilizado será o NED, sendo que neste caso o eixo do x aponta para Norte, o do y para Este, e o eixo do z aponta para o centro da Terra. No caso do referencial local ENU, o x aponta para Este, o y para Norte e o z para cima. Na Figura 3.1 está representado o referencial local NED em relação ao centro de massa da terra.

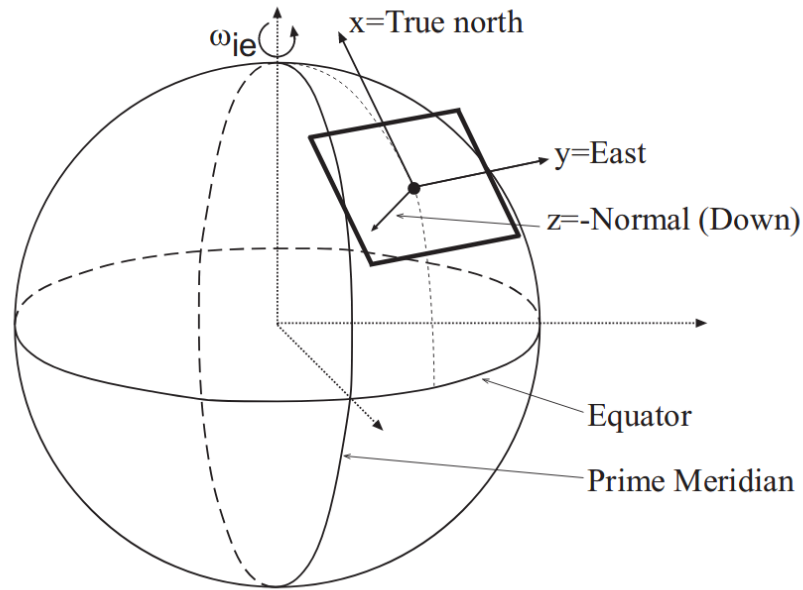


Figura 3.1: Referencial NED [3]

3.1.2 Referencial do Corpo

Num sistema de mapeamento, para além dos sensores que permitem determinar a localização do veículo temos ainda os sensores de perceção como câmaras ou sonares. Todos os sensores ou veículos possuem o seu próprio referencial, este denominado por referencial do corpo (*b-frame*). A origem deste referencial é localizada, normalmente, ou no centro de massa do sistema, ou na origem dos dados retornados, como é o caso dos sonares, e a sua orientação é relativa a um referencial local ou global. A orientação pode ser expressa em ângulos de Euler *roll* (θ), *pitch* (ϕ) e *yaw* ou *heading* (ψ) (também representados por p, q, r) em torno dos eixos x, y, z , sendo estes, no referencial subaquático, também conhecidos por u, q, r (*surge, sway, heave*), representando estes o movimento longitudinal, transversal e vertical respetivamente. Na Figura 3.2 está representado o referencial do corpo e as orientações relativamente a um referencial global.

3.2 Rotações Tridimensionais

Existem várias maneiras convencionais de representar a orientação 3D, sendo que nesta secção serão abordados duas delas, os quatérniões e os ângulos Euler.

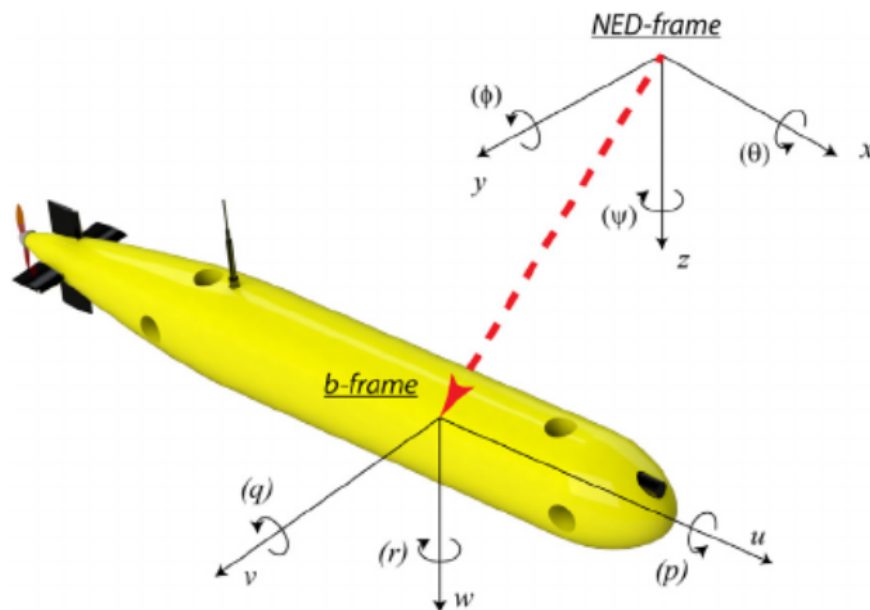


Figura 3.2: Referencial do corpo [4]

3.2.1 Ângulos de Euler

Os ângulos de Euler, ao contrário dos quaterniões, são mais perceptíveis para o ser humano. Esta notação definida por Leonhard Euler, serve para representar a orientação de um corpo rígido num espaço euclidiano tridimensional. A orientação é descrita por três ângulos, um por cada eixo do plano cartesiano (x, y, z) , sendo estes normalmente denominados por *roll* (ϕ), *pitch* (θ) e *yaw* (ψ), respetivamente. Na Figura 3.3 estão representados os ângulos de Euler.

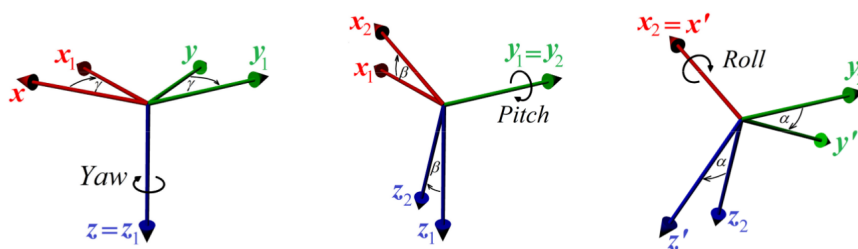


Figura 3.3: Ângulos de Euler [5]

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

$$R_x(\phi) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi \\ 0 & \sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

Também, a rotação em torno do eixo $y(\theta)$ é expressa matematicamente através da seguinte matriz:

$$R_y(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

Por fim, a rotação em torno do eixo $z(\psi)$ é expressa matematicamente através da seguinte matriz:

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

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

$$R(\phi, \theta, \psi) = R_x(\phi)^T R_y(\theta)^T R_z(\psi)^T \quad (3.4)$$

$$= \begin{bmatrix} \cos \theta \cos \psi & \cos \theta \sin \psi & -\sin \theta \\ \sin \phi \sin \theta \cos \psi - \cos \phi \sin \psi & \sin \phi \sin \theta \sin \psi + \cos \phi \cos \psi & \sin \phi \cos \theta \\ \cos \phi \sin \theta \cos \psi + \sin \phi \sin \psi & \cos \phi \sin \theta \sin \psi - \sin \phi \cos \psi & \cos \phi \cos \theta \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

No seguimento da matriz anterior, os ângulos de Euler são calculados a partir da seguinte equação:

$$\begin{bmatrix} \phi \\ \theta \\ \psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{atan2}(R_{23}, R_{33}) \\ \arcsin R_{13} \\ \text{atan2}(R_{12}, R_{11}) \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

3.2.2 Quaterniões

Os quaterniões são uma notação para representar a orientação tridimensional de um corpo. Ao contrário dos ângulos de Euler, previamente descritos, os quaterniões não são intuitivos para o ser humano. Todavia, os quaterniões reduzem o custo computacional quando é realizada qualquer tipo de rotação. Para além dessa mais valia também

resolvem as singularidades conhecidas por *Gimbal lock* [17] dos ângulos de Euler. Os quaterniões são representados por:

$$q = [q_0, q_1, q_2, q_3]^T = \begin{bmatrix} q_0 \\ q_{1:3} \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

onde q_0 é um escalar e q_1, q_2 e q_3 são números complexos.

$$\|q\| = \sqrt{q_0^2 + q_1^2 + q_2^2 + q_3^2} \quad (3.8)$$

$$q^{-1} = \frac{q}{\|q\|} \quad (3.9)$$

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

$$q = \begin{bmatrix} q_0 \\ q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \frac{\phi}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{\psi}{2} + \sin \frac{\phi}{2} \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{\psi}{2} \\ \sin \frac{\phi}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{\psi}{2} + \cos \frac{\phi}{2} \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{\psi}{2} \\ \cos \frac{\phi}{2} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\psi}{2} + \sin \frac{\phi}{2} \cos \frac{\theta}{2} \sin \frac{\psi}{2} \\ \cos \frac{\phi}{2} \cos \frac{\theta}{2} \sin \frac{\psi}{2} + \sin \frac{\phi}{2} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\psi}{2} \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

Por fim, de acordo com a sequência de rotações da equação 3.13 R_x, R_y, R_z a matriz rotação em quaterniões é dada por:

$$R = \begin{bmatrix} -q_3^2 - q_2^2 + q_1^2 + q_0^2 & 2(q_1q_2 - q_0q_3) & 2(q_1q_3 + q_0q_2) \\ 2(q_0q_3 - q_1q_2) & -q_3^2 - q_2^2 + q_1^2 + q_0^2 & 2(q_2q_3 - q_0q_1) \\ 2(q_1q_3 - q_0q_2) & 2(q_2q_3 - q_0q_1) & q_3^2 - q_2^2 + q_1^2 + q_0^2 \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

3.3 Transformações de Referenciais

De modo a permitir fundir os dados dos diversos sensores é necessário transformar os referenciais para um referencial comum. Ora, as transformações, possibilitam representar um vetor em diferentes sistemas de coordenadas, possibilitando a conversão de um vetor representado num determinado referencial para outro referencial.

A relação entre o sistema de coordenadas local (v_n) e o sistema de coordenadas do corpo é dada por uma rotação. Assumindo que o sistema de coordenadas do corpo é denominado por v_b a transformação é dada por:

$$v_n = R_b^n v_b \quad (3.12)$$

onde a matriz R_b^n é a matriz de rotação transposta da equação 3.13 dada por:

$$R_b^n = \begin{bmatrix} \cos \theta \cos \psi & -\cos \phi \sin \psi + \sin \phi \sin \theta \cos \psi & \sin \phi \sin \psi + \cos \phi \sin \theta \cos \psi \\ \cos \theta \sin \psi & \cos \phi \cos \psi + \sin \phi \sin \theta \sin \psi & -\sin \phi \cos \psi + \cos \phi \sin \theta \sin \psi \\ -\sin \theta & \sin \phi \cos \theta & \cos \phi \cos \theta \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

Capítulo 4

Projeto

Após analisar os diversos problemas e soluções existentes, e tendo em conta os requisitos como exatidão, precisão, robustez, tamanho e peso, impostos pelo projeto, e tendo como base os diversos tipos de sonares analisados, dois sonares *multibeam*s distintos foram escolhidos. Nos sub-capítulos seguintes, são apresentados a arquitetura geral do sistema, bem como a arquitetura de *software* e o *hardware* utilizado.

4.1 Arquitetura do sistema

No presente sub-capítulo é descrita a arquitetura geral do sistema, Na figura 4.1 apresenta-se, em forma de diagrama a referida arquitetura, dividida em três blocos principais, um que representa o veículo de mineração, outro o EVA e um terceiro que representa a Cabine de Controlo.

Visto que na máquina de mineração o fator peso e volume não são uma preocupação, foi projetado a instalação de dois sonares *multibeam*s distintos. Destes dois, o primeiro será um *multibeam* de duas dimensões, cujo retorno é um vetor de pontos. Todavia, devido ao facto da máquina possuir uma locomoção muito lenta, e para possibilitar uma rápida reconstrução da área envolvente, o *multibeam* será instalado num sistema *Pan&Tilt* (como já referenciado no capítulo dois), permitindo deste modo mover o sonar em redor de um ou dois eixos, rapidamente e com precisão.

O segundo sonar designado para o veículo de mineração foi um sonar *multibeam* tridimensional, que ao contrario de um *multibeam* tradicional possibilita uma "captura" instantânea tridimensional do cenário, isto é, não retorna um vetor de pontos mas sim uma matriz, possuindo cada um uma posição nas três coordenadas cartesianas. Ora, este será acoplado na frente da máquina com uma inclinação em *pitch* que pode ser al-

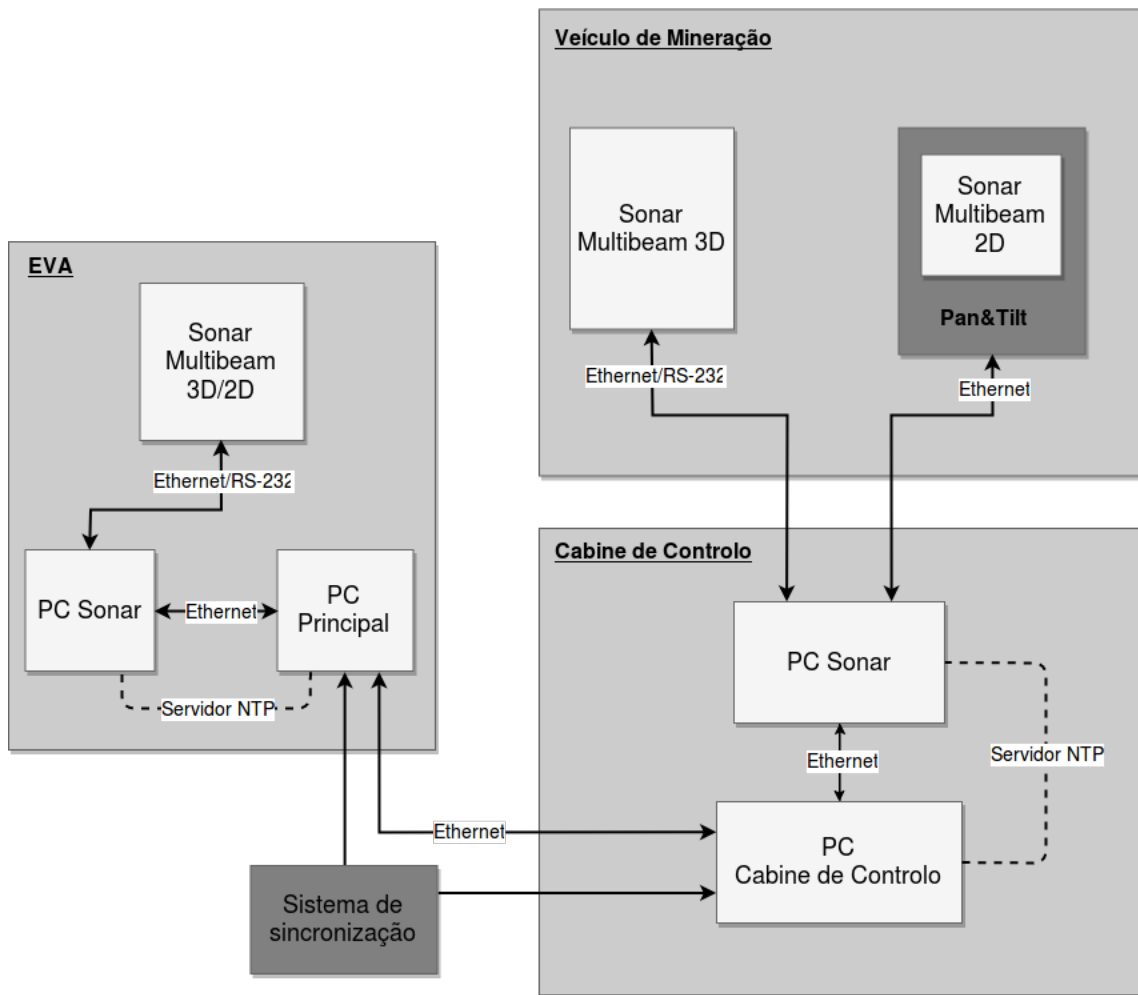


Figura 4.1: Arquitetura Geral

terado manualmente pelo utilizador, através de um sistema mecânico, de acordo a área de mapeamento desejada.

No caso da MV todo o processamento dos dados dos sonares é realizado em terra. Para esse efeito foi projetado para a cabine de controle, um computador com sistema operativo Linux, responsável por processar os dados dos sonares, e no caso de ser necessário, uma segunda unidade de processamento com o software do fabricante dos sonares. Este deve-se ao facto que vários fabricantes obrigam o utilizador a possuir um *software* proprietário com o propósito de proteger a tecnologia. Todavia estes *softwares* são maioritariamente desenvolvidos para o sistema operativo Windows, o qual não se enquadra nos requisitos estabelecidos para o computador de processamento da cabine de controle.

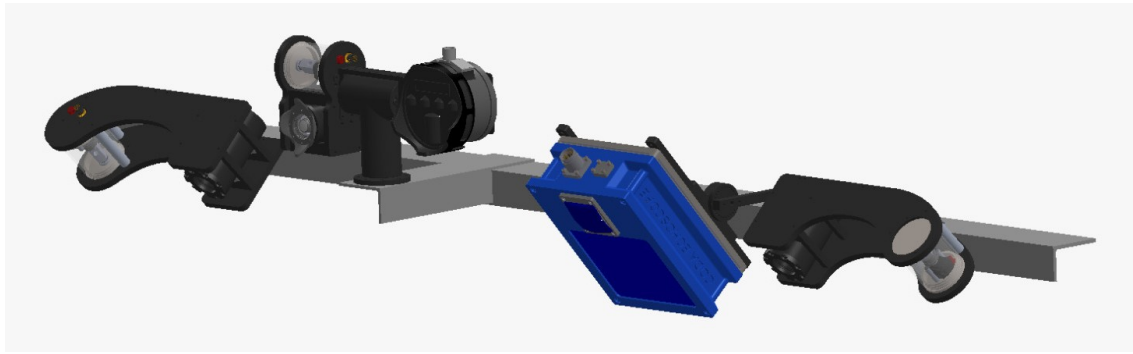


Figura 4.2: PNA do Veículo de Mineração

Para o EVA foi projetado a instalação de apenas um sonar *multibeam*, pois ao contrário da MV existem limitações de peso e volume. Todavia para tornar o sistema mais flexível, o mesmo foi projetado de maneira a ser possível alternar entre os dois sonares *multibeam* existentes no projeto (Figura 4.4).

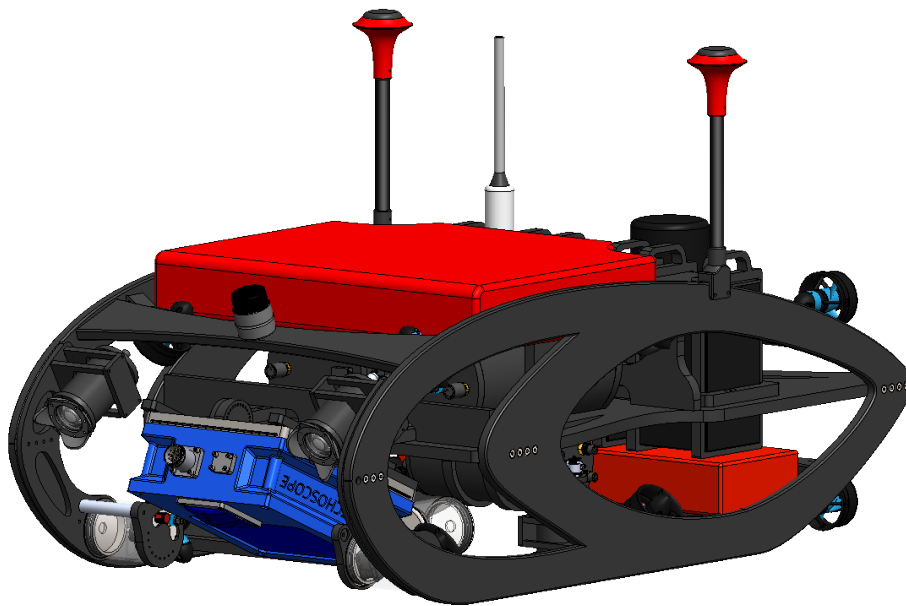


Figura 4.3: Desenho 3D do EVA

Ao invés da MV, no EVA todo o processamento da informação é feito no próprio robô,

isto deve-se ao facto de a EVA ser um sistema autónomo, e de existir a possibilidade de em certas missões a comunicação com a cabine de controlo ser inexistente. Ora tal como no veículo de mineração também no EVA serão instaladas duas unidades de processamento, todavia estes foram projetados tendo em consideração o tamanho, o que não aconteceu na MV.

De maneira a ser possível mapear o ambiente, apenas com o movimento do robô, o *multibeam* foi instalado na frente do robô com o vetor de *beams* perpendicular ao eixo principal de movimento do robô. Tal como para o MV, foi também projetada uma peça que permite a variação do ângulo em *pitch* do sensor, concluindo-se que uma inclinação de vinte e cinco graus em *pitch* face à vertical, possibilitaria ver os objetos antes de os alcançar.

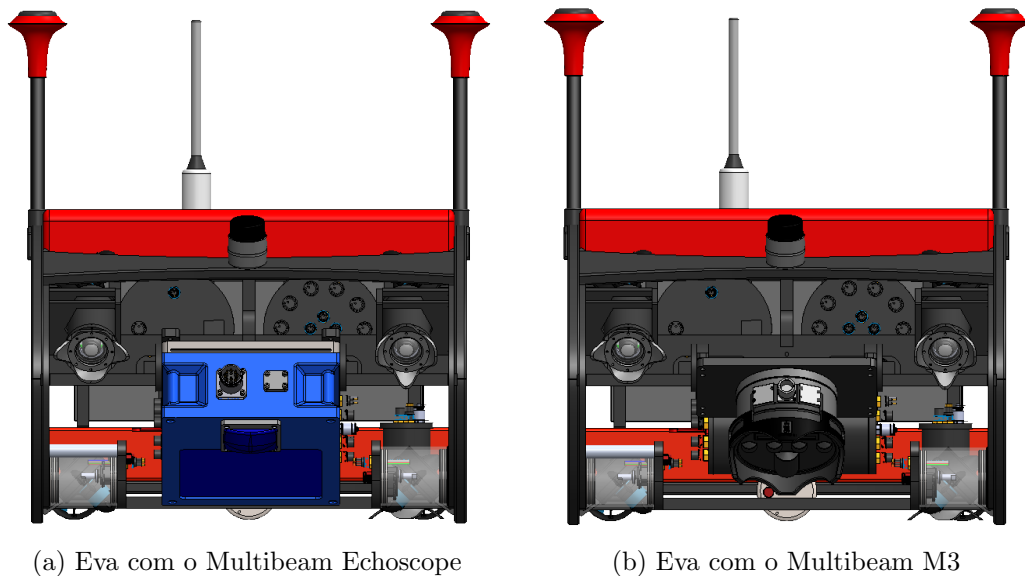


Figura 4.4: Desenho 3D do EVA com os diferentes sonares

Como já referido no capítulo 1, a comunicação entre o EVA e o CC pode ser estabelecida por diversos meios, sendo sempre aquando da operação em modo semi-autónomo, o meio de comunicação final o Wi-Fi. Para estabelecer comunicação com a EVA, será instalado um recetor Wi-Fi no CC. Para além de receber a informação vinda do EVA, serão também processados todos os dados vindos da MV (via fibra ótica), não só dos sonares, mas de todos os sensores presentes na máquina de mineração, e por fim fundidos com os dados do EVA

Para todos os sistemas funcionarem em conjunto, todos têm de estar sincronizados. Assim sendo foi projetado um sistema de sincronização que recebe um pulso por segundo

através de um sistema *Global Positioning System* (GPS), que por sua vez, irá sincronizar os dois computadores de processamento. Estes por sua vez, estando sincronizados, irão através de um servidor *Network Time Protocol* (NTP) sincronizar todos os outros computadores do subsistema respectivo, garantido assim que todas as máquinas estão sincronizadas com grande precisão.

4.2 Descrição do Hardware

Conforme a arquitetura geral apresentada na 4.5 foram escolhidos dois tipos diferentes de *multibeam*s e uma terceira variante. Nos seguintes sub-capítulos são descritas as características técnicas de cada sensor e a razão que esteve na base da escolha de cada um deles.

4.2.1 *Sonar Multibeam 2D*



Figura 4.5: Kongsberg M3 Sonar® Multibeam Echosounder

O sonar *multibeam* 2D escolhido foi o M3 Sonar® Multibeam Echosounder da Kongsberg. Os principais fatores que levaram à escolha foram: o compromisso resolução/peso, e uma característica particular que é a possibilidade de alternar entre o modo *Imaging* e o modo *Profiling* no qual possui uma abertura horizontal de cento e vinde graus e uma resolução em *range* de apenas um centímetro. É possível ainda no modo *Imaging* variar entre diversas aberturas verticais. Na tabela 4.1 estão presentes as principais características do sonar escolhido.

<i>Range</i> mínimo	0,2 m (1 m no modo <i>Profiling</i>)
<i>Range</i> máximo	150 m
Resolução	1 cm
Frequência	500 kHz
Modos	Imaging, eIQ Imaging and Profiling
Comunicação	Ethernet 1000Mbps
Peso no ar	4,7 kg
Peso na água	1,8 kg
Profundidades	500 m

Tabela 4.1: Especificações técnicas do Kongsberg M3

Para além dos dois modos já referidos é possível configurar o M3 num terceiro modo, o "eIQ *Imaging*", o qual faz uma interpolação entre diversas capturas consecutivas, com o intuito de obter uma imagem com mais qualidade, e menos ruído. Na tabela 4.2 estão descritas as principais características dos três modos. A principal diferença entre o modo *Profiling* e os de *Imaging*, é que enquanto os segundos retornam todas as intensidades de cada feixe ao longo da coluna de água, o *Profiling* retorna apenas uma distância por feixe, podendo esta ser o retorno com mais intensidade, ou o primeiro retorno acima de uma determinada intensidade. Como já referido, no modo *Imaging* é possível configurar a abertura vertical dos feixes, podendo esta ser três, sete, quinze ou trinta graus.

	<i>Imaging</i>	eIQ <i>Imaging</i>	<i>Profiling</i>
<i>Field Of View</i> (FOV) Horizontal	120 ^o	140 ^o	120 ^o
Abertura Vertical	3 ^o , 7 ^o , 15 ^o , 30 ^o	30 ^o	3 ^o
Resolução Angular	1,6 ^o	0,95 ^o	0,47 ^o
Número de <i>Beams</i>	128	148	256

Tabela 4.2: Modos de operação do Kongsberg M3

4.2.2 *Sonar Multibeam 3D*

O segundo *multibeam* escolhido foi o CodaOctopus Echoscope. O que levou a esta escolha foi o facto de este *multibeam* possuir uma tecnologia inovadora, ser um sonar 3D de alta resolução, gerando de uma só vez um modelo 3D do que está à sua frente, atingindo uma frequência de doze disparos por segundo.

Ora ao contrário do sonar anteriormente descrito, este retorna apenas uma distância por feixe, estando cada distância associada a uma intensidade. Todavia, enquanto que



Figura 4.6: CodaOctopus Echoscope® 3D sonar

no M3 já existem modos de funcionamento que associam *ranges* mínimos e máximos a ganhos, essa parametrização não existe neste sensor, sendo necessário parametrizar um conjunto variado de ganhos (por exemplo ganhos de transmissão e recepção) de modo a obter o resultado esperado. Na tabela 4.3 estão descritas as principais características do sensor.

Outra das características deste *Multibeam 3D* é a possibilidade de alternar o FOV, variando este entre o vinte e os cinquenta e cinco graus. A grande vantagem de reduzir o FOV, é o aumento notável da resolução. Todavia tem como consequência uma área de observação menor, tornando esta característica desapropriada para mapeamentos a curtas distâncias.

<i>Range</i> mínimo	1 m
<i>Range</i> máximo	120 m
Resolução	3 cm
Número de <i>Beams</i>	128 x 128 (16384 no total)
FOV	55° x 55° a 20° x 20°
Resolução Angular	0,42° a 0,16°
Frequência	340 a 700 kHz
Comunicação	Ethernet e RS232
Peso no ar	23,6 kg
Peso na água	13 kg
Profundidades	600 m

Tabela 4.3: Especificações técnicas da CodaOctopus Echoscope

4.2.3 Sonar Multibeam 2D + Pan & Tilt

Figura 4.7: Pan & Tilt com um *multibeam* M3 (lado direito)

De modo a compensar o facto de o veículo de mineração estar quase sempre parado, acoplou-se uma segunda unidade do M3 sonar a um *Pan & Tilt*. Após analisar as alternativas disponíveis no mercado foi escolhido o *Pan & Tilt* SS109 da Sidus. Este, foi escolhido devido à sua resolução angular de apenas 0,1°, o que se enquadra nas necessidades do projeto, sendo um fator de grande importância pois será o que irá definir em parte a resolução da reconstrução. Na tabela 4.4 estão descritas as principais

características do *Pan & Tilt*.

Resolução	0,1º
Velocidade	2 a 17 deg/s
Comunicação	RS485
Peso no ar	4,2 kg
Peso na água	2,7 kg
Profundidades	3000 m

Tabela 4.4: Especificações técnicas do Sidus SS109

4.3 Descrição do Software

No presente sub-capítulo é descrita a arquitetura de Software. Na figura 6.2 apresenta-se, em forma de diagrama a referida arquitetura. Esta descreve o que sucede dentro dos computadores principais de cada sistema, no caso da máquina, no computador do CC, e no caso da EVA na sua unidade de processamento principal, referidos no diagrama 4.1.

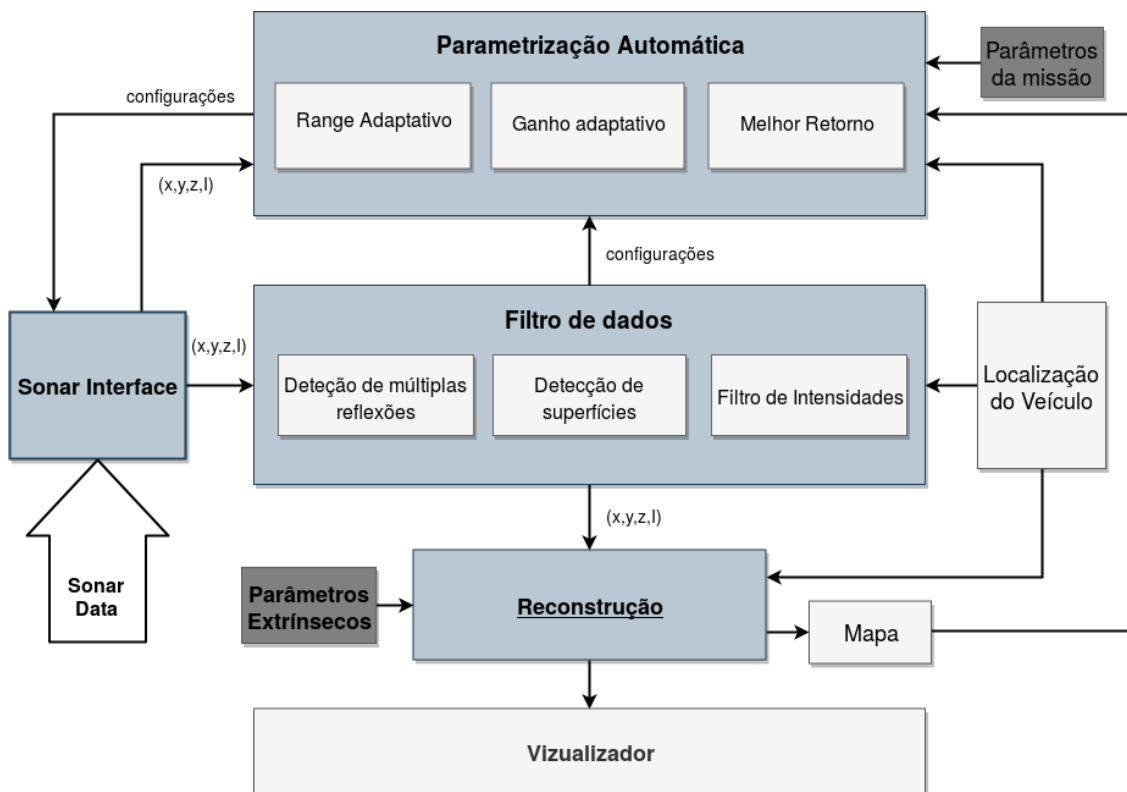


Figura 4.8: *Arquitetura de Software*

O Software desenvolvido pode ser dividido em cinco subsistemas principais, sendo eles o sistema responsável por realizar a comunicação com os sonares, o sistema responsável pela parametrização automática do sonar, o sistema que faz uma filtragem prévia dos pontos obtidos, o sistema responsável por realizar todas as transformações necessárias e por fim o sistema responsável pela visualização dos dados obtidos. Todo o sistema é desenvolvido em *Robotic Operating System* (ROS) [18] num computador com Ubuntu, um sistema operativo de código aberto.

O primeiro dos cinco sistemas, é o responsável por realizar a interface entre os sonares e o sistema operativo. Este dependendo do sonar em questão, estabelece comunicação quer através de porta série quer através de Ethernet, ou mesmo ambos. Aqui são recebidas e enviadas as tramas de informação e configuração de cada sistema, que por sua vez são processadas e convertidas num formato compatível com o mundo ROS.

Ora no segundo subsistema estão localizados os algoritmos responsáveis por automaticamente redefinir todos os parâmetros necessários para o correto funcionamento dos sonares. Aqui são analisados em tempo real os dados dos sonares, dados da localização do veículo no qual os sonares estão instalados, como profundidade e altitude, parâmetros já predefinidos de ganhos para determinados *ranges* e ambientes, e também no caso de existir, o mapa topográfico do local do mapeamento, ou um mapa reconstruído numa missão anterior. Analisando toda esta informação são enviados para os sonares, em tempo real, através da camada responsável pela comunicação, todas as configurações necessárias para otimizar o resultado final. É também neste subsistema que é definido, se neste se aplicar, o melhor eco de cada feixe.

O terceiro subsistema é responsável por filtrar toda a informação recebida pelo sonar. Aqui são eliminados falsos positivos, como múltiplas reflexões. Também com o auxílio das intensidades dos retornos e com o auxílio de dados da navegação é excluído algum ruído.

Após calibrar e filtrar os dados é necessário converter os *ranges* em pontos globais, e para tal é fundamental saber os parâmetros extrínsecos de todos os sensores de mapeamento face à origem do veículo em questão. Assim sendo, no subsistema responsável pela reconstrução dos pontos, serão analisados os parâmetros extrínsecos do veículo. Também aqui será realizada a transformação dos pontos no referencial do robô para o referencial do mundo, sendo esta realizada com os dados recebidos da navegação.

Por fim após ter todos os dados deparamos-nos com a necessidade visualizar os dados obtidos, e com esse propósito foi desenvolvida uma ferramenta capaz de permitir analisar os dados não só em pós processamento como em tempo real. Esta ferramenta é capaz de representar os diversos veículos, os dados dos vários sensores e o mapa do local da missão,

podendo assim auxiliar todas as fases da missão, desde o planeamento à execução.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco.

Capítulo 5

Implementação

No presente capítulo expõem-se, detalhadamente, a concepção e o funcionamento do sistema de parametrização e mapeamento com recurso a sonares *multibeam*, descrevendo inicialmente os veículos utilizados, o AUV EVA e o Veículo de Mineração, para a obtenção dos resultados apresentados no capítulo seguinte, no âmbito do projeto VAMOS.

5.1 *Setup* VAMOS

No presente sub capítulo estão descritos o AUV e o Veículo de Mineração utilizado no projeto VAMOS, sendo o foco do segundo, o sistema sensorial, designado no projeto por PNA.

5.1.1 *EVA*

Como projetado no capítulo anterior, no âmbito do projeto VAMOS foi desenvolvido e construído o EVA. Para além de todos os sensores que o robô possui para a navegação, como *Doppler Velocity Log* (DVL), *Inertial Navigation System* (INS), *Ultra-short baseline* (USBL), sensor de pressão e GPS, possui ainda para deteção de obstáculos um *Scanning Sonar* e para mapeamento para além de dois *Structured Light System* (SLS), a possibilidade de alternar entre dois *multibeams*, já referido no capítulo anterior, o M3 e o Coda Echoscope, utilizados para a realização desta tese.



Figura 5.1: EVA

Tal como projetado, estes dois *multibeam*s estão acoplados a uma estrutura rotativa o que permite variar o ângulo para o qual os *multibeam*s estão direcionados. Na figura 5.1 é possível ver o EVA desenvolvido pelo INESC TEC.

Na tabela 5.1 estão descritas algumas das principais características do EVA

Velocidade	1,5 m/s
Horas de operação	8h
Comunicação	Ethernet 1000Mbps e WI-Fi 300Mbps
Peso no ar	130 kg
Peso na água	Neutro
Profundidade max.	500 m

Tabela 5.1: Especificações técnicas do EVA

5.1.2 Veículo de Mineração

No Veículo de Mineração desenvolvido pela *Soil Machine Dynamics* (SMD) (figura 5.2), foram instalado pelo INESC TEC, vários sensores responsável pela localização e perceção. Enquanto que para a solução de localização foram utilizados um INS, um USBL, um sensor de pressão e um altímetro, para a solução de mapeamento foram

instalados quatro SLS, e os já referidos, dois sonares multi-feixe, um com uma posição fixa e outro acoplado a um sistema *Pan & Tilt*.



Figura 5.2: Veículo de Mineração do projeto VAMOS

Ambos os *multibeam*s foram montados na parte da superior frontal do MV de maneira a ser possível mapear a área de trabalho do veículo. Na imagem 5.3, é apresentado o veículo de mineração no qual é perceptível na zona superior da máquina os dois sonares utilizados. Os dois *multibeam*s foram instalados de maneira a proporcionar ao operador da máquina a percepção de tudo o que se passa em redor da parte frontal do veículo de mineração. A Coda Echoscope foi montada de maneira a proporciona uma "imagem" instantânea da cabeça de corte a uma frequência bastante elevada e com elevada resolução. Todavia como a Echoscope possui uma abertura de apenas cinquenta por cinquenta graus, o M3 possibilita ter uma percepção mais abrangente de tudo o que se passa na parte frontal do veículo, pois como está acoplado a um *Pan & Tilt* consegue abranger toda a frente do veículo, sendo um o complemento do outro.



Figura 5.3: Sonares *Multibeam* no MV

5.2 Sistema de interface com os sonares

O primeiro sistema implementado foi o que possibilita estabelecer a comunicação com cada sonar, sendo este, ao contrário dos próximos sistemas, distinto para cada sonar introduzido no sistema.

5.2.1 *Kongsberg M3*

Para o M3 foi desenvolvido um software que permite configurar o dispositivo e receber os dados nos diferentes formatos disponibilizados pelo fabricante. Como para este sonar é necessário possuir um *software* do fabricante, na verdade a comunicação não é estabelecida diretamente com o sonar, mas sim com o software proprietário da Kongsberg.

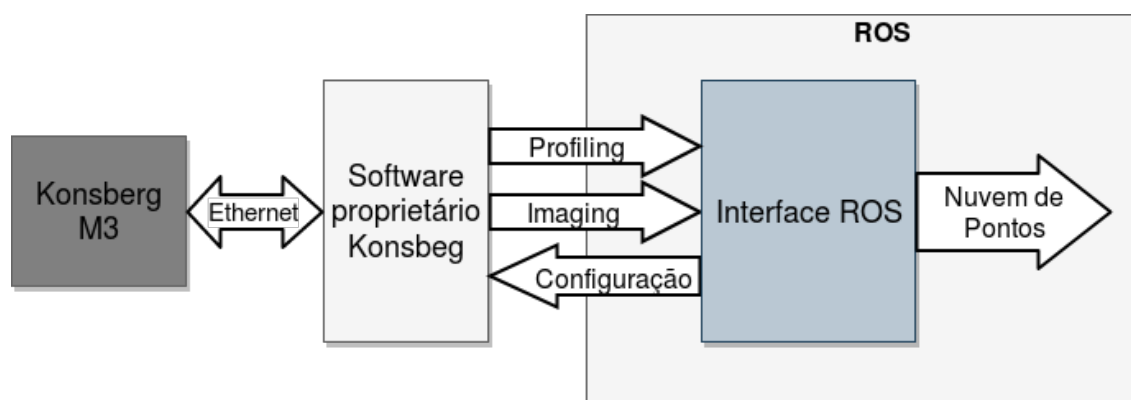


Figura 5.4: Interface com o sonar M3

Visto isto, para configurar o sonar *multibeam* é estabelecida uma comunicação TCP/IP entre o software do proprietário, e o *software* desenvolvido em ROS, a qual permite configurar os modos de funcionamento do sonar (já referidos na tabela 4.2), ranges e ganhos. Foi ainda desenvolvida uma interface gráfica que permite ao utilizador configurar manualmente todos estes parâmetros. Já para receber os dados, são disponibilizados dois modos pelo fabricante, um que envia os dados em formato *Imaging* através de um socket TCP/IP, e outro que envia os dados no modo *Profiling* este através de um socket UDP. Recebendo toda esta informação, é realizada a conversão dos dados recebidos para pontos tridimensionais que por sua vez são publicados no mundo ROS no formato de nuvem de pontos, utilizando a biblioteca *Point Cloud Library* (PCL) [19], na qual é possível indicar não só as coordenadas (X,Y,Z) como também as intensidades de cada ponto.

5.2.2 Coda Octopus Echoscope

Uma vez que a Coda Octopus também possui um software proprietário, sem o qual não é possível comunicar com o sensor, também aqui é estabelecida pelo software proprietário uma ponte entre o software desenvolvido e o sonar. Assim sendo, para comunicar com o software da Coda Octopus são criados três sockets UDP, um que permite enviar parâmetros de configuração, um que recebe os parâmetros atuais do sensor, e outro que recebe uma trama que contém os dados do sonar, representado no diagrama 5.5. Mais uma vez, tal como no M3, foi desenvolvida uma interface gráfica para configuração manual e é utilizada a biblioteca PCL para publicar os dados do sensor no mundo ROS.

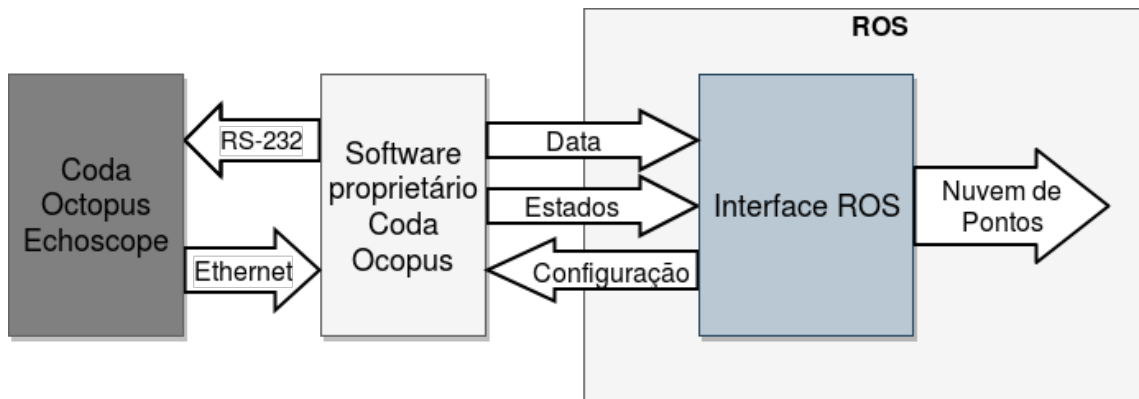


Figura 5.5: Interface com o sonar Echoscope

5.3 Sistema de parametrização automática

A parametrização representa uma parte fundamental de um sistema, pois sem uma boa configuração, é impossível garantir um sistema funcional, mas quando o mesmo é dinâmico, surge a necessidade de estar constantemente a reconfigurar os parâmetros de funcionamento. Com o objetivo de automatizar ao máximo o sistema apresentado nesta tese, foram implementados modos de parametrização automáticos para os principais parâmetros necessários para o funcionamento de um sonar. São eles ranges máximos, mínimos e ganhos.

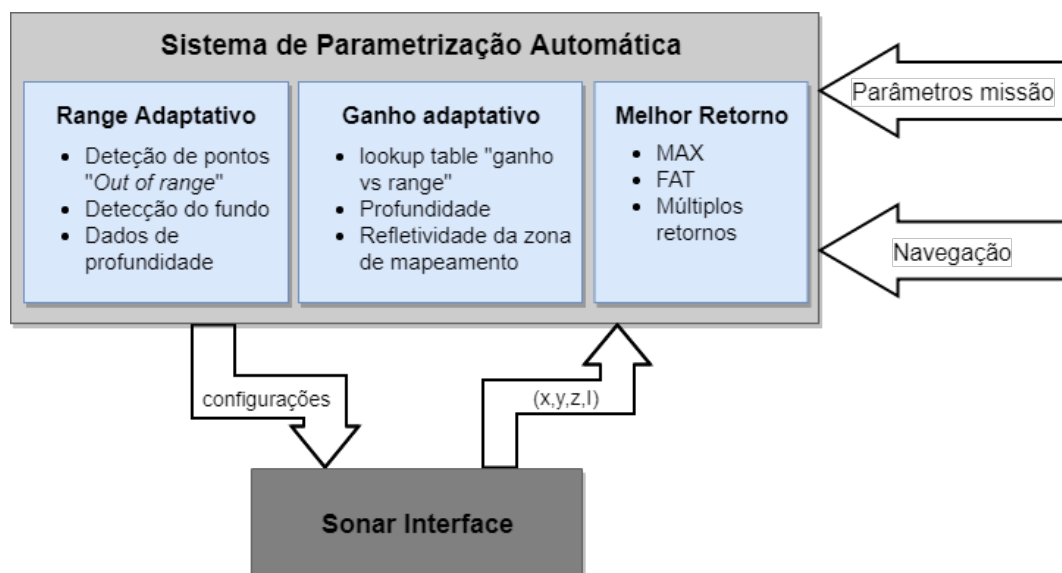


Figura 5.6: Diagrama Geral do Sistema de Parametrização Automática

Tal como referido no capítulo de projeto, foi utilizado mais que um método para configurar os ranges. Três abordagens diferentes foram implementadas com o objetivo de otimizar os ranges, sendo elas a percepção de onde está o fundo da zona de mapeamento apenas com a informação do próprio sensor, o uso de dados da navegação para determinar qual o range ideal e a avaliação dos ecos com o intuito de detetar retornos fora, ou muito próximos dos limites de configuração. Ambos os métodos foram implementados para os dois sonares utilizados, tendo existido a necessidade de adaptar as abordagens devido à diferença considerável dos dois *multibeams* utilizados no projeto.

Ora para descobrir com base na deteção do fundo, quais os ranges a utilizar, foi implementado um algoritmo que realiza uma iteração ao longo de um conjunto de ranges pré definidos, de modo a avaliar qual das configuração é a mais adequada para o cenário. Para fazer essa avaliação, em cada uma das iterações é analisada a zona central dos dados recebidos, podendo esta ser um vetor (no caso do *multibeam 2D*) ou uma matriz (no caso do *multibeam 3D*), e calculando o desvio padrão dos vários ranges e analisando o numero de falsos positivos (abordados na secção 5.4) é selecionado a configuração com menor erro. Este tipo de seleção devido à demora em obter uma solução, destina-se apenas a ser utilizada como uma configuração inicial em cenários que mantêm consideravelmente a mesma topografia ao longo do tempo.

Outro dos métodos utilizados é análise da profundidade dos retornos do sonar, e consequentemente aumentar ou reduzir o range para enquadrar essa mesma profundidade nos limites de observação. Todavia de acordo com as características da missão, existe outro fator que teve de ser tomado em consideração para a tomada de decisão. Embora que, com o aumento do range consiga-se aumentar o campo de visão, por outro lado prejudica-se a resolução, pois quanto maior for o range definido menor é a resolução obtida. De modo a otimizar este problema foi estabelecida uma pré configuração que indica qual o tipo de missão em questão. Nessa configuração é estabelecido se o que tem mais peso é a resolução, se é o campo de visão ou o melhor compromisso entre as duas.

Com o auxilio dos dados da Navegação foi então estabelecido um terceiro método. Neste não é tido em conta o retorno do *multibeam* mas sim a altitude do sistema em questão. Visto isto para calcular os ranges ideais, é feita a transformação da altitude do referencial da navegação para o referencial do sensor, e assumindo que a zona de visão se aproxima a um plano paralelo ao plano xy do robô é então determinado o range ideal.

Para além de configurar os ranges é também necessário configurar os ganhos, sendo esta parametrização distinta, dependendo do sonar em questão. Enquanto que os ranges só variam com a topologia do local e a posição do veículo, o mesmo não acontece com os ganhos. Estes, dependem de vários fatores tais como refletividade dos materiais, o

próprio range, a pressão, a temperatura e a densidade da água, pois com a variação da velocidade do som na água toda a configuração do sistema irá alterar. Ora para lidar com esta situação foram definidos um conjunto de parametrizações que dependendo do ambiente ambiente são aplicadas ao sistema. Enquanto que alguns dados como profundidade, temperatura da água e alcance podem ser calculados pelo sistema, outros como refletividade da zona de mapeamento têm de ser pré definidos pelo utilizador.

5.4 Sistema de pré filtragem de dados

Todos os sistemas por mais afinados que estejam estão sempre suscetíveis a falsos positivos, e tendo esse fator em conta, foi desenvolvido uma camada de software responsável por excluir essa informação. Com base nos dados da navegação são excluídos falsos positivos como múltiplas reflexões. Analisando o valor das intensidades são também excluídos retornos com baixa intensidade.

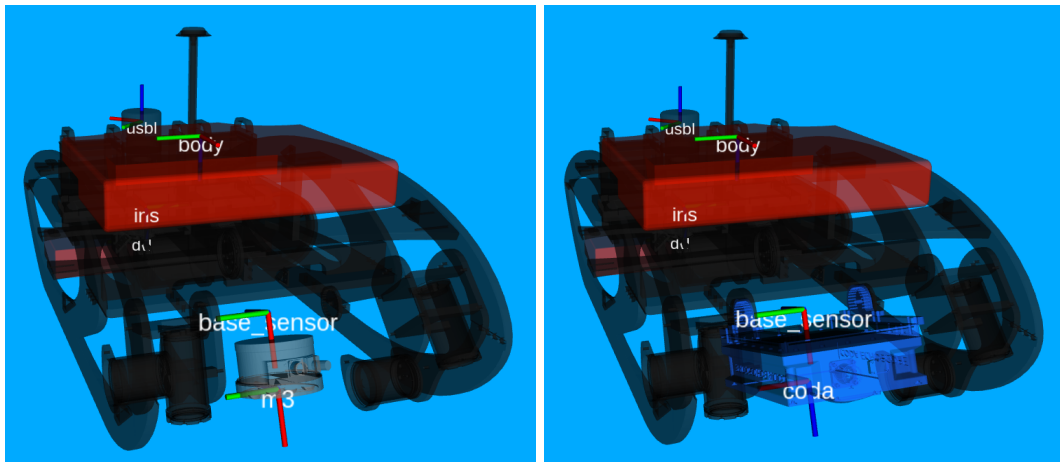
5.5 Sistema de Reconstrução

Tendo obtido os pontos no referencial do sensor foi necessário primeiramente transformar os pontos para o referencial do robô. Para descrever todos os parâmetros extrínsecos do robô foi utilizado um ficheiro URDF [20], no qual podem ser definidos todos os referenciais dos sensores ou atuadores do robô, estes designados por "*links*". A estes *links* pode ainda estar associado um visual, isto é, um objeto 3D que pode ter diversas extensões tais como STL ou OBJ, o que posteriormente irá possibilitar a visualização do robô.

Possuindo todos os links do veículo são então definidas as ligações entre cada um desses links, estas definidas como "*joints*". Nestas juntas são então indicadas a translação e rotação entre cada dois *links*, indicando se estas ligações são ligações fixas, rotativas ou prismáticas. É ainda possível, também neste ficheiro, definir parâmetros como dinâmica. Este modo de definir o robô, permite não só aceder às transformadas do robô em tempo real no mundo ROS, mas também ser usada para propósitos de simulação como em [21] e [22].

Ora, para partilhar estas transformações entre referenciais no mundo ROS estas são carregadas e publicadas com o auxílio das TF [23], uma biblioteca de transformações, que permite ao utilizador ter acesso às diversas transformadas no mundo ROS ao longo do tempo. As TF permitem manter a relação entre os diversos referenciais fazendo uso duma estrutura em árvore, permitindo ao utilizador aplicar uma transformação a,

por exemplo, uma nuvem de pontos entre quaisquer dois referenciais, a qualquer altura desejada. Na figura 5.7 (a) e (b) é possível ver o robô e parte dos seus referenciais, sendo os de mais relevância o referencial do *body* (situado na parte superior do robô), e o referencial do sensor, tanto o do M3 (à esquerda) como o da Echoscope (à direita). Também na figura 5.7 (c) é possível ver os referenciais utilizados no PNA do veículo de mineração.



(a) URDF do EVA com M3

(b) URDF do EVA com Echoscope



(c) URDF do MV

Figura 5.7: Modelo do EVA e do MV definido num ficheiro URDF

Todavia para publicar o estado das juntas rotativas como é o caso do *Pan & Tilt*, é publicado o valor da posição dos motores, numa mensagem do tipo *jointState* pertencente à biblioteca de mensagens padrão do ROS, *sensor_msgs*. Automaticamente, a biblioteca TF associa esta informação à sua árvore de transformadas.

Ora após transformar os pontos do referencial do sensor para o referencial do robô

é então necessário transformá-los para o referencial do mundo. Com esse propósito o sistema de reconstrução subscreve-se aos dados da navegação do robô em questão, estando a posição representada em coordenadas cartesianas e a orientação em quaterniões, e mais uma vez, fazendo uso da biblioteca TF é publicada à frequência dos dados da localização recebidos, a transformação entre o referencial local e o referencial do robô. Para garantir que todas as transformações são publicadas com a correta associação temporal, foi necessário garantir que todos os sistemas estavam sincronizados. No caso em que foi utilizado mais que um computador por veículo, os mesmos foram sincronizados com auxílio a um servidor NTP.

5.6 Visualização

Com o propósito de visualizar todos os dados em tempo real foi utilizada uma ferramenta do ROS para visualização tridimensional, o RViz [24]. Nesta ferramenta é possível visualizar diversas mensagens padrão como nuvens de pontos, posições de robôs e objetos, imagens, etc.

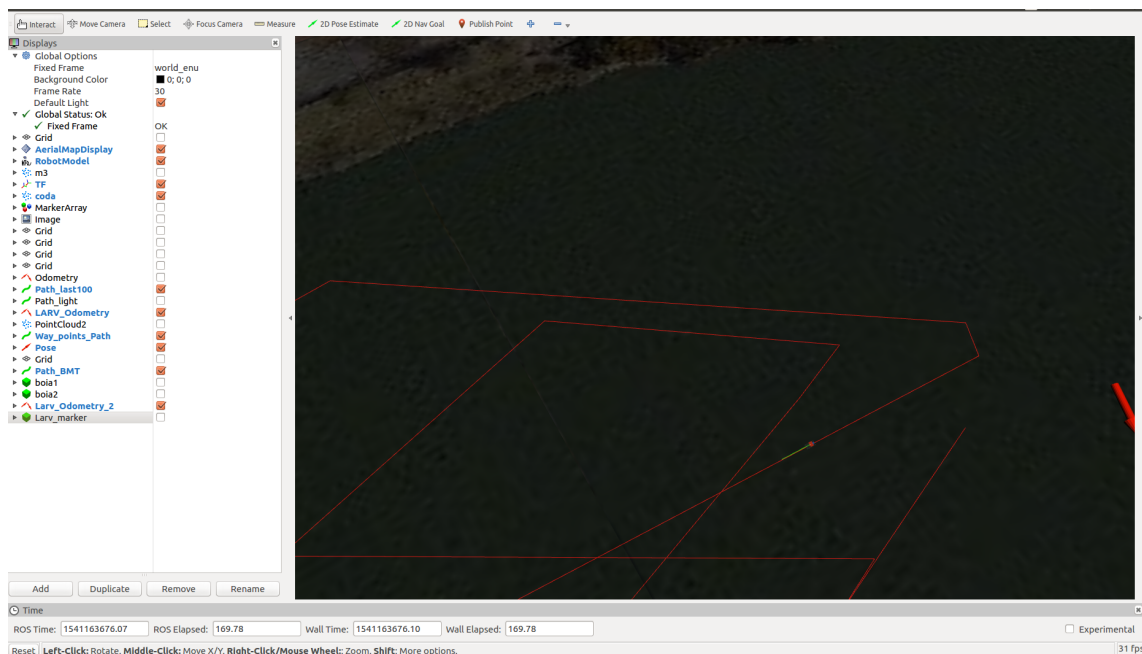


Figura 5.8: Exemplo de uma janela do visualizador RViz

Ora para possibilitar a visualização de todo o sistema foram utilizados vários formatos de visualização, sendo os principais o "RobotModel" que permite visualizar o robô, o

"*AerialMapDisplay*" que permite ter uma imagem de satélite do local da missão, o *plugin* das já referidas "TF" que permite visualizar a posição de todas as transformadas no mundo, o "*PointCloud2*" que permite visualizar as nuvens de pontos e o "*Path*" que permite visualizar o trajeto realizado pelo robô ou o planeamento do mesmo. Outra das características do Rviz é a possibilidade de visualizar o "mundo" em diversas perspetivas, isto é em diversos referenciais, podendo este ser por exemplo, o referencial global ou referencial do robô.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco.

Capítulo 6

Resultados

A arquitetura e métodos apresentados ao longo desta tese foram implementados e testados na última demonstração do projeto VAMOS, realizada numa mina inundada, a céu aberto, em Silver Mines na República da Irlanda. Na figura 6.1 é possível ver o cenário na qual foi testado todo o sistema.



Figura 6.1: Silver Mines, VAMOS 2018

De modo a apresentar todos os resultados obtidos o presente capítulo está dividido em duas secções, uma que apresenta os resultados obtidos com o AUV EVA e outra os resultados obtidos com o veículo de mineração. Todos os dados apresentado estão no

referencial local, sendo a origem a Cabine de Controlo e o referencial usado NED.

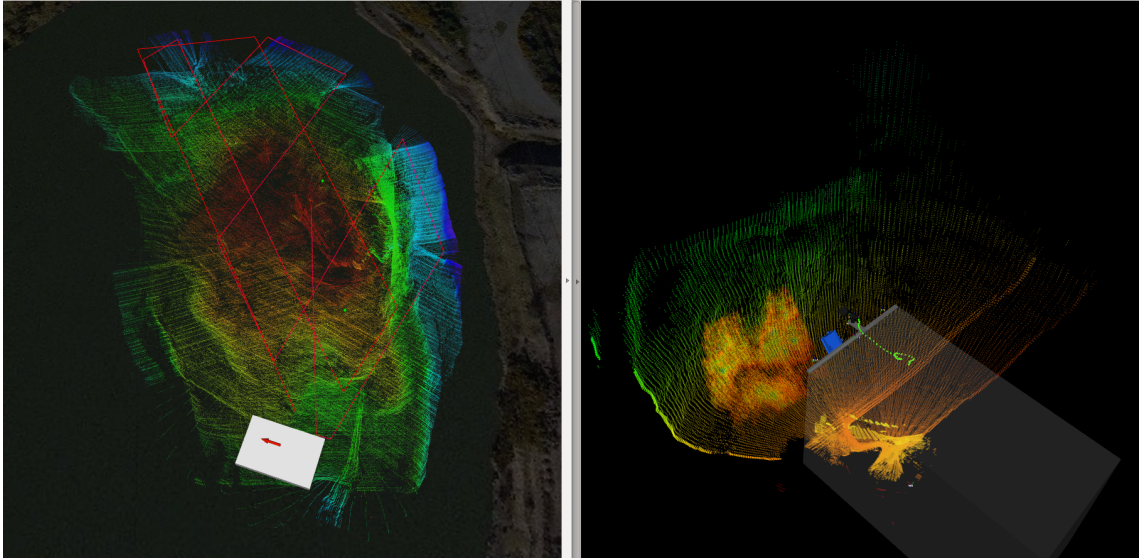


Figura 6.2: Sistema de Mapeamento

6.1 Mapeamento com o AUV EVA

O EVA foi utilizado para mapear toda a zona submersa da mina, com o propósito de atualizar o mapa batimétrico já existente, e com isto auxiliar o piloto do Veículo de Mineração.



Figura 6.3: EVA Silver Mines

Foi possível nesta demonstração alternar os sonares utilizados no EVA estando por isso esta secção, dividida entre os resultados obtidos com o M3 e os resultados obtidos com o Echoscope. Na figura 6.3 é possível ver o EVA na mina de Silver Mines.

Os dados foram obtidos em várias missões do EVA sendo inicialmente o robô utilizado em modo manual e posteriormente em modo autónomo, tendo navegado tanto à superfície como a meio da coluna de água. Também ao nível da parametrização inicialmente foi executada manualmente, e posteriormente em modo automático. A zona de mapeamento oscilava entre um metro de profundidade e os quase sessenta metros. Todos os algoritmos correram no computador principal do robô, cujo processador era um Intel i7, em tempo real. Para garantir uma correta reconstrução, todos os sistemas estavam sincronizados, sendo o pulso de sincronismo dado por GPS.

6.1.1 Resultados com M3

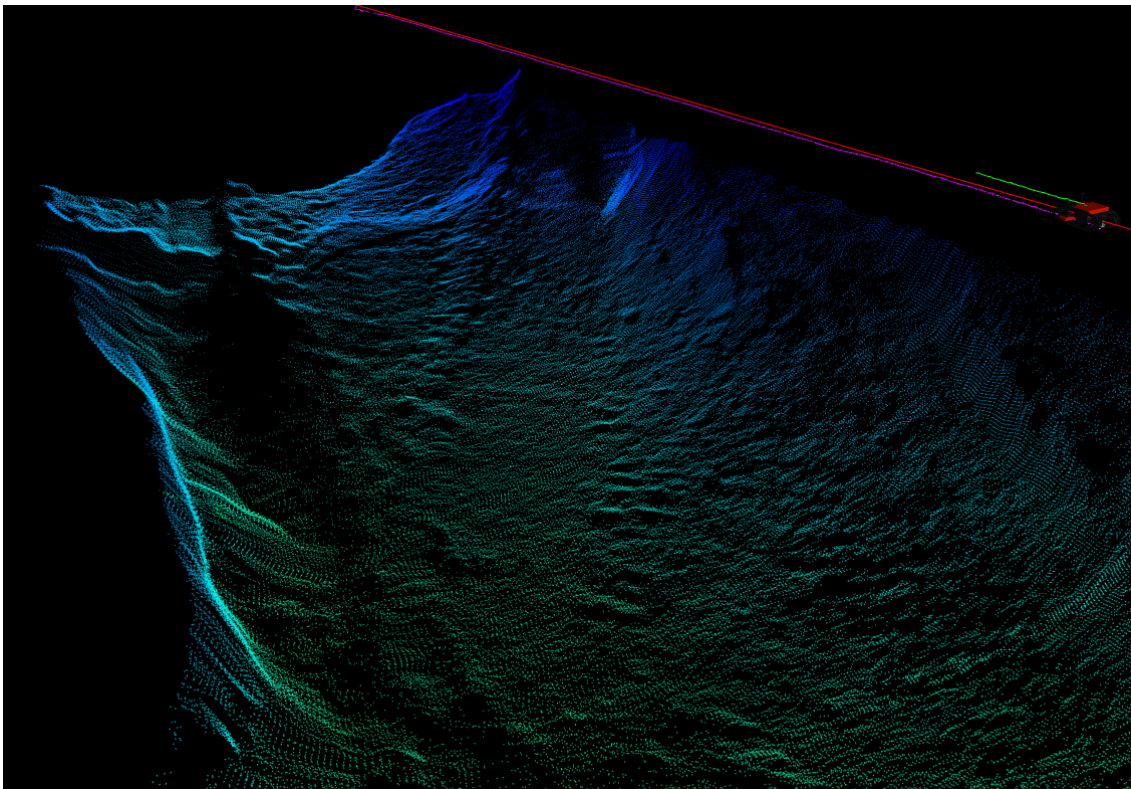


Figura 6.4: Mapeamento a curta distância com o *multibeam* M3

Inicialmente foi colocado o M3 no EVA pois devido à sua grande abertura de cento e vinte graus, permitiu realizar o mapeamento total na mina num espaço de tempo mais

reduzido, pois assim, foram necessárias menos passagens paralelas para obter o mapa da toda a mina. Na figura 6.4 é possível ver o EVA (canto superior direito) a realizar o mapeamento numa zona com média profundidade, aproximadamente quinze metros. Nestes mapeamentos de menor profundidade é bem perceptível a textura do fundo da mina.

Na figura 6.5 é possível ver outro segmento do mapeamento, este na zona mais profunda, a qual atinge quase os sessenta metros. A escala de cores varia com a profundidade, sendo o azul a zona menos profunda e o vermelho os retornos mais profundos.

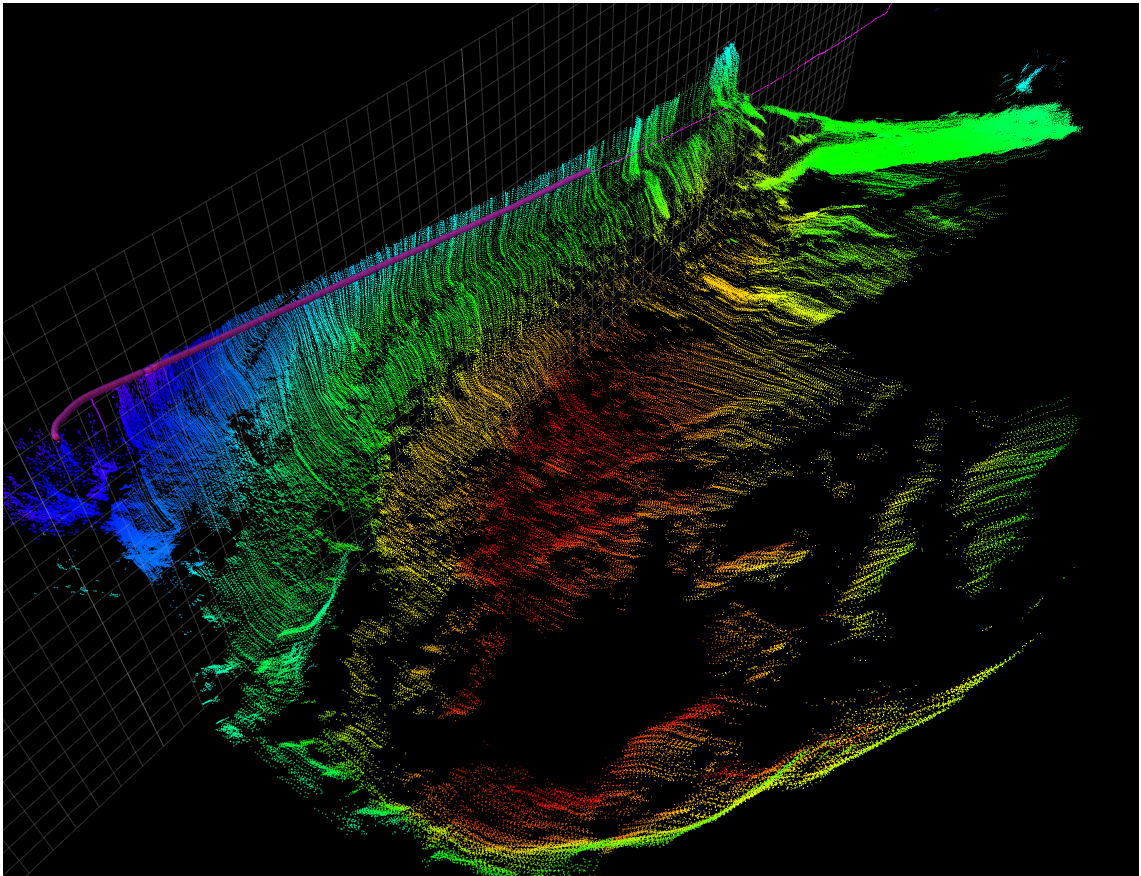
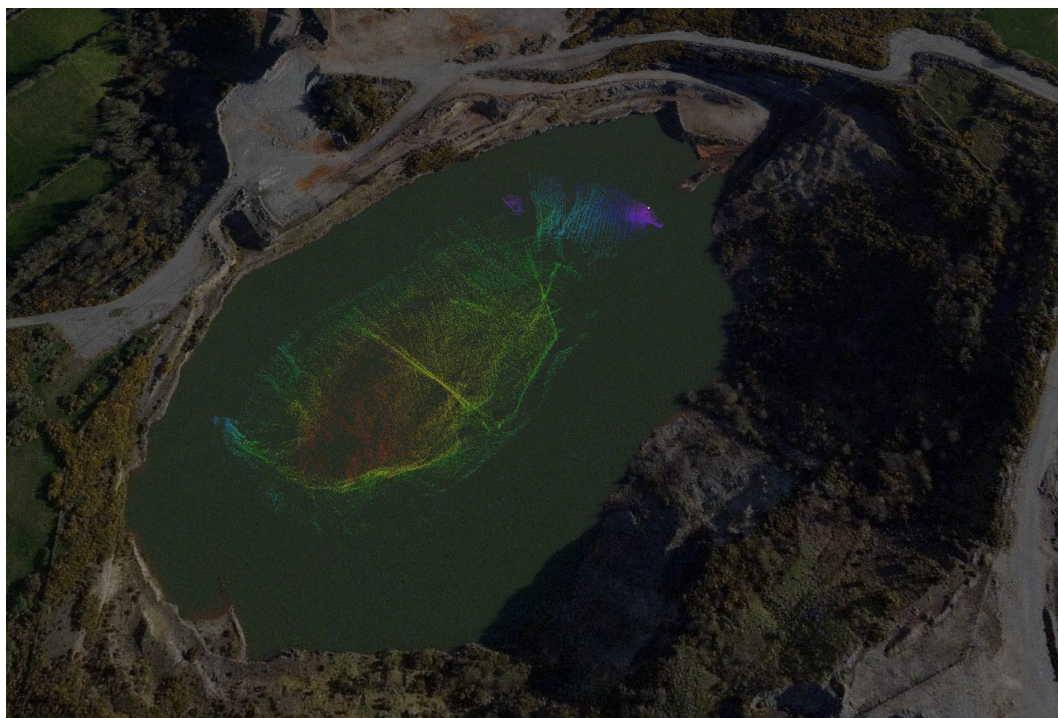


Figura 6.5: Mapeamento parcial com o *multibeam* M3

Na figura 6.6 (a) e (b) é possível ver o enquadramento das nuvens de pontos no mapa de satélite. Também na figura 6.6 (b) é possível ver a verde parte do trajeto descrito pelo EVA



(a)



(b)

Figura 6.6: Vista de topo de parte do mapeamento realizado com o *multibeam* M3

Na 6.7 está presente o mapeamento de quase toda a mina. É também possível ver a rosa a trajetória descrita pelo robô.

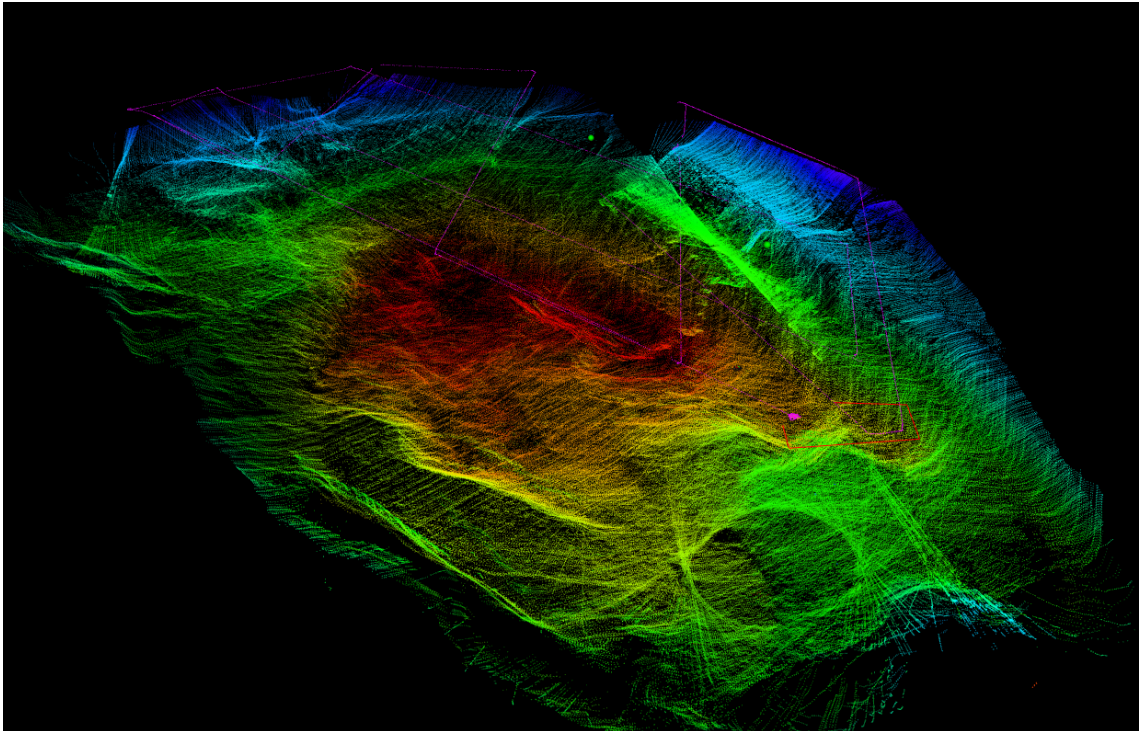
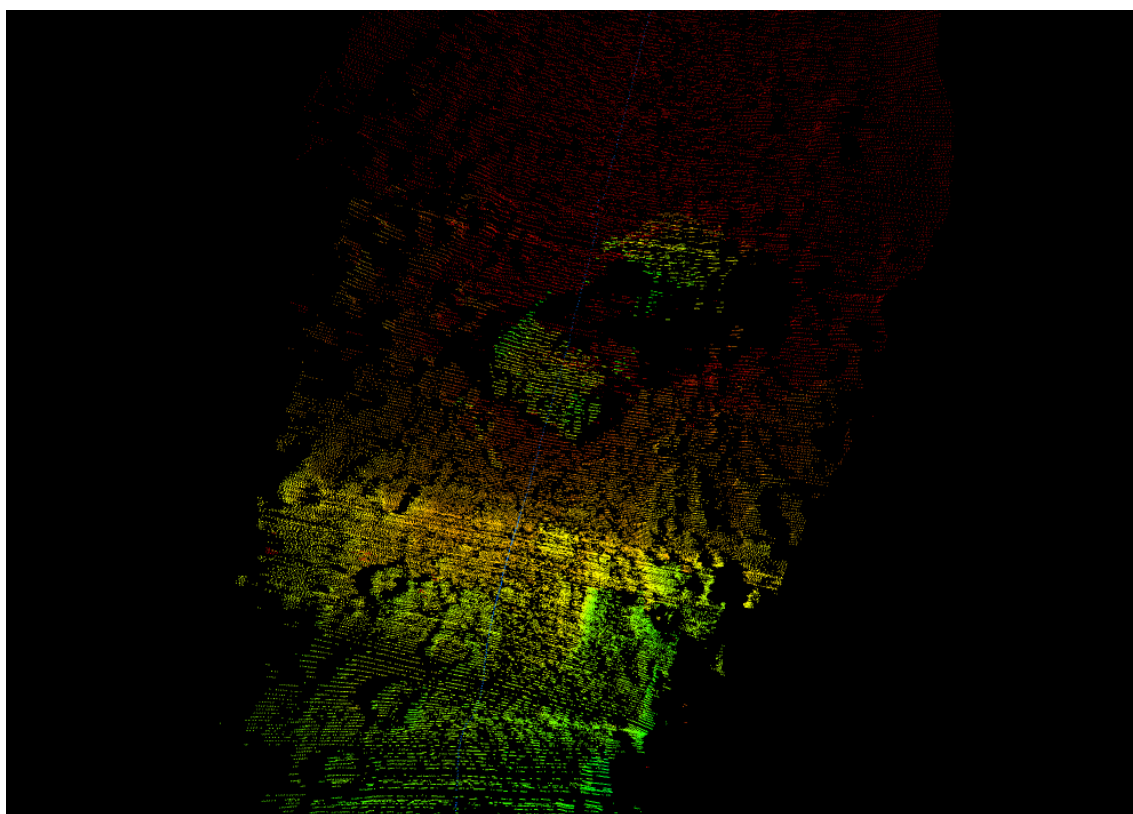
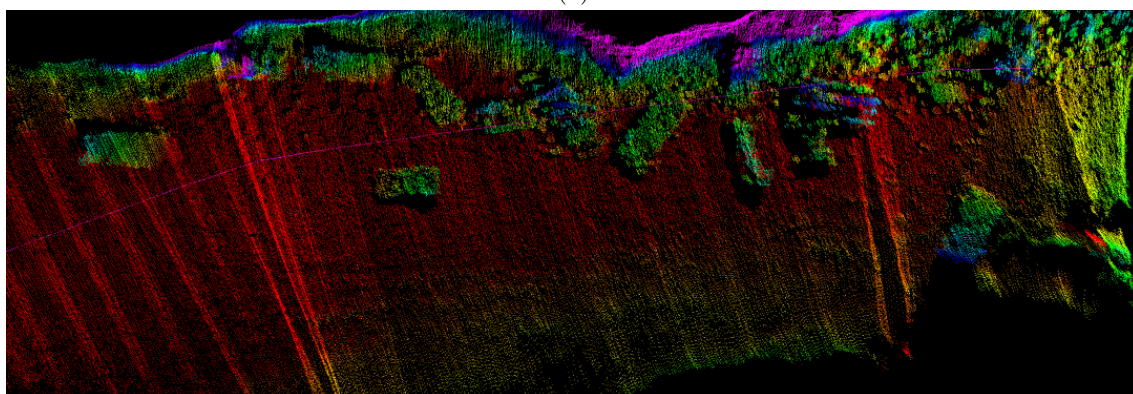


Figura 6.7: Mapeamento com o *multibeam* M3

No decorrer do mapeamento alguns objetos como carros, pneus e jantes foram encontrados no fundo do lago, tendo-se descoberto mais de quinze carros no fundo da mina num local com quinze metros de profundidade.



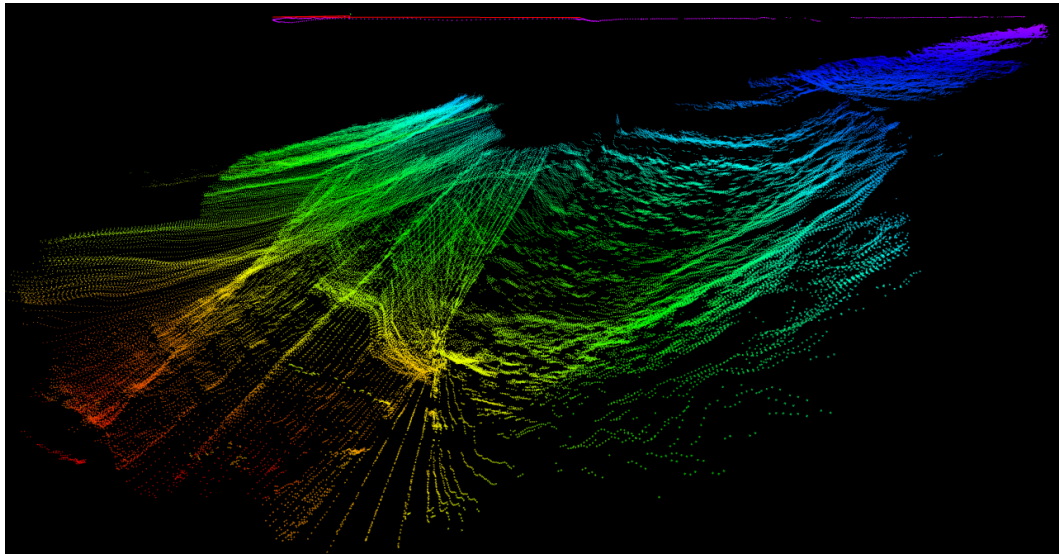
(a)



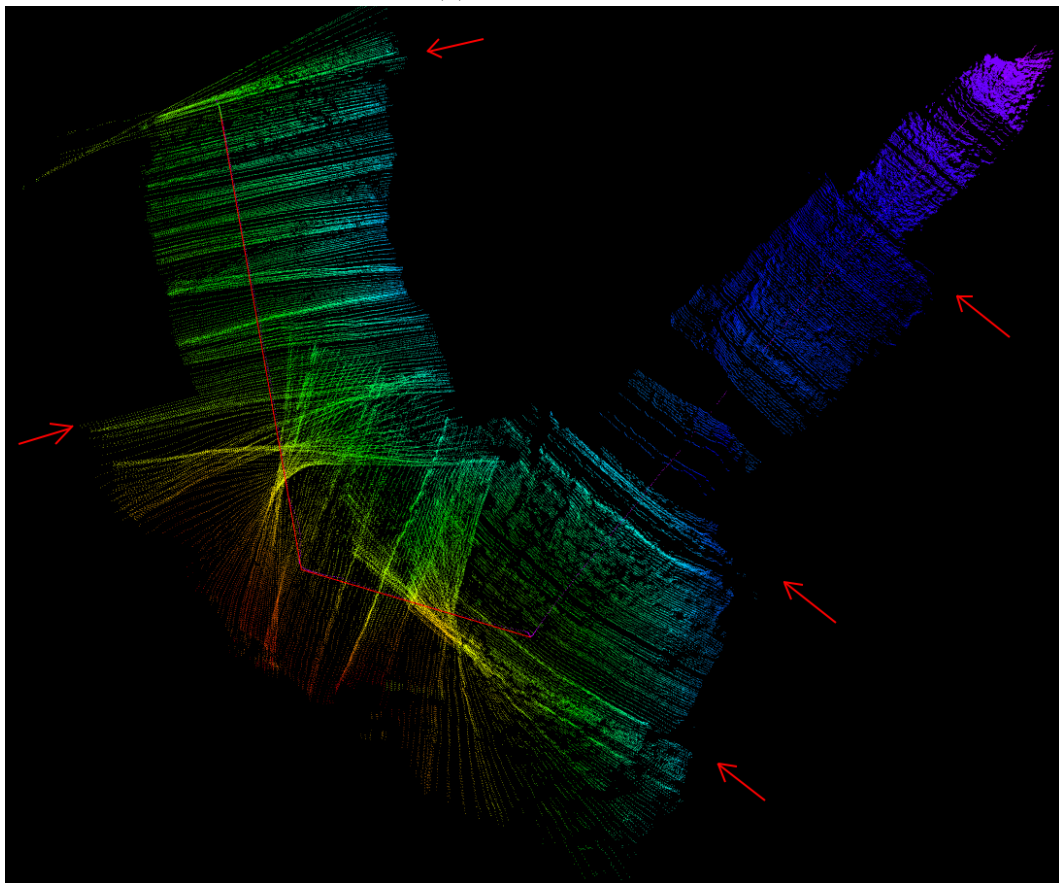
(b)

Figura 6.8: Carros no fundo do lago

Na figura 6.9 está presente uma demonstração do modo de ranges automáticos no M3, sendo a primeira imagem (a) uma vista lateral onde é perceptível a variação de profundidade, e a (b) uma vista de topo. Este teste foi realizado com o propósito de testar a variação de altitude, e com isto tornar perceptível as variações de range.



(a) Vista de topo



(b) Vista lateral

Figura 6.9: Range automático M3

As setas vermelhas indicam os momentos em que houve uma mudança de range. Neste teste a variação de range tem em consideração a otimização da resolução, isto é, manter o objeto central detetado o mais próximo possível do range máximo, aumentando deste modo a resolução. Por contrapartida neste modo o campo de visão é afetado.

6.1.2 Resultados com Echoscope

Na presente secção estão expostos alguns resultados obtidos com o *multibeam* 3D Echoscope. Ao contrário dos dados apresentados do M3 no Echoscope são usados os valores de intensidade para colorir a nuvem de pontos, ao invés da profundidade. Na figura 6.10 está presente um *scan* do Echoscope onde é visível com detalhe o fundo da mina. Neste figura o robô estava posicionado à superfície, a 30 metros de altitude.

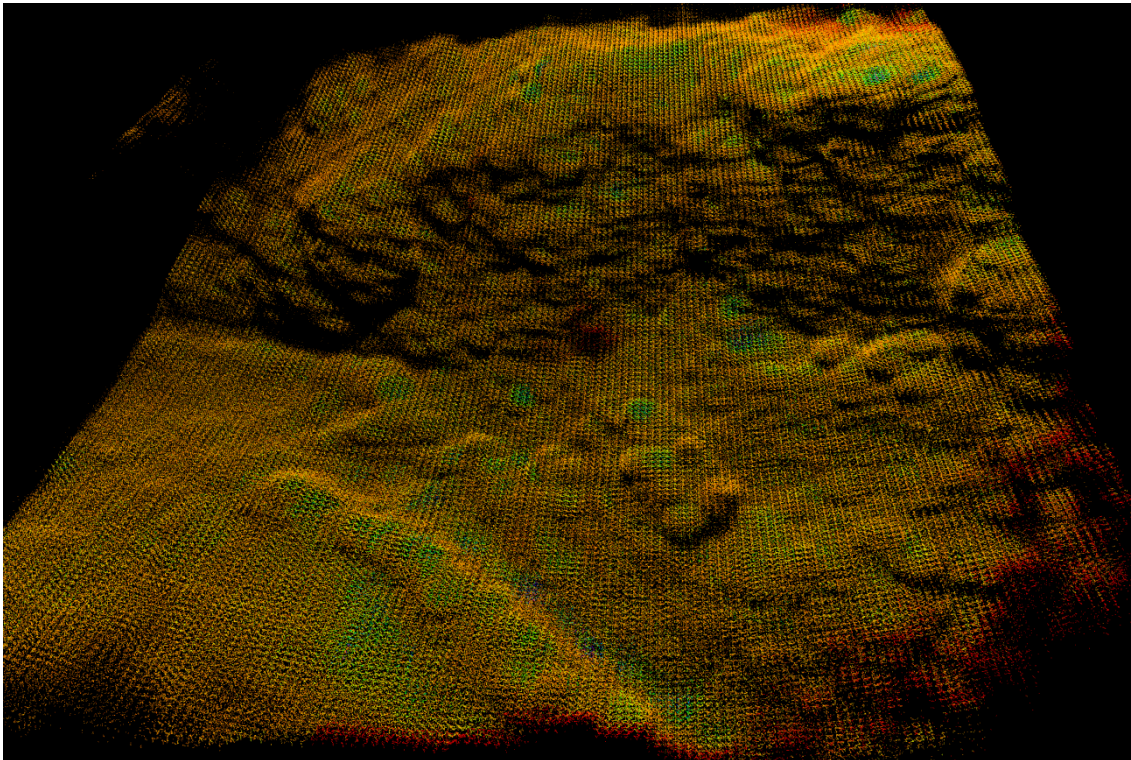
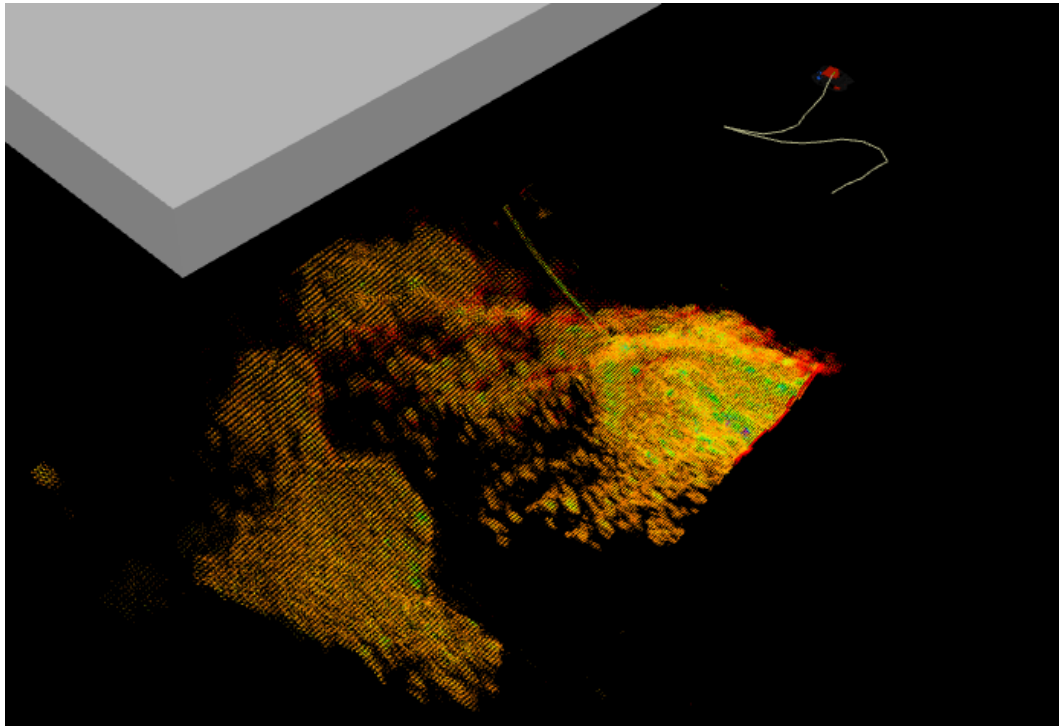
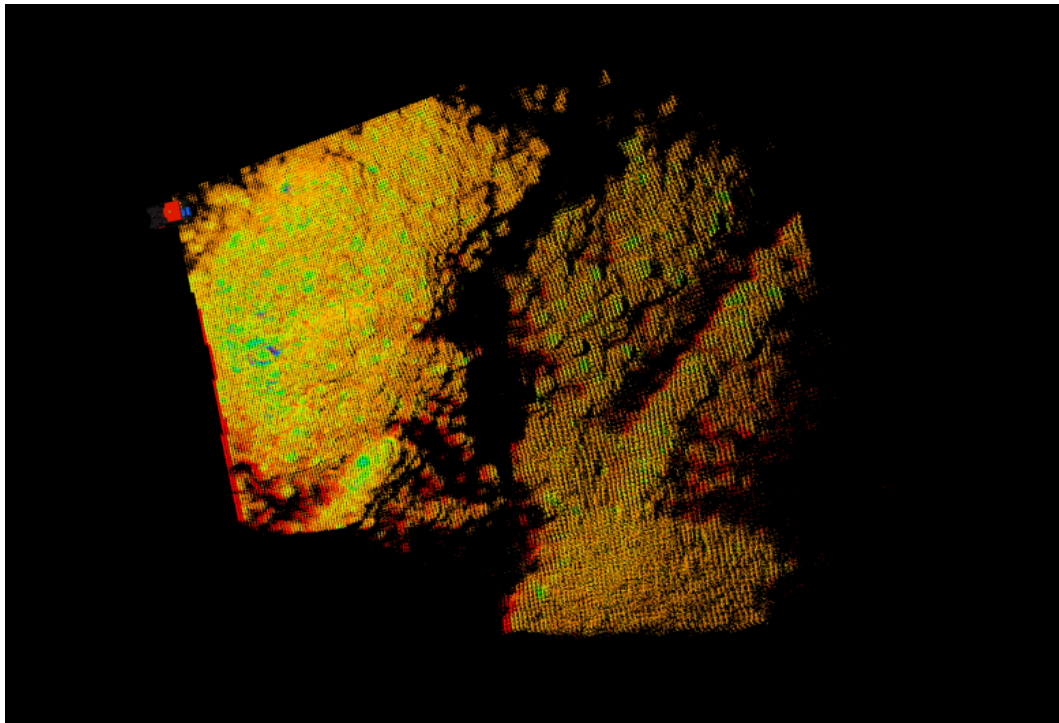


Figura 6.10: Scan Echoscope colina

Na figura 6.11 é possível ver um dos momentos em que a EVA estava a captar o local onde o veículo de mineração iria executar o seu trabalho.



(a)



(b)

Figura 6.11: Scan Echoscope

Por fim na figura 6.12 está presente o momento em que o EVA estava a captar a zona onde o veículo de mineração esteve a operar, de forma a ser possível posteriormente avaliar, qual o volume de pedra retirado pelo Veículo de Mineração.

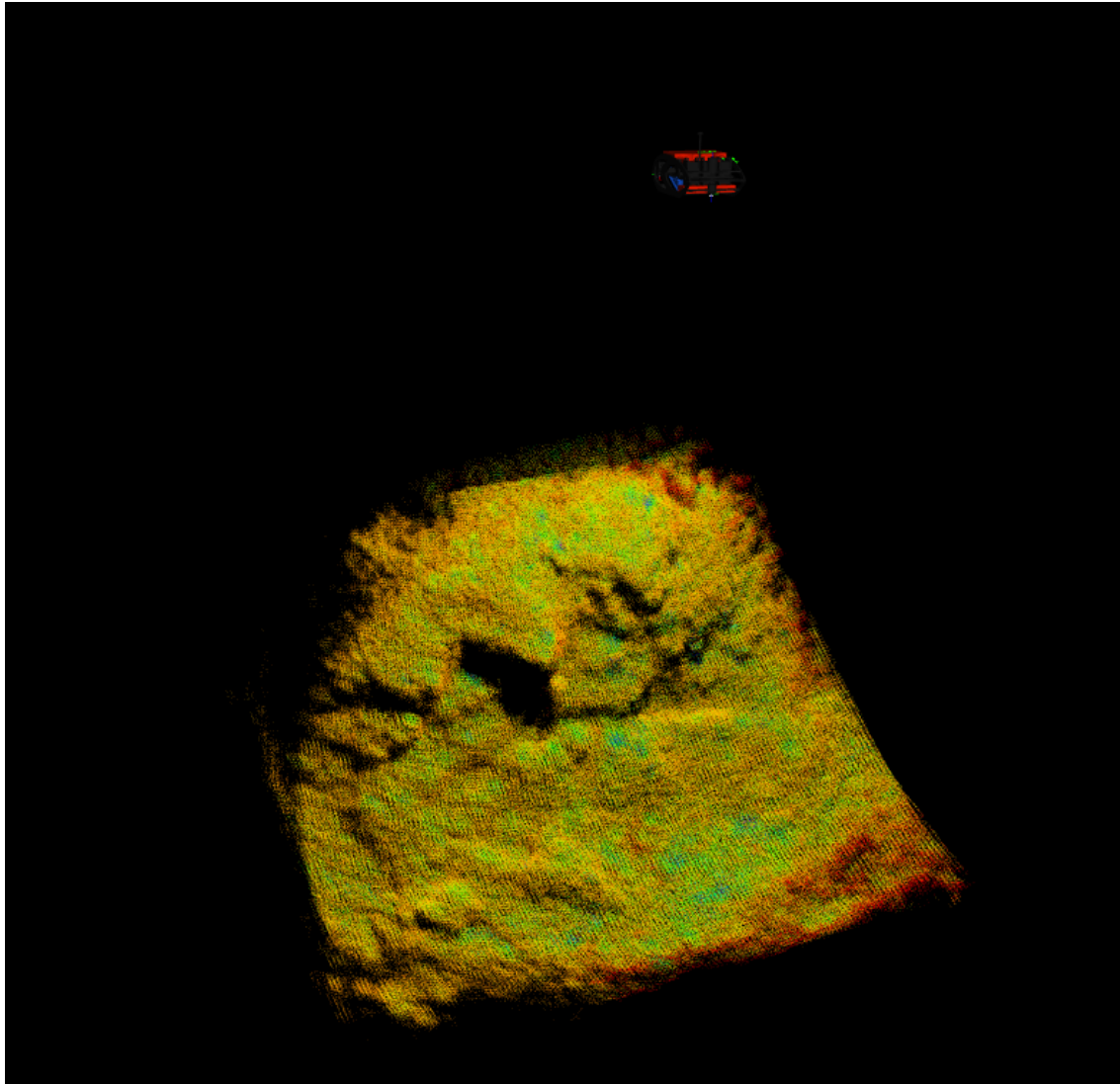


Figura 6.12: EVA a mapear a zona escavada

Inicialmente foi testado o algoritmo responsável por automaticamente definir o range do Echoscope com base nos dados de navegação, mas devido a alguns problemas com um dos sensores de localização do EVA, não foi possível validar completamente o código desenvolvido. Na figura 6.12 o EVA estava posicionado a dez metros de profundidade.

6.2 Veículo de Mineração

Inicialmente no Veículo de Mineração foi utilizado o *multibeam* M3 acoplado no *Pan&Tilt*. Posteriormente foi também instalado o *multibeam* Echoscope. Nesta secção são inicialmente apresentados os dados obtidos com o *multibeam* M3, numa segunda fase são apresentados os dados obtidos com o *multibeam* Echoscope e por fim a junção dos dois sonares. Todos os algoritmos implementados para o veículo de mineração foram executados em tempo real, no computador principal instalado na Cabine de Controlo, cujo processador era um Intel i7. Tal como no EVA de modo a garantir uma correta reconstrução, todos os sistemas estavam sincronizados, sendo o pulso de sincronismo dado por GPS.

Numa primeira fase o *multibeam* M3 foi instalado com os feixes verticais, e foi posicionado no eixo do *Tilt* a cinquenta graus para baixo face à horizontal, de modo a conseguir captar a zona imediatamente a seguir ao veículo, e foi aplicada uma rotação constante nos dois sentidos do eixo do *Pan*.

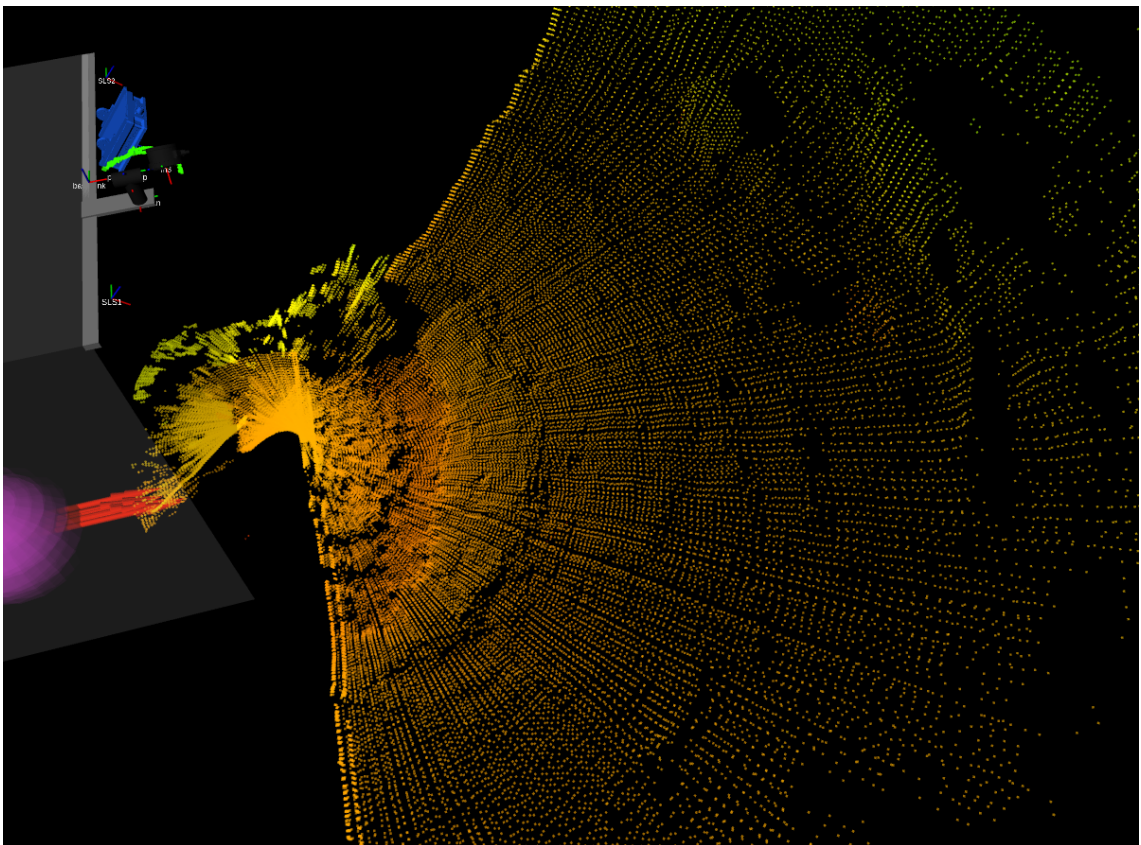


Figura 6.13: Mapeamento com o *multibeam* M3 no MV

Na figura 6.13 é possível ver o buraco no chão feito pelo Veículo de Mineração com a cabeça de corte. Mais uma vez estes dados são fundamentais para o cálculo do volume de pedra extraída. Na figura 6.14 é possível ver o corte realizado pelo veículo com mais ao pormenor.

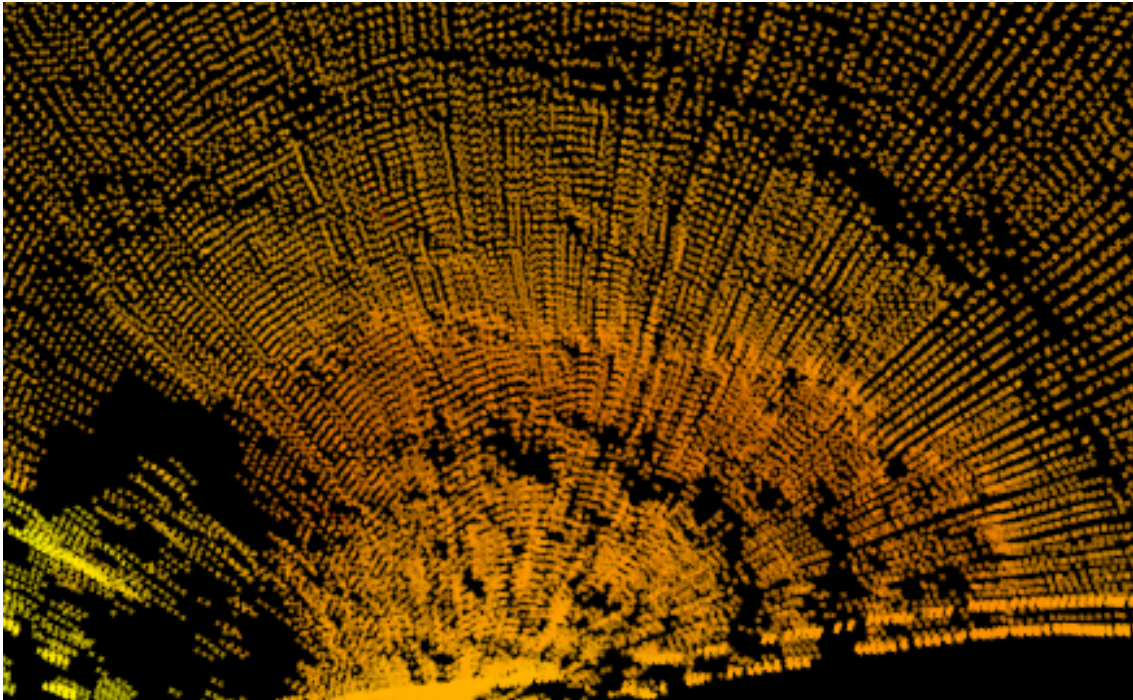
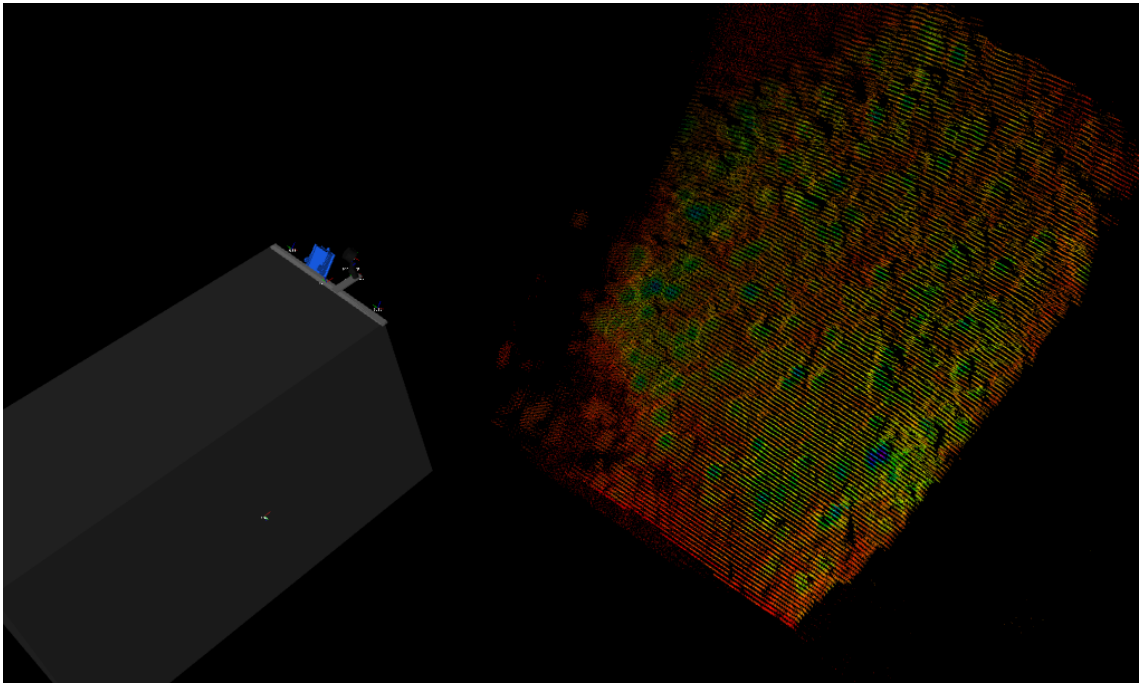
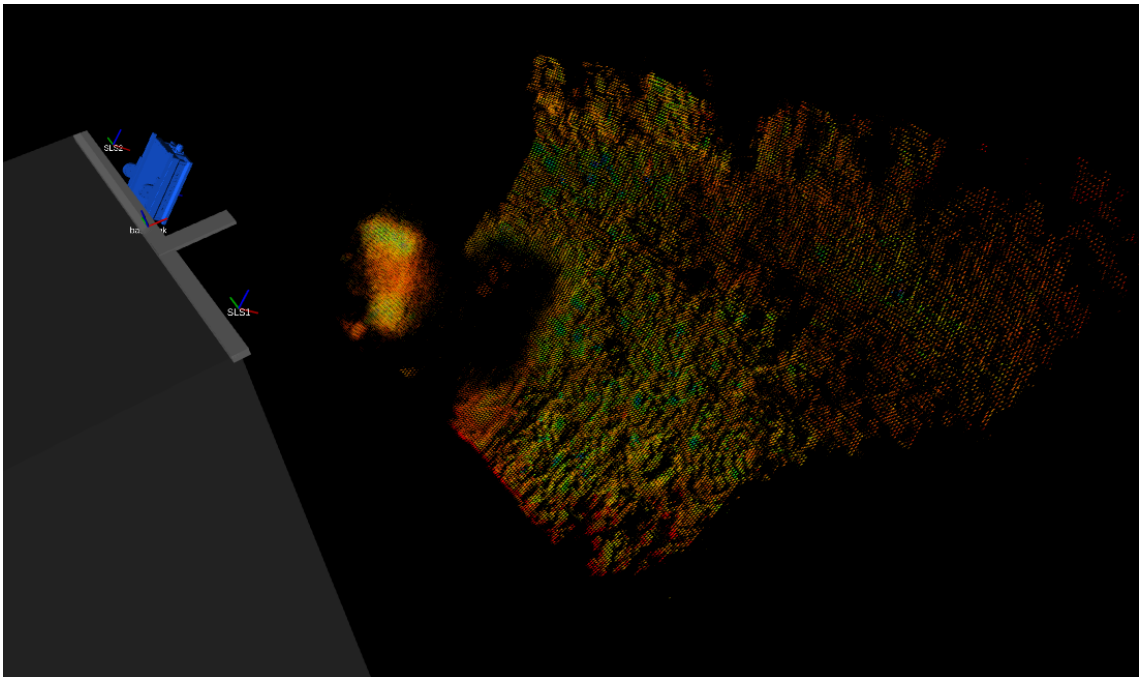


Figura 6.14: Corte mapeado com o *multibeam* M3

Após validar o sistema de mapeamento do veículo de mineração com recurso ao *multibeam* 2D foi então instalado e testado o *multibeam* 3D. Na figura 6.15 é possível ver o mapeamento com o *multibeam* Echoscope antes do veículo de mineração operar (a) e depois de operar (b), sendo possível nesta segunda ver o rasgo na pedra realizada pela cabeça de corte do veículo de mineração. É também visível na figura (b) parte da cabeça de corte e a sua respetiva sombra projetada no chão.



(a) Mapeamento antes da máquina operar



(b) Mapeamento após a máquina operar

Figura 6.15: Mapeamento com o Veículo de Mineração utilizando o Echoscope

Numa terceira fase após validar os dois sistemas em separado, foi usada a fusão das duas nuvens de pontos para auxiliar o operador do Veículo de Mineração.

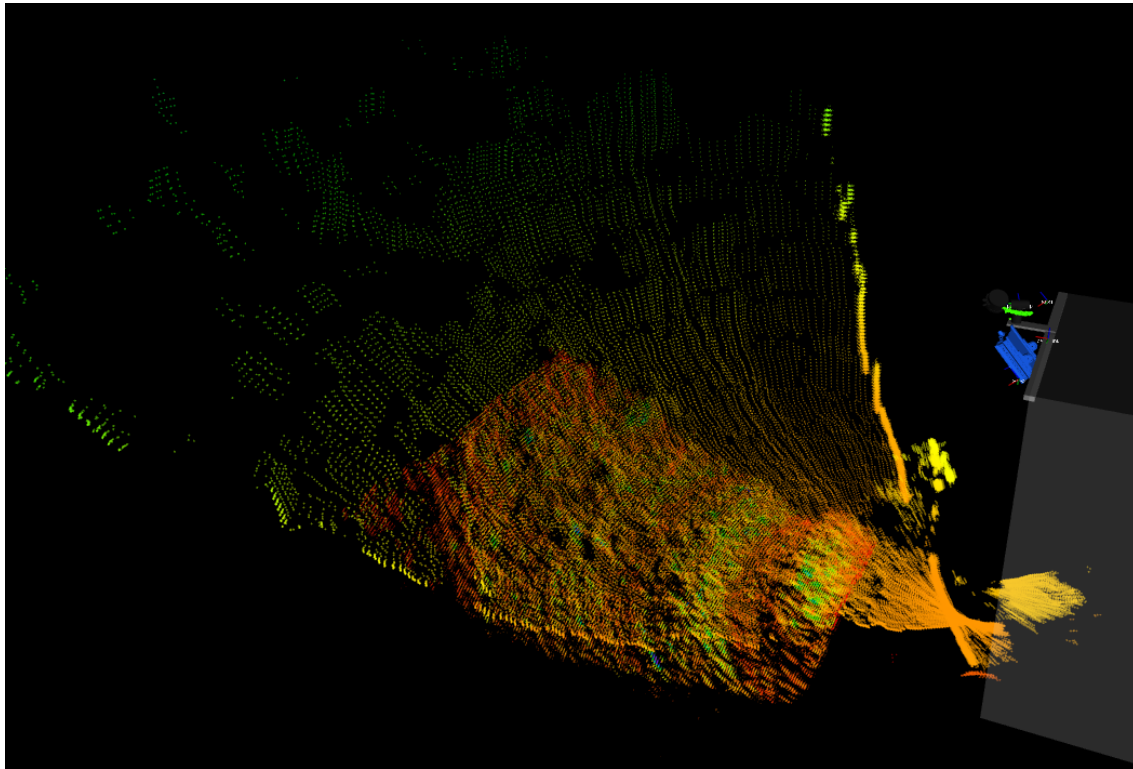


Figura 6.16: Mapeamento simultâneo com o *multibeam* Echoscope e M3 vertical

É possível ver na figura 6.16 e 6.17 a junção das duas nuvens de pontos, para o M3 foi utilizado o valor da profundidade para colorir a nuvem de pontos, e para o Echoscope foi utilizado o valor das intensidades de cada retorno. A grande vantagem de obter o valor das intensidades é a possibilidade de conseguir distinguir diferentes materiais no solo.

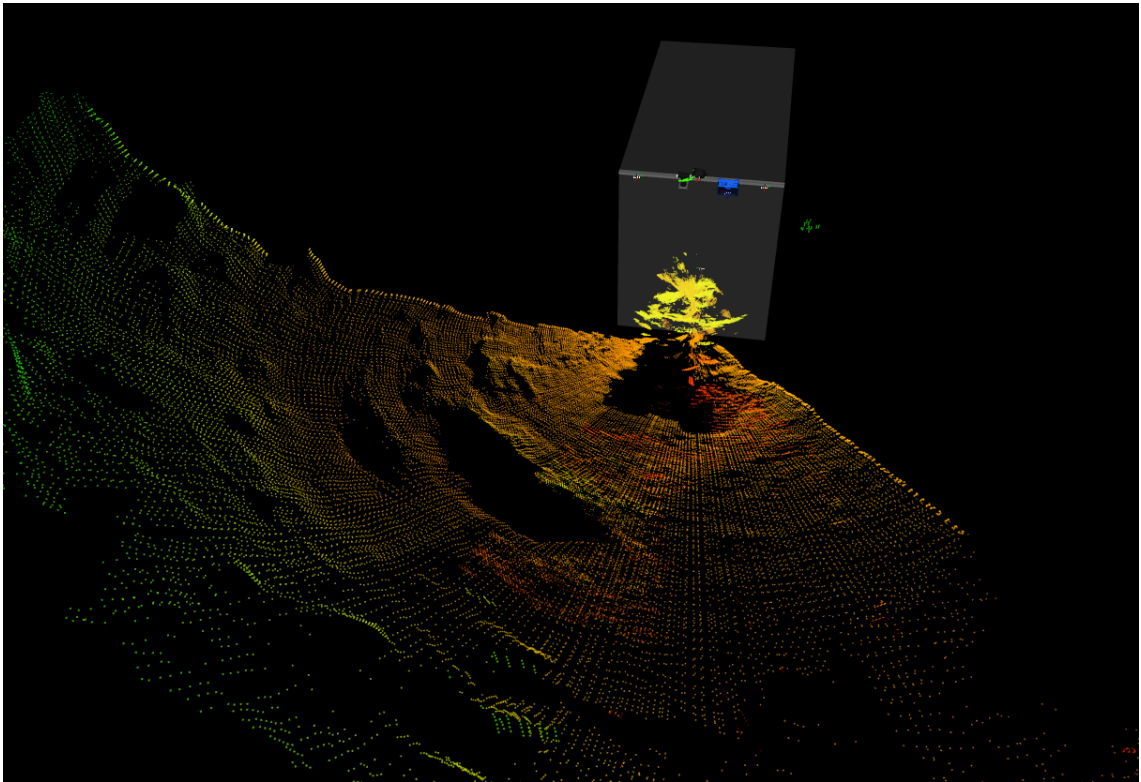
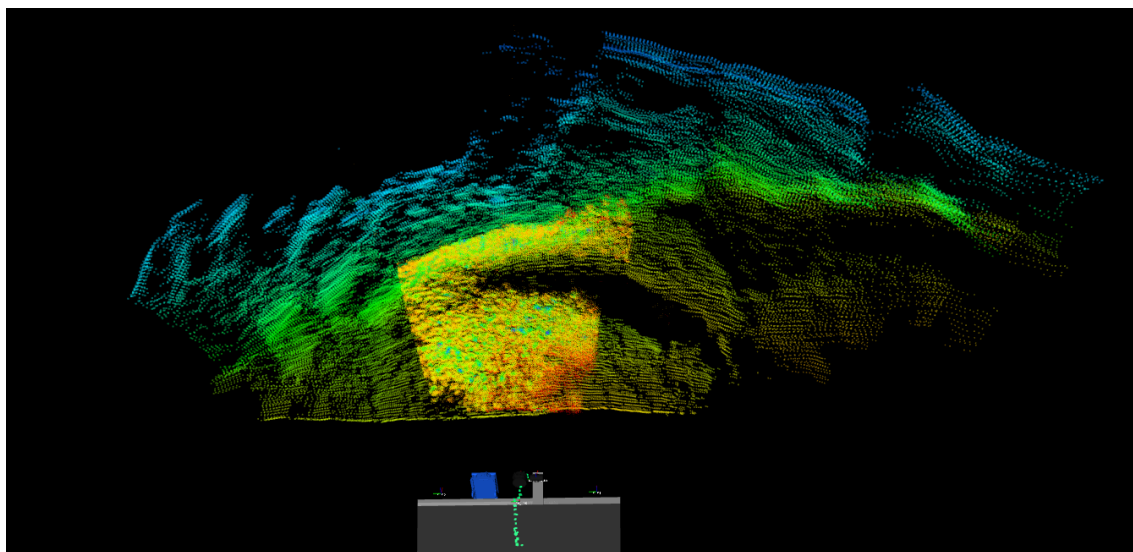
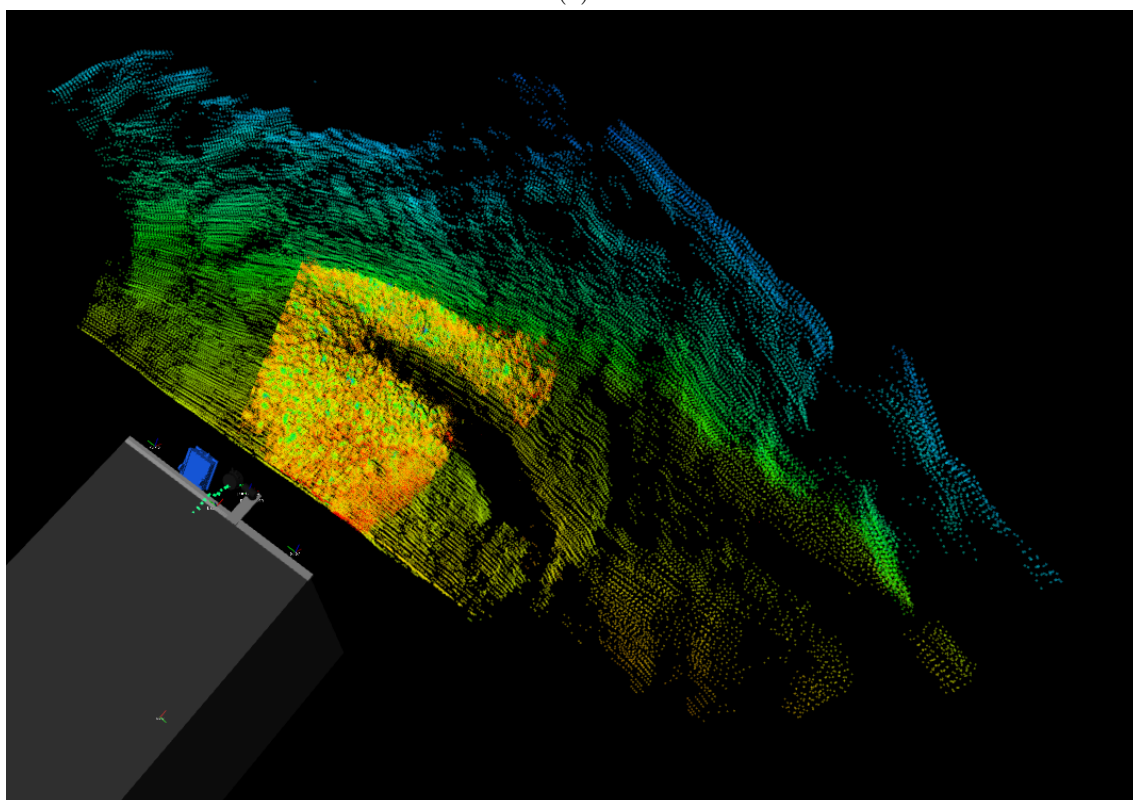


Figura 6.17: Mapeamento simultâneo com o *multibeam* Echoscope e M3 vertical (maior abertura)

Numa última fase, devido a problemas no motor de *Pan*, o *multibeam* M3 foi colocado com os feixes na horizontal, passando apenas a ser utilizado o movimento do motor de *Tilt*. Os resultados com o M3 nesta orientação foram de qualidade inferior face aos da vertical, todavia continuou-se a obter um bom resultado de reconstrução.



(a)



(b)

Figura 6.18: Mapeamento com o Veículo de Mineração

Mais uma vez na figura 6.19 é possível ver o mapeamento a curta distância e com mais resolução, com recurso aos dois sonares *multibeam*.

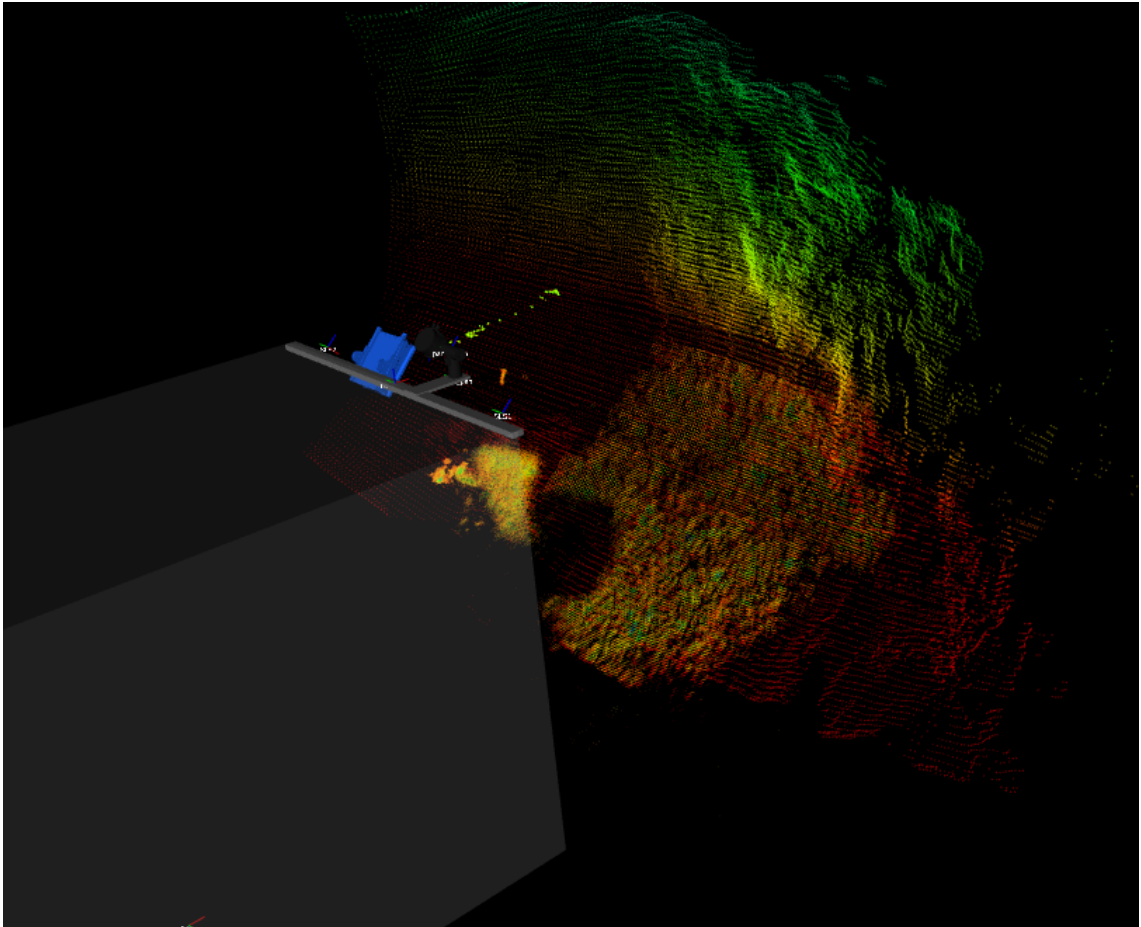
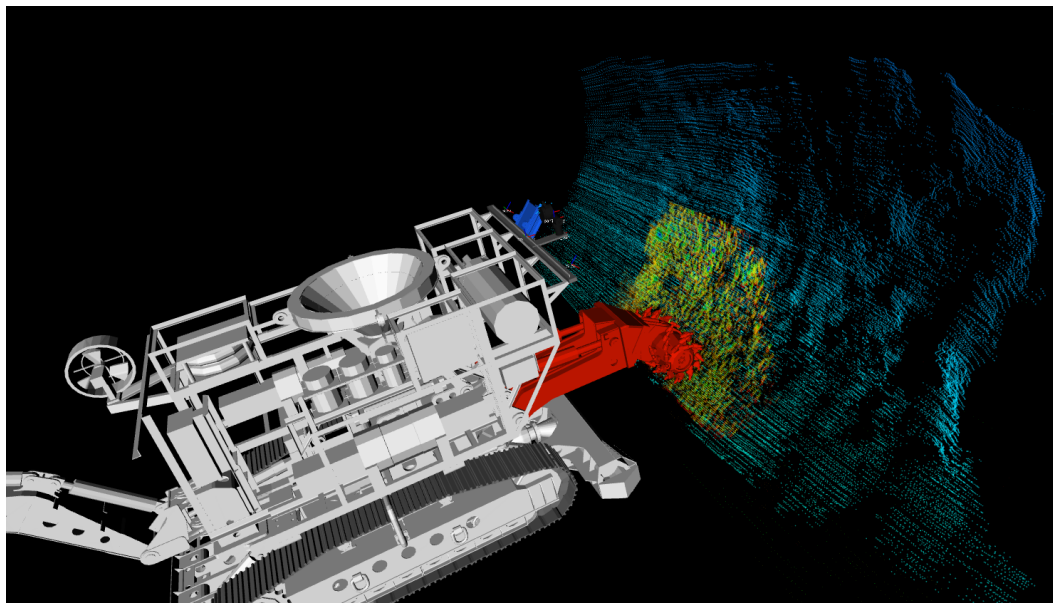


Figura 6.19: Mapeamento simultâneo com o *multibeam* Echoscope e M3 horizontal

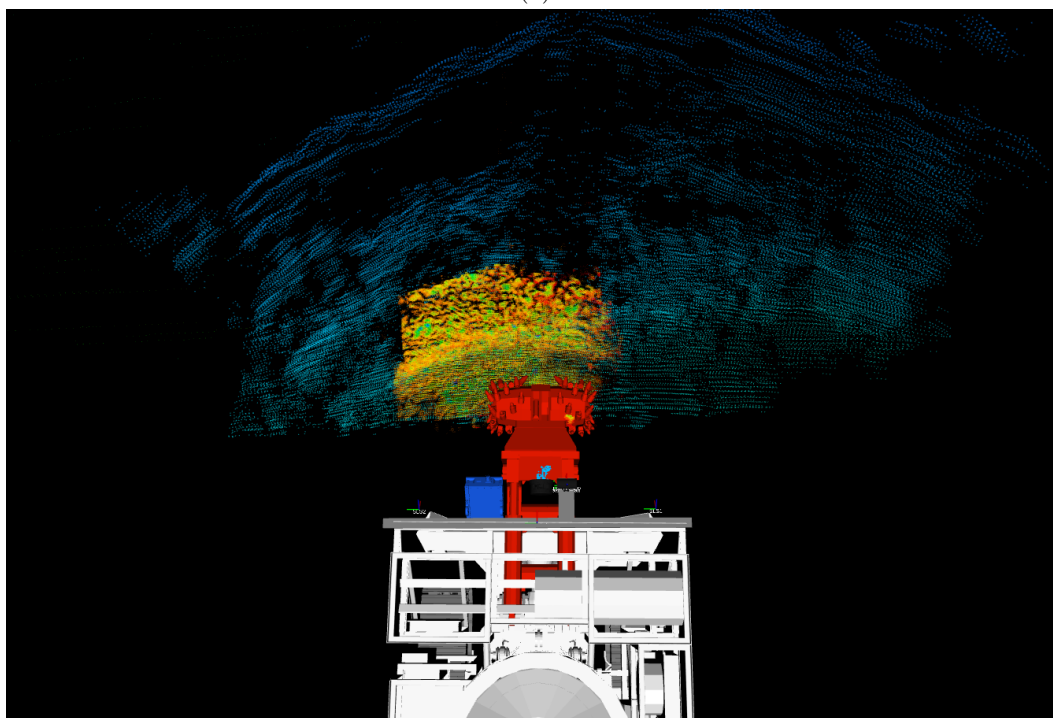
É perceptível nestas ultimas figuras a importância de ter os dois *multibeams* em simultâneo no MV, pois enquanto o conjunto *Pan&Tilt* e *multibeam* M3, oferece um maior campo de visão chegando este aos cento e vinte por cento e oitenta graus, o *multibeam* Echoscope apesar de possuir um campo de visão muito mais reduzido, possui uma frequência de atualização muito superior e uma captação instantânea do cenário com maior resolução, permitindo ao operador do veículo ver sempre a zona em que a cabeça de corte está a operar. Também a possibilidade de visualizar as intensidades tornou-se uma grande mais valia para a operação, pois estas tornam mais perceptível o relevo e os diferentes materiais do terreno.

Posteriormente, como é possível ver na Figura 6.20 foi também adicionado o modelo

do veículo de mineração ao Rviz.



(a)



(b)

Figura 6.20: Modelo do MV no Rviz

6.3 Realidade Virtual

O objetivo proposto pelo projeto de atualizar, ao longo da missão, o mapa batimétrico foi alcançado, tendo sido possível atualizar o mapa com os dados obtidos com o M3. Na figura 6.21 está representada a diferença entre os dados iniciais (a) e (b) e os dados finais (c) e (d) obtidos com o *multibeam*.

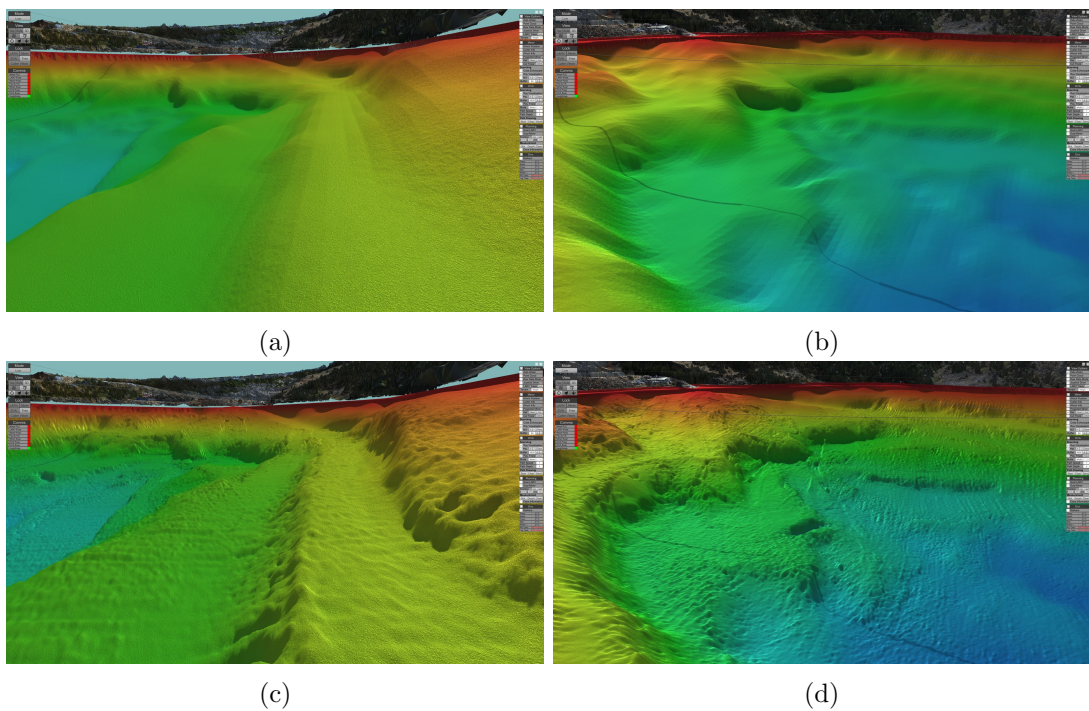


Figura 6.21: Mapeamento com o Veículo de Mineração

Por fim na figura 6.22 está presente uma captura de ecrã do ambiente de realidade virtual. Nesta é possível ver do lado esquerdo os feixes do *multibeam* M3 instalado no EVA projetados no fundo e também do lado direito o veículo de mineração a operar, sendo visível a nuvem de pontos.

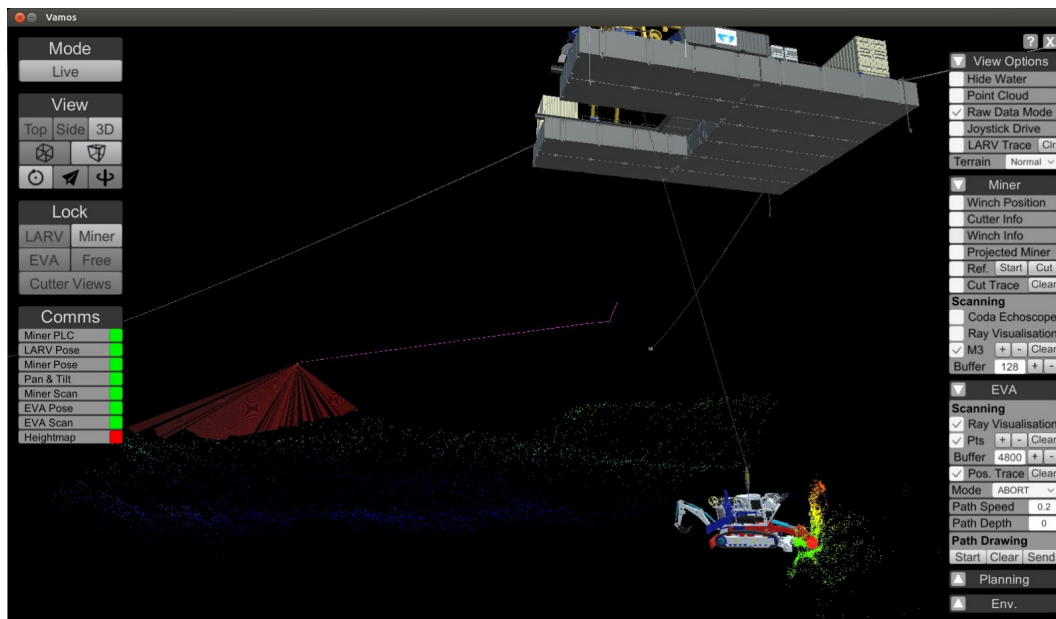


Figura 6.22: Ambiente de Realidade Virtual

Esta página foi intencionalmente deixada em branco.

Capítulo 7

Conclusão e Trabalho Futuro

Esta dissertação abordou o desenvolvimento de um sistema de parametrização e mapeamento em tempo real com recurso a sonares multi-feixe em ambientes subaquáticos. Grande parte da superfície terrestre está coberta por água, e com consciência neste facto, muitos investimentos estão-se a mover para *offshore*. Posto que, a área da robótica está sempre na vanguarda da tecnologia, é impossível a mesma ficar de fora desta tendência. Prova disso é o projeto VAMOS cujo propósito é a mineração subaquática sustentável. Todavia para executar tal tarefa é necessário um sistema de perceção subaquático, e foi essa necessidade que motivou esta tese.

Neste contexto e de modo a resolver este problema, várias soluções existentes no mercado foram analisadas, sendo também realizado um estudo sobre os projetos desenvolvidos neste âmbito, chegando-se à conclusão que o sonar *multibeam* seria o sensor mais adequado para satisfazer as necessidades do projeto. Ora, tendo definido quais os sensores a utilizar, foi possível definir a arquitetura geral do sistema. Deste modo foi inicialmente desenvolvida a interface com os sensores, cumprindo assim o primeiro objetivo delineado.

Tendo sido dominada a interface com os sensores e possuindo todos os seus dados no mundo ROS, foram desenvolvidos vários métodos para a parametrização dos sonares multi-feixe. Esta secção do sistema foi uma parte fulcral do projeto, pois quanto mais precisa foi a parametrização melhores foram os resultados obtidos. Ora, o sistema de parametrização foi dividido em três subsecções, a parametrização dos *ranges*, a parametrização dos ganhos e a escolha do melhor retorno. Assim sendo, para a primeira foram implementados alguns métodos que possibilitaram esta parametrização automática. Dois métodos distintos foram escolhidos para os dois sonares multi-feixe utilizados, enquanto que para o sonar 2D, o M3, foram apenas utilizados os dados do próprio sensor para

automaticamente redefinir o *range*, para o sonar 3D Echoscope, devido a este ser um sonar mais ruidoso, foram utilizados os dados da navegação para redefinir os *ranges* utilizados. Devido a estas parametrizações só poderem ser executadas em tempo real, e ser impossível o teste das mesmas em *offline*, os dados obtidos com a parametrização automática são reduzidos, no entanto nos resultados obtidos ambos os métodos mostraram bons resultados.

Enquanto que o *multibeam* M3 já possui parametrizações de ganhos associadas a cada modo e *range*, o mesmo não acontece com o Echoscope. Neste sentido, para o *multibeam* 3D foi definido um conjunto de parametrizações de ganhos para os diferentes *ranges* utilizados, no entanto com o decorrer da missão percebeu-se, quando o Echoscope estava instalado no veículo de mineração, que para o mesmo *range*, com a variação da profundidade os ganhos também tinham de ser redefinidos. O processo de automaticamente redefinir os ganhos não ficou cem por cento concluído, contudo, um conjunto de parametrizações de ganhos foram automaticamente definidos de acordo com os diferentes ambientes de mapeamento do local de testes.

Para além do sistema de parametrização foi também implementada uma camada de software responsável por excluir falsos positivos da nuvem de pontos, todavia aquando de uma correta parametrização esta camada demonstrou-se menos necessária.

Assim sendo, para reconstruir a zona de mapeamento, foram determinadas e aplicadas as transformações dos diversos sensores para o referencial do robô, tendo sido registadas todas as translações e rotações num ficheiro denominado por *Unified Robot Description Format* (URDF), o qual também permitiu associar às transformações, o visual do robô, possibilitando este visualizar o robô juntamente com os dados obtidos, em tempo real. Possuindo todos as transformações referentes ao veículo, foi aplicada e publicada, em tempo real a transformações do referencial do veículo para o referencial do global. A publicação destas transformações permitiu a qualquer utilizador do mundo ROS visualizar tanto o robô como as nuvens de pontos em qualquer referencial, tanto em tempo real como em pós processamento.

Todo o sistema foi validado em tempo real, com sucesso, na demonstração final do projeto VAMOS, pois foi possível, tanto com o veículo de mineração como com o AUV EVA reconstruir o local de operação e o ambiente envolvente respetivamente. Em suma, os objetivos propostos para esta dissertação foram completados com sucesso.

No que diz respeito ao trabalho futuro existem vários fatores que podem melhorar a performance do sistema. Em termos da calibração, esta poderia ser melhorada com a implementação de métodos dinâmicos para obter os parâmetros extrínsecos de todos os sensores utilizados. Também no que toca à parametrização automática dos ganhos,

com mais experiência, e mais testes de campo, o sistema pode ser melhorado, sendo a utilização de métodos de aprendizagem computacional uma aposta promissora.

Na parte da reconstrução vários algoritmos para corrigir erros de posição com base nas nuvens de pontos podem ser implementados [17] [25]. Com a implementação destas melhorias, será conseqüentemente obtido um sistema mais completo e que obterá ainda melhores resultados.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco.

Bibliografia

- [1] Whitlow WL Au. *The sonar of dolphins*. Springer Science & Business Media, 2012.
- [2] CD de Jong, G Lachapelle, S Skone, and I Elema. Multibeam sonar theory of operation. *Tech. Rep.*, 2002.
- [3] JA Farrell. Aided navigation: Gps with high rate sensors, 2008.
- [4] Kantapon Tanakitkorn, Philip A Wilson, Stephen R Turnock, and Alexander B Phillips. Depth control for an over-actuated, hover-capable autonomous underwater vehicle with experimental verification. *Mechatronics*, 41:67–81, 2017.
- [5] Aleš Janota, Vojtech Šimák, Dušan Nemeč, and Jozef Hrbček. Improving the precision and speed of euler angles computation from low-cost rotation sensor data. *Sensors*, 15(3):7016–7039, 2015.
- [6] James L Buchanan, Robert P Gilbert, Armand Wirgin, and Yongzhi Xu. Identification, by the intersecting canonical domain method, of the size, shape and depth of a soft body of revolution located within an acoustic waveguide. *Inverse problems*, 16(6):1709, 2000.
- [7] TC Yang. Data-based matched-mode source localization for a moving source. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 135(3):1218–1230, 2014.
- [8] James V Candy and EJ Sullivan. Model-based identification: An adaptive approach to ocean-acoustic processing. *IEEE Journal of Oceanic engineering*, 21(3):273–289, 1996.
- [9] Daryl Morse. A multi-purpose multibeam sonar for roV applications. In *Acoustics in Underwater Geosciences Symposium (RIO Acoustics), 2015 IEEE/OES*, pages 1–7. IEEE, 2015.

- [10] N Hurtós, X Cuffi, and J Salvi. Calibration of optical camera coupled to acoustic multibeam for underwater 3d scene reconstruction. In *OCEANS 2010 IEEE-Sydney*, pages 1–7. IEEE, 2010.
- [11] A Davis and A Lugsdin. High speed underwater inspection for port and harbour security using coda echoscope 3d sonar. In *OCEANS, 2005. Proceedings of MTS/IEEE*, pages 2006–2011. IEEE, 2005.
- [12] Rolf Kahrs Hansen, Umberto Castellani, Vittorio Murino, Andrea Fusiello, Enrico Puppo, Laura Papaleo, Massimiliano Pittore, Marco Gobbi, Luigi Bisone, Kurt Kleppe, et al. Mosaicing of 3d sonar data sets-techniques and applications. In *OCEANS, 2005. Proceedings of MTS/IEEE*, pages 2326–2333. IEEE, 2005.
- [13] Yinbin Guo. 3d underwater topography rebuilding based on single beam sonar. In *Signal Processing, Communication and Computing (ICSPCC), 2013 IEEE International Conference on*, pages 1–5. IEEE, 2013.
- [14] Angelos Mallios, Pere Ridao, Emili Hernández, David Ribas, Francesco Maurelli, and Yvan Petillot. Pose-based slam with probabilistic scan matching algorithm using a mechanical scanned imaging sonar. In *OCEANS 2009-EUROPE*, pages 1–6. IEEE, 2009.
- [15] Enrique Coiras, Yvan Petillot, and David M Lane. Multiresolution 3-d reconstruction from side-scan sonar images. *IEEE Transactions on image processing*, 16(2):382–390, 2007.
- [16] David Ribas, Pere Ridao, and José Neira. *Underwater SLAM for structured environments using an imaging sonar*, volume 65. Springer, 2010.
- [17] Andrew J Hanson. Visualizing quaternions. In *ACM SIGGRAPH 2005 Courses*. ACM, 2005.
- [18] 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.
- [19] Radu Bogdan Rusu and Steve Cousins. 3d is here: Point cloud library (pcl). In *Robotics and automation (ICRA), 2011 IEEE International Conference on*, pages 1–4. IEEE, 2011.

-
- [20] Willow Garage. Universal robot description format (urdf). *Http://Www.ros.org/urdf/, 2009*, 2009.
- [21] R Pereira, J Rodrigues, Alfredo Martins, André Dias, J Almeida, C Almeida, and E Silva. Simulation environment for underground flooded mines robotic exploration. In *2017 IEEE International Conference on Autonomous Robot Systems and Competitions (ICARSC)*, pages 322–328. IEEE, 2017.
- [22] D Sytnyk, R Pereira, D Pedrosa, J Rodrigues, A Martins, A Dias, J Almeida, and E Silva. Simulation environment for underground flooded mines robotic exploration. In *OCEANS 2017-Aberdeen*, pages 1–6. IEEE, 2017.
- [23] Tully Foote. tf: The transform library. In *Technologies for Practical Robot Applications (TePRA), 2013 IEEE International Conference on, Open-Source Software workshop*, pages 1–6, April 2013.
- [24] Hyeong Ryeol Kam, Sung-Ho Lee, Taejung Park, and Chang-Hun Kim. Rviz: a toolkit for real domain data visualization. *Telecommunication Systems*, 60(2):337–345, 2015.
- [25] Dorit Borrmann, Jan Elseberg, Kai Lingemann, Andreas Nüchter, and Joachim Hertzberg. Globally consistent 3d mapping with scan matching. *Robotics and Autonomous Systems*, 56(2):130–142, 2008.