

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Renderização de Ambientes Marinhos Costeiros usando tecnologias Web

Ana Cláudia Fonseca Santos

PREPARAÇÃO DA DISSERTAÇÃO



Mestrado Integrado em Engenharia Informática e Computação

Supervisor: Ricardo José Vieira Baptista

9 de Março de 2020

Renderização de Ambientes Marinhos Costeiros usando tecnologias Web

Ana Cláudia Fonseca Santos

Mestrado Integrado em Engenharia Informática e Computação

Abstract

The sea is a place that, in addition to its difficult and expensive access, is also intrinsically dynamic. This subjects its exploration to various adverse conditions. At the moment, there are a lot of sources of information about the sea such as ship positions, tidal heights, currents, bathymetry and data from autonomous vehicles. This information is available in different resolutions (temporal and spatial), has variable precision and the data are provided in multiple formats, which makes it difficult to view them combined. This work aims to allow any user to aggregate information of the coastal ocean combining data available on the web, weather forecasts and data collected in real time by autonomous vehicles of LSTS ¹.

In order to respond to this problem, a web application will be developed that will make it possible to view the data obtained by AUVs ² together with data from other sources in 3D. The use of web technologies does not require the installation of any specialized software and allows simplified access from any device compatible with an HTML5 *browser*. This application will interact with a set of web services that will provide data from different sources so that they can be accessed and viewed in 3D. For part of the data, forecasting services will also be used, such as meteorological and position estimates of ships and autonomous vehicles, for the moment.

We hope this application will allow its users to have a global view of the state of the sea and some of its stakeholders (AUVs and ships) to better understand the different coastal dynamics and support the users specialized in decision-making. It will also be useful for archaeologists to realistically visualize artifacts, as well as for oceanographers who will have the possibility to combine 2D visualization with 3D visualization in the hope of improving data analysis.

To conclude, despite the existence of a large number of sources of high-quality information, its comprehending is hard and requires specialized visualization software. An application such as the one we propose, will make this information more accessible and provide to any user a global and appealing view of the conditions and characteristics of the ocean.

Keywords: 3D, Computer graphics, Simulation, Three.js, CesiumJS, data visualization, underwater, bathymetry, GIS, MGIS, LSTS, AUV, Ripples

¹Laboratory of Underwater Systems and Technology

²Autonomous underwater vehicle

Resumo

O mar é um local que, além do acesso difícil e dispendioso, é também intrinsecamente dinâmico e sujeito a várias condições adversas. De momento, existe uma grande quantidade de fontes de informação sobre o mar tal como posições de navios, altura da maré, correntes, batimetria e dados provenientes de veículos autónomos. Esta informação é disponibilizada em diferentes resoluções (temporais e espaciais), tem precisão variável e os dados são fornecidos em múltiplos formatos, o que dificulta a sua visualização combinada. Este trabalho tem como objetivo permitir a qualquer utilizador visualizar de forma agregada a informação do oceano costeiro combinando dados disponibilizados na web, previsões meteorológicas e dados recolhidos em tempo real pelos veículos autónomos do LSTS³.

De forma a dar resposta a este problema será realizada uma aplicação web onde será possível visualizar em 3D os dados obtidos por AUVs⁴ em conjunto com dados de outras fontes. A utilização de tecnologias web não obriga à instalação de qualquer software especializado e permite um acesso simplificado a partir de qualquer dispositivo com um *browser* HTML5. Esta aplicação irá interagir com um conjunto de serviços web que irão disponibilizar os dados das diferentes fontes de forma a poderem ser acedidos e visualizados em 3D. Para parte dos dados, serão ainda utilizados serviços de previsão, como meteorológicos e estimar as posições de navios e veículos autónomos, no momento actual.

Espera-se que esta aplicação permita aos seus utilizadores uma visualização global do estado do mar e dos seus intervenientes (AUVs e navios) e assim, perceber melhor as diferentes dinâmicas costeiras e apoiará utilizadores especializados na tomada de decisões. Será útil também para arqueólogos para visualizar artefactos de forma realista, assim como para oceanógrafos que terão a possibilidade de combinar visualização 2D com a visualização 3D na expectativa de melhorar a análise de dados.

Para concluir, apesar da existência de um grande número de fontes de informação de qualidade, a sua compreensão é dificultada por estarem distribuídas e necessitarem de software especializado para a sua visualização. Uma aplicação deste tipo tornará essa informação mais acessível e permitirá a qualquer utilizador uma vista global e apelativa das condições e características do oceano.

Keywords: 3D, Computer graphics, Simulation, Three.js, CesiumJS, data visualization, underwater, bathymetry, GIS, MGIS, LSTS, AUV, Ripples

³Laboratório de Sistemas e Tecnologia Subaquática

⁴Veículo autónomo subaquático

Conteúdo

1	Introdução	1
1.1	Contexto	1
1.2	Motivação	3
1.3	Problema	3
1.4	Objetivos	4
1.5	Estrutura do documento	4
2	Estado da arte	5
2.1	Estudo de técnicas de representação e visualização de dados	5
2.1.1	Dados Batimétricos	6
2.1.2	Fenómeno de Ondulação	8
2.1.3	Tráfego Marinho	9
2.1.4	Trajetória dos Veículos autónomos	10
2.2	Sistemas de Informação Geográfica	12
2.2.1	Sistemas baseados em web	13
2.2.2	Outros tipos de sistemas	14
2.3	Ferramentas de Renderização	15
2.3.1	Frameworks e Tecnologias	15
2.4	Sumário	18
3	Proposta de Solução	21
3.1	Requisitos do Sistema	21
3.1.1	Funcionais	22
3.1.2	Não Funcionais	23
3.2	Arquitetura do Sistema	23
3.3	Avaliação do Sistema	25
3.4	Ferramentas e Tecnologias	25
3.4.1	Visualização	25
3.4.2	Dados	26
3.4.3	Demo	26
3.5	Sumário	27
4	Conclusões	29
4.1	Plano de tarefas	29
A	Inquérito e Resultados	31
	Referências	35

Lista de Figuras

1.1	Exemplo de veículo autónomo subaquático (AUV) desenvolvido no LSTS [13].	2
2.1	Mapa de isóbatas para representação de batimetria [25].	6
2.2	Vista de perfil de dados de batimetria [25].	7
2.3	Modelo de alta resolução do fundo do mar em 3D [25].	7
2.4	Típicos formatos dos dados batimétricos: [10]	8
2.5	Exemplo de representação 2D da ondulação marítima [17].	9
2.6	Exemplo de representação de tráfego de embarcações	10
2.7	Vista 3D imersiva de um dos barcos à vela.	11
2.8	Controlador e simulador 2D de AUV's do Neptus.	11
2.9	Simulador 3D de AUV's do LabOceano.	12
2.10	Sistema de informação geográfica Google Earth.	13
2.11	Exibição de dados batimétricos no protótipo em WebGL [11].	14
2.12	Imagen do Ripples que mostra dados em tempo real de dois veículos autónomos em conjunto com dados de salinidade [37]	14
2.13	Algumas janelas do software Neptus.	15
2.14	Tendências de pesquisas dos termos no Google [23].	16
2.15	Número de downloads de cada framework através da API NPM. [38]	16
2.16	Imagen de uma demo de Three.js onde foi simulado o efeito de água [49].	17
3.1	Casos de uso do sistema	22
3.2	Diagrama da solução proposta.	24
3.3	Design da solução proposta	24
3.4	Demo	26
4.1	Plano de trabalho para os próximos meses.	30

Lista de Tabelas

2.1 Comparação entre frameworks	18
---	----

Acrónimos

AUV	<i>Autonomous underwater vehicle</i>
LSTS	Laboratório de Sistemas e Tecnologia Subaquática
SIG	Sistema de informação geográfica
GIS	<i>Geographical Information Systems</i>
MGIS	<i>Geographical Information Systems and maritime systems</i>
IMC	<i>Inter-Module Communication</i>
AIS	<i>Automatic Identification System</i>
TIN	<i>Triangulated Irregular Network</i>
IMO	<i>International Maritime Organization</i>

Capítulo 1

Introdução

Cerca de 70% da superfície da Terra é coberta por água, e o oceano retém cerca de 96% de toda a água da Terra [48]. Os oceanos são um dos recursos naturais mais importantes da humanidade, são responsáveis por um vasto ecossistema, possuindo o maior habitat no mundo. No entanto, apenas conhecemos cerca de 1% do fundo do mar por se tratar de um local difícil de explorar.

As novas tecnologias de monitorização e de deteção remoto levaram a uma explosão de novos dados científicos sobre os oceanos [14]. Assim, foi possível mudar drasticamente a maneira como a humanidade interage com o oceano e permitiu a exploração de áreas e de processos oceânicos que antes eram incompreensíveis e inacessíveis [41].

Na secção 1.1 faremos uma breve contextualização do tema e serão referidas as motivações desta dissertação na secção seguinte 1.2. Seguidamente, na secção 1.3 será formalizado o problema e levantada a questão de pesquisa que nos propomos responder. Na secção 1.4 serão apresentados os objetivos principais deste trabalho. Por último, na secção 1.5 será apresentada a estrutura do presente documento.

1.1 Contexto

Devido à vastidão e inacessibilidade dos oceanos a sua exploração científica ficou para trás do estudo dos sistemas terrestres [14]. Os sistemas de informação geográfica (SIG)¹ estão altamente avançados devido ao fácil acesso aos dados da superfície terrestre e à natureza estática dos mesmos. Existem satélites que recolhem informações e imagens a partir das quais é possível construir mapas de relevo detalhados e cidades e GPS para registar com precisão mapas de estradas, linhas ferroviárias e outros recursos. Contudo, quando se trata do ambiente marinho e costeiro as coisas são muito menos diretas.

¹Em inglês *geographic information system* (GIS)

Segundo Dawn Wright [53], não há características fixas no ambiente marinho e muito pouco de natureza estática que possa ser mapeado, com exceção do fundo do mar. Além disso, apesar da localização da costa permanecer amplamente fixa esta é afetada diariamente pelas marés. Cui Xie[55] caracteriza os dados do oceano como sendo complexos, vastos, descrevendo processos complicados da interação dinâmica entre entidades de várias escalas, como marés, correntes, ondas, topografia do fundo do mar, vento da superfície e outros campos atmosféricos.

O Laboratório de Sistemas e Tecnologia Subaquática (LSTS) [15] é um laboratório de investigação interdisciplinar sediado na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP) e é especializado na construção e operação de veículos subaquáticos e aéreos não tripulados e no desenvolvimento de ferramentas e tecnologias para a implementação de sistemas de veículos em rede. Neste contexto iremos focar-nos nos veículos subaquáticos não tripulados, utilizados pelo laboratório para a recolha de dados costeiros. Os AUV's ² pertencem ao grupo de veículos subaquáticos não tripulados que permitem recolher dados de rios, lagos, zonas costeiras e do fundo do mar. Chris Goldfinger[22] diz que este tipo de veículos permite extrair a verdade do solo e, por isso, são importantes para a investigação de ambientes marinhos. Os AUVs permitem fornecer uma observação *in situ* do fundo do mar, isto é especialmente útil quando existem informações críticas necessárias mas indisponíveis por outros meios. Além da capacidade de fazer mapeamento do fundo do mar através de sonares, estes veículos permitem a recolha em tempo real de vários outros tipos de dados como temperatura, salinidade, clorofila, magnetometria, etc.



Figura 1.1: Exemplo de veículo autónomo subaquático (AUV) desenvolvido no LSTS [13].

O rápido desenvolvimento deste tipo de veículos e de outras tecnologias de observação do oceano levou a uma explosão de variados tipos de dados marinhos com uma alta resolução.

Isto traduz-se num maior conhecimento e estes avanços tecnológicos oferecem maiores oportunidades de investigação nas ciências marinhas. Contudo, segundo Cui Xi [55], a alta heterogeneidade dos dados, o seu grande volume, a taxa de atualização alta e a relação acoplada entre os vários tipos de dados, trazem grandes desafios técnicos para a sua análise de forma completa e automática, assim como para a sua visualização.

²veículos autónomos subaquáticos

1.2 Motivação

A quantidade de dados e a sua natureza complexa leva a que seja também difícil a sua análise. Segundo Bernd Resch [40], a logística marítima e a proteção ecológica estão sujeitas a preocupações heterogéneas de diferentes grupos de interesse, e, portanto, projetos de proteção, construção e reestruturação em áreas costeiras precisam ser baseados em bases científicas sólidas.

Apesar de existirem algumas ferramentas de visualização de dados marinhos em 2D, quanto mais abstrata é a visualização mais distante é esta do mundo físico e maior é o esforço para interpretar informações apresentadas digitalmente. O 3D serve como ponte psicológica entre mapas bidimensionais abstratos altamente simplificados e a realidade. De forma a averiguar o interesse neste desenvolvimento por parte de potenciais utilizadores foi realizado um pequeno inquérito que será melhor apresentado no capítulo 3. Neste inquérito todos os inquiridos responderam de forma afirmativa à questão:

Existe algum interesse em visualizar dados da sua área científica de estudo em 3D a partir de um *browser*?

A combinação e agregação dos vários tipos de informação disponível do oceano num único sistema gráfico de simples acesso permitirá aos seus utilizadores a exploração dos dados oceânicos, a análise e uma melhor compreensão acerca da dinâmica dos complexos processos marinhos. Além disso, a visualização 4D de dados geoespaciais na Web pode contribuir significativamente para dar resposta ao desafio de informar os tomadores de decisão e o público em geral sobre desenvolvimentos em áreas costeiras [40]. Também, para cientistas e biólogos, ter uma forma de monitorizar o oceano será uma mais valia devido às implicações ambientais globais que as mudanças nas características do oceano podem ter [48].

Assim, este desenvolvimento poderá contribuir para o estudo e para a proteção do oceano, assim como facilitar a sua compreensão e análise por parte de todas as ciências que estudam o mar.

1.3 Problema

Em resposta ao que foi descrito na secção 1.2, existe então a necessidade de haver uma forma de visualizar os múltiplos tipos de dados num único sistema de simples acesso. Contudo, devido às características espaço-temporais dos dados marinhos, às múltiplas fontes de dados e ao seu enorme volume é esperado que isto resulte numa aplicação bastante complexa. Além disso, o facto dos dados estarem relacionados pode ser necessário uma visualização combinada destes conjuntos de dados, de forma a permitir uma análise mais profunda dos mesmos. Assim, isto leva-nos às questões que pretendemos responder:

Como combinar dados oriundos de diferentes fontes externas com dados de AUVs?
Como apresentar o resultado dessa combinação de dados de forma simples e apelativa?

1.4 Objetivos

O objetivo principal desta dissertação é permitir a qualquer utilizador visualizar de forma agregada e intuitiva a informação proveniente de múltiplas fontes relacionadas com o oceano e litoral. Pretendemos então desenhar uma solução de visualização de dados marinhos costeiros utilizando tecnologias web. Esta solução terá que responder a objetivos específicos:

- integrar vários tipos de dados que variam no espaço e no tempo provenientes de diferentes fontes de forma a permitir a identificação de padrões e correlações entre as variáveis representadas visualmente;
- representar um enorme volume de dados de forma simples e direta de modo a facilitar a sua interpretação;
- facilitar a demonstração e compreensão de ambientes marinhos;
- ser útil para operadores de AUV's:
 - fornecer aos observadores conhecimento visual em tempo real do plano a decorrer;
 - facilitar o processo de tomada de decisão no decorrer de missões;
 - correlacionar a visualização 3D com as imagens do sonar recolhidas pelos AUV's.
- facilitar aos arqueólogos visualizarem os modelos dos pontos de interesse inseridos no seu ambiente marinho;
- permitir a divulgação científica das ciências ligadas ao mar através de uma sistema intuitivo, acessível e de fácil compreensão por qualquer utilizador comum.

Apesar do objectivo principal ser agregar e mostrar informação de forma visualmente simples que seja comprehensível por parte de qualquer utilizador, seja ele especializado ou não, existem grupos de utilizadores ligados às ciências do mar que poderão beneficiar mais com o trabalho desenvolvido, nomeadamente operadores de AUV's, arqueólogos, oceanógrafos e biólogos.

1.5 Estrutura do documento

Para além da presente introdução, este relatório contém mais 3 capítulos e um anexo. Assim, no capítulo 2 é exposta a revisão bibliográfica dos campos mais relevantes no contexto do problema. Este capítulo, por sua vez, encontra-se subdividido em quatro secções principais: estudo das técnicas utilizadas para representação de dados marinhos, os sistemas marinhos existentes, as tecnologias de renderização web e por fim o sumário das ideias gerais do capítulo. O capítulo 3 contém a proposta de solução desde a arquitetura, os requisitos e *mockups* e de que forma será avaliado o sistema. Assim como as ferramentas, tecnologias e APIs que irão ser utilizadas e uma demo desenvolvida para validação de conceitos. Por último o capítulo 4 apresenta as conclusões do que foi exposto neste documento e o plano de trabalho para os próximos meses. Em anexo encontra-se um inquérito realizado a potenciais utilizadores, assim como os seus resultados.

Capítulo 2

Estado da arte

Este capítulo apresenta a revisão bibliográfica efetuada, relevante para o contexto do problema. A secção 2.1 contém o estudo geral das técnicas utilizadas para representação de dados marinhos, nomeadamente dados batimétricos, fenómenos de ondulação, tráfego marinho e trajetória de veículos subaquáticos. Na secção 2.2 apresentamos o estado da arte em relação a sistemas de visualização marinha como sistemas baseados em web mas também outros tipos de sistemas existentes. Na secção 2.3 são apresentadas e comparadas as tecnologias relevantes para o trabalho. Por fim, na secção 2.4 é apresentado o sumário geral desta revisão bibliográfica.

2.1 Estudo de técnicas de representação e visualização de dados

Até recentemente, o termo visualização significava construir uma imagem visual na mente. Agora passou a significar algo mais como uma representação gráfica de dados ou conceitos. Assim, além de ser uma construção interna da mente, uma visualização tornou-se uma ferramenta externa que apoia a tomada de decisão. Os dados recolhidos eram tradicionalmente visualizados utilizando técnicas de visualização 2D, no entanto a procura de soluções mais eficientes e interactivas levou a novas soluções 3D e 4D. A visualização pode funcionar como ferramenta cognitiva para dar suporte à descoberta, exploração e tomada de decisão. Segundo Colin Ware [51], a visualização de dados, se realizada de forma apropriada, permite exibir grandes quantidades de informações que podem ser rapidamente interpretadas e pode ser uma ferramenta muito útil no controle de qualidade dos dados uma vez que permite detetar erros nos dados ou na recolha dos mesmos. Kai Wang [50] refere que "a visualização de dados é essencialmente uma apresentação gráfica de informações, onde o objetivo é facilitar que os seus utilizadores obtenham um entendimento qualitativo da maciça informação de alta dimensão".

2.1.1 Dados Batimétricos

Mais de dois terços da Terra está coberta por água e a maior parte do planeta não está acessível para observações visuais diretas. Se há cerca de 100 anos atrás, o fundo do oceano era considerado plano e sem características, nas últimas décadas houve uma revolução nos conhecimentos nesta área com os avanços tecnológicos a permitirem medir cada vez mais e melhor a superfície coberta de água de nosso planeta [6]. A utilização de ferramentas GIS e aplicações geoespaciais contribuíram de forma muito significativa para avanços nesta área. A medição e mapeamento do fundo do mar em águas rasas fornece segurança à navegação enquanto que o seu levantamento em zonas mais profundas é geralmente de natureza exploratória. Ainda, segundo Philippe Blondel [6], as taxas de erosão e sedimentação são muito mais baixas no oceano do que em terra, por isso a batimetria revela a morfologia e a história geológica. A compreensão dos parâmetros geológicos e geofísicos que moldam o fundo do oceano são essenciais para o estudo dos recursos vivos e não vivos.

Os dados batimétricos podem ser obtidos a partir de diversas formas incluindo satélites, aviões, navios, submarinos ou plataformas subaquáticas e, são usados para gerar cartas de navegação, modelos 3D e perfis do fundo do mar. Estes dados são recolhidos principalmente medindo o tempo que a luz do laser, ou um pulso do sonar acústico, leva para chegar através da coluna de água até o fundo do mar e vice-versa, com base na velocidade do som na água, nas características do sensor, no tempo e outros variáveis [25].

Visualização

Os mapas de isolinhas ou isóbatas são usados para representar batimetria e representam linhas de mesma profundidade em oceanos ou lagos com grandes dimensões. São dados vectoriais representados como linhas interligando profundidades de valores iguais. O intervalo entre as linhas depende da escala, aplicação e outros fatores, mas os contornos mais próximos representam um terreno altamente variável ou íngreme, enquanto os contornos mais afastados indicam um fundo do mar mais suave e plano. Estes mapas são usados como limites de segurança para embarcações que navegam em águas rasas e também em cartas de navegação como mostrado na figura 2.1 [25].

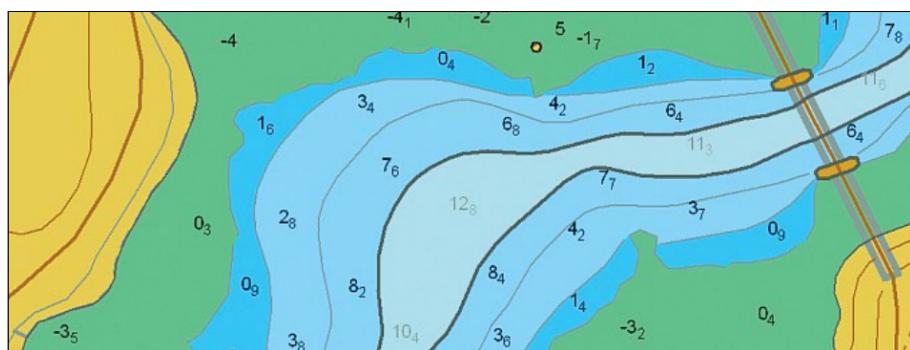


Figura 2.1: Mapa de isóbatas para representação de batimetria [25].

As imagens de perfil de batimetria (2.2) permitem observar o fundo do mar de uma perspectiva transversal, particularmente útil para análise de rotas de cabos ou tabulações e construção de infraestruturas, complementando de forma excelente outras representações batimétricas [25].

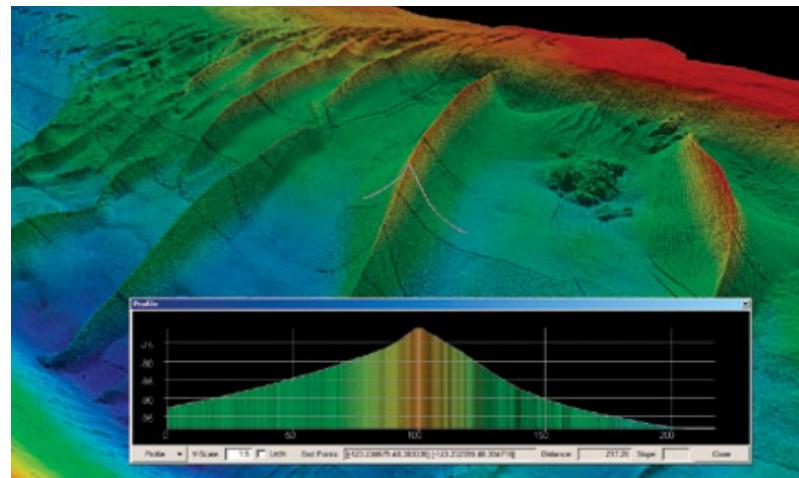


Figura 2.2: Vista de perfil de dados de batimetria [25].

Os avanços na área de visualização 3D em computador permitiu ampliar o uso da batimetria muito para além da navegação. Estes desenvolvimentos permitiram aos cientistas que estudam o mar visualizar as superfícies do fundo do oceano com bastante realismo através de imagens batimétricas de alta resolução em 3D. Na figura 2.3 podemos ver um exemplo de um modelo de alta resolução do fundo do mar em 3D.

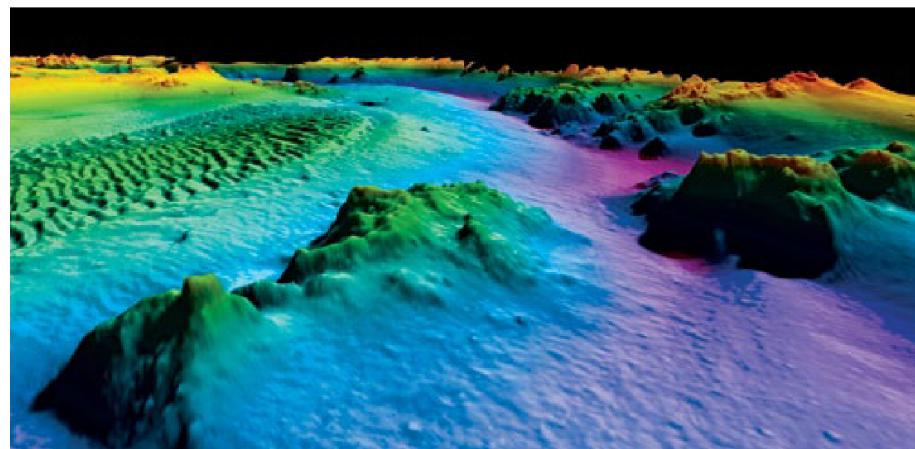


Figura 2.3: Modelo de alta resolução do fundo do mar em 3D [25].

Representação

Os dados batimétricos que descrevem a topografia do fundo do mar estão geralmente em forma de grelha espaçada regular ou em forma de rede triangular irregular, também conhecida por for-

mato TIN¹. Na figura 2.4(a) e na 2.4(b) mostra respectivamente a representação TIN e em grelha regular de um terreno.

O formato em grelha é o mais popular para descrever superfícies uma vez que neste formato é naturalmente fácil exibir e renderizar os dados como uma malha 3D. O modo de funcionamento é bastante simples, onde os pontos de superfície são definidos numa grelha no plano XY e para cada ponto há uma elevação correspondente. Se os dados originais são um conjunto de pontos de superfície distribuídos irregularmente, é necessária uma interpolação para construir uma grelha. Esse processo de interpolação também é chamado de *gridding*². Com base nessa grelha uma malha 3D pode ser facilmente criada [29].

No entanto, características batimétricas como picos, cordilheiras, vales e fossas oceânicas não são explicitamente representadas e estas características são predominantes no mar [29]. Neste caso é aconselhado a modelação através de uma TIN. Existem vários modelos para a geração destas redes, contudo o mais utilizado é a triangulação de Delaunay.

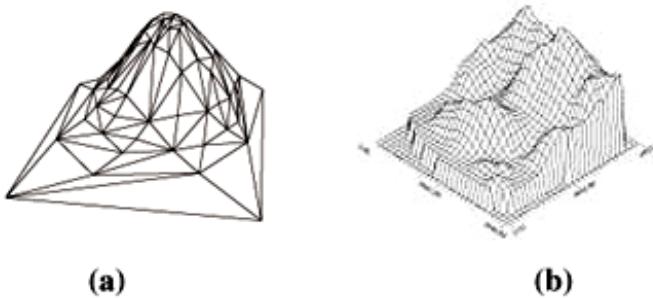


Figura 2.4: Típicos formatos dos dados batimétricos: [10]

Comparando as duas representações, ambas tem vantagens e desvantagens. A utilização da *Constrained Delaunay Triangulation* permite uma melhor representação das características oceânicas anteriormente mencionadas [54] [29]. Segundo Alain Wulf [54] a modelação TIN deve ser preferida quando a área mapeada não tiver uma cobertura homogénea contudo a manipulação deste modelo é mais complexa do que no modelo em grelha. Já os modelos em grelha são menos flexíveis contudo oferecem maior velocidade, exigem menos requisitos de memória e os algoritmos de implementação são mais fáceis de implementar, tornando-os preferidos quando a área é coberta de forma homogénea.

2.1.2 Fenómeno de Ondulação

As ondas oceânicas são dos fenómenos mais reconhecidos na oceanografia. O fenómeno da ondulação é explicado pelo stress aplicado pelo vento à superfície do oceano, que progressivamente torna as ondas mais altas [52]. A sua representação em 2D é tradicionalmente realizada através de uma mapa bivariável, no qual se utiliza cores mas também flechas que indicam a direção das ondas, como é possível observar na figura 2.5.

¹do inglês *triangulated irregular network*

²criação de malhas

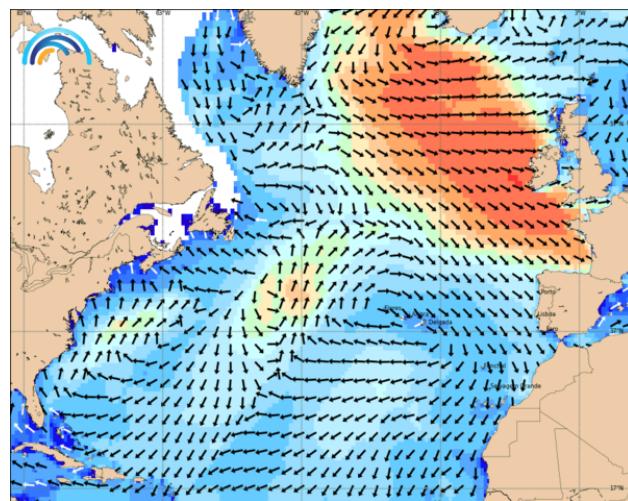


Figura 2.5: Exemplo de representação 2D da ondulação marítima [17].

Não encontramos literatura científica que represente dados de fenómenos de ondulação em 3D. No entanto, existe algum trabalho científico em simulações realistas de ondas para jogos de computador e animações. Apesar de na representação 3D ser possível mostrar a altura das ondas, no nosso entender, uma representação sem as cores da representação 2D, poderá dificultar a análise da direção e a altura das mesmas.

2.1.3 Tráfego Marinho

De acordo com a *International Maritime Organization* (IMO), quase 90% do comércio mundial é transportado por via marítima e por isso é necessário garantir proteção e segurança ao número crescente de embarcações. Deste modo, monitorizar o tráfego marinho através da visualização de dados poderá ajudar a compreender comportamentos, a aprimorar a segurança das embarcações e dar confiança aos serviços de actividades marítimas [50]. Desde o ano de 2004 todas as embarcações com tonelagem bruta igual ou superior a 300 toneladas com tráfego internacional tem de ser equipadas com AIS (*Automatic Identification System*).

Assim, a apresentação visual dos dados AIS ajuda na vigilância e segurança costeira e também ajuda os analistas que tomam decisões a entenderem melhor os movimentos e fluxo de embarcações.

O sistema AIS permite a troca de informação entre navios vizinhos num intervalo de tempo entre 2 a 10 segundos ou a cada 3 minutos se ancorado.

Os três tipos de informações principais são:

- **Informação estática:** nome, tamanho e tipo de navio e a identidade de serviço móvel marítimo;
- **Informação dinâmica:** velocidade, posição e direção da embarcação e a velocidade de mudança de direção;

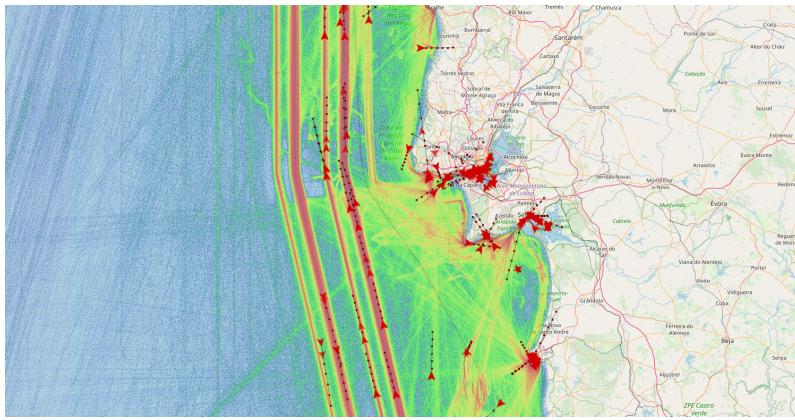


Figura 2.6: Exemplo de representação de tráfego de embarcações

- **Informação da viagem:** local de partida e destino, calado³ e tempo estimado de chegada da rota definida.

Com o aumento do número de embarcações e com o aumento de equipamentos e dispositivos avançados no transporte marítimo houve um aumento exponencial de dados de alta dimensão. Devido ao grande volume de possibilidades destes dados a sua visualização pode ter um custo computacional muito alto. Neste sentido, o algoritmo de Douglas-Peucker (DP) permite reduzir o tempo de computação uma vez que filtra apenas os dados essenciais do trajeto [50].

Na figura 2.6 é possível observar um exemplo da representação do tráfego de embarcações em 2D disponível na plataforma *Ripples* [16]. A monitorização do tráfego de embarcações é essencial para que missões com AUVs decorram em total segurança quer para os veículos autónomos quer para as próprias embarcações. Outro exemplo da utilidade deste tipo de monitorização pode ser observado na figura 2.7. Neste caso, o público tinha dificuldade em acompanhar os acontecimentos em campeonatos de barcos à vela por serem longe da costa e por isso foi combinado um sistema de visualização 3D com uma plataforma que difundia informação dos barcos em tempo real [39].

2.1.4 Trajetória dos Veículos autónomos

Como referido na secção 2.1 a exploração do oceano é cada vez mais importante e o uso de veículos autónomos subaquáticos mostrou ser uma mais valia nesse sentido [46]. Contudo é difícil observar e testar veículos subaquáticos devido à ausência de contato visual e à falta de comunicações num ambiente submerso [46] [8].

Os AUV's realizam tarefas e missões complexas mantendo um controlo físico estável com seis graus espaciais de liberdade [8] o que requer algoritmos estáveis e confiáveis no software de controle [46] com pouca tolerância a falhas. Isto significa que uma pequena falha pode ser catastrófica e de difícil recuperação. Além disso, danos no veículo ou até a sua perda, é geralmente intolerável devido ao tempo, dinheiro e recursos investidos [8].

³distância entre a quilha do navio e a linha de flutuação

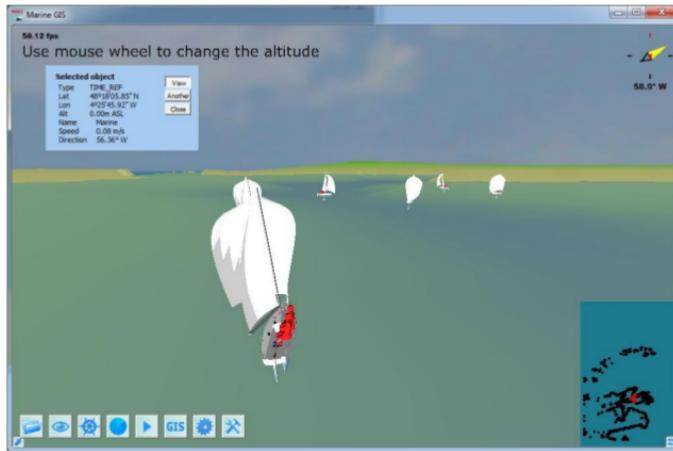


Figura 2.7: Vista 3D imersiva de um dos barcos à vela.

Os recentes avanços tecnológicos levaram à proliferação de vários tipos de veículos autónomos não tripulados e com isso, diferentes formas de comunicação e monitorização. No Lsts a comunicação com os AUV's é realizada através de mensagens IMC⁴. Este protocolo orientado a mensagens projetado para comunicação entre veículos heterogéneos, sensores e operadores humanos, abstrai a heterogeneidade do hardware e da comunicação, fornecendo um conjunto compartilhado de mensagens que podem ser serializadas e transferidas por diferentes meios [31].

No contexto desta dissertação importa salientar as *Maneuver messages* porque além de permitir a definição de manobras e conhecer o estado de execução, são as mensagens relacionadas com a monitorização do veículo através dos *waypoints* [31].

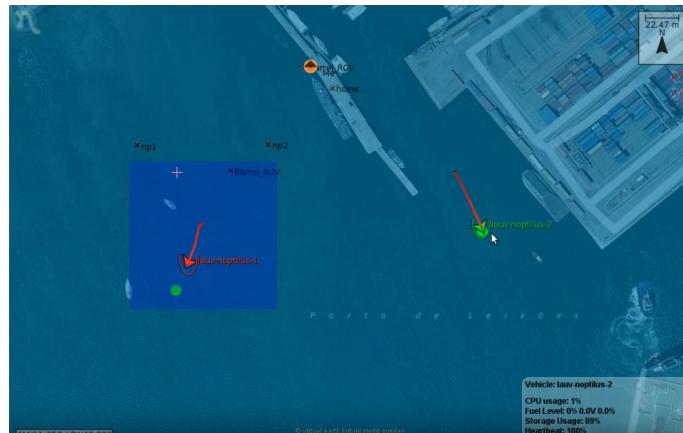


Figura 2.8: Controlador e simulador 2D de AUV's do Neptus.

A figura 2.8 mostra a interface do software de controlo, visualização e simulação Neptus, desenvolvido no LSTS, onde mostra de que forma o posição dos veículos são monitorizados. Don Brutzman [8], em 1995, afirma que "o uso de um mundo virtual subaquático em 3D renderizado em tempo real é um recurso essencial para o desenvolvimento dos AUV's". Também Sorokin [44]

⁴Inter-Module Communication

refere que "a visualização 3D de um ambiente subaquático permite explorar as especificidades do fundo do mar, facilita o planeamento, o controle e a tomada de decisões durante as missões submarinas". Na figura 2.9 é possível observar o simulador de AUVs em 3D desenvolvido pelo LabOceano [28].



Figura 2.9: Simulador 3D de AUV's do LabOceano.

2.2 Sistemas de Informação Geográfica

Tal como em muitas outras áreas, a evolução de software e hardware das últimas cinco décadas alterou de maneira significativa a forma como recolhemos, tratamos e usamos os dados geoespaciais. Os sistemas de informação geográfica (SIG)⁵ são um bom exemplo das consequências desses desenvolvimentos [7]. Paul Bolstad[7] define um GIS como sendo "um sistema baseado em computador para auxiliar na recolha, manutenção, armazenamento, análise, saída e distribuição de dados e informações espaciais" e que as chaves para a definição de um GIS são "onde" e o "quê".

No inicio dos anos 90 estes sistemas despertaram a curiosidade e atenção dos oceanógrafos e cartógrafos porque desempenharam um papel fundamental na gestão e visualização de dados 3D marinhos [45]. Então, alguns especialistas europeus e americanos desenvolveram ferramentas específicas nos GIS para a analise de dados marinhos. Em 1993, Li e Saxena [30] apresentaram algumas diferenças entre os sistemas terrestres e os marinhos.

Os sistemas de informação geográfica marinha⁶ exigem mais requisitos em comparação com os sistemas terrestres, uma vez que os GISs tradicionais apenas lidam com fenómenos terrestres, menos dinâmicos que os fenómenos marinhos. Além da integração e análise de informação multidimensional de múltiplas fontes, também tem de permitir a visualização de dados que variam no espaço e no tempo de forma a fornecer uma ampla visão dos processos marinhos e do impacto humano no oceano [24].

Apesar dos avanços nos últimos anos, em 2016 Pengbo Ji [24] diz que ainda não há nenhuma plataforma especializada em aplicações marítimas que seja capaz de atender aos requisitos da simulação e da visualização. A visualização de fenómenos marinhos que variam no tempo e no

⁵em inglês *geographic information systems* (GIS)

⁶em inglês *marine geographic information systems* (MGIS)

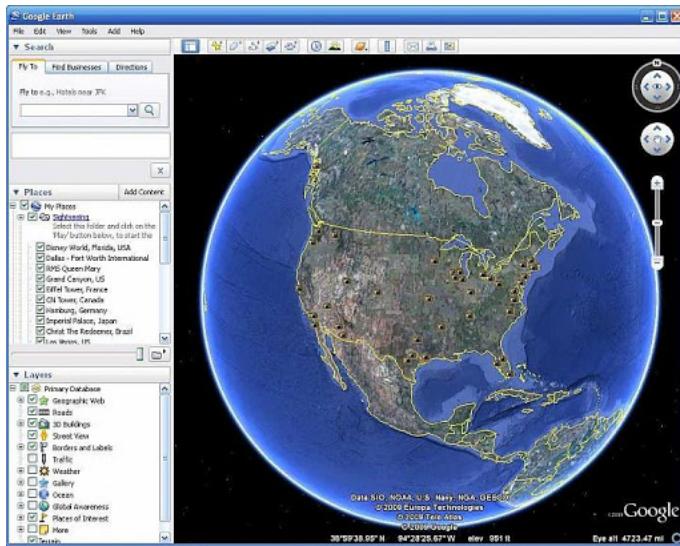


Figura 2.10: Sistema de informação geográfica Google Earth.

espaço, ou seja em 4D, não é uma área de pesquisa completamente desenvolvida e, portanto, não amplamente representada na literatura atual [40].

2.2.1 Sistemas baseados em web

Em 1995, o conceito de sistemas de informação baseada na Internet e centralizados em mapas foi difundido com o aparecimento do Google Earth. Na imagem 2.10 podemos ver os aspeto deste sistema. Esta aplicação 3D, mantida pela Google, permite visitar qualquer lugar no mundo graças as imagens capturadas por satélites.

O surgimento do Google Earth revolucionou a área dos GISs. Contudo, muitos desafios de pesquisa permaneceram, incluindo a questão da integração de dados geográficos que variam no tempo em sistemas de visualização baseados em mapas na web [11]. O design da visualização de dados geográficos baseada na Web não foi ainda padronizado [40] e os utilizadores deste tipo de sistemas normalmente encontram dificuldades na interacção, análise e visualização dos dados que que estão longe de ser ótimos [11].

Assim, Bernd Resch [11] utilizou o WebGL para a realização de um protótipo destinado a utilizadores não especializados. Para isso focou-se em critérios como os requisitos para transmitir informações para o apoio nas tomadas de decisão e também em critérios como a usabilidade, o desempenho e o esforço de implementação necessário. O protótipo em WebGL, presente na figura 2.11, mostrou-se altamente adequado ao dar resposta favorável aos critérios definidos.

No contexto desta dissertação é importante referir o sistema Ripples, desenvolvido pelo LSTS. Este software baseado em nuvem agrupa e difunde dados e informações provenientes de várias fontes, como modelos físicos, sensores de deriva, tráfego de embarcações (AIS), entre outros. Além disso, através de comunicações via satélite, pode ser usado para o planeamento de missões e monitorização de veículos não tripulados [16]. Na figura 2.12 mostra um exemplo da integração dos dados em tempo real de dois veículos autónomos com dados de salinidade.

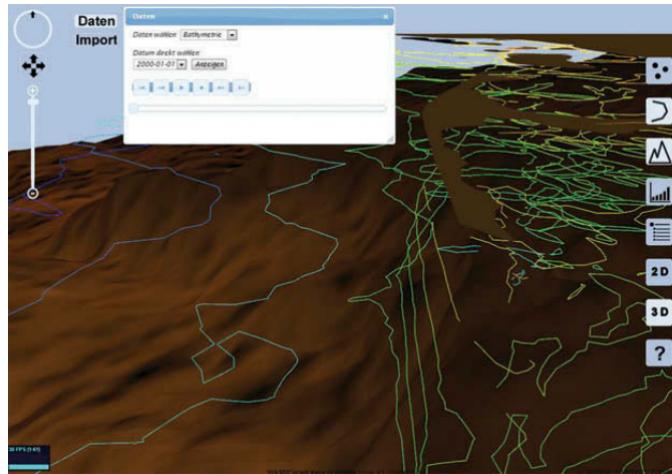


Figura 2.11: Exibição de dados batimétricos no protótipo em WebGL [11].

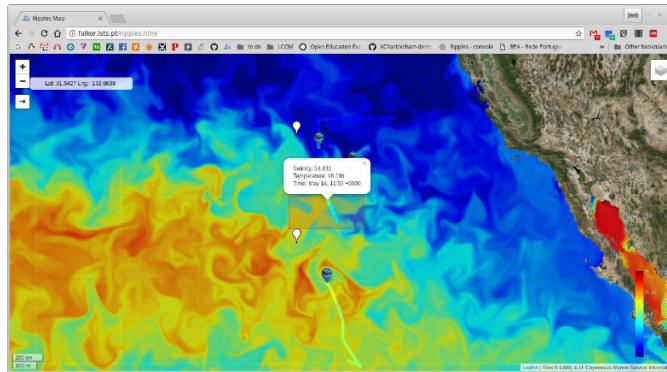


Figura 2.12: Imagem do Ripples que mostra dados em tempo real de dois veículos autónomos em conjunto com dados de salinidade [37]

2.2.2 Outros tipos de sistemas

O foco desta dissertação são os sistemas MGIS baseados em *Web* contudo, a literatura nesta área é muito escassa. Assim, é importante referir outros tipos de sistemas relevantes para o desenvolvimento deste estudo.

Pengbo Ji [24] introduz a plataforma i4Ocean, criada para ajudar as pessoas a explorar, a gerir e a entender o oceano. O sistema permite aos cientistas e meteorologistas investigar, monitorizar, analisar e prever as mudanças nos recursos marinhos e nas condições ambientais. Além da integração dados marinhos, renderização em tempo-real, a visualização, a simulação e posterior análise, os seus utilizadores podem desenvolver aplicações para integrar na plataforma.

Outro sistema que importa salientar é o Neptus. José Pinto [36] apresenta este software de comando e controle distribuído para operações com veículos, sensores e operadores humanos em redes heterogéneas. Este software mostra em tempo-real informação como posição GPS e profundidade / altitude dos veículos autónomos. Adicionalmente, permite analisar os dados recolhidos pelos AUVs tais como, salinidade, temperatura, turbidez ou oxigênio da água dissolvido de uma

área, sendo possível criar mapas 2D e 3D. Por fim, permite também analisar dados de sonar de forma a encontrar naufrágios de navios, sítios de interesse arqueológico ou qualquer outra estrutura submersa.

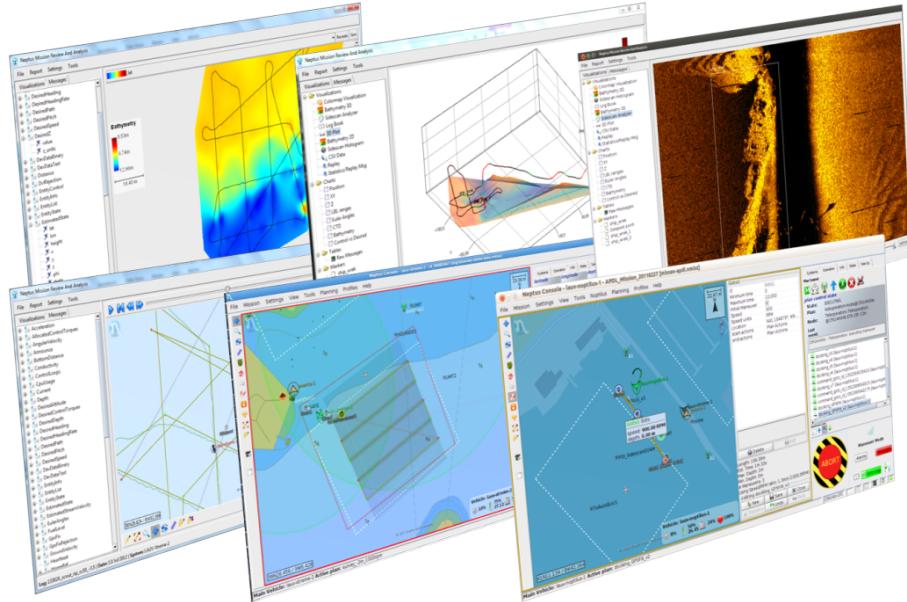


Figura 2.13: Algumas janelas do software Neptus.

2.3 Ferramentas de Renderização

O WebGL é uma tecnologia de visualização Web3D baseada em OpenGL, que combina HTML5 com JavaScript. Esta API fornece uma renderização tridimensional acelerada de elementos canvas HTML5 usando a OpenGL Shader Language [11].

A vantagem do uso de WebGL é que os dados e a parte principal das funções do sistema ficam do lado do servidor, enquanto que no lado do cliente apenas é necessário instalar um navegador que lhe permite fazer interações simples, como mover, dimensionar e consultar informação [33].

Se por um lado temos a facilidade de renderizar gráficos 3D sem usar plugins e de funcionar com qualquer plataforma que suporte o OpenGL, por outro lado exige que os utilizadores compreendam profundamente o OpenGL, o que torna o seu desenvolvimento difícil. Existem, no entanto, várias frameworks WebGL que permitem aos desenvolvedores construir de forma fácil e rápida gráficos e animações 3D.

2.3.1 Frameworks e Tecnologias

As frameworks introduzem um nível de abstração em relação ao conhecimento matemático necessário no desenvolvimento diretamente em WebGL. Estas fornecem uma API declarativa no qual uma cena 3D é descrita usando XML e incorporada numa página através de uma tag personalizada [34].

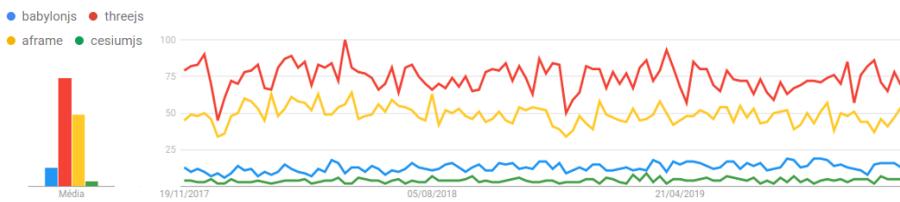


Figura 2.14: Tendências de pesquisas dos termos no Google [23].

Distinguem-se ainda pela oferta de recursos, forma de definir o conteúdo 3D e pela sua finalidade. Não existe no entanto trabalho científico que as compare e portanto não há evidências empíricas de que uma framework seja superior a outra para um caso de uso em específico. Aliás, os *developers* escolhem a biblioteca a usar baseando-se no tamanho da sua comunidade, integridade da documentação, número de exemplos ou até a aparência do site [26]. Contudo, as figuras 2.14 e 2.15 mostram uma comparação entre algumas *frameworks* em voga, nomeadamente o número de vezes que o termo foi pesquisado no Google e o número de downloads através da API NPM. Das apresentadas as estruturas mais populares são Three.js e o Babylonjs [26].

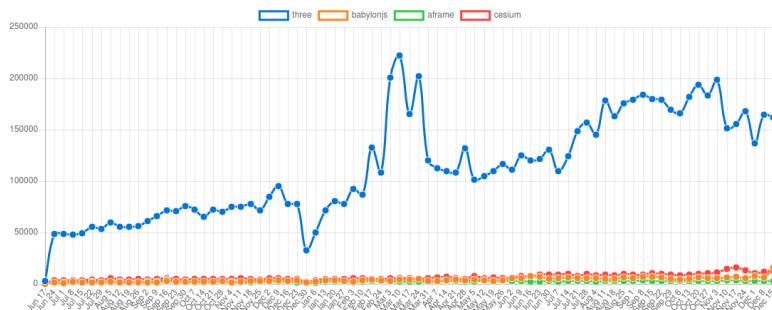


Figura 2.15: Número de downloads de cada framework através da API NPM. [38]

O objetivo do Three.js é criar uma biblioteca 3D leve e fácil de usar com um renderizador WebGL padrão[47]. Nasceu em Abril de 2009 e foi originalmente desenvolvido em ActionScript, sendo agora uma biblioteca Javascript de código aberto que permite a programação de alto nível de cenas 3D e é provavelmente a mais famosa para gráficos 3D em *browsers*. Como foi criado antes da introdução do WebGL, o Three.js possui uma estrutura modular, o que significa que tem vários mecanismos de renderização (WebGL, Canvas e SVG) [20]. Os *developers* ao usar esta framework contam com uma excelente documentação, exemplos na sua página web e no seu repositório GitHub, além de uma grande comunidade ativa. Esta framework permite dar uma resposta eficiente e muito realista à questão da renderização da água, como podemos observar na figura 2.16. Em contrapartida, existe uma constante alteração de versões e não há garantias de retro compatibilidade.

O Babylonjs é outra framework *open-source*, que ao contrário do Three.js oferece uma ampla variedade de recursos de animação, e adota uma abordagem mais orientada para o desenvolvi-

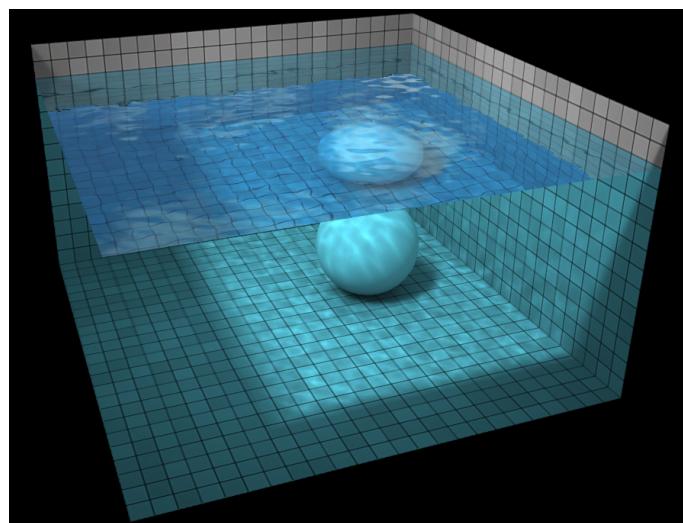


Figura 2.16: Imagem de uma demo de Three.js onde foi simulado o efeito de água [49].

mento de jogos. Além dos sistemas de deteção de colisões integra também mecanismos de física. Em termos de animação de objetos 3D, além de importar cenas de vários formatos 3D, como OBJ e FBX, suporta também animações de frames e animação baseada em estruturas esqueléticas [1].

Uma framework que têm vindo a crescer pelas suas características diferenciadoras é o CesiumJS [12]. Esta biblioteca JavaScript que tem como objetivo fornecer aos utilizadores poderosas funções que criam globos e mapas 3D e usa o WebGL como mecanismo de renderização gráfica para visualização dinâmica de dados. É a única *opensource* com suporte direto para coordenadas geospaciais e por isso o seu desenvolvimento é altamente impulsionado pela comunidade geoespacial. Comparado a outras estruturas, o Cesium é único, pois reúne muitas funcionalidades geoespaciais avançadas como transmissão de dados e imagem do terreno, e também desenha camadas de imagem usando serviços e padrões geoespaciais da web [26, 19]. Outros dos recursos mais notáveis do Cesium é a capacidade de representar dados de serviços da Web, desenhar dados vetoriais armazenados no formato *Esri Shapefile*, a possibilidade de visualizar dados de forma temporal [40] e por último, graças a *plugins*, também permite a criação de conteúdo *WebVR*.

Outra framework que é relevante falar é o A-Frame. Este sistema *open-source* baseado em Web foi especialmente desenvolvido para a criação de experiências de realidade virtual com base em HTML e JavaScript. A utilização é muito simples e acessível mesmo para não programadores, sendo possível desenvolver conteúdo com conhecimento em apenas em HTML, CSS e alguma experiência com JavaScript [42]. Contudo, apesar de ser uma ferramenta útil para a criação de conteúdo em VR não é tão poderoso e flexível como o Three.js ou o Babylon.js.

Comparação entre Frameworks

Só se pode argumentar que uma determinada ferramenta é mais adequada a um objetivo se tiver sido testada em condições realistas e práticas[26]. Existem algumas diferenças que serão

apresentadas na tabela 2.1. Como não existe literatura a comparar estas *frameworks* os dados apresentados foram recolhidos através de comparação direta das funcionalidades de cada uma delas.

Tabela 2.1: Comparação entre frameworks

	Three.js	Babylonjs	CesiumJS
Prós	<ul style="list-style-type: none"> • Excelente documentação e grande numero de exemplos online; • Leve e poderoso; • Ótimo suporte para GPU shaders; • Muito recorrente na literatura científica; • Suporte para coordenadas geospaciais através do <i>plugin Potree</i>; • Existe documentação e exemplos de integração com CesiumJS; • Acesso ao baixo nível do WebGL; 	<ul style="list-style-type: none"> • Boa documentação; • Renderizador com desempenho superior; • Maior nível de abstração: desenvolvimento mais rápido de cenas; • Menor curva de aprendizagem; • Comunidade muito ativa: os bugs são corrigidos rapidamente; • API não muda muito entre versões. • Acesso ao baixo nível do WebGL; 	<ul style="list-style-type: none"> • Boa documentação e exemplos online; • Recursos GIS 3D; • Suporte básico para KML, o principal formato do Google Earth; • Comunidade geoespacial ativa; • Excelente desempenho; • Ampla <i>plugins</i> de bibliotecas para a importação de dados, cálculos matemáticos, criação 3D, câmeras, etc.
Contras	<ul style="list-style-type: none"> • Curva de aprendizagem acentuada; • Menor nível de abstração, logo mais código redundante para a construção de uma cena básica; • Constante alteração de versões sem garantias de retro compatibilidade. 	<ul style="list-style-type: none"> • Bibliotecas maiores e código mais verboso; • Menos tendência que o Three.JS até à data; • Poucos downloads o que é preocupante para o futuro; • Pouca documentação para integração com CesiumJS. 	<ul style="list-style-type: none"> • Não tem acesso ao baixo nível do WebGL; • Recursos muito técnicos; • Visualização inferior as restantes.

2.4 Sumário

Ao longo deste capítulo foram abordados diferentes temas relevantes para o desenvolvimento desta dissertação, entre elas o estudo das técnicas de representação e visualização dos dados, vários sistemas de informação geográfica e por último o levantamento de várias ferramentas de renderização web.

No estudo das técnicas de representação e visualização de dados foram apresentados formas de representação de dados científicos como dados batimétricos, de fenómenos de ondulação, de tráfego marinho, assim como, a trajectória de veículos autónomos. Quanto à visualização de dados de batimetria foi possível verificar que existem formas 2D e 3D de visualização, sendo que modelos

de alta resolução em 3D permitem observar de forma realista o aspecto do fundo do mar. Referimos também formas de representação destes dados, popularmente realizada em forma de grelha espaçada regular ou em rede triangular irregular (TIN). Depois de destacamos algumas vantagens e desvantagens associadas a cada formato foi possível concluir que a grelha espaçada regular é um formato mais simples, menos pesado computacionalmente e que permite obter resultados satisfatórios e o modelo TIN, apesar de permitir uma melhor representação de características oceânicas como picos, cordilheiras, vales e fossas, é de manipulação é muito complexa. Nos fenómenos de ondulação foram referidos a forma tradicional de visualização com um mapa bivariável de cores e flechas que indicam a altura das ondas e a direção das mesmas respectivamente. Assim, por se tratar de um forma amplamente utilizada para a representação deste tipo de dados, consideramos que a sua visualização em 3D deverá manter estas características para que não seja perdida informação relevante. No tráfego marinho foi referido o sistema AIS que permite a monitorização e comunicação entre embarcações, assim como o tipo de dados e a sua periodicidade. Foram mostradas diferentes formas de visualização, em 2D e em 3D, as vantagens e as diferentes aplicações deste tipo de sistemas. Por último, na representação e visualização da trajetória de veículos autónomos foi igualmente mostradas formas 2D e 3D deste tipo de visualização e a forma de monitorização de *waypoints*.

Nos sistemas de informação geográfica foi referido as diferenças significativas entre os sistemas GIS e os MGIS. Os *marine geographic information systems*, muito mais relevantes para esta dissertação, são muito mais complexos que os sistemas terrestres que não tem de lidar com fenómenos que variam no tempo e no espaço. Assim, este tipo de visualização ainda não está amplamente representada na literatura atual. Foi destacado também que existem sistemas baseados em web e os sistemas de computador local e que existem diferenças relevantes nestes dois tipos de sistemas. Nos sistemas baseados em web importa salientar que a questão da integração e visualização eficiente de dados geográficos que variam no tempo num *browser* ainda não foi devidamente explorada e portanto padronizada. Nos outros tipos de sistema foram explorados e mostrados sistemas relevantes como o Neptus e o i4Ocean que permitem a integração e análise de dados científicos.

Por último, nas ferramentas de renderização e na apresentação das diferentes *frameworks* foram comparadas e mostradas as mais valias de cada uma das ferramentas. Assim como a tendência de crescimento de cada uma delas quer no número de pesquisas dos termos quer no numero de downloads. O baixo número de pesquisa e de downloads do Babylonjs, assim como a sua ausência na literatura é preocupante e uma barreira ao uso da *framework*. Importa destacar o Cesiumjs, uma ferramenta não muito popular contudo muito poderosa na criação de globos e mapas 3D e cada vez mais representada na literatura devido à resposta adequada aos desafios que a representação de dados geospaciais apresenta.

O estudo das técnicas de representação e visualização de dados em conjunto com o levantamento dos variados tipos de sistemas de informação geográfica permitiu concluir que existem imposições e dificuldades inerentes na visualização de dados marinhos em plataformas web devido às características dinâmicas deste tipo de dados. Contudo, também foi visto que existem

trabalhos relevantes que demonstram que é possível ultrapassar referidas dificuldades. Quanto às *frameworks* estudadas permitiu concluir que existem ferramentas poderosas capazes de dar resposta de forma eficiente às questões de visualização e renderização de forma eficiente.

Capítulo 3

Proposta de Solução

Este capítulo descreve em detalhe a solução proposta que consiste numa aplicação web em 3D de visualização de dados marinhos. Com a revisão da literatura foi possível estudar o que foi realizado até à data e, também, verificar a inexistência de trabalhos em determinadas questões. Deste modo, foi possível desenhar uma arquitetura geral para o sistema e definir os seus requisitos. Neste Capítulo será também esclarecido de que forma o sistema será avaliado e validado, assim como, justificadas as ferramentas e tecnologias envolvidas no processo.

3.1 Requisitos do Sistema

Como referido, o objetivo principal desta dissertação é permitir a qualquer utilizador visualizar de forma agregada e intuitiva a informação proveniente de múltiplas fontes relacionadas com o oceano e litoral. No entanto, a par da vertente de divulgação científica, outro dos objetivos é auxiliar os utilizadores ligados às ciências do mar, ou seja, operadores de AUVs, oceanógrafos, biólogos e arqueólogos. De forma a responder adequadamente às necessidades destes utilizadores, foi realizado um inquérito com algumas questões que se encontra em anexo. Apesar do número escasso de respostas, estas permitiram chegar a conclusões importantes.

A primeira questão veio reforçar as motivações desta dissertação, visto que todos os inquiridos responderam que tinham interesse em visualizar dados da sua área científica de estudo em 3D a partir de um *browser*. Por outro lado, com a questão “Que tipo de dados é útil visualizar ?” permitiu demonstrar a importância transversal a todas as áreas dos dados de batimetria, uma vez que, constam de forma unânime na maioria das respostas. Mas também foi possível concluir que existe num vasto espectro de necessidades dos inquiridos e, por isso, não é possível responder a todas elas neste trabalho.

Então, para além da inclusão dos dados de batimetria, foi decidido que o apoio às missões com AUVs era prioridade. Desse modo, os tipos de dados mais importantes no decorrer das missões é o tráfego de embarcações e a ondulação do mar. A monitorização destes dados permite que estas

operações decorram com a segurança necessária. Por fim, foi decidido a integração dos modelos de naufragos dos arqueólogos. Isto, além de responder aos pedidos dos arqueólogos, permite também de uma forma simples, o enriquecimento da visualização e também serão úteis para as missões com AUVs. Na figura 3.1 estão apresentados os casos de uso do sistema.

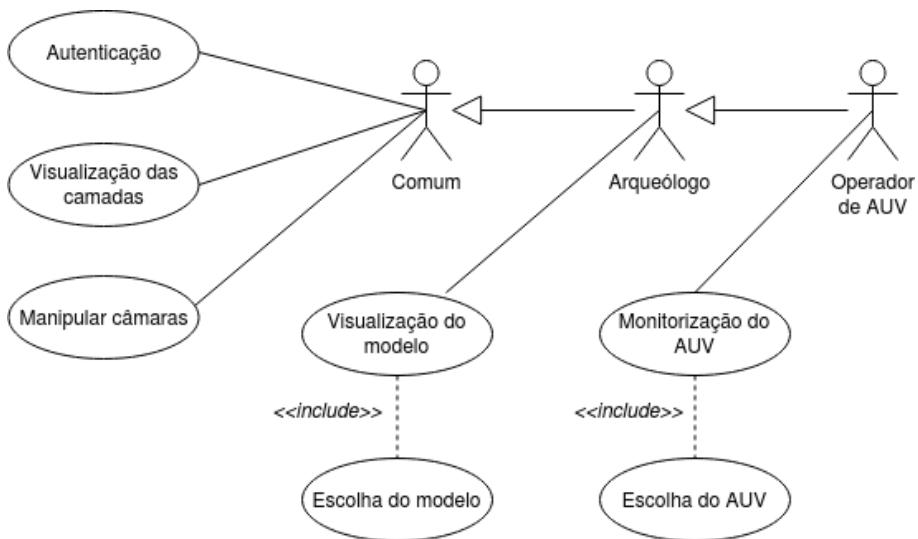


Figura 3.1: Casos de uso do sistema

De seguida será apresentada uma lista de requisitos, que devem estar presentes na versão final do sistema.

3.1.1 Funcionais

- Utilizadores Comuns
 - **Menus:** O visualizador deve mostrar os menus para manipular o sistema.
 - **Câmaras:** O visualizador deve alterar o modo de visualização para vista normal ou de cima e permitir explorar o cenário de forma livre com o modo "orbit"ou "free camera".
 - **Mostrar lista de camadas:** O visualizador deve mostrar a lista de camadas de dados que estão disponíveis para visualização.
 - **Visualização das camadas:** O visualizador deve renderizar adequadamente as camadas de tráfego de embarcações e a ondulação se estas se encontrarem ativas.
- Arqueólogos
 - **Mostrar lista de modelos:** O visualizador deve mostrar a lista de modelos de naufrágios que estão disponíveis para visualização.
 - **Visualização dos modelos:** O visualizador deve renderizar adequadamente os modelos de naufragos.

- Operadores de AUVs
 - **Mostrar lista de AUVs:** O visualizador deve mostrar a lista de AUVs que estão disponíveis para visualização.
 - **Visualização e monitorização de AUVs:** O visualizador deve renderizar adequadamente o AUV na posição e orientação correta e a sua trajetória.

3.1.2 Não Funcionais

- **Usabilidade:** o visualizador deve ser intuitivo e compreensível por todos os utilizadores.
- **Eficiência** O visualizador deve poder renderizar e responder à interação do utilizador com o mínimo atraso possível.
- **Compatibilidade:** O visualizador deve ser compatível na maioria dos *browsers*.
- **Confiabilidade:** Limitação ao acesso da visualização de modelos e monitorização de AUVs se necessário.
- **Implementação:** O sistema web será desenvolvido em Java Script e com as *frameworks* Three.js e CesiumJS.

3.2 Arquitetura do Sistema

No diagrama da figura 3.2, é apresentada a arquitetura do sistema. A interface de visualização será construída a partir da combinação das frameworks *Cesium* e *Three.js*. A escolha das tecnologias será devidamente justificada na secção 3.4.

A interação entre o sistema de visualização e os recursos de dados é realizada através de pedidos *HTTP*¹. A atualização da posição do veículo, *waypoints xyzt*, é fornecida através do servidor do LSTS *Ripples* em formato *JSON*. Assim como os modelos dos naufragos (*.obj*) estarão alojados no próprio servidor da aplicação, onde poderão ser carregados e renderizados quando necessários. Os dados de batimetria, ondulação e tráfego serão fornecidos através de serviços externos, contudo, será o servidor *Ripples* o responsável pelos pedidos às entidades externas, pelo seu processamento e posteriormente por disponibilizar ao servidor da aplicação.

Design do Sistema

A solução proposta a nível de interface com o utilizador encontra-se na figura 3.3. O que propomos é uma interface intuitiva e acessível, que permita a qualquer utilizador especializado ou não na área das ciências marinhas visualizar informação e para isso no lado direito pretende-se incluir um menu simples e facilmente compreensível.

¹Hypertext Transfer Protocol

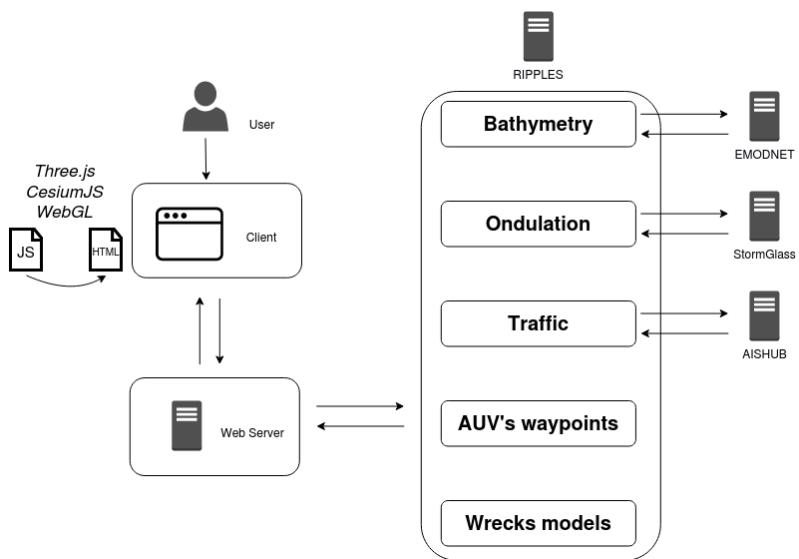


Figura 3.2: Diagrama da solução proposta.

Desta forma, o utilizador pode trocar a vista para uma vista de cima e assim visualizar embarcações e a ondulação, assim como explorar o ambiente com as opções de *Free Camera* ou *Orbit*. Também é possível ativar ou desativar *layers* de dados, evitando que a aplicação faça pedidos desnecessários, escolher o veículo autônomo a seguir e por último poderá escolher um modelo de naufrágio que esteja disponível na base de dados para visualizar.



Figura 3.3: Design da solução proposta

3.3 Avaliação do Sistema

O sistema proposto tem um design centrado no utilizador, desse modo a avaliação do sistema será focada na experiência dos utilizadores na interação com o sistema.

Existem diversos tipos de utilizadores ligados às ciências do mar que podem beneficiar com o uso deste sistema contudo será também importante que a avaliação do sistema passe por utilizadores comuns. Em linhas gerais, os testes com utilizadores comuns será focado na usabilidade, interação e compreensão do sistema e dos dados visualizados. Por outro lado, a avaliação realizada pelo grupo de utilizadores especializados terá como objetivo principal fazer a verificação de erros ou incongruências na visualização dos dados ou sugerir alterações para melhorias no sistema.

Para a avaliação de casos de uso mais concretos, a monitorização do percurso de um AUV e a visualização de modelos de naufragos é obrigatoriamente necessário incluir operadores de AUVs e arqueólogos no grupo de utilizadores especializados. Para os operadores de AUVs é essencial que a verificação, análise e testes do sistema sejam realizados em missões no terreno com veículos autónomos subaquáticos em tempo real. Deste modo, a combinação dos atuais sistemas de monitorização do veículo com a visualização 3D permitirá verificar e corrigir possíveis falhas, imprecisões e/ou erros relacionados com a trajetória. No caso dos arqueólogos a validação passa pelo uso do sistema para visualizarem modelos dos pontos de interesse inseridos no seu ambiente marinho.

3.4 Ferramentas e Tecnologias

Nesta secção serão apresentadas as ferramentas e tecnologias para o desenvolvimento do sistema, assim como, as APIs externas e outras fontes para a obtenção de dados.

3.4.1 Visualização

Three.js - Tal como referido no capítulo 2.3.1 não existem diferenças significativas entre o Three.js e o BabylonJS. A escolha do Three.js é fundamentalmente pela facilidade de integração com as demais frameworks para a implementação do sistema.

CesiumJS - Esta framework é única de código aberto com suporte direto para coordenadas geoespaciais. A combinação da renderização em escala e dos recursos GIS da Cesium com o Three.js abre possibilidades para novas experiências WebGL.

WebGL - O uso das frameworks referidas anteriormente requer conhecimentos em WebGL.

HTML5, CSS, Javascript - Tecnologias vitais para a criação da página web.

3.4.2 Dados

Batimetria: EMODNET - Serviço disponibilizado pela Rede Europeia de Observação e Dados Marinhos que é uma rede de organizações apoiadas pela política marítima integrada da UE com o objetivo de observar o mar, processar e disponibilizar dados de forma gratuita [18].

Ondulação: StormGlass - Esta API fornece previsões e históricos de alta resolução de dados meteorológicos globais e de dados marítimos, de todos os oceanos e marés [21].

Tráfego de embarcações: AISHUB - Esta API fornece dados NMEA AIS que permite monitorizar e rastrear embarcações. Juntamente com outras informações relevantes, o AIS transmite continuamente dados como posição, identidade, velocidade e percurso das embarcações [2].

Modelos de naufragos - Os ficheiros dos modelos serão disponibilizados por arqueólogos em formato *.fbx* e/ou *.obj*.

3.4.3 Demo

Para validação de conceitos foi desenvolvido uma demo muito simplificada utilizando o Three.js e o A-Frame. Como observável na imagem 3.4, o protótipo permite ao utilizador observar um determinado ambiente sob o ponto de vista de AUV.

A cena virtual simula um ambiente marinho simples com umas rochas, no qual um AUV move-se numa direção pré-definida enquanto são atualizados valores de temperatura através das cores da água e do valor correspondente. Para isso foram carregados dois ficheiros *.obj* para os objetos 3D, rochas e veículo, e um ficheiro *.csv* com valores reais de temperatura recolhidos por um AUV.



Figura 3.4: Demo

3.5 Sumário

Neste capítulo foi descrito em detalhe a solução proposta que consiste numa aplicação web que através de HTML5, Javascript, WebGL, Three.js e CesiumJS é capaz de mostrar dados em 3D fornecidos por diversos serviços externos. A proposta inclui a arquitetura do sistema, *mockups* do design da aplicação web e, também, uma lista de requisitos que devem concretizadas na versão final do sistema sob o ponto de vista dos utilizadores e do próprio sistema.

A avaliação do sistema será realizada com utilizadores comuns e será focada na usabilidade, interação e compreensão do sistema e dos dados visualizados, mas também, por utilizadores especializados onde o objetivo principal será fazer a verificação de erros na visualização dos dados.

O Three.js e CesiumJS são as *frameworks* de visualização escolhidas para o desenvolvimento da solução, o primeiro pela alta qualidade de renderização e pela documentação existente para integração com o CesiumJS e o segundo pelas capacidades de representação de dados geoespaciais. Quanto às APIs de dados serão utilizadas a EMODNET, a StormGlass e a AISHub para a batimetria, ondulação e tráfego de embarcações respectivamente.

Capítulo 4

Conclusões

Como revisto no capítulo dois deste documento uma aplicação web 3D para observar dados marinhos será uma mais valia para diversas áreas ligadas às ciências do mar. Este sistema de visualização permitirá mostrar o desconhecido e enigmático ambiente marinho em tempo real de uma forma inovadora contudo, de um modo simples, intuitivo e comprehensível até para utilizadores comuns que não tenham conhecimento especializado nesta área. No entanto, também foi referido que a integração e visualização eficiente de dados geográficos que variam no espaço e no tempo num *browser* ainda não foi devidamente explorada e padronizada, isto será uma das dificuldades a ultrapassar na concretização desta dissertação. Outro obstáculo a ultrapassar será o agrupar a grande quantidade de dados e os seus múltiplos formatos com o pesado trabalho de renderização e visualização. Contudo, foi referido que existem trabalhos relevantes que demonstram que é possível ultrapassar estas dificuldades.

No capítulo três foi exposta a solução proposta da aplicação web 3D. A arquitetura, design da interface e a lista de requisitos que referimos formam a base inicial para dar resposta a este problema, contudo, será sujeita a alterações e melhorias quando se iniciar a fase de estudo das ferramentas e tecnologias envolvidas. Ainda neste capítulo referimos que a avaliação do sistema será realizada com utilizadores comuns e será focado na usabilidade, interação e compreensão do sistema e dos dados visualizados mas também, por utilizadores especializados onde o objetivo principal será fazer a verificação de erros na visualização dos dados. Isto seria à priori uma dificuldade, contudo, este trabalho terá a oportunidade de ser testada por ambos os grupos de utilizadores. O primeiro grupo com pessoas da própria instituição e o segundo com as pessoas envolvidas e ligadas ao laboratório LSTS.

4.1 Plano de tarefas

De forma a garantir o cumprimentos dos objetivos desta dissertação é crucial definir um plano de tarefas, desse modo, a figura 4.1 mostra um *Gantt* que lista cada uma delas assim como o tempo

esperado para o seu desenvolvimento.

No momento da escrita deste relatório o projeto encontra-se na conclusão da revisão de literatura. Seguidamente será necessário uma fase para o estudo e familiarização com as ferramentas e tecnologias de desenvolvimento, assim como as APIs de serviços de dados e os formatos dos mesmos, de forma a refinar a arquitetura e requisitos do sistema. Após esta fase é necessário a criação dos módulos de obtenção e processamento de dados e de seguida a criação de módulos de visualização que serão realizadas praticamente em simultâneo. Sendo este um sistema centrado no utilizador é imprescindível fazer testes gerais contínuos durante todo seu desenvolvimento. Por último, após integração e testes gerais de sistema é necessário realizar testes com os diferentes utilizadores. Estes resultados serão analisados e integrados no documento final.

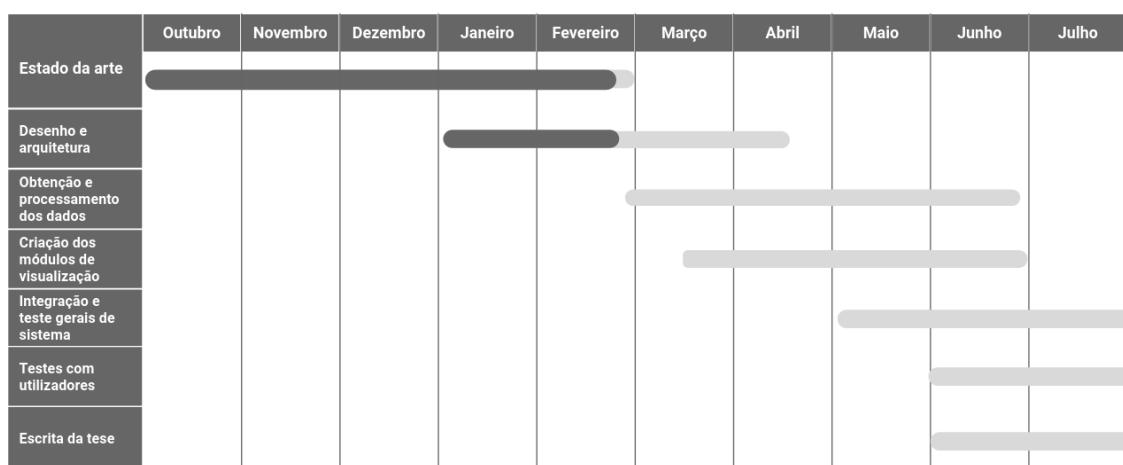


Figura 4.1: Plano de trabalho para os próximos meses.

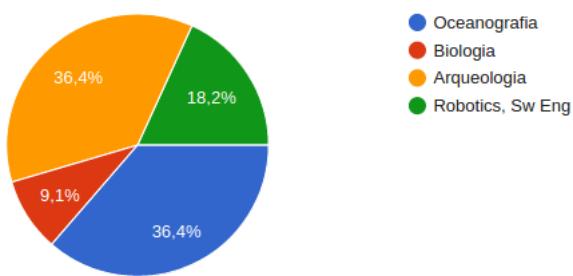
Anexo A

Inquérito e Resultados

1. Qual é a sua área de estudo ?



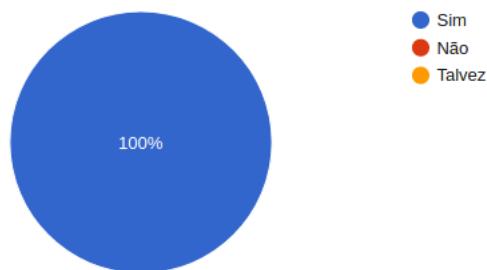
11 respostas



2. Algum interesse em visualizar dados da sua área científica de estudo em 3D a partir de um browser?



11 respostas



Que tipo de dados é útil visualizar ?

11 respostas

Tráfego marítimo, correntes, ondulação, batimetria

Batimetria, relevo, magnetometria

Vestiges arqueológicos situados em meio submerso

bathymetry, elevation, substrate type etc

AUV e meteoceanograficos

Temperatura, Salinidade, Densidade

Nós usamos software fotogramétrico para desenvolver malhas 3D e depois software gráfico para seccionar as malhas e obter secções dos sítios. O processo é um bocado pesado e requer várias operações.

Destroços de navios, artefactos de dimensões distintas, objectos de construção humana.

Todos os prâmetros oceanográficos são úteis. Mais necessários: Temp., Salinidade, Velocidades horizontal. Grandezas derivadas: densidade, velocidade do som, frequência de Brunt-Väisälä (estabilidade do oceano), velocidade vertical (a partir da equação da continuidade, p. ex.)

batimetria e relevo submarino

Tráfego marítimo, batimetria, correntes, ondulação

De que forma será mais apropriada visualizar esses dados?

10 respostas

batimetria: modelo 3d, ondulação: 3d animado, tráfego e correntes: overlay 2D no oceano

Em real time e em formatos obj ou preferencialmente fbx georeferenciados

Anyone whcih can be downloaded and used in GIS software

computador / smartphone

MATLAB ou software fácil de utilizar e aprender

Os ficheiros mais neutrais são os melhores (.STL, .DAE), mas .DWG pode-se converter.

Em qualquer suporte, digital ou não, que permita aproximar e afastar a escala: zoom in e out.

Perfis num ponto (lat, long), secções verticais, campos horizontais, diagramas TS

websig ou algo do tipo Google Earth

overlays, mapa de cores e modelos em 3D

Que fontes de acesso público a esses dados utiliza?

9 respostas

Marine traffic, copernicus (CMEMS), EMODNET-Bathymetry

Web ou software dedicado

EMODnet and similar

por exemplo CORIOLIS/IFREMER; NASA / NOAA; Sentinel missions / Copernicus

Nós temos um server aqui na univ, em Comp. Sci., onde metemos as coisas que queremos partilhar, ou a partir de onde ligamos os nossos textos com os sítios onde se pode ver vídeos (youtube, etc.), ou modelos (Sketchfab, etc.)

Não entendo esta questão.

NODC - World Ocean Atlas

Google Earth e plataforma EMODNET

windy, Google Maps, Open Street Maps

Dos dados referidos existe alguns deles correlacionados e por isso mais facilmente interpretados se agrupados ?

9 respostas

Correntes e ondulação seria interessante poder correlacionar (ondas a moverem-se no sentido da corrente).

sim , contextos/complexos arqueológicos

No always

Nao

NA

Tudo o que facilite a visualização de várias coleções de dados ao mesmo tempo é precioso.

É possível. Pode acontecer.

EMODNET

batimetria e posição dos AUVs

Que tipo de ferramentas normalmente utiliza para visualização de dados?

10 respostas

Windy.com, Marinetrack.com

Rhinoceros 3D, Simlab composer, Autodesk Maya, Blender

Qgis

GIS

Ocean Virtual Laboratory ; NASA worldview; Sentinel Hub; MATLAB (formato netcdf)

Rhino ou Autodesk Maya.

As imagens chegam-me já em formato de ficheiro de imagem, passo a redundância.

Surfer, ODV, Matlab, Mirone

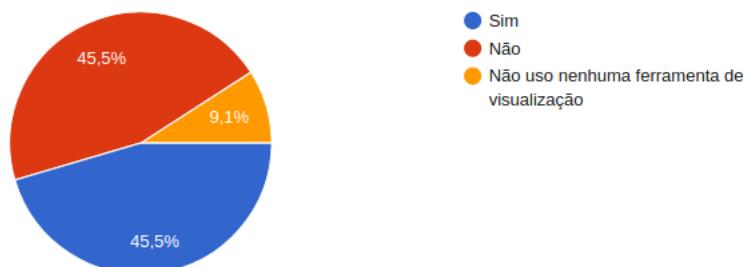
Software SIG e plataformas WEBSIG

neptus

Alguma dessas ferramentas é em 3D?



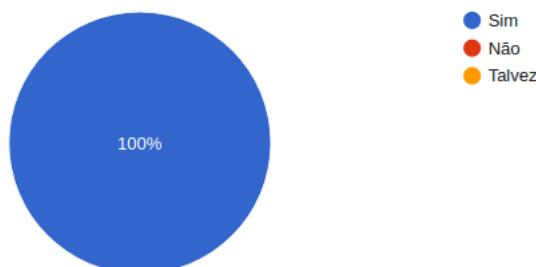
11 respostas



A possibilidade de visualizar os dados em 3D, teria vantagens em relação a essas?



5 respostas



Referências

- [1] Amit L. Ahire, Alun Evans, e Josep Blat. Animation on the web: A survey. Em *Proceedings of the 20th International Conference on 3D Web Technology*, Web3D '15, página 249–257, New York, NY, USA, 2015. Association for Computing Machinery.
- [2] aishub. Free AIS vessel tracking | AIS data exchange | JSON/XML ship positions. Disponível em <https://www.aishub.net/>, acedido pela última vez em Fevereiro de 2020, 2020.
- [3] Google Elevation API. Get Started | Elevation API | Google Developers. Disponível em <https://developers.google.com/maps/documentation/elevation/start>, acedido pela última vez em Novembro de 2019, 2019.
- [4] J Barruos. Effective virtual navigation in a 3D underwater environment based on real-world bathymetry. 2014.
- [5] Carlo Beltrame e Elisa Costa. 3D survey and modelling of shipwrecks in different underwater environments. *Journal of Cultural Heritage*, 29:82–88, 2018.
- [6] Philippe Blondel. *BATHYMETRY AND ITS APPLICATIONS Edited by Philippe Blondel*. 2011.
- [7] Paul Bolstad. *GIS Fundamentals: A First Text on Geographic Information Systems*. 04 2012.
- [8] D. Brutzman. Virtual world visualization for an autonomous underwater vehicle. Em '*Challenges of Our Changing Global Environment'. Conference Proceedings. OCEANS '95 MTS/IEEE*', volume 3, páginas 1592–1600 vol.3, Oct 1995.
- [9] Mehmet Buyukdemircioglu e Sultan Kocaman. A 3D campus application based on city models and WebGL. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 42(5):161–165, 2018.
- [10] Gilberto CÃ¡\textcentmara, AntÃ\textcentrio Miguel Vieira Monteiro, JoÃ\textcentso Argemiro Paiva, Jonas Gomes, e Luiz Velho. Towards a unified framework for spatial data models. *Journal of the Brazilian Computer Society*, 7:17–25, 2000.
- [11] H. Cao, X. Hou, e Y. Feng. Webgl-based research on virtual visualization simulation display platform of ship, May 2018.
- [12] CesiumJS. Open Source 3D Mapping. Disponível em <https://cesium.com/>, acedido pela última vez em Novembro de 2019, 2019.
- [13] Lukáš Chrpa, Jose Pinto, Manuel Ribeiro, Frédéric Py, João Sousa, e Kanna Rajan. On mixed-initiative planning and control for autonomous underwater vehicles. 09 2015.

- [14] Robert Costanza. The ecological, economic, and social importance of the oceans. *Ecological Economics*, 31(2):199–213, 1999.
- [15] Laboratório de Sistemas e Tecnologia Subaquática. LSTS. Available at <https://lsts.pt/>, acedido pela última vez em Novembro de 2019, 2019.
- [16] Laboratório de Sistemas e Tecnologia Subaquática. Ripples. Available at <https://ripples.lsts.pt/>, acedido pela última vez em Fevereiro de 2020, 2020.
- [17] Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA). IPMA - Significant wave height forecast. Disponível em <https://www.ipma.pt/en/maritima/hs/>, acedido pela última vez em Fevereiro de 2019, 2019.
- [18] EMODnet. Central Portal | Your gateway to marine data in Europe. Disponível em <https://www.emodnet.eu/>, acedido pela última vez em Fevereiro de 2020, 2020.
- [19] Konstantinos Evangelidis, Theofilos Papadopoulos, Konstantinos Papatheodorou, Paris Mastorokostas, e Constantinos Hilas. 3D geospatial visualizations: Animation and motion effects on spatial objects. *Computers and Geosciences*, 111(December 2016):200–212, 2018.
- [20] Alun Evans, Marco Romeo, Arash Bahrehmand, Javi Agenjo, e Josep Blat. 3D graphics on the web: A survey. *Computers and Graphics (Pergamon)*, 41(1):43–61, 2014.
- [21] Storm Glass. Home - Storm Glass. Disponível em <https://stormglass.io/>, acedido pela última vez em Fevereiro de 2020, 2020.
- [22] Chris Goldfinger. Active tectonics: Data acquisition and analysis with marine gis. Em Dawn Wright e D. Bartlett, organizadores, *Marine and Coastal Geographical Information Systemsn*, chapter 17, páginas 245–264. Taylor & Francis, 2000.
- [23] Google. Google Trends. Disponível em <https://trends.google.com/trends/explore?date=2017-11-16%202019-12-16&q=babylonjs,threejs,aframe,cesiumjs>, acedido pela última vez em Novembro de 2019, 2019.
- [24] Pengbo Ji, Fenglin Tian, Shuai Liu, Yuchi Jiang, e Ge Chen. I4Ocean: An interactive simulation and scientific visualization platform for marine application. *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad del Zulia*, 39(5):169–179, 2016.
- [25] Timothy a. Kearns e Joe Breman. Bathymetry: the art and science of seafloor modeling for modern applications. *Ocean Globe*, página 274, 2010.
- [26] Michel Krämer e Ralf Gutbell. A case study on 3D geospatial applications in the Web using state-of-the-art WebGL frameworks. *Proceedings - Web3D 2015: 20th International Conference on 3D Web Technology*, (June 2015):189–197, 2015.
- [27] A. Krooks, J. Kahkonen, L. Lehto, P. Latvala, M. Karjalainen, e E. Honkavaara. WebGL visualisation of 3D environmental models based on Finnish open geospatial data sets. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 40(3):163–169, 2014.
- [28] Laboratório Tecnologia Oceânica LabOceano. LabOceanode. Available at <http://www.laboceano.coppe.ufrj.br/>, acedido pela última vez em Novembro de 2019, 2019.

- [29] Rongxing Li. Data models for marine and coastal geographic information systems. Em Dawn Wright e D. Bartlett, organizadores, *Marine and Coastal Geographical Information Systemsn*, chapter 3, páginas 28–40. Taylor & Francis, 2000.
- [30] Rongxing Li e Narendra Saxena. Development of an integrated marine geographic information system. *Marine Geodesy*, 16:293–307, 10 1993.
- [31] Ricardo Martins, Paulo Sousa Dias, Eduardo R. B. Marques, José Pinto, João Borges de Sousa Sousa, e Fernando M. Lobo Pereira. Imc: A communication protocol for networked vehicles and sensors. *OCEANS 2009-EUROPE*, páginas 1–6, 2009.
- [32] Meteomatics. Meteomatics | Your Experts in Weather Data Processing. Disponível em <https://www.meteomatics.com>, acedido pela última vez em Novembro de 2019, 2019.
- [33] Ru Miao, Jia Song, e Yunqiang Zhu. 3D geographic scenes visualization based on WebGL. *2017 6th International Conference on Agro-Geoinformatics, Agro-Geoinformatics 2017*, 2017.
- [34] F. Mwalongo, M. Krone, G. Reina, e T. Ertl. State-of-the-art report in web-based visualization. *Computer Graphics Forum*, 35(3):553–575, 2016.
- [35] Joel Rocha De Oliveira. Visualização de conteúdos multimédia num ambiente de realidade virtual. 2018.
- [36] Jose Pinto, Paulo Dias, Rui Gonçalves, Eduardo Marques, Gil Gonçalves, João Sousa, e Fernando Pereira. Neptus - a framework to support the mission life cycle. *7th IFAC Conference on Manoeuvring and Control of Marine Craft, Lisboa*, 9, 01 2006.
- [37] José Pinto, Paulo Sousa Dias, e João Borges Sousa. Ripples: A tool for supervision and control of remote assets. *Instrumentation Viewpoint*, 2018.
- [38] John Potter. npm trends: Compare NPM package downloads. Disponível em <https://www.npmtrends.com/three-vs-babylonjs-vs-aframe-vs-cesium>, acedido pela última vez em 16 de Dezembro de 2019, 2019.
- [39] Cyril Ray, Rafal Goralski, Christophe Claramunt, e Chris Gold. *Real-Time 3D Monitoring of Marine Navigation*, páginas 161–175. 05 2011.
- [40] Bernd Resch, Ralf Wohlfahrt, e Christoph Wosniok. Web-based 4D visualization of marine geo-data using WebGL. *Cartography and Geographic Information Science*, 41(3):235–247, 2014.
- [41] Jenny Rock, Ellen Sima, e Manon Knapen. What is the ocean: A sea-change in our perceptions and values? *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, (August):1–8, 2019.
- [42] S. G. Santos e J. C. S. Cardoso. Web-based virtual reality with a-frame. Em *2019 14th Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI)*, páginas 1–2, June 2019.

- [43] Matteo Serpi, Alessandro Carcangiu, Alessio Murru, e Lucio Davide Spano. Web5VR: A flexible framework for integrating virtual reality input and output devices on the web. *Proceedings of the ACM on Human-Computer Interaction*, 2(EICS), 2018.
- [44] V. A. Sorokin, A. Y. Demin, e D. Z. Khasaeva. Three-dimensional visualization of the underwater environment using graphical library “3dbodies”. Em *2014 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS)*, páginas 1–5, Oct 2014.
- [45] Fenzhen Su, Xiaomei Yang, Jun Xu, Tianyu Zhang, e Jiancheng Luo. Basic theory and key technologies for marine geographic information system. *Acta Oceanologica Sinica*, 25(2):80–86, 2006.
- [46] Tobias Theuerkauff, Yves Wagner, e Frank Wallhoff. Realtime simulation and 3d-visualisation of surface and underwater vehicles for monitoring and evaluating autonomous missions. páginas 129–135, 05 2018.
- [47] Threejs. three.js – JavaScript 3D library. Disponível em <https://threejs.org/>, acedido pela última vez em Novembro de 2019, 2019.
- [48] Juha Uitto. *Global Freshwater Resources*, volume 3, páginas 65–76. 01 2001.
- [49] Evan Wallace. WebGL water. Disponível em <http://madebyevan.com/webgl-water/>, acedido pela última vez em Fevereiro de 2020, 2020.
- [50] K. Wang, M. Liang, Y. Li, J. Liu, e R. W. Liu. Maritime traffic data visualization: A brief review. Em *2019 IEEE 4th International Conference on Big Data Analytics (ICBDA)*, páginas 67–72, March 2019.
- [51] Colin Ware. *Information Visualization*. Morgan Kaufmann, 3 edição, 2013.
- [52] Dennis J. Whitford. Teaching ocean wave forecasting using computer-generated visualization and animation - Part 1: Sea forecasting. *Computers and Geosciences*, 28(4):537–546, 2002.
- [53] D. Wright, Dawn and Bartlett. *Marine and Coastal Geographical Information Systems*. Taylor & Francis, 2000.
- [54] Alain Wulf, Denis Constales, Timothy Nuttens, e Cornelis Stal. Grid models versus tin: Geometric accuracy of multibeam data processing. 11 2012.
- [55] Cui Xie, Mingkui Li, Haoying Wang, e Junyu Dong. A survey on visual analysis of ocean data. *Visual Informatics*, 3(3):113–128, 2019.
- [56] Ziwen Zhang, Yijun Liu, Peichao Yang, Wujian Ye, Shaowei Weng, Tie Liu, e Yang Li. Real-time Rendering Technology of Large-scale Underwater Scene on Web Terminal. *Journal of Coastal Research*, 83(SI):490–494, 2018.