



João Miguel Gomes Bento de Sousa

# Barco Autónomo para Monitorização Ambiental

Dissertação de Mestrado

Setembro 2012



UNIVERSIDADE DE COIMBRA



# Barco Autónomo para Monitorização Ambiental

**Orientador:** Prof. Doutor Lino José Forte Marques  
**Co-Orientador:** Prof. Doutor António Paulo Mendes Breda Dias Coimbra

## **Júri:**

**Presidente:** Prof. Doutor Rui Alexandre de Matos Araújo  
**Vogais:** Prof. Doutor Mário Gonçalo M. V. Silveirinha

João Miguel Gomes Bento de Sousa  
Dissertação submetida para obtenção do Mestrado Integrado em  
Engenharia Electrotécnica e de Computadores

Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores

Faculdade de Ciências e Tecnologia  
Universidade de Coimbra

Setembro 2012



# Resumo

Foi construída uma plataforma de superfície não-tripulada. Foi também criado software e hardware para o controlo e aquisição de dados. As missões serão realizadas em cursos naturais de água doce ou em barragens.

O robô está equipado com um sonar, um sensor químico e sensores de temperatura e condutividade para extrair parâmetros batimétricos e de qualidade da água. A sua estrutura modular e elevada capacidade de carga transportável permite facilmente adicionar mais sensores e/ou capacidade de processamento. Como forma de aumentar a autonomia das baterias, um painel fotovoltaico foi instalado.

Com a utilização de ROS não só se obtém uma excelente integração dos diferentes sensores e actuadores, como também proporciona ferramentas óptimas para usar nas missões de estudo de rios e alcançar bons resultados. Foram desenvolvidos drivers para o robô e para o sonar por forma a controlar a plataforma e fazer o estudo batimétrico.

Para conseguir uma grelha uniforme das variáveis medidas, vários métodos de interpolação espacial foram usados. Várias comparações foram feitas entre métodos clássicos de interpolação e métodos estocásticos. O método de interpolação de kriging foi implementado por forma a ser executado em simultâneo com a missão, permitindo assim prever zonas não-navegáveis.

## Palavras-Chave

Plataforma de Superfície Não-Tripulada, Monitorização Ambiental, Batimetria, Interpolação de kriging, ROS



# Abstract

An unmanned surface vehicle was built and it was created software and hardware for path control and data acquisition on natural freshwater courses or dams.

The robot is equipped with a sonar, a chemical sensor, a temperature and a conductivity sensor to extract bathymetric and water quality parameters. The modular structure and high payload capacity allows easy integration of more sensors and/or more powerful processing capabilities. As a way of extending the autonomy, a photovoltaic panel was installed.

The use of ROS not only provides an excellent sensor e actuator integration, but also gives great tools to use in tests and to achieve good results. Robot and sonar driver have been developed in order to control paths and to do the bathymetric study.

To obtain an uniform grid of measured variables, multiple spatial interpolation methods were used. Several comparisons were made between classical methods of interpolation and stochastic methods. The kriging one was implemented in order to run concurrently with the mission, thus predicting non-navigable areas.

## Keywords

Unmanned Surface Vehicle, Environmental Monitoring, Kriging Interpolation, Bathymetry, ROS



# Agradecimentos

Primeiro, como a formação e logística é essencial para a formação profissional, gostaria de agradecer à Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra e ao Instituto de Sistemas e Robótica de Coimbra.

Em segundo lugar, quero agradecer aos meus pais que me apoiaram durante todo o curso e em especial durante o semestre da dissertação.

Quero agradecer ao meu orientador Professor Lino Marques pelo empenho e disponibilidade para alcançar os objectivos e por ter ajudado a superar problemas encontrados. Um agradecimento também ao Professor Paulo Coimbra pela colaboração no projecto e pela ajuda prestada nos testes.

Como a troca de ideias com os colegas é crucial para um trabalho mais aperfeiçoado, quero agradecer aos meus colegas de laboratório, Bruno Antunes, Fábio Faria, Gilberto Martins, Gonçalo Cabrita, Hugo Peralta, Jorge Fraga, Ricardo Faria e Vitor Silva.

Por fim, a todas as pessoas amigas que contribuíram para o desenvolvimento do projecto, o meu agradecimento pela ajuda.



# Conteúdo

<b>Resumo</b>	<b>v</b>
<b>Abstract</b>	<b>vii</b>
<b>Agradecimentos</b>	<b>ix</b>
<b>Lista de Acrónimos</b>	<b>xv</b>
<b>Lista de Figuras</b>	<b>xvii</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>xix</b>
<b>1. Introdução</b>	<b>1</b>
1.1. Objectivos . . . . .	2
1.2. Estrutura . . . . .	2
<b>2. Revisão da Literatura</b>	<b>5</b>
2.1. Plataformas . . . . .	5
2.1.1. Casco . . . . .	5
2.1.2. Propulsão . . . . .	6
2.2. Sensores . . . . .	7
2.3. Interpolação . . . . .	10
<b>3. Plataforma</b>	<b>13</b>
3.1. Estrutura . . . . .	13
3.2. Propulsores . . . . .	14
3.3. Ponte H - LSE . . . . .	16
3.4. Controlador do painel fotovoltaico . . . . .	18
3.5. Direcçionador . . . . .	19

---

3.6. Baterias . . . . .	20
3.7. Compartimentos de materiais . . . . .	21
3.8. Sensores . . . . .	22
3.8.1. <i>Imagenex 852</i> . . . . .	22
3.8.2. Sensor químico: <i>cyclops 7</i> . . . . .	24
3.8.3. Sensor de condutividade e temperatura . . . . .	25
3.9. Comunicação . . . . .	25
<b>4. Software</b>	<b>27</b>
4.1. ROS: Driver de sonar <i>imagenex 852</i> . . . . .	28
4.1.1. Algoritmo considerando o máximo eco . . . . .	28
4.1.2. Detecção de obstáculos por correspondência de amostra . . . . .	29
4.2. ROS: Driver da plataforma . . . . .	31
4.3. ROS: Visualizador gráfico 3D - <i>RVIZ</i> . . . . .	31
4.4. Arduino . . . . .	33
4.4.1. <i>LSE H-Bridge</i> . . . . .	34
4.4.2. Medições analógicas . . . . .	35
4.4.3. Controlador do painel fotovoltaico . . . . .	37
<b>5. Estimação Espacial</b>	<b>39</b>
5.1. Distância inversa . . . . .	39
5.2. <i>Kriging</i> . . . . .	40
5.2.1. Variogramas e modelação . . . . .	41
5.2.2. Método de <i>Kriging</i> ordinário . . . . .	42
5.2.3. <i>Kriging</i> por bloco . . . . .	43
5.3. Implementação em ROS . . . . .	44
<b>6. Testes e Resultados</b>	<b>45</b>
6.1. Plataforma AquaSV vs. <i>Kingfisher</i> . . . . .	45
6.2. Teste da corrente consumida pelos motores . . . . .	46
6.3. Estudo da batimetria . . . . .	46
6.4. Resultados <i>Cyclops 7</i> . . . . .	47
<b>7. Conclusões</b>	<b>51</b>
7.1. Trabalhos futuros . . . . .	51

---

<b>Bibliografia</b>	<b>53</b>
<b>A. Anexo</b>	<b>57</b>
A.1. Imagens . . . . .	57
A.2. Interpolação . . . . .	60
A.2.1. IDW: escolha do expoente . . . . .	60
A.2.2. IDW: uso de vizinhança de pesquisa . . . . .	61
A.2.3. <i>Kriging</i> . . . . .	61



# Lista de Acrónimos

AC	Alternating Current
ADC	Analog-to-Digital Converter
AGM	Absorbed Glass Mat
BLDC	Brushless DC
BLUE	Best Linear Unbiased Estimator
CAD	Computer-Aided Design
CDOM	Colored Dissolved Organic Matter
CTD	Conductivity, Temperature and Depth
DC	Direct Current
DC	Direct Current
ETAR	Estação de Tratamento de Águas Residuais
FET	Field Effect Transistor
FOV	Field of View
FTDI	Future Technology Devices International
HDPE	High Density Polyethylene
IDE	Integrated Development Environment
IDW	Inverse Distance Weighting
LIDAR	Light Detection And Ranging
MOSFET	Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistor

---

MPPT	Maximum Power Point Tracking
PCB	Printed Circuit Board
PWM	Pulse Width Modulation
ROS	Robot Operating System
RPSMA	Reverse polarity SubMiniature version A
RTK	Real Time Kinematic
UGV	Unmanned Ground Vehicle
VLRA	Valve Regulated Lead-Acid

# Lista de Figuras

2.1. Plataforma <i>KINGFISHER</i> , versão 1, da <i>ClearpathRobotics</i> . . . . .	6
2.2. Invólucro para uma sonda usado na embarcação <i>Lizhbeth</i> . . . . .	8
2.3. Sonda YSI EXO2. . . . .	9
2.4. Fotogrametria do rio Tua [Ferreira et al., 2009]. . . . .	10
3.1. Imagem da plataforma AquaSV. . . . .	14
3.2. Imagem renderizada a 3D da plataforma. . . . .	15
3.3. Motor utilizado como propulsor. . . . .	16
3.4. Circuito representativo de uma meia-ponte. . . . .	17
3.5. Representação esquemática dos motores da plataforma. . . . .	18
3.6. Representação a 3D do sistema de direcção. . . . .	19
3.7. Baterias Zenith ZL120115HD usadas na plataforma. . . . .	21
3.8. Sonar <i>Imagenex 852</i> . . . . .	23
3.9. Sensor químico <i>Cyclops 7</i> . . . . .	24
3.10. Módulos <i>ZeeBee-PRO</i> usados no plataforma e na estação base com antena e FTDI. . . . .	26
4.1. Representação esquemática dos nós de ROS e como comunicam entre si. . . . .	27
4.2. Representação esquemática funcionamento do driver de sonar. . . . .	29
4.3. Influência do ruído no cálculo do máximo. . . . .	30
4.4. Histograma da largura do eco. . . . .	31
4.5. Fluxograma sobre o funcionamento do <i>driver</i> do barco . . . . .	32
4.6. Árvore de transformadas criada pelo nó <i>view_frames</i> do ROS. . . . .	33
4.7. Visualizador gráfico - estudo da batimetria de uma zona do rio. . . . .	34
4.8. Função de transferência do fluorómetro utilizado. . . . .	35
4.9. Representação esquemática do sensor químico. . . . .	36
4.10. Representação esquemática dos sensores de temperatura e de condutividade. . . . .	36

---

4.11. Representação esquemática do controlador do painel fotovoltaico. . . . .	37
5.1. Representação gráfica da estimação espacial obtida pelo <i>RTI</i> . . . . .	44
6.1. Estimação espacial da profundidade do rio usando o método de <i>kriging</i> , recorrendo à <i>toolbox DACE</i> do <i>Matlab</i> . . . . .	47
6.2. Estimação espacial da profundidade do rio usando o método da distância inversa, recorrendo ao <i>Matlab</i> . . . . .	48
6.3. Estimação espacial da concentração de CDOM usando o método de Kriging, recorrendo à <i>toolbox DACE</i> do <i>Matlab</i> . . . . .	48
6.4. Estimação espacial da concentração de CDOM usando o método da distância inversa, recorrendo ao <i>Matlab</i> . . . . .	49
A.1. Segmentação da imagem para extracção de um objectivo. . . . .	57
A.2. Vista de topo e esquerda dos quaiques utilizados como flutuadores. . . . .	57
A.3. Ligação dos perfis da <i>Item</i> aos quaiques. . . . .	58
A.5. Esquemático da ponte-H desenvolvida. . . . .	58
A.4. Controlador do painel fotovoltaico. . . . .	59
A.6. Ponte-H desenvolvida no LSE. . . . .	59
A.7. Teste da corrente consumida pelos motores. . . . .	60
A.8. Esquemático da placa para controlar os ganhos do sensor químico utilizado. . . . .	60
A.9. Estimação espacial usando o método de Kriging, recorrendo à <i>toolbox DACE</i> do <i>Matlab</i> (vista em perspectiva). . . . .	62

# Lista de Tabelas

3.1. Comparação de vários motores eléctricos utilizados em barcos. . . . .	15
3.2. Comparação entre diferentes tipos de baterias . . . . .	21
3.3. Especificações resumidas do sonar <i>Imagenex 852</i> . . . . .	23
6.1. Comparação entre a plataforma <i>AquaSV</i> e a plataforma <i>Kingfisher M100</i> . . .	45
6.2. Comparação entre a velocidade do motor e a corrente consumida. . . . .	46
A.1. Comparação entre a escolha dos vários expoentes na IDW. . . . .	61
A.2. Comparação entre a escolha de várias vizinhanças na IDW. . . . .	61



# 1. Introdução

Nos últimos 50 anos, o uso de embarcações autónomas surgiu num contexto militar, como é o caso da plataforma *Master Plan* [Navy, 2007]. A utilização destas embarcações telecomandadas tinha como principal objectivo a destruição de minas.

Com o crescimento tecnológico no âmbito da robótica, começaram a ser construídos robôs autónomos de monitorização ambiental. Adoptando o mesmo objectivo de um Veículo terrestre não-tripulado (UGV), foram desenvolvidos Veículos de superfície autónomos (ASV). Estes podem ser também telecomandados em casos mais específicos, como por exemplo em situações de salvamento.

As reservas naturais de água doce são um bem precioso e cada vez mais afectado devido a causas humanas. A poluição nos rios e albufeiras é cada vez mais uma preocupação em virtude de águas que são derramadas provenientes de estações de tratamento, centrais de produção de energia, ou até mesmo de produções fabris e agro-pecuária.

O uso de ASVs para monitorização ambiental permite obter informação com uma precisão e sem erros humanos associados. Os métodos de aquisição de dados são feitos de uma forma sistemática podendo através de modelos inferir dados futuros. Porém, existem outras abordagens para monitorização ambiental. Uma delas passa por espalhar garrafas estanques com sensores incluídos no seu interior [Andrew Tinka, 2012].

Em locais de lazer devem existir limites para a segura utilização dos cursos de água. Parâmetros relativos à qualidade da água são úteis para um controlo de poluentes nos recursos naturais. Estes podem provenir de Estações de Tratamento de Águas Residuais (ETAR) ou até mesmo de algas tóxicas que alteram a qualidade da água. Estes podem ser medidos com sensores químicos [Designs, 2007] ou através de outros métodos, como por exemplo passando pela utilização de satélites [Kutser, 2010]. Outros parâmetros, como a temperatura e salinidade da água, são também relevantes.

O estudo do leito de um rio justifica o uso de uma plataforma autónoma para conhecer a profundidade do rio, especialmente junto a pilares de pontes. O rio Mondego atravessa

Coimbra e foi o local escolhido para os testes dada a sua proximidade e interesse da empresa Águas do Mondego para a monitorização de condutas de água.

## 1.1. Objectivos

A principal finalidade foi construir e colocar operacional uma plataforma equipada de sensores e actuadores para a aquisição de dados ambientais. Trata-se de um veículo que foi desenhado para operar em cursos de água doce, podendo navegar em águas pouco profundas ou em albufeiras.

As missões concretizadas pelo AquaSV são essencialmente aquisição e registo de dados. Para o excelente funcionamento da plataforma, uma estação terrestre é necessária para o seu comando e determinação de objectivos.

## 1.2. Estrutura

Esta dissertação encontra-se dividida em 7 capítulos. No primeiro capítulo (1) é feita uma breve introdução aos veículos já desenvolvidos e a algumas técnicas de amostragem ou assimilação de dados ambientais. Contém também não só uma descrição geral do objectivo proposto como também algumas aplicações práticas que ao longo do trabalho justificam a construção deste tipo de plataforma.

No segundo capítulo (2) é feita uma descrição tecnológica das plataformas já desenvolvidas, dos sensores utilizados em ASVs e UAVs e das técnicas usadas para a aquisição de dados.

A componente de *hardware* e *software* é descrita em pormenor nos capítulos três (3) e quatro (4), respectivamente. Nestas secções são descritos os pormenores desde a estrutura da embarcação até aos sensores utilizados.

No quinto capítulo (5), a implementação teórico-prática do terceiro e quarto capítulo são fundidas com o uso de técnicas de interpolação para um estudo e conhecimento completo do fundo do rio.

Os testes e resultados encontram-se no sexto (6) capítulo desta dissertação. São mostrados e interpretados vários testes qualitativa e quantitativamente.

O sétimo (7) capítulo é a conclusão onde se fazem algumas considerações finais sobre o

trabalho e onde são enumerados possíveis melhoramentos e acrescentos à plataforma desenvolvida.



## 2. Revisão da Literatura

Várias empresas e universidades já desenvolveram plataformas dedicadas a estudos ambientais. Estas plataformas podem ser divididas em dois grupos: as dedicadas a águas paradas, tais como rios e albufeiras, ou as construídas para navegar no mar.

No presente capítulo são referidas plataformas semelhantes com à AquaSV, tais como a da Universidade Marítima de Shanghai [Wang et al., 2008], ou plataforma Lizhbeth [Hitz et al., 2011]. São apresentadas outras tecnologias de monitorização que complementam os ASV. Outro assunto abordado neste capítulo são os sensores utilizados nos ASV e técnicas de interpolação.

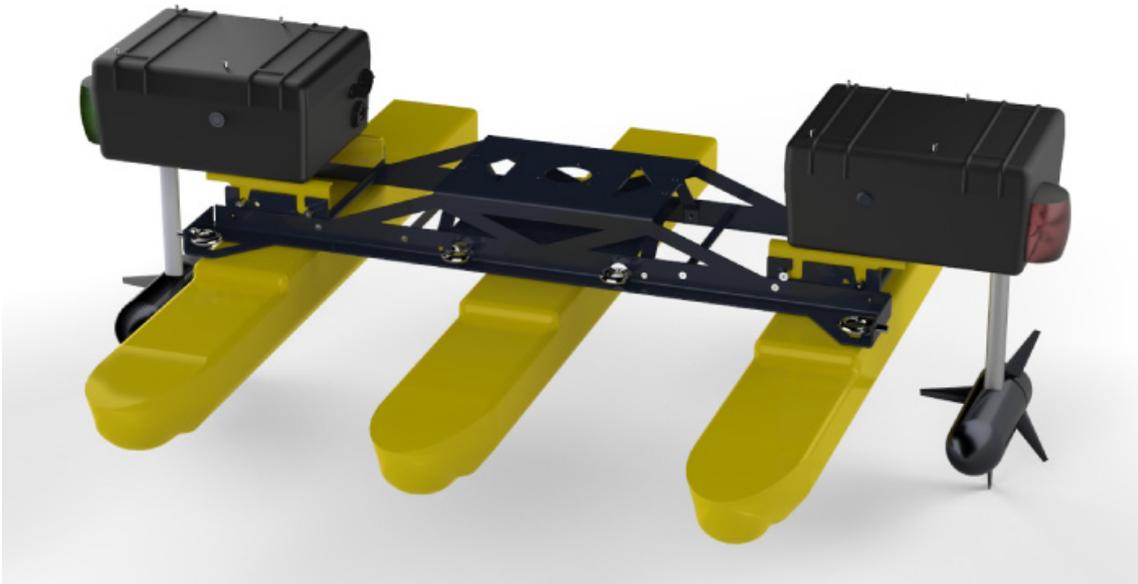
### 2.1. Plataformas

Os lagos são zonas onde diversos factores tais como a qualidade da água, poluição ou proliferação de algas são estudadas por limnólogos [Oliveira et al., 2006]. Existem estações onde são analisadas amostras de água recolhidas em vários locais de um rio alvo de estudo. Estas recolhas são efectuadas por pessoas, e normalmente são colhidas junto às margem ou em locais mais afastados, usando embarcações tripuladas. Actualmente podem ser usados barcos autónomos referidos em [Wang et al., 2009, Hänggi, 2009] equipados de sensores que analisam no local os parâmetros a conhecer.

#### 2.1.1. Casco

O uso da fibra de vidro é bastante comum em embarcações dada a sua facilidade de unir partes, reparar rombos ou compatibilidade com a água salgada. No entanto, para a sua construção é necessário alguém conhecedor das técnicas de modelagem da fibra de vidro.

A plataforma desenvolvida por Higinbotham [Higinbotham et al., 2008], foi construída em fibra de vidro. Com 5,5 m de comprimento por 1,5 m de largura, 1,8 m de altura e com 1360



**Figura 2.1.:** Plataforma *KINGFISHER*, versão 1, da *ClearpathRobotics*.

kg de massa, a estabilidade adquirida torna possível a utilização em águas agitadas.

O alumínio foi o material escolhido para os flutuadores da plataforma referida em [Wang et al., 2008]. As dimensões exteriores desta plataforma apresenta 2,7 metros de comprimento por 1,48 metros de largura. A altura dos flutuadores é de 0,36 metros, o que permite ter uma plataforma com 60 kg de massa e pode instrumentada até 60 kg.

Na Universidade do Porto foi desenvolvida uma plataforma autónoma, que já se encontra na segunda versão, em que o material usado para o casco foi Polietileno de Alta Densidade (HDPE) que além de ser impermeável e resistente às forças existentes na estrutura, consegue ser menos denso que o alumínio.

A empresa *ClearpathRobotics* [Clearpath Robotics, 2012] comercializa um barco autónomo (figura 2.1) que pode ser usado para investigação e monitorização ambiental. Este barco tem uma grande vantagem que é o seu transporte e fácil montagem.

### 2.1.2. Propulsão

Em robótica aquática, o uso de motores eléctricos é uma das formas mais comuns de controlar a posição e orientação do veículo. Das diferentes tecnologias, os motores de corrente

contínua (DC) com escovas e os motores de corrente contínua sem escovas (BLDC) são os mais utilizados.

As embarcações [Ferreira et al., 2009, Furfaro et al., 2009] usam motores BLDC e as vantagens que podem obter face a plataformas que usem motores DC com escovas reside no facto de o controlo em posição ser mais simples. Além disso, os fabricantes de motores, como a *Torqueedo* (tabela 3.1) fornecem também os *drivers*. No caso particular dos motores DC com escovas, pode ser usado um *driver* semelhante ao desenvolvido na secção 3.3.

Com o objectivo de ter uma autonomia que não seja limitada pelas baterias ou pela existência ou não de sol, foram criadas duas plataformas que aproveitam a energia das ondas ou do vento como forma de propulsão. O ASV *Wave Glider* [Manley and Willcox, 2010] da empresa *LiquidRobotics* usa os movimentos verticais das ondas e através de um mecanismo submerso consegue-se movimentar durante 142 dias, somando um total de 2500 milhas náuticas [Manley, 2008]. Este barco dispõe também de um painel fotovoltaico para fornecer energia ao resto do sistema, como o leme direccional e os sensores.

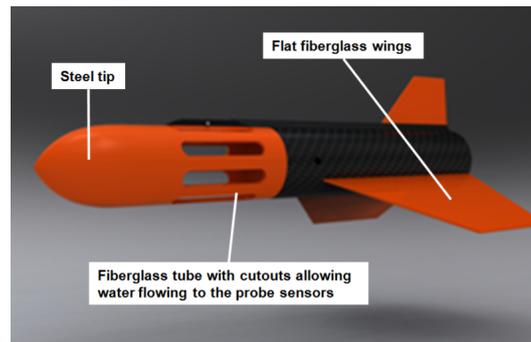
Usando o vento como meio de propulsão, a plataforma *Spirit of Annapolis* [Blevens et al., 2011] foi desenhada pela USNA e fez a viagem transatlântica, sendo esse o único objectivo do trabalho.

## 2.2. Sensores

Os sensores são ferramentas essenciais para utilizar num ASV. Estes podem ser dedicados à localização, como é o caso do GPS ou do IMU, podem ter como objectivo apenas a medição de características físicas e/ou químicas, ou podem fundir estes dois últimos grupos. Existem sensores no mercado que permitem fazer leituras 3D, tais como distâncias, e já incluem módulo inercial e GPS, permitindo assim corrigir erros de localização. Em [Burguera et al., 2010], a informação recolhida pelo sonar é fundida com a posição para correcção de trajetórias.

Os sonares são sensores mais utilizados para medir distâncias aquáticas e no mercado existem várias tecnologias. Um sonar pode ser apenas constituído por um emissor e um receptor, permitindo apenas recolher medidas numa direcção ou pode ser mecânicamente actuado no seu interior para deslocar o transdutor e com isso obter um campo de visão (FOV) máximo de 360°.

Nos finais dos anos 80, adoptando as características dos sonares sem actuador mecânico



**Figura 2.2.:** Invólucro para uma sonda usado na embarcação *Lizhbeth*.

no seu interior, foram desenvolvidas tecnologias onde são usados vários feixes em vez de apenas um. O objectivo é medir a profundidade e características do fundo aquático com taxas de refrescamento superiores aos sonares mecânicos. Cada sonar emite feixes mais estreitos, quando comparados com os de um único emissor, chegando a ter um conjunto de 120 transdutores igualmente espaçados [Blondel, 2009, Starfish, 2012].

O sonar de varrimento lateral surgiu na década de 50 para usos militares. Actualmente, este sonar é muito utilizado para obter uma imagem da zona alvo do estudo. Este sonar pode ser acoplado a um ASV, como é utilizado em [Ferreira et al., 2009]. Por vezes, é acoplado a veículos que são movidos por outras embarcações e têm como objectivo de transportar o sonar.

Para além dos estudos batimétricos e recolha de imagens aquáticas, as embarcações autónomas recolhem parâmetros relativos à água. A proliferação das algas tóxicas em oceanos ou lagos é um problema que justificou a utilização da plataforma [Hitz et al., 2011].

Sendo o aquecimento global um problema que se tem agravado nos últimos anos, é possível monitorizar emissões de gases do efeito de estufa, tais como o dióxido de carbono ou metano. A embarcação autónoma australiana CSIRO [Dunbabin and Grinham, 2010] usa sensores para mapeamento de emissões de gás através de uma sonda YSI que combina uma fácil expansão com outros sensores de um modo compacto [YSI, 2012].

À semelhança da embarcação CSIRO, o ASV *Lizhbeth* fez uso da sonda YSI 6600 incorporada num invólucro hidrodinâmico [Hitz et al., 2011] para obter parâmetros limnológicos, com baixa resistência ao arrasto (figura 2.2).

Esta é uma sonda modular que permite a utilização de uma vasta gama de sensores inteligentes que possuem memória onde guardam valores de calibração de fábrica. Como é



**Figura 2.3.:** Sonda YSI EXO2.

possível observar, esta sonda tem várias ligações de sensores, que permite ligar em qualquer das entradas e permite o acoplamento de mais sondas em *daisy chain*.

Uma desvantagem dos sensores químicos é o seu custo inicial. A sonda YSI EXO2 (figura 2.3) representa uma percentagem notável do custo final de uma plataforma autónoma. Outra desvantagem são as calibrações periódicas deste tipo de sensores, que obriga à utilização de soluções de concentrações conhecidas cujo preço é alto.

No entanto, outros métodos de análise de substâncias presentes na água são apenas possíveis em laboratório devido à inexistência de equipamentos portáteis ou devido ao preço. Em [Wang et al., 2009], a plataforma desenvolvida contém alguns reservatórios para a recolha de amostras de água para posteriormente analisar em laboratório.

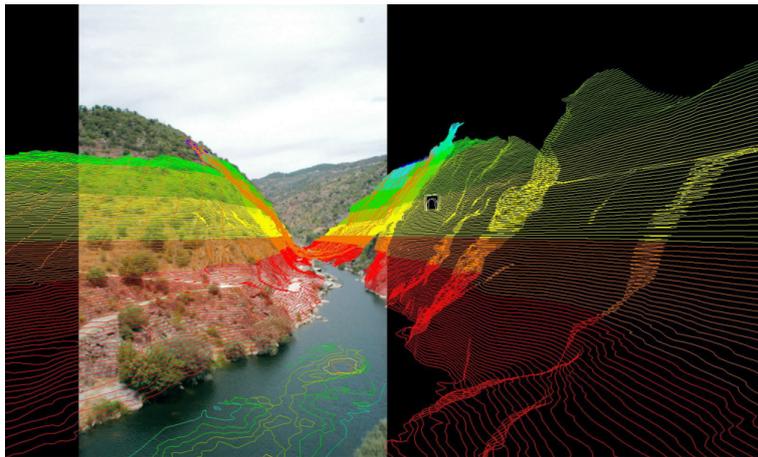
Para a navegação de um ASV incluir a detecção de obstáculos fora de água, uma das abordagens utilizada em [Ferreira et al., 2009] passa pela obtenção da fotogrametria<sup>1</sup>, gerando uma imagem onde as margens são representadas, como é possível observar na figura 2.4. Através da fotogrametria é possível corrigir erros na pose do ASV ou evitar zonas assoreadas.

Outra abordagem pode passar pela utilização de um *Light Detection And Ranging* (LIDAR) ou um LASER para exterior como o *Hokuyo URG* usado em na plataforma australiana [Dunbabin and Grinham, 2010]. Neste caso particular, o sensor foi colocado com um ângulo de 15° relativamente a uma recta perpendicular ao rio, e permite assim um maior campo de visão.

Técnicas de visão por computador, envolvendo processamento de imagem através de segmentação, foram usadas no lago *Wivenhoe* pelo ASV [Dunbabin et al., 2009] com o objectivo

---

<sup>1</sup>Medição de distâncias ou de dimensões através de fotografias.



**Figura 2.4.:** Fotogrametria do rio Tua [Ferreira et al., 2009].

de evitar colisões com pequenas plataformas flutuantes com sensores (figura A.1). Outra utilização das técnicas de visão é na protecção contra furtos [Wang et al., 2009].

## 2.3. Interpolação

A interpolação de campo de variáveis (capítulo 5) consiste em encontrar o valor de todos os pontos de um conjunto  $\Phi$ , conhecendo apenas um sub-conjunto discreto de  $\Phi$ . Como é expectável num processo de interpolação, irá sempre existir um erro associado à interpolação nos pontos não conhecidos.

O método de interpolação de kriging é actualmente o mais utilizado, tendo substituído o método clássico da distância inversa (IDW). Este método foi utilizado em [Basu and Maczkowska, 2001] para calcular a elevação num dado ponto, obtendo uma média pesada dos pontos vizinhos que é inversamente proporcional à distância associada (equação 2.1).

$$F(x, y) = \sum_{i=1}^N w_i f(x_i, y_i) = \frac{\sum_{i=1}^N f(x_i, y_i) / (d_i)^p}{\sum_{i=1}^N 1 / (d_i)^p} \quad (2.1)$$

onde

$(x, y)$  é o ponto a estimar

$d$  é a distância do ponto  $(x, y)$  a um ponto conhecido

$p$  é o parâmetro que define o expoente da distância

$N$  número total de amostras recolhidas

O método de interpolação de kriging não só é usado para a reconstrução dos perfis de elevação, como é mostrado em [Hofierka and Cebecauer, 2007], mas também para interpolação de parâmetros em lagos, como é mostrado em [Kožar and JeriÄŸeviü, 2011, Alvarez et al., 2012].

Um dos problemas que afecta o método de kriging é o tamanho do conjunto de dados de entrada. A predição do valor a ser interpolado implica conhecer todos os pesos relativos a cada ponto conhecido. Sendo assim, torna-se um problema de complexidade  $O(N^2)$ .

Em [Zhuo et al., 2011], são apresentadas técnicas para diminuir o tempo de computação baseadas no processamento paralelo usando vários núcleos de processamento por nó. Aplicando o método descrito a um conjunto de dados sintetizado constituído por 8000 pontos, conseguiu-se reduzir o tempo de cálculo de 29,3 segundos para 4,2 segundos.

A amostragem adaptativa é um assunto que se aplica a qualquer plataforma de monitorização ambiental. Este processo tem como objectivo a minimização da variância do erro de interpolação associado [Zhu et al., 2010].

Em conjuntos de dados onde possam ter ocorrido fenómenos naturais, tais como sismos ou falhas geológicas, o modelo do variograma obtido pode não ser globalmente adequado. O método utilizado por [Wu and Liu, 2011] é baseado numa variante do kriging, o kriging localmente adaptado. Este método permite adaptar localmente o variograma e com isso obter variâncias na ordem dos centímetros.



## 3. Plataforma

Com a finalidade de recolher dados ambientais em albufeiras ou num leito de um rio foi desenvolvido um barco com o casco em forma de catamarã. A escolha deste tipo de casco deve-se ao facto de apresentar uma maior estabilidade às inclinações laterais e com isso consegue-se alcançar maior precisão nas medidas recolhidas durante uma missão [Hank Lobe, 1997, Hennigan and Hennigan, 2006].

Para a locomoção do catamarã são usados dois motores eléctricos *Yamaha* M12 e um actuador linear que orienta os motores de uma forma autónoma segundo uma topologia de condução de *Ackermann*. Os propulsores podem ser actuados tanto de forma diferencial como no modo de *Ackermann*. No modo diferencial, ambos motores têm a mesma direcção e sentido e apenas são alteradas as velocidades dos motores. Se o modo de condução for o de *Ackermann*, as velocidades dos motores são definas em ambos motores com a mesma intensidade e sentido. Porém, neste modo o actuador linear tem como objectivo direccionar os motores de acordo com o raio de curvatura pretendido.

### 3.1. Estrutura

Um aspecto fundamental na construção do barco é a corrosão das partes metálicas causada pela água. Para superar este problema foram apenas usados materiais em alumínio anodizado, aço galvanizado e aço inoxidável.

Para o barco ficar com a forma de um catamarã, dois flutuadores foram usados. Com base a ter alguma facilidade na montagem da plataforma, optou-se por caiaques de plástico, nomeadamente dois *Bic Ouassou* (figura A.2) que podem ser adquiridos numa superfície comercial, que suportam uma carga máxima de 110 kg.

Posteriormente foram ligados a uma simples estrutura em alumínio anodizado por algumas placas de aço galvanizado (figura A.3). Relativamente ao casco, também houve a hipótese



**Figura 3.1.:** Imagem da plataforma AquaSV.

de ter dois flutuadores em fibra de vidro, mas a opção não prevaleceu devido à fragilidade do material e também devido ao preço.

Um dos primeiros passos foi desenhar a estrutura do barco usando um programa de CAD para ter uma melhor percepção dos materiais e distâncias a usar. Optou-se por desenhar a três dimensões para posteriormente ser usado na interface gráfica (secção 4.3).

Os materiais usados na estrutura foram essencialmente perfis de alumínio da *Item* que permitem uma grande flexibilidade na construção do robô. O resultado final é apresentado na figura 3.2.

## 3.2. Propulsores

Na embarcação autónoma desenvolvida foram usados dois motores de corrente contínua (DC) com escovas *Yamaha* M12 [Yamaha, 2012] cuja montagem se efectua na popa. Estes motores têm vantagens na sua utilização e adaptação à plataforma dado que foram construídos já com o suporte de fácil aperto.

Para além dos motores utilizados, foram pesquisados outros modelos de motores. Na tabela 3.1 encontram-se motores que foram pesquisados e algumas características dos mesmos.

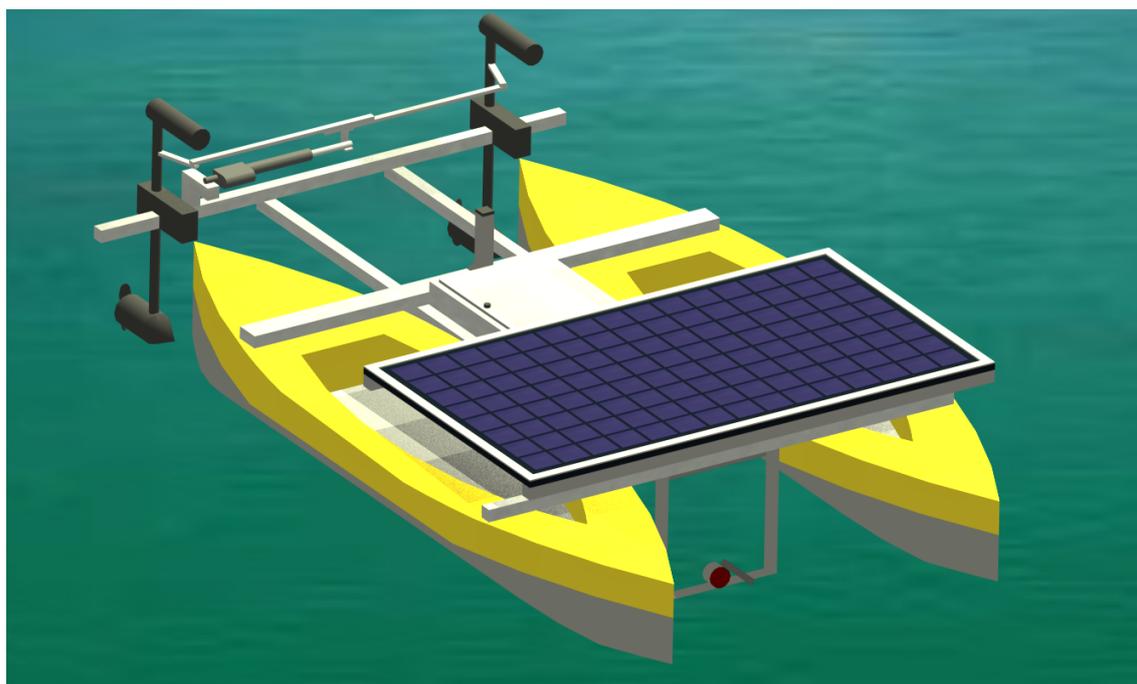


Figura 3.2.: Imagem renderizada a 3D da plataforma.

Marca	Modelo	Tensão Nominal (V)	Potência (W)	Propulsão (kgf)
<i>Torqueedo</i>	<i>Ultralight 403</i>	29,6	745	15
<i>Tecnadyne</i>	560	24-330 (típico é 150)	745	17
<b>Yamaha</b>	<b>M12</b>	<b>12</b>	<b>360</b>	<b>13,6</b>
<i>MinnKota</i>	<i>Engine Mount 55</i>	12	300	24,95

Tabela 3.1.: Comparação de vários motores eléctricos utilizados em barcos.

As especificações do modelo M12 da *Yamaha* (figura 3.3) ditaram a sua escolha dado que a tensão nominal é adequada à tensão das baterias, a propulsão é suficiente e o seu acoplamento ao barco é simples.

O correto posicionamento e orientação dos motores tem uma elevada relevância para executar trajectórias precisas. Um dos primeiros ensaios da plataforma foi o controlo manual da mesma, sendo esta tripulada. Este teste foi especialmente útil para ter uma ideia de como controlar o barco e qual o seu comportamento quando sujeito a várias manobras.

Para fixar os motores utilizou-se uma barra de perfil igual às usadas na estrutura do barco.



Figura 3.3.: Motor utilizado como propulsor.

### 3.3. Ponte H - LSE

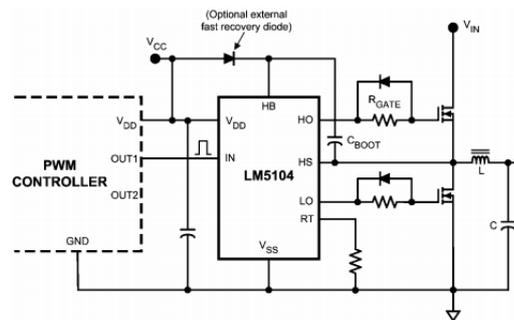
Os actuadores do barco são constituídos por motores DC com escovas, onde o princípio é apresentado em [Microchip Technology Inc, 2004]. Este tipo de motores pode ser controlado em velocidade variando a tensão de alimentação que pode ser alcançada através da introdução de um dispositivo linear no circuito ou aplicando uma técnica chamada de Modulação por Largura de Impulsos (PWM).

Actualmente tem-se vindo a trocar a antiga electrónica linear por electrónica comutada, verificando-se não só no controlo de motores DC, como também na iluminação a LED ou até mesmo em amplificadores áudio. Deste modo é possível poupar energia que o dispositivo linear necessita de dissipar. Um breve exemplo é o Circuito Integrado 7805 [Semiconductor, 2011] que produz uma tensão de saída de 5 V. Para alimentar uma carga de 1 k $\Omega$ , o dispositivo tem de fornecer 25 mW de potência. Se a tensão de entrada no IC 7805 for de 12 V, este necessita de ter uma queda de tensão de 7 V que implica dissipar sob a efeito de Joule 35 mW. Em contra-partida, usando PWM apenas seria dissipada a potência que seria igual à corrente na carga multiplicada pelo diferencial de tensão no *Field Effect Transistor* (FET).

Como já foi referido anteriormente, os motores que asseguram a locomoção do veículo necessitam de bastante corrente para funcionar, sendo que as especificações do fabricante apontam

para um valor máximo de 30 A. Como tal, foi desenvolvida no LSE uma PCB para controlar a velocidade e sentido do motor. O controlo em velocidade é apenas em malha aberta devido à inexistência de sensores acoplados no motor que permitam fornecer a posição do rotor.

Para o desenvolvimento de uma PCB com a finalidade desejada foram usados MOSFET do tipo N, com a finalidade de ter uma resistência de *Drain - Source* ( $R_{ds}$ ) muito reduzida. Porém, o uso de MOSFETs de tipo N, para comutação entre a carga e o terminal positivo da bateria, obriga a que o circuito consiga colocar no terminal da *Gate* uma tensão não existente no circuito. Para tal foram usados *drivers* de MOSFETs em que a sua função é única e exclusivamente fornecer tensões nas *gate* de todos os MOSFETs apropriadas ao bom funcionamento da ponte H. Estes *drivers* de fazer uso de um circuito de *Bootstrap* como é indicado na *application note* referida em [Semiconductor, 2008] e na figura 3.4.



**Figura 3.4.:** Circuito representativo de uma meia-ponte.

Uma funcionalidade adicionada na placa foi a possibilidade de medir a corrente consumida pelos motores. Para tal, foi adicionado um circuito amplificador, mais concretamente um amplificador operacional configurado na montagem não-inversora, com a finalidade de medir a queda de tensão entre o terminal de alimentação negativo e a *source* dos MOSFETs 2 e 4 (figura A.5), tirando partido da resistência de uma pista de cobre. Esta pista de cobre foi posteriormente medida com um ohmímetro no modo quatro fios e apresentava uma resistência de 0,01  $\Omega$ .

Para a concepção do protótipo da ponte-H foi usado um programa de desenho de PCB. Foram feitas algumas versões da placa *LSE H-Bridge* conseguindo por fim chegar à versão 2.1. Na figura 3.5 está representada a integração dos propulsores no barco.

As figuras A.5 e A.6 representam o esquemático de uma dessas placas.

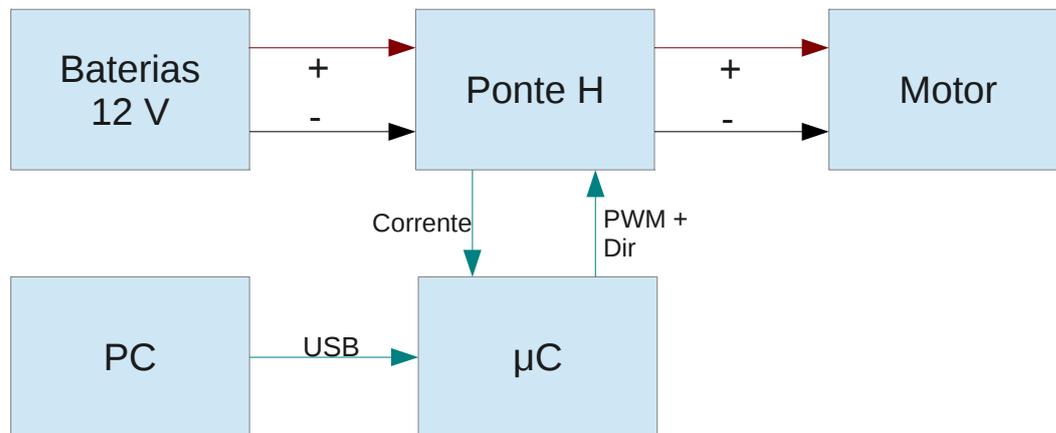


Figura 3.5.: Representação esquemática dos motores da plataforma.

### 3.4. Controlador do painel fotovoltaico

Na plataforma AquaSV foi desenvolvida uma estrutura capaz de suportar um painel fotovoltaico. Neste caso particular foi escolhido um painel de 240 W, construído com tecnologia de silício policristalino, que é ligado a uma placa desenvolvida no LSE em que o principal objectivo é manter o painel solar polarizado a uma determinada tensão de operação.

Após uma breve revisão da literatura sobre o funcionamento de um *Maximum Power Point Tracking* (MPPT), o essencial nesta placa é ser capaz através de ter um microcontrolador gerar um sinal de PWM e actuar num conversor comutado com a topologia *Buck*. Com recurso às especificações técnicas [MPrime, 2011] é possível observar que o ponto de operação para a máxima potência é aproximadamente 29 V.

Inicialmente foi adoptada uma abordagem em que o sinal de PWM era apenas a saída de um comparador. No entanto desta forma não era possível obter o rendimento máximo do painel, porque a queda de tensão nos terminais do painel fotovoltaico não era controlada.

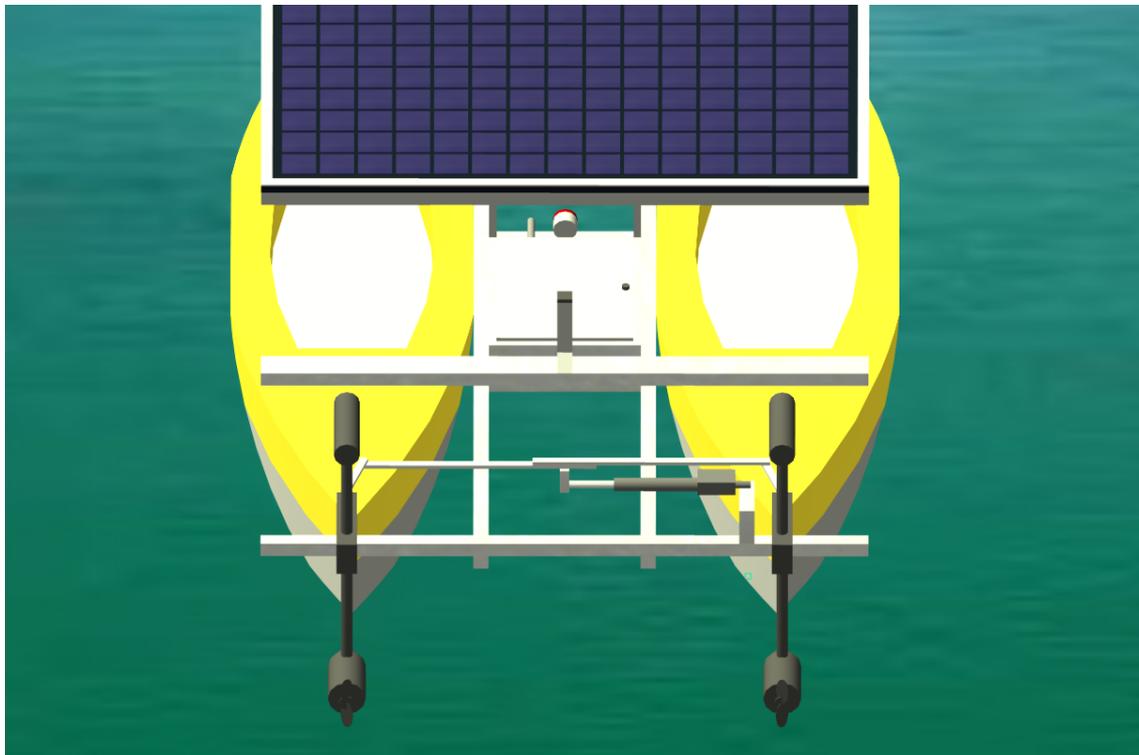
Posteriormente foi implementado um circuito que dá informação ao microcontrolador da tensão a que o painel fotovoltaico está polarizado. Com esta informação, o microcontrolador pode ajustar o PWM de forma a que a tensão no painel seja igual à tensão de máxima potência. Na figura A.4 é possível ver o *hardware* que foi desenvolvido.

Outra abordagem que poderia ter sido adoptada passava pela utilização de um sensor de

corrente. Este método consiste em calcular a potência fornecida pelo painel solar e variar o sinal de PWM de modo a que a esta seja máxima.

## 3.5. Direccionador

Como foi referido no início deste capítulo, a plataforma AquaSV tem condução diferencial e de *Ackermann*. Para que ser possível direccionar os motores com o ângulo pretendido foi colocado um actuador linear no barco. Trata-se de um actuador constituído por um motor DC, com realimentação de posição através de um potenciómetro e está montado entre o chassis do barco e a barra de direcção. Na figura 3.6 é possível observar a estrutura de direcionamento dos propulsores.



**Figura 3.6.:** Representação a 3D do sistema de direcção.

Para o controlo da orientação dos motores, a placa *Arduino Mega 1280* foi programada para receber uma referência e gerar um sinal de controlo numa das pontes-H referidas na secção

3.3. Em [Fraga, 2012] pode ser encontrada informação relativa aos cálculos dos ângulos e como calcular a referência a enviar para o sistema de controlo.

## 3.6. Baterias

A principal fonte de energia do barco são baterias de chumbo. Este tipo de acumuladores de energia eléctrica pode variar não só quanto ao tipo de electrólito, ao tipo de descarga para a qual a bateria foi concebida, mas também quanto à necessidade ou não de manutenção periódica.

Para a utilização de baterias numa embarcação [Higinbotham et al., 2008], e partindo do pressuposto que não pode haver derrames de electrólito nas caixas e a sua utilização será no mínimo de algumas horas, é prudente usar uma bateria *deep cycle*. Este tipo de bateria consegue alcançar um tempo de descarga maior que as baterias usadas no arranque de motores de automóveis. Também se deve optar por uma bateria com a tecnologia *Absorbed Glass Mat* (AGM) e *Valve Regulated Lead-Acid* (VLRA) dado que não necessita de estar na vertical e não derrama electrólito.

No mercado existem várias tecnologias de baterias dedicadas a vários tipos de aplicações. Actualmente existe baterias de Iões de Lítio (Li-ion) que têm uma elevada densidade energética quando comparadas com as tecnologias mais antigas nomeadamente as Níquel-Cádmio (NiCd), Chumbo-Ácido (Pb) ou até mesmo as Níquel-Hidreto metálico (NiMH). No entanto as baterias de Lítio são muito mais caras que as baterias de chumbo.

Nesta plataforma desenvolvida foram usadas quatro baterias de Gel *Zenith ZL120115HD* (figura 3.7) com a capacidade de 18 Ah para 20 h. Pela informação presente na ficha técnica estas baterias permitem ter os motores ligados na terceira velocidade por um período de uma hora.

O custo das baterias foi o principal elemento que decidiu a escolha. Depois de uma breve pesquisa do mercado verificou-se que esta era uma das baterias com uma maior relação capacidade por preço (Ah/€) e capacidade por massa (Ah/kg). Outro elemento crucial na escolha foram as dimensões que estas baterias apresentam. Com estas características é possível obter uma maior facilidade de manuseamento. Na tabela 3.2 é apresentado uma comparação de algumas baterias pesquisadas.



**Figura 3.7.:** Baterias Zenith ZL120115HD usadas na plataforma.

Marca /Modelo	Capacidade (Ah)	Massa (kg)	Preço (€)	Relação Ah/€	Relação Ah/kg
<i>Exide</i> ES450	40	15	233,82	0,17	2,67
<i>Exide</i> ES650	56	21	276,14	0,20	2,67
<i>Bosch</i> DMC5.5	75	30,4	353,50	0,21	2,47
<b>Zenith</b> ZL120115	<b>18</b>	<b>6,67</b>	<b>51,66</b>	<b>0,35</b>	<b>2,70</b>
<i>Shimatsu</i>	90	27	238,62	0,38	3,33

**Tabela 3.2.:** Comparação entre diferentes tipos de baterias

## 3.7. Compartimentos de materiais

Todo o Veículo de Monitorização Autónoma necessita de compartimentos para guardar os dispositivos de potência, os de controlo e os de comunicação. Neste caso particular foram usadas duas caixas metálicas para electrónica aparafusadas aos perfis de alumínio. Para garantir a estanquidade foram usados buçins para passar cabos e as caixas têm vedantes em borracha na zona de acesso ao seu interior.

A caixa de controlo tem capacidade para ter um computador portátil *Netbook*, um controlador de sonar, um concentrador USB, um módulo *ZigBee-PRO* de longo alcance e um Sistema de Posicionamento Global (GPS), entre outros dispositivos e cabos.

Na caixa de potência está a principal fonte de energia, distribuída por quatro baterias de 18 Ah cada, ligadas em paralelo, tendo assim disponível uma tensão de 12 V.

Outro conjunto de dispositivos fundamentais ao funcionamento do barco são os *drivers* do actuador linear e dos propulsores. Estes últimos foram projectados para operar com correntes contínuas até 30 A. Para correntes tão elevadas acumulam-se grandes quantidades de energia

térmica, que são dissipadas através de um acoplamento à caixa, funcionando esta como um dissipador.

Para além das baterias, encontra-se também nesta caixa o controlador do painel solar que tem como objectivo carregar as baterias e prolongar a autonomia do barco.

## 3.8. Sensores

Na plataforma desenvolvida foi adaptado um vasto leque de sensores com a finalidade de localizar o barco em relação a um ponto base ou para efectuar medições aquáticas. Neste capítulo são descritas as características dos sensores para medições de parâmetros hidrográficos.

Os sensores de localização têm um papel fundamental dado que possibilitam fornecer uma pose (posição e orientação) ao barco para posteriormente associar as medições ao referencial base. São usados dois GPS e um Módulo Inercial com a finalidade de obter a pose da plataforma. Para um maior detalhe sobre as técnicas de localização usadas, ver [Fraga, 2012].

### 3.8.1. *Imagenex 852*

Um dos objectivos desta plataforma é fazer estudos batimétricos. Para tal foi usado o sonar *Imagenex 852* (figura 3.8) que permite a medição de distâncias subaquáticas. Com este sensor é possível obter dados a uma profundidade de 0,15 m a 50 m, num ângulo de 360°. A frequência do emissor pode também ser ajustada para 675 kHz ou para 850 kHz consoante a distância a medir. Em águas pouco profundas<sup>1</sup>, a frequência de 850 kHz é usada [Blondel, 2009] para ter uma melhor resolução.

Para a medição da profundidade utilizou-se um sonar com o feixe ultrassónico direccionável para poder ler num ângulo de 90 graus o fundo do rio. Esse sensor foi fixo ao barco num local de modo a ficar submerso e com o feixe a 45° do com o fundo do rio, de modo a detectar obstáculos.

O sonar utilizado foi o modelo 852 da *Imagenex* (tabela 3.3) já existente no laboratório e pode ser ligado ao computador por uma porta série utilizando um conversor USB - RS232. Os

---

<sup>1</sup>Distâncias inferiores a 20m.



**Figura 3.8.:** Sonar *Imagenex 852*.

fabricantes deste sonar disponibilizam uma interface que foi especialmente útil para ajustar alguns parâmetros e assim poder configurar o transdutor presente no interior do sonar.

Especificações de Hardware	
Frequência	675 / 850 kHz
Largura do feixe do transdutor	$2,5^{\circ} \times 22^{\circ}$
Resolução de alcance	20 mm
Alcance mínimo detectável	150 mm
Alcance máximo detectável	50 m
Interface	RS-232
Alimentação	22 - 30 VDC (2,5 W)

**Tabela 3.3.:** Especificações resumidas do sonar *Imagenex 852*.

Uma mensagem recebida pelo sonar pode conter até 512 bytes dos quais 500 bytes são dados que representam a potência do eco a uma determinada distância. O máximo alcance é estipulado aquando o envio do comando de controlo do sonar. Logo, a seguir a cada comando enviado, o transdutor dentro do sonar é posicionado num ângulo dado pela inequação 3.1. A cada leitura de sonar é retornada pela porta série um vector de 500 valores que corresponde a uma dada orientação.

$$\theta_{min} \leq \theta_{son} \leq \theta_{max} \quad (3.1)$$

onde

$\theta_{min}$  ângulo mínimo

$\theta_{son}$  ângulo actual

$\theta_{max}$  ângulo máximo

### 3.8.2. Sensor químico: *cyclops 7*

Nas proximidades do rio Mondego existem ETARs que fazem descargas de águas tratadas para o seu leito. Por esse motivo é sensato instalar um sensor na embarcação que seja sensível aos poluentes que não tenham sido totalmente eliminados dessas águas.

O sensor químico *Cyclops 7* [Designs, 2007] (figura 3.9) foi calibrado para detectar matéria orgânica dissolvida na água, ou seja, é do tipo *Colored Dissolved Organic Matter* (CDOM). Este sensor emite um feixe de luz ultravioleta que posteriormente é detectado por um receptor. O princípio de funcionamento é semelhante ao referido em [Stedmon et al., 2000].

Foi instalado no barco de forma a ficar submerso e foi colocado dentro de um protector [Designs, 2000] para evitar danificar o sensor caso embatesse no fundo do rio ou em algum obstáculo.



Figura 3.9.: Sensor químico *Cyclops 7*.

Este sensor é posteriormente ligado a um ADC do Arduino para poder registar as medições juntamente com a posição onde foram recolhidas as amostras. A alimentação é fornecida através das baterias e o terminal da saída analógica é directamente ligado ao conversor analógico-digital (ADC), visto que as tensões estão dentro dos parâmetros de bom funcionamento do sistema<sup>2</sup>.

Existem dois fios adicionais que têm como função de ajustar o ganho de forma a que as medidas possam ser obtidas com maior resolução. Estes dois ganhos são 10 e 100 e consegue-

<sup>2</sup>O ADC do *Arduino* admite um gama de tensões de 0 V a 5 V nas suas entradas.

se definir cada um ligando o fio correspondente ao terminal negativo da alimentação. Para ajustar o ganho automaticamente foi desenvolvida uma PCB no LSE que tem como principal função colocar os fios de ajuste do ganho ao mesmo potencial do terminal negativo. Para tal foram utilizados dois MOSFETs que por sua vez são controlados pelo Arduino.

### 3.8.3. Sensor de condutividade e temperatura

É interessante que uma plataforma de monitorização ambiental seja capaz de obter dados relativos à qualidade da água. O uso de sondas *Conductivity, Temperature and Depth*(CTD) é frequente para extrair valores de salinidade e densidade.

O parâmetro da condutividade é indicador da salinidade da água pois a presença de sais faz diminuir a resistência à corrente eléctrica e através desse efeito é possível extrair a concentração de sais. Para a medição da temperatura foram acoplados dois sensores de temperatura LM35 a uma barra de alumínio. Foi também colocada uma PCB em forma de dois eléctrodos para medição da condutividade.

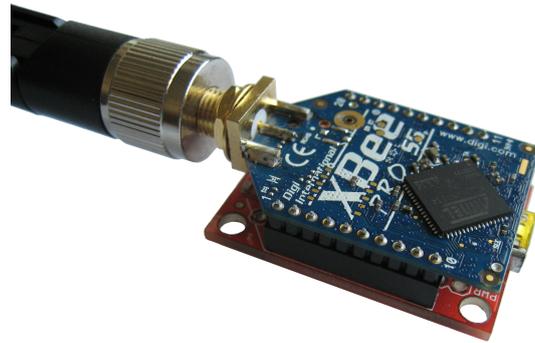
Relativamente à aquisição de valores, foi necessário construir uma PCB com circuito de amplificação para os sensores de temperatura. A medição da condutividade foi efectuada em DC devido à elevada complexidade do circuito para medir em AC a resistência da água. Em [Crescentini et al., 2012] é apresentado um método de medir a condutividade da água de uma forma eficiente, e onde a impedância é medida a quatro fios.

## 3.9. Comunicação

A comunicação da plataforma AquaSV com a base terrestre é crucial para poder ter um controlo da embarcação e para visualizar os dados. Deste modo é possível comandar o barco no modo de controlo remoto, ou enviar um comando para o barco ir para um determinado ponto no mapa. Para este controlo ser possível, a interface gráfica *rviz* foi utilizada e o assunto é apresentado com mais detalhe na secção 4.3.

Outra utilização da comunicação com a base é na utilização do GPS. Como é referido em [Fraga, 2012], o barco necessita de utilizar a biblioteca *Real Time Kinematic* (RTK) para ter uma maior precisão na sua posição. Desse modo é imperativo que exista uma comunicação contínua entre o barco e a estação terrestre.

Com o objectivo de ter uma plataforma com um raio de alcance na ordem de quilómetros, optou-se por usar dois módulos *ZeeBee-PRO* 868 (figura 3.10) que são comercializados pela *Digi*. Estes módulos operam a uma frequência de 868 MHz e têm um raio de alcance de 80 km em linha de vista e 550 m com obstáculos, ou seja, num meio urbano como é referido nas especificações técnicas.



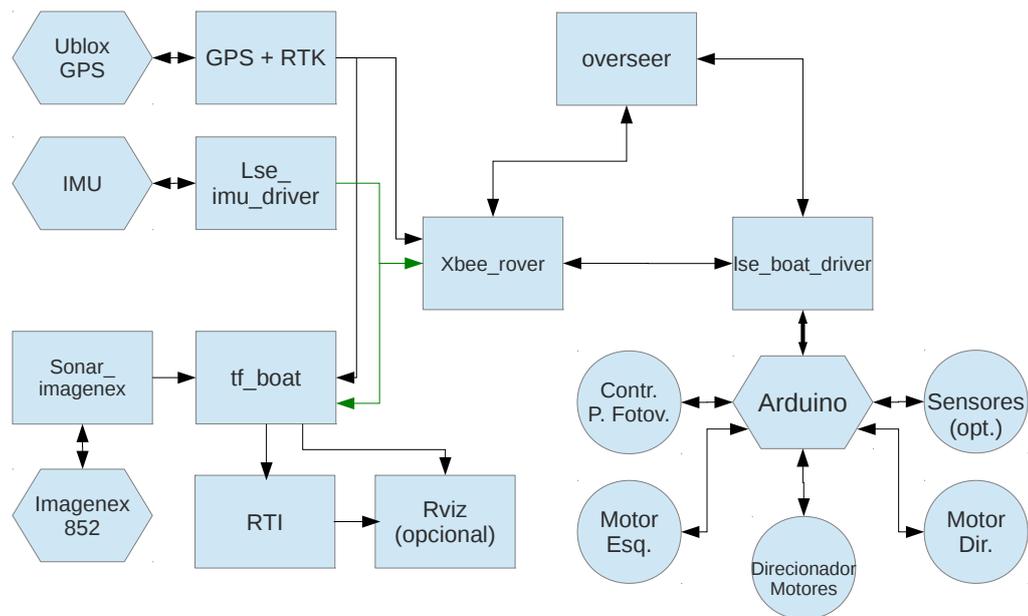
**Figura 3.10.:** Módulos *ZeeBee-PRO* usados no plataforma e na estação base com antena e FTDI.

O módulo *ZeeBee-PRO* 868 tem um conector *Reverse polarity SubMiniature version A* (RPSMA) que o permite ligar através de um cabo a uma antena monopolo com 21 cm. Este tipo de antenas tem vantagens no barco porque o padrão de radiação é omnidirecional no plano XY do barco. Esta característica é imprescindível porque se trata de um veículo autónomo onde a sua orientação poderá ser de  $[-\pi : \pi]$  rad.

Um dos problemas foi a utilização da mesma linha para a comunicação com a biblioteca RTK e envio ou recepção de dados com o barco. Para tal, foi desenvolvido um protocolo para reencaminhar as mensagens para o seu destino correto. Para mais detalhes sobre este protocolo ver [Fraga, 2012].

## 4. Software

Como base do *software* do barco foi usado ROS. Nesta dissertação foram descritos os *drivers* desenvolvidos e na figura 4.1 é apresentado um esquema dos nós de ROS e como eles comunicam entre si. Alguns desses nós estão descritos em mais pormenor em [Fraga, 2012].



**Figura 4.1.:** Representação esquemática dos nós de ROS e como comunicam entre si.

## 4.1. ROS: Driver de sonar *imagenex 852*

No desenvolvimento da plataforma foi dedicado especial interesse no reconhecimento do fundo do rio. Foi proposto fazer um estudo batimétrico do fundo do rio, em especial numa zona próximo da empresa Águas do Mondego.

Para ser possível usar o sonar foi criado um *driver* de ROS para fazer a interface com o sonar. A cada mensagem recebida o driver publica uma mensagem de ROS do tipo *Range.msg*<sup>1</sup>, que poderá ser lida por outro processo (*ROS node*) e que fica gravada no *bag file*<sup>2</sup>.

Como foi já referido anteriormente, uma mensagem que contém *N bytes*, o *N-ésimo byte* recebido corresponde ao eco referente a uma distância medida pelo sonar.

Cada vez que é recebida uma mensagem de sonar, um algoritmo desenvolvido faz o reconhecimento de obstáculos detectados pelo sonar. Este procedimento pode ser feito em tempo real ou depois do teste. A vantagem de ter este algoritmo a processar em tempo real é apenas para identificar possíveis zonas que a plataforma AquaSV deve evitar, dado que no rio podem existir obstáculos que impeçam o barco de navegar tais como bancos de areia, rochas ou troncos.

Na figura 4.2 pode ser observado o fluxograma que explicita funcionamento do driver.

### 4.1.1. Algoritmo considerando o máximo eco

O máximo eco representa o ponto onde possivelmente poderá estar um obstáculo. Este método consiste apenas em calcular o índice máximo de um vector de *n* elementos. Para o cálculo do valor máximo, uma filtragem de fase nula é efectuada à priori para evitar ruído causado por diferentes tipos de superfícies e para suavizar a curva de modo a evitar situações como a que é apresentada figura 4.3.

---

<sup>1</sup>Mensagem ROS com informação relativa ao sonar.

<sup>2</sup>Ficheiro onde são gravados tópicos publicados.

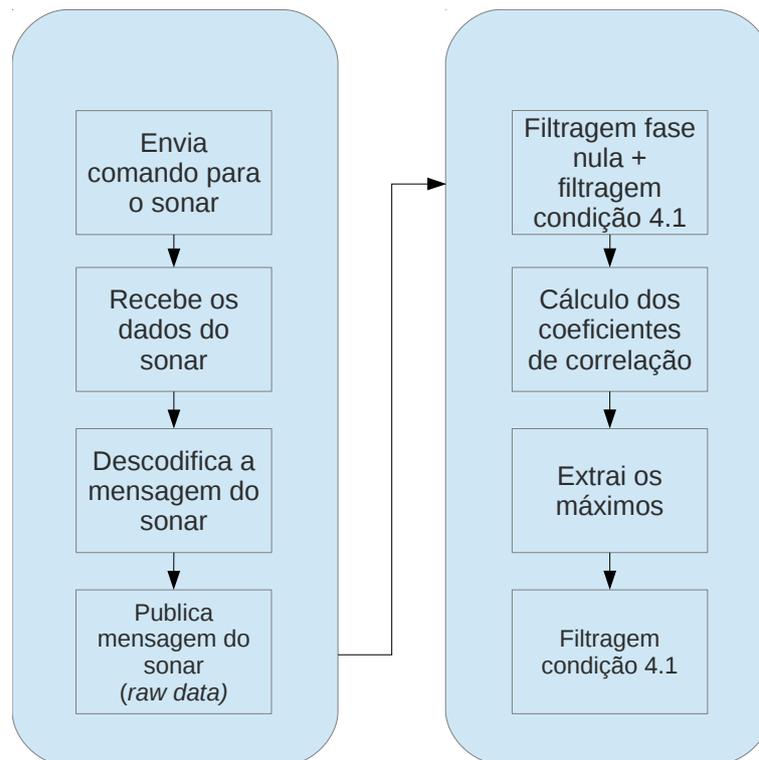


Figura 4.2.: Representação esquemática funcionamento do driver de sonar.

#### 4.1.2. Detecção de obstáculos por correspondência de amostra

O método para estudar a batimetria usado consiste em primeiro encontrar um modelo de um obstáculo. Para tal foi recorrido à ferramenta matemática MATLAB para recolher vários parâmetros do eco retornado pelo sonar. Posteriormente foi analisada a zona relativamente à presença de um obstáculo e de seguida feito um histograma com a largura de cada eco, cuja finalidade é aproximar por uma função gaussiana.

O histograma 4.4 mostra a largura do eco correspondente a um obstáculo. É possível verificar que o valor com maior ocorrência é 15, mas no entanto é notório que a forma de um eco pode variar.

No decorrer do programa, cada leitura de sonar é filtrada, de seguida é calculado o coeficiente de correlação entre a amostra correspondente e o modelo de obstáculo anteriormente obtido. Por fim são encontrados os máximos que verifiquem a condição 4.1.

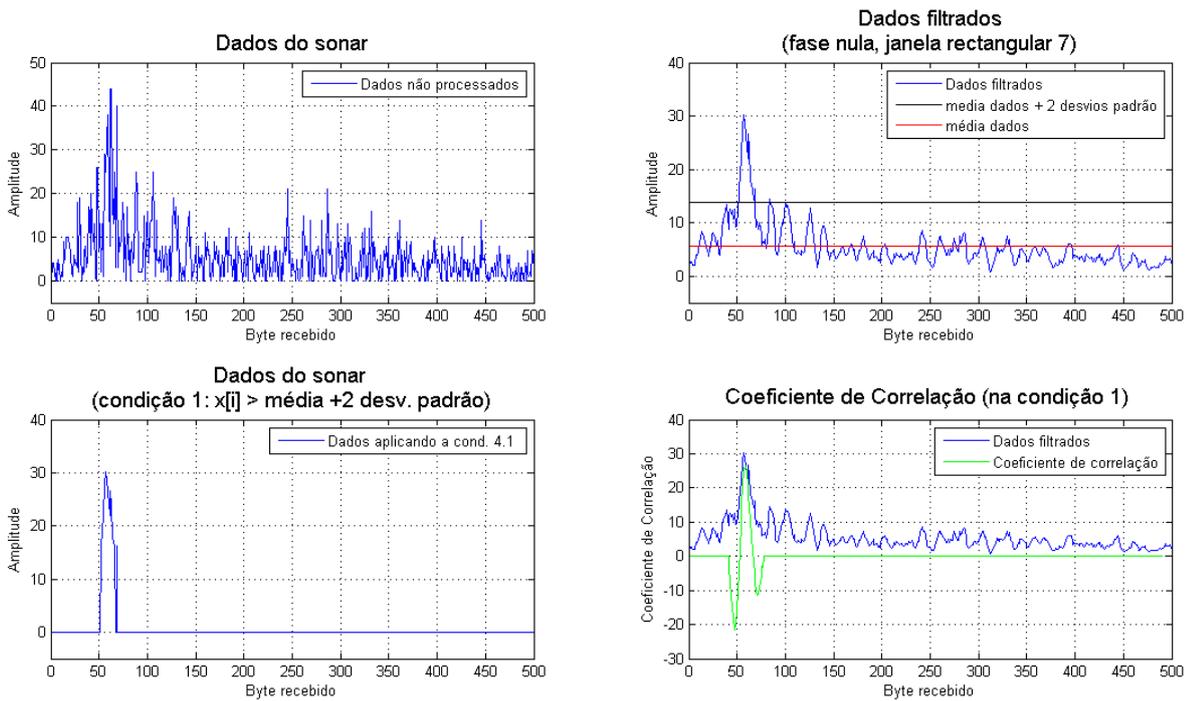


Figura 4.3.: Influência do ruído no cálculo do máximo.

$$x_i \geq \bar{x} + n\sigma \tag{4.1}$$

onde

$\bar{x}$  média

$n$  nr. desvios padrão

$\sigma$  desvio padrão

Por fim, este nó de ROS envia os pontos relativamente ao referencial do sonar. Estes são lidos noutra processo, o `tf_broadcast`, que está contido no `package tf_boat`, que conhece a transformação entre o sonar e a estação base. É então no processo `tf_broadcast` que os pontos que representam obstáculos são usados para a navegação e/ou batimetria.

Estes pontos podem ser enviados para o visualizador gráfico 4.3 onde se pode ter uma noção a 3D da batimetria do rio.

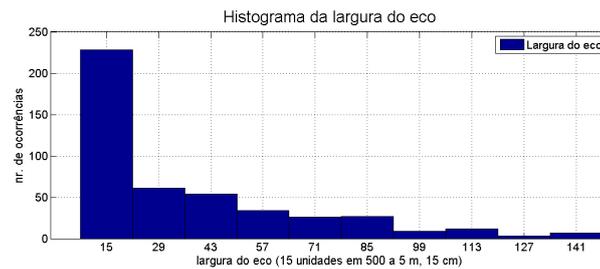


Figura 4.4.: Histograma da largura do eco.

## 4.2. ROS: Driver da plataforma

Na arquitectura ROS, o *driver* do robô é fundamental ao seu funcionamento e operação. Este *driver* cria uma camada de abstracção para o *software* que tem como objectivo fornecer a odometria e receber comandos de velocidade para controlar a plataforma.

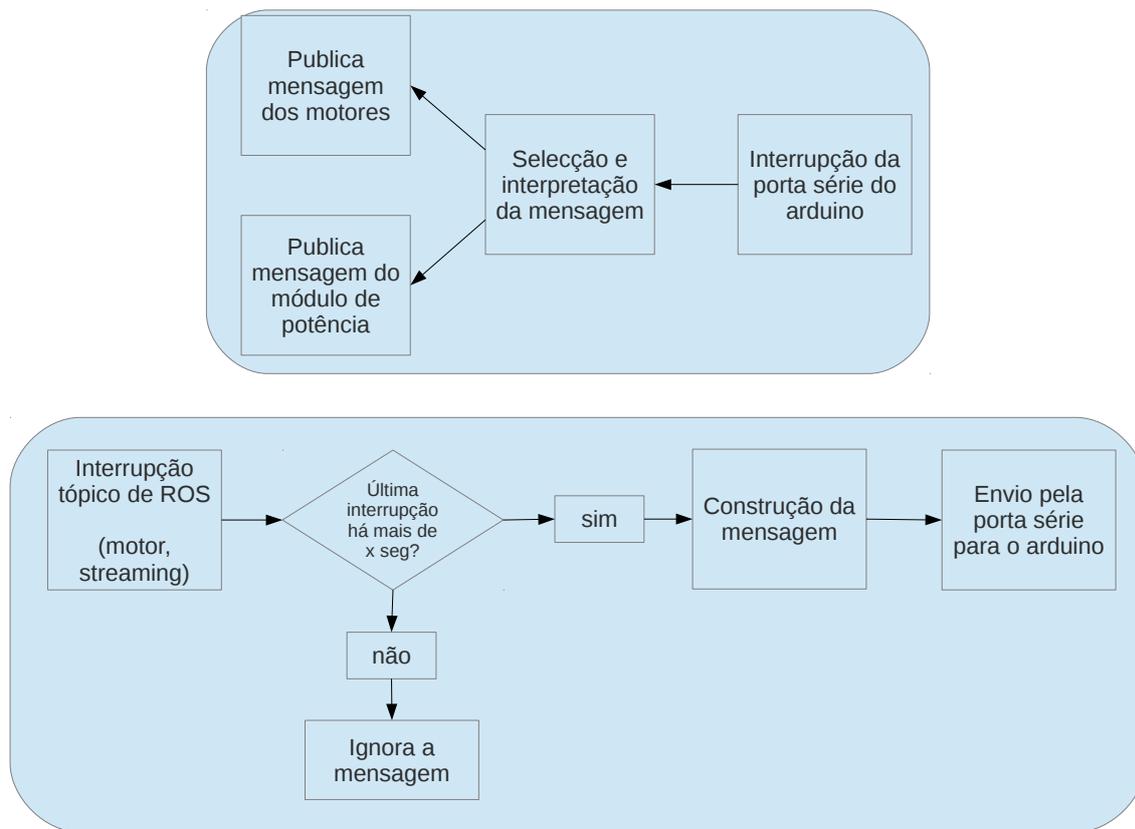
Neste caso particular, a plataforma não tem meios de fornecer a odometria. No entanto foi criado um modo de receber comandos de velocidade de motor que são enviados para o microcontrolador *Arduino* (ver secção 4.4.1).

## 4.3. ROS: Visualizador gráfico 3D - *RVIZ*

A ferramenta gráfica *rviz* contida no ROS foi utilizada no desenvolver da plataforma. Este visualizador tem especial importância para controlo da plataforma e para visualização dos resultados obtidos. No entanto, numa fase de correcção de erros e com o código desenvolvido, a sua utilidade foi relevante na medida que facilitou a captura e correcção de erros e *bugs*.

Como foi abordado na secção 1.2, o desenho 3D em CAD desenvolvido foi útil devido à possibilidade de ser convertido para o formato *Collada* (.dae) e posteriormente importado pelo *rviz*. Foi também retirada uma imagem do *Google Earth* e obtido o desenho da ponte pedonal de Coimbra para uma melhor e mais rápida localização.

Para a correcta visualização do barco foram definidos referenciais em relação ao sistema de coordenadas */world*. O ROS tem uma *stack* que permite resolver os problemas relacionados com as transformações entre vários referenciais. Esta é uma funcionalidade particularmente útil uma vez que permite saber todas as transformadas no barco e/ou no mundo (figura 4.6),



**Figura 4.5.:** Fluxograma sobre o funcionamento do *driver* do barco

e para além disso fá-lo em tempo real, conseguindo assim transformar pontos entre qualquer referencial.

A plataforma AquaSV é representada em relação ao referencial da estação base e a sua posição e orientação é transmitida pelo barco usando o método desenvolvido e referenciado na secção 3.9.

Outra funcionalidade desta interface é a selecção da área do rio a estudar. Tirando partido do uso das *interactive markers* do ROS, foram criadas quatro esferas que podem ser deslocadas. Um algoritmo, semelhante ao referido em [Tokekar et al., 2011], que corre em paralelo envia o barco para um ponto novo cada vez que chega ao anterior, até que a informação seja toda recolhida. Na figura 4.7 podem ser observadas várias potencialidades deste visualizador. A

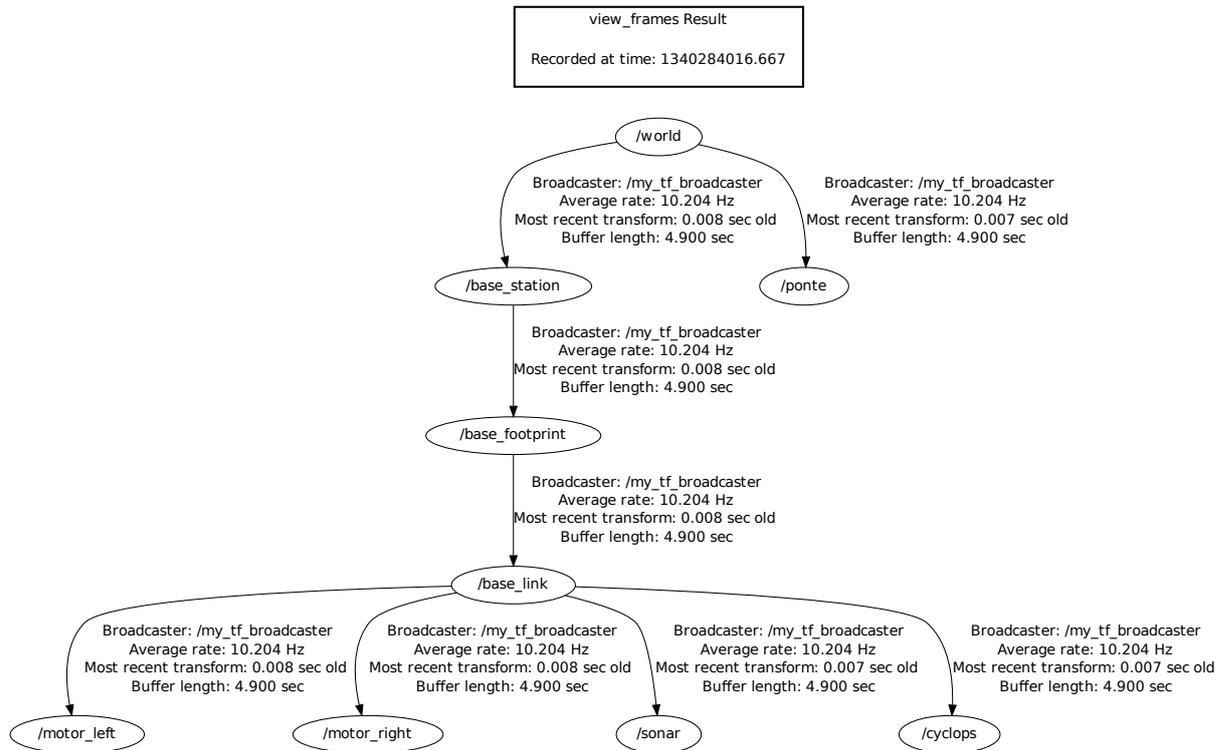


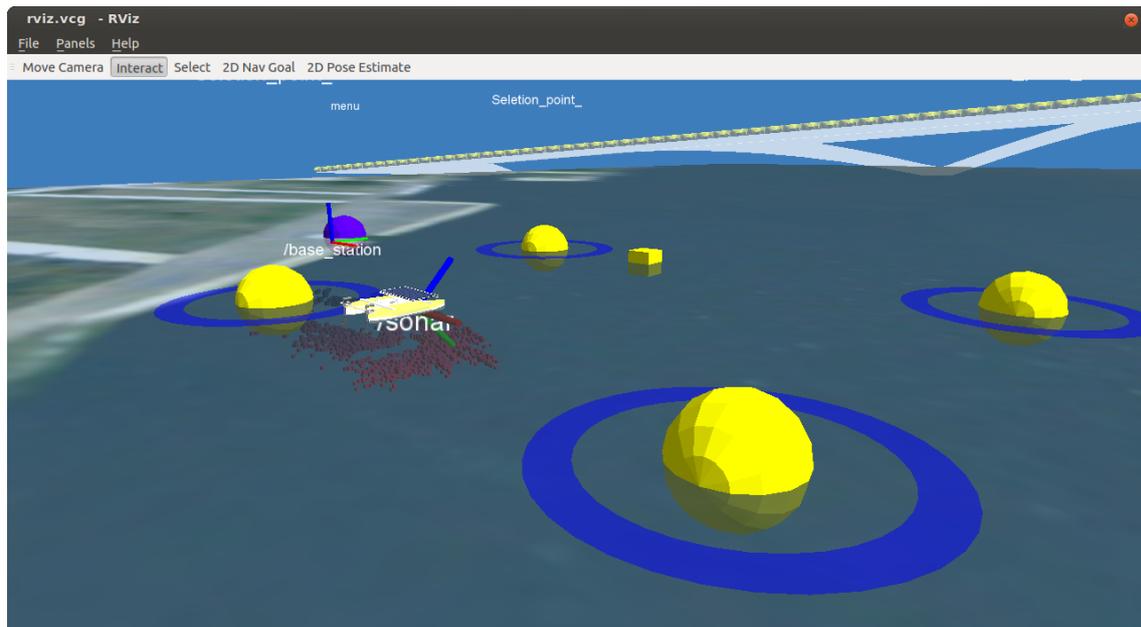
Figura 4.6.: Árvore de transformadas criada pelo nó *view\_frames* do ROS.

plataforma está a seguir pontos usando o controlo desenvolvido em [Fraga, 2012] e está a representar os pontos obtidos pelo sonar no referencial da estação base.

## 4.4. Arduino

O microcontrolador usado na interface com os sistemas de baixo nível, tais como as leituras e escritas analógicas ou digitais, foi o ATMEGA1280. Este IC é comercializado já montado num kit de desenvolvimento com ligação USB e pinos de fácil acesso, bem como reguladores de tensão para alimentar o microcontrolador.

Para assegurar o correcto funcionamento do *hardware*, foram desenvolvidas três classes em C++ que garantem a aquisição de dados e controlo da plataforma.



**Figura 4.7.:** Visualizador gráfico - estudo da batimetria de uma zona do rio.

O *arduino* foi programado com a *Integrated Development Environment* (IDE) fornecida que dispõe um ciclo infinito (*loop*) onde é corrido o programa. Neste ciclo principal existem três funções que asseguram a recepção de comandos, a actualização de acordo com os comandos recebidos e o envio de informação. Esta última função é configurada de modo a apenas enviar de acordo com o intervalo definido. Os períodos de envio das mensagens para o *driver* da plataforma (ver secção 4.2) são definidos através de um comando enviado para o *arduino*.

#### 4.4.1. *LSE H-Bridge*

A classe que controla as pontes-H (secção 3.3) tem como principal objectivo colocar o motor DC com uma determinada tensão desejada.

Um dos propósitos desta classe é o controlo do motor DC sem transições bruscas de PWM. Pode-se considerar uma transição brusca a num determinado instante de tempo o *duty-cycle* de uma *LSE H-Bridge* ser 90% e no instante seguinte seguinte ser 0%. A cada mensagem recebida para controlar o motor, o software é capaz de criar uma rampa do valor actual até ao valor desejado.

Outra funcionalidade configurada através do *netbook* que se encontra na plataforma é o envio

de informação relativa às pontes-H. Os dados enviados podem ser corrente consumida pelos motores e o valor de PWM nas pontes desenvolvidas.

#### 4.4.2. Medições analógicas

A aquisição de dados do sensor químico passa por apenas ler um sinal analógico de 0 - 5 V proveniente do sensor. Porém existem dois fios que têm como objectivo ajustar o ganho.

A função transferência do sensor fornecida pela *Turner designs* indica que o seu comportamento não é linear e sobrejectiva<sup>3</sup>, como é possível observar na figura 4.8. Dada esta não-linearidade intrínseca do sensor, é necessário operar numa zona em que a resposta é linear. Nas especificações técnicas [Designs, 2007] recomenda-se que leituras abaixo de 0,3 V deve-se aumentar o ganho. Ao contrário, se a leitura for maior que 3,0 V é prudente diminuir o ganho para evitar a zona não-linear. Usando o sensor entre 0,3 V e 3.0 V, a função transferência é injectiva<sup>4</sup>.

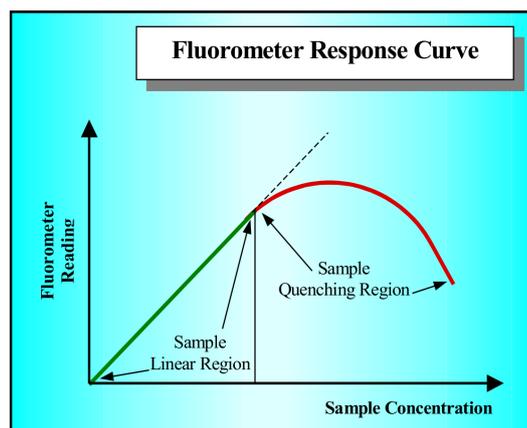


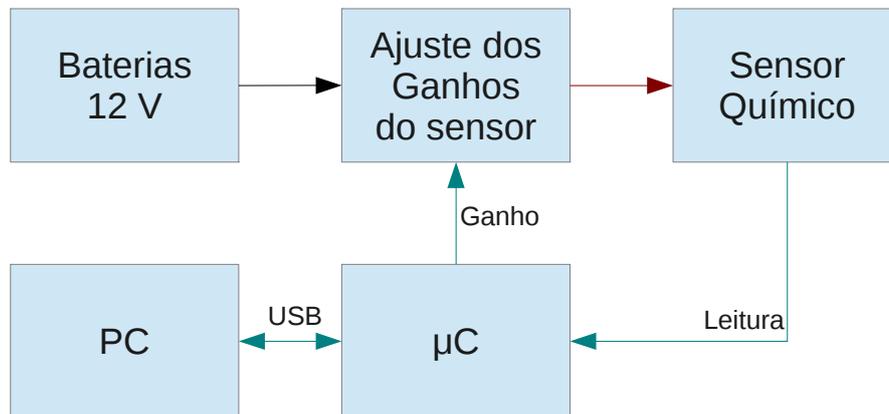
Figura 4.8.: Função de transferência do fluorómetro utilizado.

O *software* presente no *arduino* executa essas funções ajustando o ganho através de um placa desenvolvida no LSE. As leituras do ADC do *arduino* provenientes do sensor são enviadas para o computador do barco à taxa que for definida bem como o ganho associado

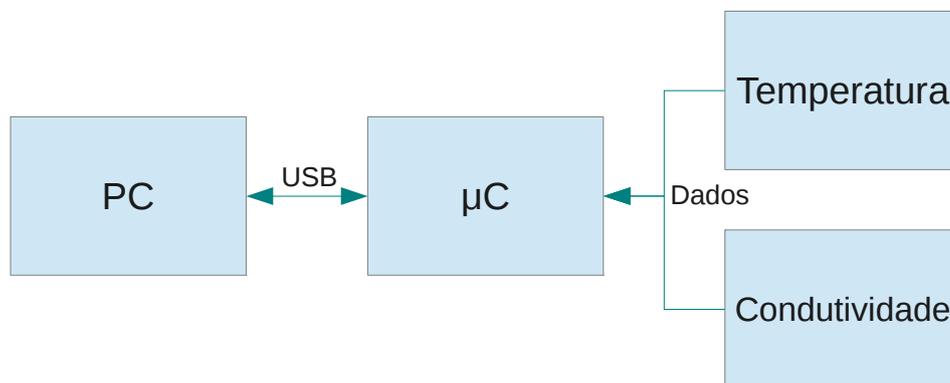
<sup>3</sup>Uma função é sobrejectiva quando o conjunto imagem coincide com o contradomínio da função (wikipedia).

<sup>4</sup>Uma função diz-se injectiva se e somente se quaisquer que sejam  $x_1$  e  $x_2$  pertencentes ao domínio da função, se  $x_1$  é  $x_2$  diferente de implica que  $f(x_1)$  é diferente de  $f(x_2)$ .

à leitura. Nas figuras 4.9 e 4.10 estão representadas as ligações do sensor químico, sensores de temperatura e condutividade.



**Figura 4.9.:** Representação esquemática do sensor químico.



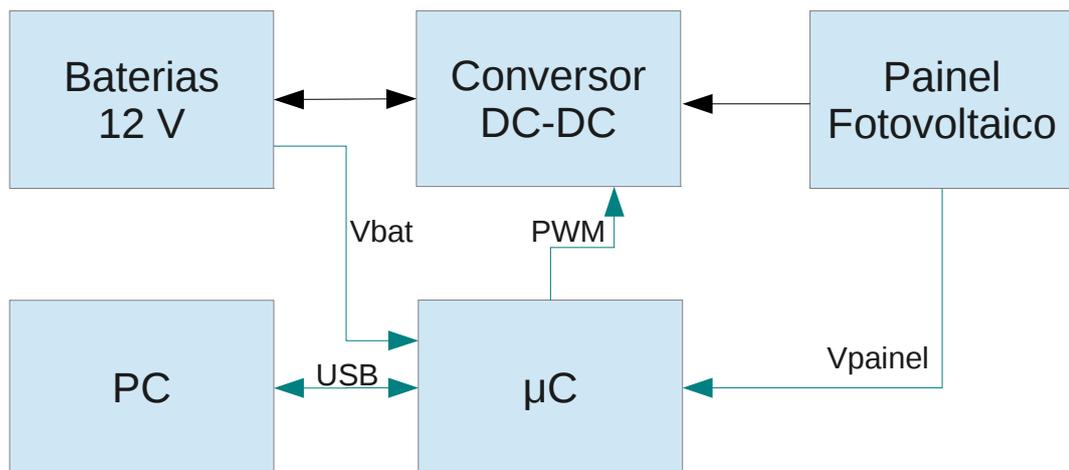
**Figura 4.10.:** Representação esquemática dos sensores de temperatura e de condutividade.

### 4.4.3. Controlador do painel fotovoltaico

O controlador do painel fotovoltaico tem como objectivo extrair a potência máxima do painel e com isso prolongar o tempo de operação do barco. Como já foi referido na secção 3.4, o microcontrolador usado tem como fim ajustar um sinal de PWM para actuar no conversor *Buck* e com isso evitar polarizar o painel à tensão das baterias.

O *software* desenvolvido é baseado em regras simples compostas apenas por condições. No início, o painel não carrega as baterias, ou seja o *duty-cycle* do sinal de PWM é 0%. Caso a tensão do painel fotovoltaico esteja acima do valor de tensão cujo rendimento é máximo, o *duty-cycle* aumenta uma unidade. No entanto, se a tensão do painel descer abaixo do valor de rendimento máximo, o *duty-cycle* diminui duas unidades.

Como medida de segurança, caso a tensão nas baterias ultrapasse os valores de segurança, que neste caso particular é 13,6 V, o *duty-cycle* fica a 0%. Na figura 4.11 está representada a integração do controlador fotovoltaico no barco.



**Figura 4.11.:** Representação esquemática do controlador do painel fotovoltaico.



## 5. Estimação Espacial

Uma plataforma dedicada ao estudo ambiental descreve movimentos para adquirir dados numa certa zona. Numa fase posterior ao teste, é possível obter um mapa com o valor em todos os pontos, considerando uma determinada divisão entre células.

A interpolação espacial é uma necessidade para obter um campo de variáveis. Esta interpolação pode ser realizada através de métodos simples como o ponto vizinho mais próximo, ou a interpolação bilinear ou bicúbica. No entanto, existem métodos que minimizam o erro do valor previsto.

### 5.1. Distância inversa

A interpolação baseada no distância inversa é um dos métodos heurísticos usados neste estudo. A inovação presente neste método face ao método da média local está presente na atribuição de um determinado peso a cada amostra de uma forma a variar com a distância.

Na equação (2.1), o denominador garante que todos os pesos são normalizados, sendo a sua soma igual a um. A escolha do expoente  $p$  permite ajustar as estimativas. Na generalidade, o valor escolhido para  $p$  é dois. No entanto, quanto mais se aproxima de zero, mais o método da distância inversa se aproxima da média aritmética. No entanto, à medida que  $p$  se aproxima de um valor infinito, as amostras mais distantes irão receber menos importância e como consequência a sua contribuição será menor.

Na secção de testes e resultados A.2.1 estão representadas várias situações usando o método referido nesta secção. É possível observar que também está presente uma comparação com vários valores de  $p$ .

Para diminuir o tempo de computação são apenas calculados os pontos numa dada janela de pesquisa. Em anexo (secção A.2.2), é feita a comparação entre usar ou não uma janela para considerar apenas os pontos mais próximos.

Como forma de comparar a eficiência na escolha dos parâmetros, foi calculado a soma do erro quadrático como forma de comparar globalmente a veracidade da interpolação.

## 5.2. *Kriging*

O base teórica da interpolação de *Kriging* foi desenvolvida por um matemático francês Georges Matheron baseado na tese de Daniel Gerhardus Krige, dando nome aos métodos.

Os métodos de *kriging* são fundamentalmente usados em geoestatística com o principal objectivo de interpolar campos de variáveis espaço-temporais [Christakos, 2000, Christakos et al., 2002] e tem como objectivo a minimização da variância do erro de estimação. Um exemplo onde é aplicado este método é na obtenção de mapas de elevação, como é mostrado no livro [Isaaks and Srivastava, 1989].

Existem vários métodos de estimação por *kriging*, dos quais o *Simple Kriging*, o *Ordinary Kriging*, o *Block Kriging* e o *Co-Kriging* [Isaaks and Srivastava, 1989, Christakos, 2000].

Os métodos de *kriging* estimam um valor  $\hat{v}_0$  no espaço através do cálculo da média pesada de todas as amostras conhecidas, como é apresentado na equação (5.1). A diferença deste método para o da distância inversa é que o cálculo do peso associado a cada amostra não depende apenas da distância e a estimação de variáveis minimiza a variância do erro de estimação.

$$\hat{v}_0 = \sum_{i=1}^n w_i v_i \quad (5.1)$$

Na equação 5.2 é apresentada a condição que força o valor esperado do erro a zero. Deste modo é possível dizer que é um método *Best Linear Unbiased Estimator* (BLUE).

$$E\{R(x_0)\} = 0 = E\{V\} \sum_{i=1}^n w_i - E\{V\} \quad (5.2)$$

$$E\{V\} \sum_{i=1}^n w_i = E\{V\} \quad (5.3)$$

$$\sum_{i=1}^n w_i = 1 \quad (5.4)$$

onde

$E\{R(x_0)\}$  valor esperado do erro em  $x_0$

$E\{V\}$  valor esperado

$w_i$  contribuição de cada amostra

### 5.2.1. Variogramas e modelação

Um variograma é matematicamente definido com a relação entre dois pontos de um campo aleatório ou processo estocástico. O variograma tem uma importância notável neste método de interpolação porque possibilita expressar uma relação entre a amostra e o ponto, sendo equivalente ao papel da distância no método IDW (secção 5.1).

Estas funções são calculadas através dos dados experimentais obtidos. Numa fase posterior, os dados calculados segundo a equação 5.5 são aproximados por um dos modelos de variograma conhecidos.

$$\gamma(\mathbf{h}) = \frac{1}{2N(\mathbf{h})} \sum_{(i,j|\mathbf{h}_{ij} \approx \mathbf{h})} (v_i - v_j)^2 \quad (5.5)$$

onde

$i, j$  par de pontos

$\mathbf{h}$  distância entre pares de pontos

$N(\mathbf{h})$  número de pares cuja distância é  $\mathbf{h}$

$v_i, v_j$  variância em  $i$  e  $j$

Os modelos de variogramas conhecidos são o modelo exponencial, o linear, o gaussiano e o

esférico. Cada uma destes modelos são caracterizados por três parâmetros: o efeito pepita (*nugget effect*), o patamar (*sill*) e o alcance (*range*). Em teoria, o efeito pepita seria nulo mas normalmente os variogramas experimentais têm sempre um valor não nulo associado a este campo. Este facto deve-se a erros na amostragem ou erros analíticos, e portanto pode ser interpretado por ter no mesmo local diferentes medidas.

O resultado de um variograma pode sofrer alterações na sua direcção. É então dito que o modelo é anisotrópico, ou seja, os parâmetros acima indicados variam com a direcção.

### 5.2.2. Método de *Kriging* ordinário

Neste método é possível minimizar a variância do erro através da introdução do parâmetro de *Lagrange*. Em anexo encontra-se a introdução do parâmetro de *Lagrange* na equação 5.6 para ser possível minimizar a variância do erro representada por:

$$\tilde{\sigma}_R^2 = \tilde{\sigma}^2 + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_i w_j \tilde{C}_{ij} - 2 \sum_{i=1}^n w_i \tilde{C}_{i0} + 2\mu \underbrace{\left( \sum_{i=1}^n w_i - 1 \right)}_0 \quad (5.6)$$

Na forma matricial, o sistema que permite o cálculo dos pesos pode ser escrito da seguinte forma:

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \tilde{C}_{11} & \cdots & \tilde{C}_{1n} & 1 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \tilde{C}_{n1} & \cdots & \tilde{C}_{nn} & 1 \\ 1 & \cdots & 1 & 0 \end{bmatrix}}_{(n+1) \times (n+1)} \cdot \underbrace{\begin{bmatrix} w_1 \\ \vdots \\ w_n \\ \mu \end{bmatrix}}_{(n+1) \times 1} = \underbrace{\begin{bmatrix} \tilde{C}_{10} \\ \vdots \\ \tilde{C}_{n0} \\ 1 \end{bmatrix}}_{(n+1) \times 1} \quad (5.7)$$

O vector representativo dos pesos a atribuir a cada amostra é calculado matricialmente da seguinte forma:

$$\begin{aligned}\mathbf{C}.\mathbf{w} &= \mathbf{D} \\ \mathbf{C}^{-1}.\mathbf{C}.\mathbf{w} &= \mathbf{C}^{-1}.\mathbf{D} \\ \mathbf{I}.\mathbf{w} &= \mathbf{C}^{-1}.\mathbf{D} \\ \mathbf{w} &= \mathbf{C}^{-1}.\mathbf{D}\end{aligned}\tag{5.8}$$

Encontrado este vector, o valor estimado  $\hat{v}_0$  é calculado pela equação (5.8), sendo a variância de estimação minimizada dada por (5.9).

$$\tilde{\sigma}_R^2 = \tilde{\sigma}^2 - \sum_{i=1}^n w_i \tilde{C}_{i0} + \mu\tag{5.9}$$

A interpolação dos valores medidos pode ser executada na linguagem de programação em C++ e em Matlab, utilizando a *toolbox DACE*.

### 5.2.3. Kriging por bloco

O método de estimação *kriging* ordinário, quando é aplicado a áreas extensas e com muitas amostras<sup>1</sup>, rapidamente se torna computacionalmente difícil de calcular a matriz inversa  $\mathbf{C}^{-1}$  em (5.8).

Deste modo, este método divide a área de estudo em células que por sua vez são discretizadas com uma distância fixa entre pontos. Posteriormente, o método *kriging* Ordinário (ver secção 5.2.2) é aplicado a cada bloco e assim é possível reduzir o tempo de cálculo, como é descrito no livro [Isaaks and Srivastava, 1989].

O sistema de matrizes que calculam os pesos a atribuir a cada amostra é similar ao apresentado em (5.7), mas com a diferença que apenas a alteração do vector  $\mathbf{D}$  ser a média da co-variância da área. Um exemplo onde é aplicado a estimação ponto-para-bloco é apresentada em [Zhang, 2011] para estimar a porosidade dos solos.

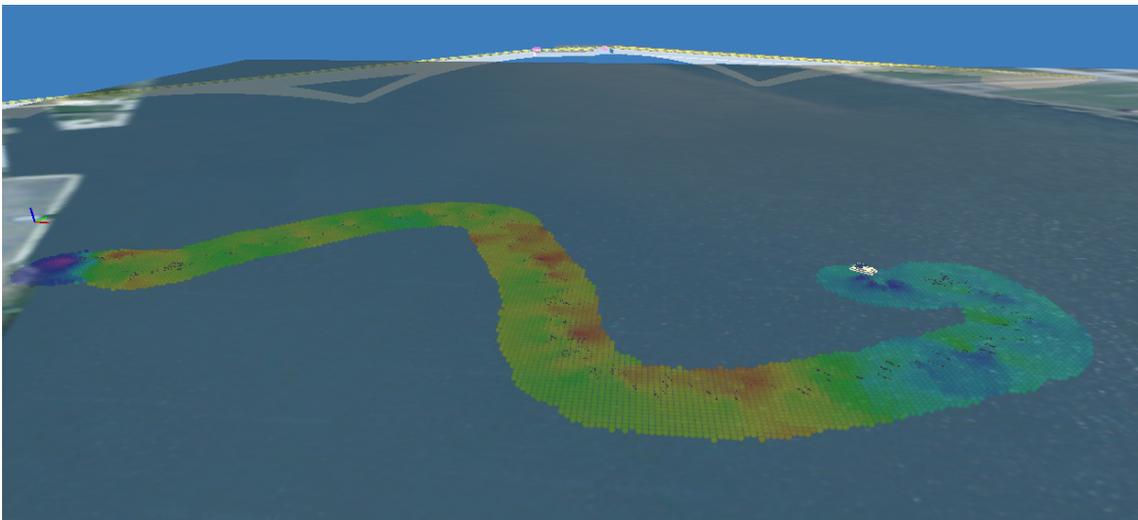
---

<sup>1</sup>O Sonar *Imagenex* (3.8.1) obtém medidas a 10 Hz. Os testes no rio tiveram normalmente a duração de 30 minutos, portanto é normal obter cerca de 18000 ou mais amostras.

### 5.3. Implementação em ROS

O algoritmo de *kriging* ordinário foi implementado em ROS para ser possível uma integração em tempo real com o *rviz*. Este algoritmo tem uma desvantagem relativamente ao excessivo número de amostras tornar o tempo de computação excessivamente grande (ver secção 2.3). A sua implementação usando a classe C++ *Eigen* está feita e implementada num nó de ROS *RTI* e pode ser usada no fim ou durante uma missão obter resultados. Para aumentar a velocidade de computação, optou-se por limitar o número de amostras por célula do mapa e limitar a área de pesquisa a uma determinada zona.

Na figura 5.1 está representada a estimação de uma parte do rio Mondego, usando células de 5 m x 5 m e resolução de 0,5 m.



**Figura 5.1.:** Representação gráfica da estimação espacial obtida pelo *RTI*.

## 6. Testes e Resultados

Numa fase inicial da construção da plataforma, os vários sensores e actuadores foram testados. Esses testes e respectivos resultados estão nas secções 6.1 e 6.2.

### 6.1. Plataforma AquaSV vs. *Kingfisher*

A empresa *ClearpathRobotics* foi contactada para um orçamento da plataforma *Kingfisher*. O orçamento que foi pedido para a plataforma sem sensores adicionais foi de 17500 \$ que equivale a 13670 €, excluindo a mão de obra.

Na tabela 6.1 é feita a comparação de algumas características entre a plataforma desenvolvida no ISR de Coimbra e o *Kingfisher M100*.

	AquaSV	<i>Kingfisher M100</i> , v1
Dimensões ( $C \times L \times A$ )	2950 × 2000 × 500 mm	1270 × 1270 × 520 mm
Massa	112 kg (com baterias e painel fotovoltaico)	30 kg (com baterias)
Capacidade de carga	108 kg	5,7 kg
Potência dos motores	720 W (pico)	200 W (pico)
Computador de bordo	Dual core Intel Atom @ 1.5 GHz, 1 GB RAM, 250 GB HDD	Dual core Intel Atom @ 1.6 GHz, 1 GB RAM, 8 GB SSD
Preço	3600 €	13670 €

**Tabela 6.1.:** Comparação entre a plataforma AquaSV e a plataforma *Kingfisher M100*.

Velocidade	1	2	3	4	5
Corrente Consumida (A)	7,5	9,8	13,7	16,0	26,3

**Tabela 6.2.:** Comparação entre a velocidade do motor e a corrente consumida.

## 6.2. Teste da corrente consumida pelos motores

Um dos primeiros testes feitos com os motores foi medir a corrente que consumiam. Foi montado uma estrutura junto ao local dos testes (figura A.7) e os resultados estão apresentados na tabela 6.2.

Este foi um teste que serviu para dimensionar os requisitos da ponte-H construída na secção 3.3.

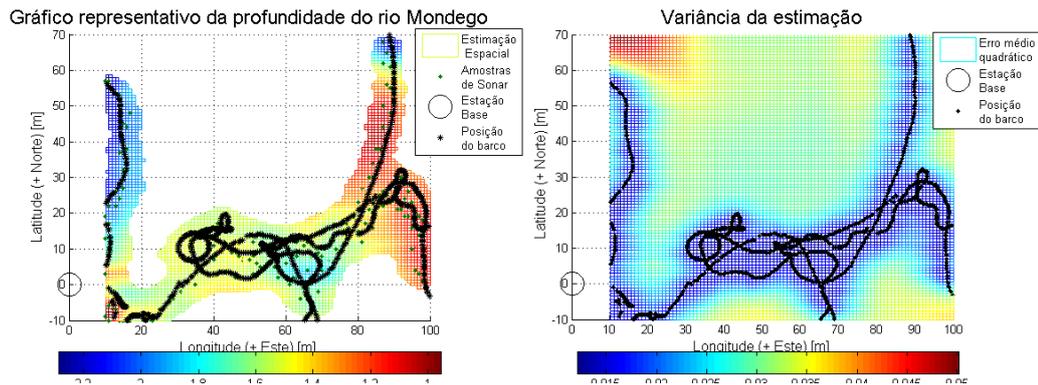
## 6.3. Estudo da batimetria

Os testes no rio feitos pela embarcação AquaSV foram guardados e processados de forma *offline* usando a ferramenta *Matlab* e a *toolbox DACE*. O algoritmo da distância inversa (ver secção 5.1) também foi processado de forma a poder comparar com os resultados da *toolbox DACE*.

Na figura 6.1 é apresentada a estimacão da batimetria usando o *Matlab*. Nesta figura é de salientar ainda que há locais onde a interpolação não foi calculada devido ao erro associado. Em anexo na figura A.9 está representada uma vista em perspectiva do mesmo gráfico.

Com os mesmos resultados, o método da distância inversa foi comparado com o método de *kriging*. O valor de  $\mathbf{p}$  da equação 2.1 usado foi  $p = 2$ .

A partir da comparação dos dois métodos usados é possível verificar que a interpolação de *kriging* apresenta melhores resultados na medida que absorve irregularidades associadas a erros de medição. Para melhor comparar os dois métodos, ver a figura A.9.



**Figura 6.1.:** Estimação espacial da profundidade do rio usando o método de *kriging*, recorrendo à *toolbox DACE* do *Matlab*.

## 6.4. Resultados *Cyclops 7*

O sensor químico foi colocado à direita do sonar de forma a ficar submerso e não interferir com a distância medida pelo sonar. O seu ganho foi definido automaticamente pela placa desenvolvida no LSE cujo esquemático encontra-se em anexo (figura A.8). Devido à inexistência de matéria orgânica dissolvida na água, o ganho estabelecido pela placa foi sempre X10. A interpolação de *kriging* foi também usada nestes dados, sendo o resultado apresentado na figura 6.3.

O método da distância inversa foi também aplicado aos valores recolhidos pelo sensor químico. A figura 6.4, representa o resultado da interpolação com os mesmos valores.

Neste caso, o método de *kriging* apresenta novamente melhores resultados que o método IDW dado que o método de *kriging* é mais sensível a pequenas variações de concentração. O método da distância inversa aplicada às mesmas amostras tem um comportamento semelhante ao cálculo da média aritmética.

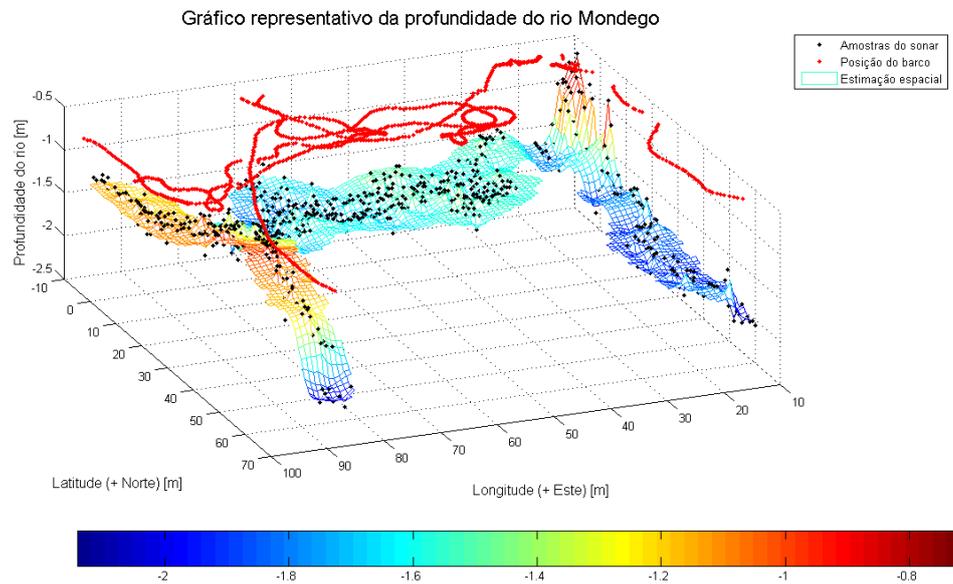


Figura 6.2.: Estimação espacial da profundidade do rio usando o método da distância inversa, recorrendo ao *Matlab*.

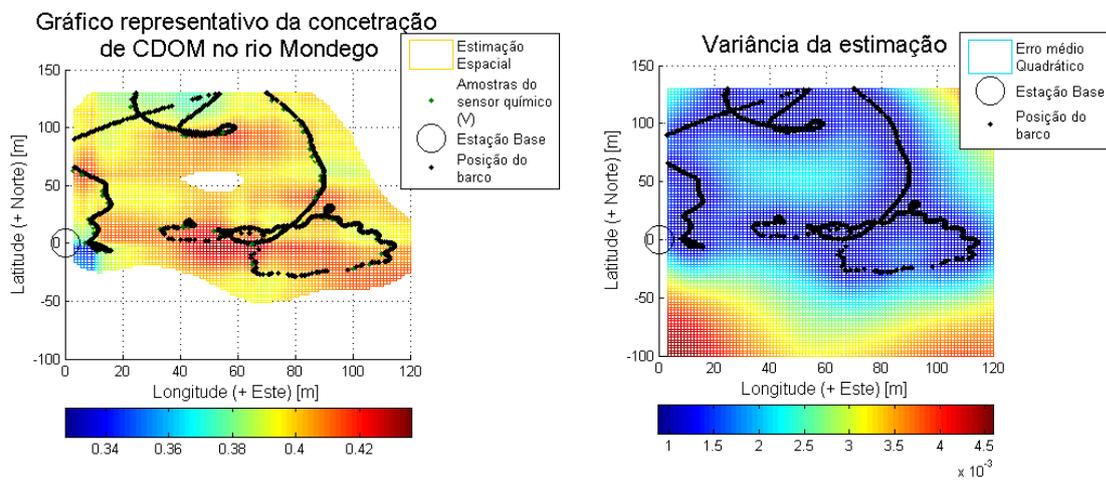
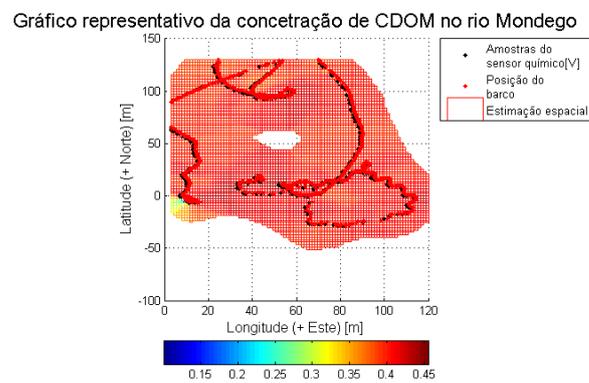


Figura 6.3.: Estimação espacial da concentração de CDOM usando o método de Kriging, recorrendo à *toolbox DACE* do *Matlab*.



**Figura 6.4.:** Estimação espacial da concentração de CDOM usando o método da distância inversa, recorrendo ao *Matlab*.



## 7. Conclusões

No fim do trabalho proposto na secção 1.1, todos os objectivos foram concluídos com sucesso. Esta plataforma desenvolvida permite servir para trabalhos futuros de investigação ou até mesmo de busca e salvamento.

Um dos objectivos alcançados com a construção do AquaSV foi a criação de uma plataforma de baixo custo e com elevada capacidade de carga transportável. A utilização do painel fotovoltaico aumenta a autonomia das baterias.

Os actuadores do barco controlados pelo *driver* descrito na secção 3.3 e 4.2 mostraram ser úteis no comando para obter os dados ambientais desejados. A estas funcionalidades estão associadas outras de extrema importância para o caso de falha da comunicação ou falta de energia, evitando assim que o barco fique a navegar de uma forma descontrolada.

Os algoritmos pesquisados e implementados nos *drivers* de ROS permitem fornecer uma camada de abstracção com o *hardware* e outros nós de ROS. O código desenvolvido foi adaptado aos sensores já existentes no laboratório, sendo possível a qualquer altura adicionar novas funcionalidades.

Os resultados da estimação espacial apresentada no capítulo 6 conclui que o método de *kriging* utilizado produz melhores resultados que o método da distância inversa.

Na estimação espacial obtida através da *toolbox DACE* do *MATLAB* foram considerados apenas os pontos próximos da trajectória do barco. Esta estratégia foi adoptada devido a apenas utilizar os pontos estimados com a variância inferior a 25%. No entanto, esta condição pode ser excluída de forma a obter um campo contínuo numa área especificada.

### 7.1. Trabalhos futuros

A recolha de leituras batimétricas foi feita e a aquisição de dados dos restantes sensores foi concluída com êxito. No entanto, através da estimação de um modelo dinâmico do rio pode-

se usar técnicas de assimilação de dados para não só estimar espacialmente, mas também obter dados espaciais no domínio do tempo.

Outro trabalho que torna o barco autónomo útil numa situação de acidente químico será a fusão do algoritmo de pesquisa de fontes químicas com o trabalho desenvolvido.

# Bibliografia

- [Alvarez et al., 2012] Alvarez, A., Chiggiato, J., and Mourre, B. (2012). Robotic Characterization of Access-Restricted Marine Environments. In *IEEE Robotics and Automation Magazine*, volume 16.
- [Andrew Tinka, 2012] Andrew Tinka (2012). Floating robots use GPS-enabled smartphones to track water flow. *UC Berkeley Media Center*.
- [Basu and Maczkowska, 2001] Basu, A. and Maczkowska, I. (2001). Bathymetry Map Analysis Using Simulated Annealing on a GIS Platform. In *OCEANS, 2001. MTS/IEEE Conference and Exhibition*, volume 4, pages 2407– 2414.
- [Blevens et al., 2011] Blevens, C., Debbink, M., Deeter, T., Ham, M., Harmon, M., Keef, C., Miller, P., Nicholson, M., Rohrs, S., and Tashner, N. (2011). Development of a Sail-Powered Autonomous Surface Vessel ( ASV ) for Trans-Atlantic Voyaging. 4(August):16–17.
- [Blondel, 2009] Blondel, P. (2009). *The Handbook of Sidescan Sonar*.
- [Burguera et al., 2010] Burguera, A., Gonz, Y., and Oliver, G. (2010). Underwater Scan Matching using a Mechanical Scanned Imaging Sonar. In *IFAC Symposium on Intelligent Autonomous Vehicles (IAV), Lecce (Italy)*.
- [Christakos, 2000] Christakos, G. (2000). *Modern Spatiotemporal Geostatistics*. Oxford University Press.
- [Christakos et al., 2002] Christakos, G., Bogaert, P., and Serre, M. L. (2002). *Temporal GIS: Advanced Functions for Field-Based Applications*. Springer.
- [Clearpath Robotics, 2012] Clearpath Robotics (2012). Kingfisher. <http://www.clearpathrobotics.com/kingfisher>.
- [Crescentini et al., 2012] Crescentini, M., Bennati, M., and Tartagni, M. (2012). Design of integrated and autonomous conductivity-temperature-depth (CTD) sensors. *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, 66(8):630–635.

- [Designs, 2000] Designs, T. (2000). Using the CYCLOPS-7 Protective / Shade Cap. [http://docs.lib.noaa.gov/noaa\\_documents/DWH\\_IR/DWH\\_documents\\_NCDDC/Archive%20Prep%202/American\\_Diver/Cruise\\_02/0-data/CNES/Documentation/TURNER\\_CYCLOPS7/Shade%20Cap%20Instructions.pdf](http://docs.lib.noaa.gov/noaa_documents/DWH_IR/DWH_documents_NCDDC/Archive%20Prep%202/American_Diver/Cruise_02/0-data/CNES/Documentation/TURNER_CYCLOPS7/Shade%20Cap%20Instructions.pdf).
- [Designs, 2007] Designs, T. (2007). CYCLOPS-7 Submersible Sensors User's Manual. [http://www.fondriest.com/pdf/turner\\_cyclops\\_manual.pdf](http://www.fondriest.com/pdf/turner_cyclops_manual.pdf).
- [Dunbabin and Grinham, 2010] Dunbabin, M. and Grinham, A. (2010). Mapping Greenhouse Gas Emissions on Complex Inland Waterways Using Autonomous Surface Vehicles. In *Robotics and Automation*, pages 7–9.
- [Dunbabin et al., 2009] Dunbabin, M., Grinham, A., Udy, J., Centre, C. I. C. T., and Box, P. O. (2009). An Autonomous Surface Vehicle for Water Quality Monitoring. *Australasian Conference on Robotics and Automation (ACRA)*.
- [Ferreira et al., 2009] Ferreira, H., Almeida, C., Martins, a., Almeida, J., Dias, N., Dias, a., and Silva, E. (2009). Autonomous bathymetry for risk assessment with ROAZ robotic surface vehicle. *Oceans 2009-Europe*, pages 1–6.
- [Fraga, 2012] Fraga, J. M. R. (2012). *Controlo de uma Plataforma Autónoma de Monitorização Ambiental*. Master thesis, Universidade de Coimbra.
- [Furfaro et al., 2009] Furfaro, T. C., Dusek, J. E., and Ellenrieder, K. D. V. (2009). Design , Construction , and Initial Testing of an Autonomous Surface Vehicle for Riverine and Coastal Reconnaissance.
- [Hänggi, 2009] Hänggi, T. (2009). *Design of an Autonomous Sampling Boat for the study of Algae Bloom in Lake*. Master thesis.
- [Hank Lobe, 1997] Hank Lobe, L. B. (1997). Meeting Mission Needs Through Proper Techonology Application and Platform Selection. *IEEE*, pages 1481–1487.
- [Hennigan and Hennigan, 2006] Hennigan, G. and Hennigan, C. (2006). Top 9 Catamaran Advantages.
- [Higinbotham et al., 2008] Higinbotham, J. R., Moisan, J. R., Schirtzinger, C., Linkswiler, M., Yungel, J., and Orton, P. (2008). Update on the development and testing of a new long duration solar powered autonomous surface vehicle. *Oceans 2008*, pages 1–10.
- [Hitz et al., 2011] Hitz, G., Pomerleau, F., and Garneau, M.-E. (2011). Design and Application of a Surface Vessel for Autonomous Inland Water Monitoring. In *IEEE Robotics and Automation Magazine*, number 2, pages 62–72.

- [Hofierka and Cebecauer, 2007] Hofierka, J. and Cebecauer, T. (2007). Spatial Interpolation of Elevation Data With Variable Density : A New Methodology to Derive Quality DEMs. *IEEE GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING LETTERS*, 4(1):117–121.
- [Isaaks and Srivastava, 1989] Isaaks, E. H. and Srivastava, R. M. (1989). *An Introduction to Applied Geostatistics*. Oxford University Press, New York.
- [Kořar and JeriÄŸeviü, 2011] Kořar, I. and JeriÄŸeviü, v. (2011). Limit kriging in finite element environmental modeling. In *MIPRO, 2011 Proceedings of the 34th International Convention*, pages 308–311.
- [Kutser, 2010] Kutser, T. (2010). Monitoring long time trends in lake CDOM using Landsat image archive. In *2010 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, pages 389–392. IEEE.
- [Manley and Willcox, 2010] Manley, J. and Willcox, S. (2010). The Wave Glider: A persistent platform for ocean science. In *OCEANS’10 IEEE SYDNEY*, pages 1–5. IEEE.
- [Manley, 2008] Manley, J. E. (2008). Unmanned surface vehicles, 15 years of development. *Oceans 2008*, pages 1–4.
- [Microchip Technology Inc, 2004] Microchip Technology Inc (2004). Brushed DC Motor Fundamentals.
- [MPrime, 2011] MPrime (2011). Módulos fotovoltaicos 210 - 240 W.
- [Navy, 2007] Navy, U. (2007). The Navy Unmanned Surface Vehicle (USV) Master Plan.
- [Oliveira et al., 2006] Oliveira, L., Gomes, B., Baumgartner, G., and Sebastien, N. Y. (2006). Variação espacial e temporal dos fatores limnológicos em riachos da microbacia do rio São Francisco Verdadeiro. pages 770–781.
- [Semiconductor, 2008] Semiconductor, F. (2008). Design and Application Guide of Bootstrap Circuit for High-Voltage Gate-Drive IC.
- [Semiconductor, 2011] Semiconductor, F. (2011). 3-Terminal 1A Positive Voltage Regulator.
- [Starfish, 2012] Starfish (2012). Side Scan Sonar, What is it? <http://www.starfishsonar.com/technology/sidescan-sonar.htm>.
- [Stedmon et al., 2000] Stedmon, C., Markager, S., and Kaas, H. (2000). Optical Properties and Signatures of Chromophoric Dissolved Organic Matter (CDOM) in Danish Coastal Waters. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 51(2):267–278.
- [Tokekar et al., 2011] Tokekar, P., Branson, E., Hook, J. V., and Isler, V. (2011). Coverage

- and Active Localization for Monitoring Invasive Fish with an Autonomous Boat. *IEEE Robotics and Automation Magazine*.
- [Wang et al., 2008] Wang, J., Gu, W., and Zhu, J. (2008). Design of an Autonomous Surface Vehicle Used for Marine Environment Monitoring. *International Conference on Advanced Computer Control*, pages 405–409.
- [Wang et al., 2009] Wang, J., Gu, W., Zhu, J., and Zhang, J. (2009). An Unmanned Surface Vehicle for Multi-mission Applications. *International Conference on Electronic Computer Technology*, pages 4–7.
- [Wu and Liu, 2011] Wu, M.-C. and Liu, J. G. (2011). Adaptive local kriging (ALK) to retrieve the slant range surface motion maps of Wenchuan earthquake. In *Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2011 IEEE International*, pages 1183–1186.
- [Yamaha, 2012] Yamaha (2012). Yamaha M12 Electric Motor. <http://www.yamaha-motor.eu/uk/products/marine-engines/electric-drives/m26-m20-m18-m12.aspx?view=features>.
- [YSI, 2012] YSI (2012). EXO2 Sonde. <http://www.ysi.com/index.php>.
- [Zhang, 2011] Zhang, T. (2011). The application of block kriging estimation in porosity simulation. In *2011 3rd International Conference on Computer Research and Development*, pages 203–206. IEEE.
- [Zhu et al., 2010] Zhu, X., Yu, J., and Wang, X. (2010). Optimization of Large Scales Ocean Sampling for Minimization of the Kriging Variance. In *World Congress on Intelligent Control and Automation*, pages 7050–7054.
- [Zhuo et al., 2011] Zhuo, W., Paciorek, C., Kaufman, C., and Bethel, W. (2011). Parallel Kriging Analysis for Large Spatial Datasets. In *IEEE International Conference on Data Mining*, pages 38–44.

# A. Anexo

## A.1. Imagens



Figura A.1.: Segmentação da imagem para extracção de um objectivo.



Figura A.2.: Vista de topo e esquerda dos quiaques utilizados como flutuadores.

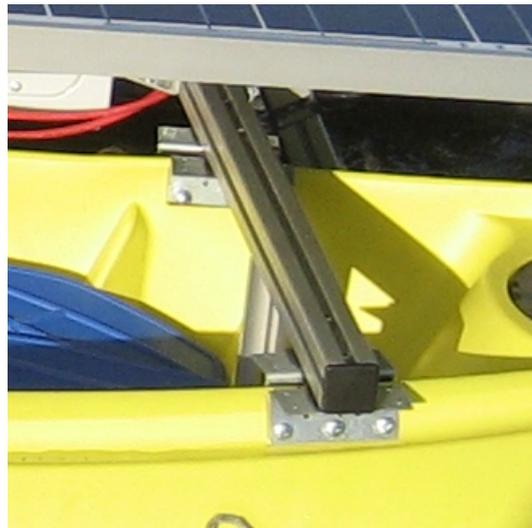


Figura A.3.: Ligação dos perfis da *Item* aos quaiques.

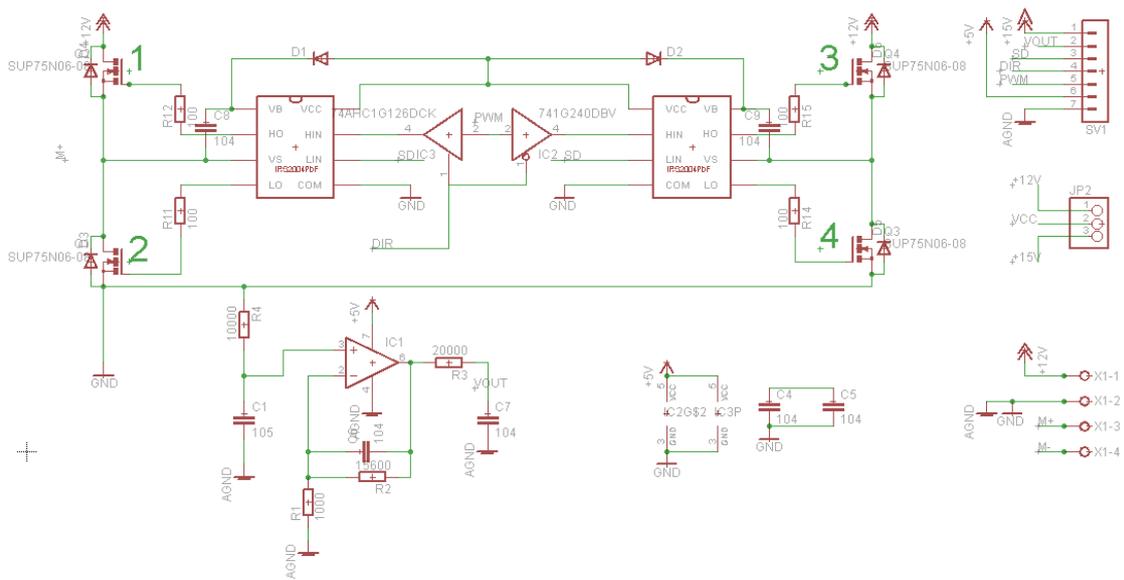
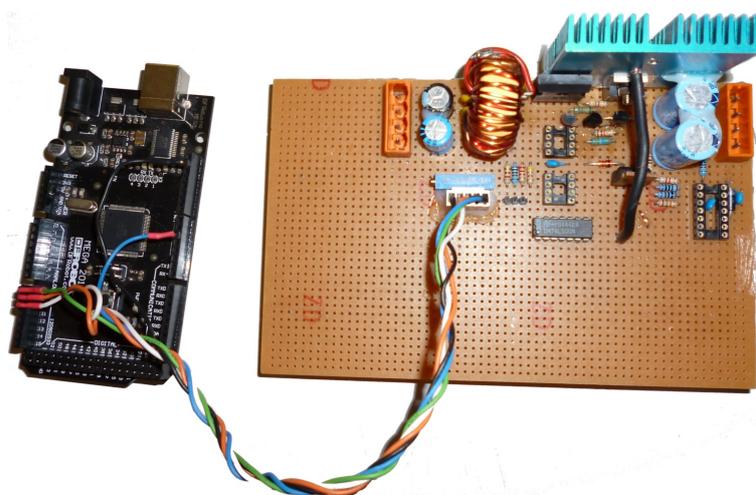
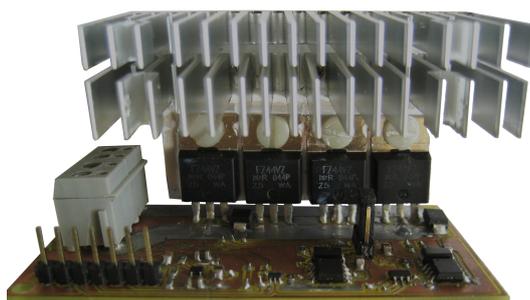


Figura A.5.: Esquemático da ponte-H desenvolvida.



**Figura A.4.:** Controlador do painel fotovoltaico.



**Figura A.6.:** Ponte-H desenvolvida no LSE.



Figura A.7.: Teste da corrente consumida pelos motores.

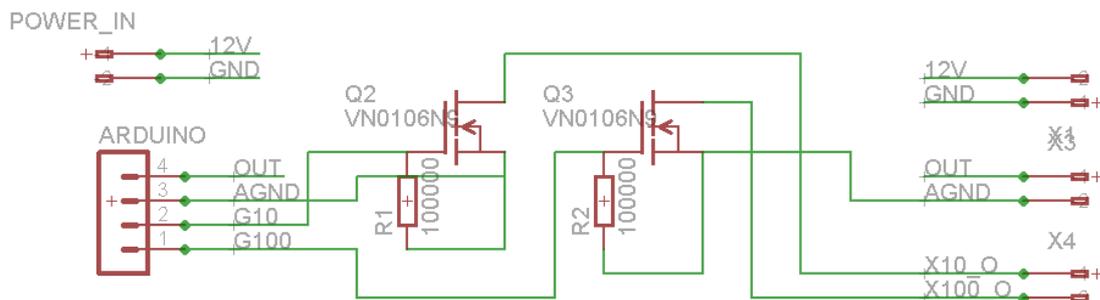


Figura A.8.: Esquemático da placa para controlar os ganhos do sensor químico utilizado.

## A.2. Interpolação

### A.2.1. IDW: escolha do expoente

Na tabela A.1 pode ser visível o efeito na escolha de vários expoentes. Os dados gerados foram iguais aos que foram usados em A.2.2.

## A.2 Interpolação

---

Expoente (p na eq. 2.1)	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Soma de erro quadrático	2,178	2,091	2,003	1,915	1,828	1,743	1,660	1,580	1,504	1,432	1,365	0,949	0,849	0,876	0,944	1,020	1,091	1,154	1,209	1,257

**Tabela A.1.:** Comparação entre a escolha dos vários expoentes na IDW.

### A.2.2. IDW: uso de vizinhança de pesquisa

O programa Matlab foi usado para simular a interpolação usando o método da distância inversa. Foi criado um *script* que gera *à priori* um campo de três variáveis, ou seja, duas dimensões mais uma terceira. Esta terceira variável é a variável a interpolar. Para ser possível um comparação, as dimensões foram de 300 na variável X e Y e foram aleatoriamente criados 1000 pontos.

Na tabela A.2 pode ser observado o erro considerando apenas o uso de pontos mais próximos. Caso o valor seja 1, é obtido um gráfico cujo método de interpolação é dado pelo ponto mais próximo.

Vizinhança (nr. de pontos)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Soma de erro quadrático	1,817	1,180	0,963	0,891	0,859	0,862	0,869	0,891	0,918	0,949	0,978	1,009	1,040	1,075	1,109
Tempo de cálculo (s)	15	30	46	62	77	92	108	123	139	155	170	186	202	218	233

**Tabela A.2.:** Comparação entre a escolha de várias vizinhanças na IDW.

### A.2.3. Kriging

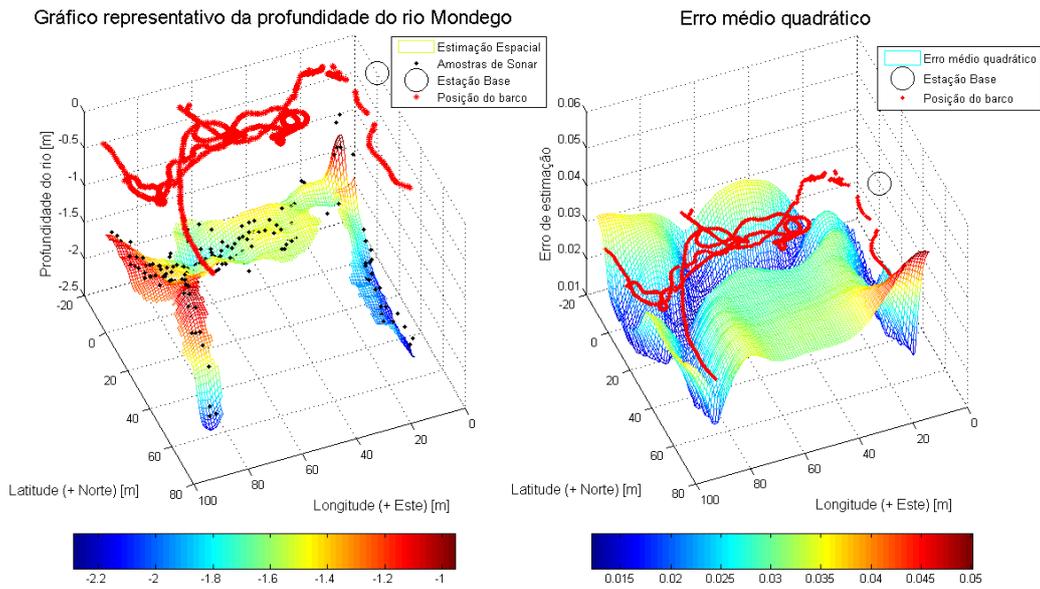


Figura A.9.: Estimação espacial usando o método de Kriging, recorrendo à *toolbox DACE* do *Matlab* (vista em perspectiva).

### A.2.3.1. Parâmetro de *lagrange*

De forma a minimizar a variância do erro de estimação, a introdução do termo  $2\mu \left( \sum_{i=1}^n w_i - 1 \right)$  torna possível a tarefa. Derivando parcialmente em ordem a  $\mu$ , através de:

$$\frac{\partial (\tilde{\sigma}_R^2)}{\partial \mu} = \frac{\partial \left( 2\mu \left( \sum_{i=1}^n w_i - 1 \right) \right)}{\partial \mu} \tag{A.1}$$

é possível chegar à condição:

$$\sum_{i=1}^n w_i = 1 \tag{A.2}$$

