

PROJETO, DESENVOLVIMENTO E IMPLEMENTAÇÃO DE UM ROBÔ NADADOR DE INSPIRAÇÃO BIOLÓGICA

José Augusto Moreira da Silva



Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Área de Especialização de Automação e Sistemas

Departamento de Engenharia Eletrotécnica

Instituto Superior de Engenharia do Porto

20 de Novembro de 2013

Este relatório satisfaz, parcialmente, os requisitos que constam da Ficha de disciplina da
Unidade Curricular de Tese/Dissertação, do 2º ano, do Mestrado em Engenharia
Eletrotécnica e de Computadores

Candidato: José Augusto Moreira da Silva, N° 1080489, 1080489@isep.ipp.pt

Orientação científica: Manuel Fernando dos Santos Silva, mss@isep.ipp.pt

Co-orientação: Ramiro de Sousa Barbosa, rsb@isep.ipp.pt



Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Área de Especialização de Automação e Sistemas

Departamento de Engenharia Eletrotécnica

Instituto Superior de Engenharia do Porto

20 de Novembro de 2013

Dedico esta Tese/Dissertação aos meus pais

Agradecimentos

Quero agradecer aos meus pais o apoio prestado, o que me possibilitou chegar a este ponto da minha vida académica.

Agradeço também aos meus orientadores, Eng.º Manuel Silva e Eng.º Ramiro Barbosa, toda a disponibilidade prestada ao longo da realização desta Tese/Dissertação.

Agradeço ao meu irmão o auxílio prestado nos ensaios realizados no Laboratório de Sistemas Autónomos (LSA) do ISEP.

Agradeço à Sofia Guedes e família por terem permitido a realização de testes na piscina de casa.

Por fim, quero agradecer à Câmara Municipal de Espinho por terem permitido a realização de testes e ensaios na piscina Solário Atlântico.

Resumo

A elaboração deste trabalho surge no âmbito da unidade curricular de Tese/Dissertação, pertencente ao Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e Computadores, ramo de Automação e Sistemas, do Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP).

Este trabalho enquadra-se no âmbito da robótica de inspiração biológica no meio aquático. Pretendeu-se com este trabalho desenvolver e implementar um robô nadador de inspiração biológica. Inicialmente foi realizado um estudo acerca da locomoção dos peixes, para perceber a sua forma de se movimentar. Foi ainda efetuado um estudo acerca dos robôs nadadores existentes, de forma a verificar a sua constituição e formas de locomoção. Numa fase inicial foi desenvolvido um protótipo e, de seguida, procedeu-se à implementação do robô de uma forma sequencial. Implementou-se a estrutura do robô, com o objetivo de se assemelhar o mais possível com um peixe biológico. Foram utilizados servomotores para a locomoção do robô. Para que o robô possua a capacidade de se movimentar numa determinada direção recorreu-se à utilização de uma bússola digital. Posteriormente introduziu-se um emissor/recetor de radiofrequência (RF) para ligar/desligar o robô.

Numa fase final procederam-se aos testes da locomoção do robô. Nos ensaios realizados verificou-se que o robô conseguiu nadar com estabilidade e com sentido de direção.

Palavras-Chave

Robô, peixe, inspiração biológica, servomotor, bússola, radiofrequência, bateria.

Abstract

This work is a part of the course of Thesis/Dissertation, which belongs to the Master's degree in Electrical and Computer Engineering, in the Automation and Systems by the Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP).

This work concerns the study of bio inspired swimming robotics. The main goal of this work was to develop and implement a swimming robot similar to a biological fish. First, it was made a study about the swimming of the fishes in order to understand the way they move. In parallel was also conducted another study about swimming robots to examine the locomotion modes implemented by the prototypes already developed.

At first it was developed a prototype and then the robot implementation was made in a sequential way. The structure of the robot was raised up in order to be similar to a biological fish, as far as possible. Servomotors were used to propel the robot. A digital compass was placed in the robot's body because it gives the ability to move in a specific direction. It was introduced an RF emitter/receptor to control on/off the robot.

The final phase was concerned with the tests of locomotion robot. The tests revealed that the robot was able to swim with stability and direction.

Keywords

Robot, fish, biological inspiration, servomotor, compass, radio frequency, battery.

Índice

AGRADECIMENTOS	I
RESUMO	III
ABSTRACT	V
ÍNDICE	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	IX
ÍNDICE DE TABELAS	XI
ACRÓNIMOS	XIII
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO	3
1.2. OBJETIVOS	4
1.3. CALENDARIZAÇÃO	4
1.4. ORGANIZAÇÃO DO RELATÓRIO	5
2. ESTUDO DA ROBÓTICA NO MEIO AQUÁTICO	7
2.1. BIOLOGIA DOS PEIXES	7
2.2. ESTÁTICA DOS FLUIDOS	16
2.3. DINÂMICA DOS FLUIDOS	19
2.4. DESENVOLVIMENTOS DA ROBÓTICA NO MEIO AQUÁTICO.....	20
3. ARQUITETURA E MÓDULOS UTILIZADOS	31
3.1. ARDUINO UNO.....	33
3.2. SERVOMOTOR - GOTECK.....	37
3.3. BÚSSOLA DIGITAL	41
3.4. MÓDULO DE RADIOFREQUÊNCIA	47
3.5. BATERIA	49
4. IMPLEMENTAÇÃO	51
4.1. ESTRUTURA FÍSICA DO ROBÔ	51
4.2. CONTROLO DO ROBÔ	58
4.3. PROCESSO DE LOCOMOÇÃO DO ROBÔ	63
4.4. CONSUMO EM CORRENTE DO ROBÔ.....	66
4.5. ESQUEMAS ELÉTRICOS	67
5. ENSAIOS E TESTES REALIZADOS	69
5.1. ENSAIOS NO TANQUE DO LSA	69
5.2. ENSAIOS NA PISCINA MUNICIPAL DE ESPINHO	77

5.3. ENSAIOS NUMA PISCINA RESIDENCIAL.....	79
6. CONCLUSÕES	81
REFERÊNCIAS DOCUMENTAIS.....	85
ANEXO A. DIMENSÕES DO ROBÔ.....	87

Índice de Figuras

Figura 1	Robô flexível “Estrela do mar” [1].....	2
Figura 2	Robô aquático Ziphius [2].....	2
Figura 3	Constituição de um peixe ósseo [3].....	8
Figura 4	Algumas espécies de peixes [5].....	9
Figura 5	Representação do atum [6].....	10
Figura 6	Representação da espécie <i>Antigonia</i> [7].....	11
Figura 7	Exposição da raia-viola [8].....	12
Figura 8	Peixe-espada [9].....	13
Figura 9	Exposição do baiacu-de-espinhos [10].....	13
Figura 10	Tubarão-martelo [11].....	14
Figura 11	Representação do peixe-machado [12].....	14
Figura 12	Cavalo-marinho [13].....	15
Figura 13	Exposição do peixe-trombeta [14].....	15
Figura 14	Princípio de Arquimedes [18].....	17
Figura 15	Corpo a afundar-se.....	18
Figura 16	Corpo a elevar-se.....	18
Figura 17	Corpo em equilíbrio totalmente imerso (à esquerda) e parcialmente imerso (à direita)	19
Figura 18	Robô nadador vs robô aquático.....	20
Figura 19	Robô Tuna [19].....	21
Figura 20	Representação do peixe robô reconfigurável [20].....	23
Figura 21	Robô nadador controlado por um iPad [21].....	24
Figura 22	Robô aquático Ziphius [2].....	25
Figura 23	Robô nadador Emily [23].....	26
Figura 24	Robô PacX Wave Glider [24].....	27
Figura 25	Robô Grace [25].....	28
Figura 26	Robô de limpeza aquática [26].....	28
Figura 27	Arquitetura do sistema de controlo do robô.....	32
Figura 28	Interface com o utilizador do <i>software</i> Arduino v1.0.5.....	33
Figura 29	<i>Hardware</i> do Arduino Uno [28].....	35
Figura 30	Servomotor Goteck 2,5 kg.cm [29].....	38
Figura 31	Diagrama de blocos de um servomotor.....	38
Figura 32	Diagrama de controlo do ângulo de rotação dos servos [30].....	40
Figura 33	Espectro magnético [31].....	41

Figura 34	Representação do campo magnético terrestre [32].....	42
Figura 35	Representação da bússola.....	43
Figura 36	Constituição do sensor magneto-resistivo	43
Figura 37	Bússola HMC6352 [33].....	45
Figura 38	Barramento de comunicação I2C [34].....	45
Figura 39	Trama de comunicação I2C [35]	46
Figura 40	Módulo RF WLS102B5B [36].....	47
Figura 41	Representação da lógica de saídas <i>tri-state</i>	49
Figura 42	Constituição da bateria de ácido-chumbo [39].....	50
Figura 43	Estrutura fusiforme do robô.....	52
Figura 44	Representação da “cabeça” do robô	53
Figura 45	Três modelos de barbatanas concebidos.....	53
Figura 46	Veio da barbatana peitoral.....	54
Figura 47	Representação do rolamento de agulhas.....	54
Figura 48	Representação das faces do retentor.....	55
Figura 49	Representação do acessório em nylon.....	55
Figura 50	Representação da barbatana peitoral no robô	56
Figura 51	Representação do robô com as barbatanas	56
Figura 52	Componentes da estrutura do mecanismo da barbatana caudal.....	57
Figura 53	Aspetto da barbatana caudal no robô.....	57
Figura 54	Representação do robô	58
Figura 55	Monitoração dos dados da bússola	62
Figura 56	Fluxograma do princípio de funcionamento do robô	65
Figura 57	Bateria de ácido-chumbo de 12 V e 1200 mAh para alimentação da eletrônica do robô.	66
Figura 58	Esquema elétrico da ligação dos servomotores e da bússola ao Arduino.....	67
Figura 59	Esquema elétrico do módulo RF	67
Figura 60	Tanque do LSA	70
Figura 61	Valores gerados pela bússola no tanque.....	71
Figura 62	Robô a realizar ensaios no tanque do LSA com o modelo 1 de barbatanas	73
Figura 63	Duração temporal do percurso com as barbatanas a 30° de amplitude	73
Figura 64	Robô com o modelo 3 de barbatanas.....	74
Figura 65	Desvio com as barbatanas a 30° de amplitude	75
Figura 66	Duração temporal do percurso com as barbatanas a 45° de amplitude	75
Figura 67	Desvio com as barbatanas a 45° de amplitude	76
Figura 68	Robô a efetuar a travessia da piscina Municipal de Espinho	77
Figura 69	Sequência temporal do robô a atravessar a piscina Municipal de Espinho	78
Figura 70	Robô a realizar ensaios na piscina de fibra.....	79

Índice de Tabelas

Tabela 1	Calendarização do projeto.....	5
Tabela 2	Consumo de corrente dos componentes constituintes do robô.....	66
Tabela 3	Ensaio com as barbatanas a uma amplitude de movimento de 30°.....	72
Tabela 4	Ensaio com as barbatanas a uma amplitude de movimento de 45°.....	72
Tabela 5	Resultados obtidos nos ensaios na piscina Municipal de Espinho.....	78
Tabela 6	Resultados obtidos nos ensaios na piscina residencial.....	80

Acrónimos

ADC	-	<i>Analog Digital Converter</i>
BIOS	-	<i>Basic Input Output System</i>
CAN	-	<i>Controller Area Network</i>
CPU	-	<i>Central Processing Unit</i>
CTC	-	<i>Clear Timer Compare</i>
DAC	-	<i>Digital Analog Converter</i>
DC	-	<i>Direct Current</i>
EEPROM	-	<i>Electrically Erasable Programmable Read Only Memory</i>
GCC	-	<i>GNU Compiler Collection</i>
GPS	-	<i>Global Positioning System</i>
I2C	-	<i>Inter Integrated Circuits</i>
ISEP	-	Instituto Superior de Engenharia do Porto
LSA	-	Laboratório de Sistemas Autónomos
MIPS	-	<i>Million Instruction Per Second</i>
MSB	-	<i>Most Significant Bit</i>
Ni-Cd	-	Níquel - Cádmió
Ni-MH	-	Hidreto Metálico de Níquel

- PWM - *Pulse Width Modulation*
- RAM - *Random Access Memory*
- RF - *Radiofrequência*
- RISC - *Reduced Instruction Set Computer*
- SCL - *Serial Clock*
- SDA - *Serial Data*
- UART - *Universal Asynchronous Receiver Transmitter*
- USART - *Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter*
- USB - *Universal Serial Bus*

1. INTRODUÇÃO

A robótica é uma área da tecnologia que engloba eletrónica, mecânica e informática. Na atualidade é consensual dizer que a robótica tem vindo a ter cada vez mais utilidade nos diversos sectores da nossa sociedade. Existem muitas áreas nas quais se pode aplicar a robótica, podendo ter inúmeras funções no nosso quotidiano. Contudo, hoje em dia já existem diversas áreas em que a robótica se encontra bem presente, como por exemplo: veículos motorizados, exploração espacial, biónica, automação industrial, sistemas autónomos, entre outros.

A robótica no meio aquático tem sido um tema com algum desenvolvimento a nível mundial, visto que cada vez mais surgem grupos de I&D a desenvolverem os chamados robôs nadadores, com o intuito de desempenharem as mais variadíssimas funções no meio aquático e por vezes controlados de uma forma bastante sofisticada. Nos Estados Unidos está a ser desenvolvido por cientistas da Universidade de Harvard um robô flexível, denominado “Estrela-do-mar”, representado na Figura 1, cujo modelo se inspira nas estrelas-do-mar e nas lulas, sendo este um modelo de estrutura mole, no qual os seus movimentos se processam através de ar comprimido [1]. A empresa Portuguesa Azorean desenvolveu um submarino, designado por Ziphius (Figura 2), com a particularidade de ser controlado por telemóvel, e que contém numa das extremidades uma câmara capaz de apontar em várias direções e cujas imagens recolhidas são enviadas para um telemóvel [2].

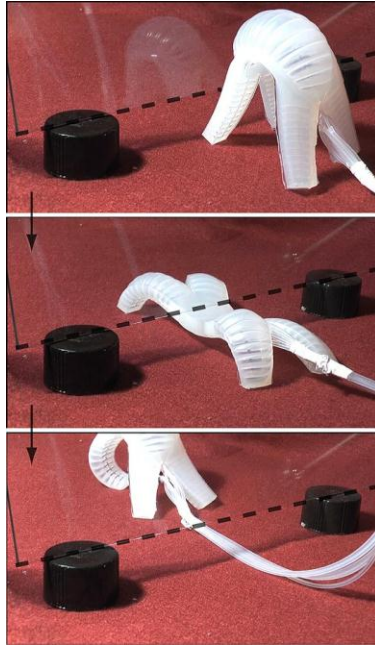


Figura 1 Robô flexível “Estrela do mar” [1]

Praticamente todos os robôs possuem um elevado desenvolvimento a nível mecânico e eletrônico.

A nível mecânico, escolhe-se o tipo de material a utilizar, atendendo ao meio onde o robô irá atuar e aos movimentos que o robô irá desempenhar. No caso particular dos robôs nadadores, a estanquicidade surge como uma das principais preocupações a nível mecânico, tendo em conta a proteção das placas eletrónicas, visto que se encontram sempre alocadas no interior do respetivo corpo do robô. Por forma a garantir um bom desempenho mecânico (boa movimentação e estanquicidade), a grande maioria dos robôs são realizados em acrílico, alumínio, aço ou titânio.



Figura 2 Robô aquático Ziphius [2]

Relativamente às tecnologias apresentadas normalmente por um robô, destacam-se as suas capacidades de autonomia (baterias), deteção (sensores) e controlo (atuadores).

A bateria armazena energia química que, quando solicitada, tem a capacidade de a transformar em energia elétrica. Existem diversos tipos de baterias, em que cada modelo deve ser selecionado consoante o projeto em questão. No âmbito da robótica a maioria dos projetos utilizam baterias de chumbo-ácido, níquel - cádmio (Ni-Cd), íons de lítio ou hidreto metálico de níquel (Ni-MH).

Os sensores consistem em dispositivos elétricos ou mecânicos, que convertem uma determinada grandeza física num sinal, podendo este ser digital ou analógico.

Os sensores podem ser classificados de duas formas: sensores ativos e sensores passivos. Os sensores ativos medem através da emissão de energia para o ambiente ou por modificarem o ambiente. Os sensores passivos não emitem energia mas, pelo contrário, recebem energia do ambiente. Um sensor laser e uma câmara de visão são exemplos de sensores ativos e passivos, respetivamente.

Os atuadores consistem em elementos que produzem movimentos, provenientes de comandos elétricos ou mecânicos. No sector da robótica o atuador mais utilizado é o motor. Os motores recebem energia elétrica e transforma-a em energia mecânica. Um modelo muito frequente na robótica é o servomotor, que proporciona um binário constante e elevada precisão no posicionamento. Os servomotores possuem basicamente um pequeno motor de corrente contínua (DC), um circuito eletrónico de controlo, um potenciómetro que roda juntamente com o eixo do servo e um conjunto de engrenagens.

1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO

Este projeto surgiu do desejo de realizar um trabalho no âmbito da robótica no meio aquático.

Existe atualmente um enorme interesse na implementação e utilização de veículos aquáticos na observação oceanográfica, busca e salvamento, limpezas, e em competições puramente desportivas. No entanto, na atualidade ainda existe um número muito restrito de investigadores nesta área, sendo esta uma área com potencial de crescimento futuro.

Atualmente alguns robôs de inspiração biológica apresentam um elevado desenvolvimento científico e tecnológico, incorporando tecnologia de comunicações sem fios (*wireless*) e painéis solares, e muito dotados ao nível da mecânica permitindo uma locomoção análoga aos peixes biológicos.

1.2. OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é o desenvolvimento e implementação de um robô nadador de inspiração biológica, com uma locomoção estável. Como melhoria do protótipo desenvolvido, idealizou-se o controlo de direção. Dada a complexidade inerente a este objetivo, sentiu-se a necessidade de o subdividir em múltiplas tarefas de realização mais simples, tais como:

- Estudar a forma de locomoção de um peixe biológico;
- Analisar os projetos já desenvolvidos;
- Idealizar e implementar a estrutura do robô;
- Desenvolver o *software* e *hardware* adequado para a locomoção estável do robô nadador;
- Realizar os testes à locomoção do respetivo robô.

1.3. CALENDARIZAÇÃO

A implementação de um robô nadador surge como o principal objetivo deste trabalho; contudo, para que esse objetivo pudesse ser alcançado, foi necessário realizar diversas tarefas, o que conduziu à calendarização apresentada na Tabela 1. Esta inclui as seguintes tarefas:

- planificação do trabalho;
- análise e definição dos requisitos e objetivos do projeto;
- estudo do estado da arte;
- projeto e descrição detalhada da estrutura, da tecnologia a implementar e sua organização;

- desenvolvimento do *software* e *hardware* para a locomoção do robô;
- realização de testes à locomoção do robô.

Tabela 1 Calendarização do projeto

ID	Nome das etapas	Duração	Março	Abril	Maió	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	
1	Planificação do trabalho	3 semanas	[Barra de Gantt: Março]								
2	Análise e definição dos requisitos e objectivos do projeto; Estado da arte e estudo de possíveis alternativas.	6 semanas	[Barra de Gantt: Março, Abril]								
3	Projeto e descrição detalhada da estrutura, da tecnologia a implementar e sua organização.	4 semanas	[Barra de Gantt: Maio]								
4	Desenvolvimento do software e hardware para a locomoção do robô	16 semanas	[Barra de Gantt: Junho, Julho, Agosto, Setembro]								
5	Realização de testes à locomoção do robô	3 semanas	[Barra de Gantt: Setembro]								
6	Redação da Tese	20 semanas	[Barra de Gantt: Maio, Junho, Julho, Agosto, Setembro, Outubro]								

1.4. ORGANIZAÇÃO DO RELATÓRIO

Este relatório encontra-se dividido em seis capítulos. Neste primeiro capítulo efetua-se uma primeira abordagem ao projeto e aos seus objetivos. É ainda efetuada uma abordagem teórica sucinta às tecnologias que normalmente constituem um robô.

No capítulo seguinte, 2, é efetuado um estudo teórico acerca da robótica no meio aquático. Em primeiro lugar é efetuada uma análise à biologia dos peixes. Posto isto, é abordado o tema da hidrostática, sendo de seguida apresentados alguns robôs já desenvolvidos por diversos grupos de investigadores, assim como as suas principais características.

O Capítulo 3 apresenta a arquitetura e descreve as principais tecnologias que compõem o robô implementado. É realizado um estudo das diversas tecnologias de que o robô dispõe, entre as quais: bateria, controlador, sensores e motores.

No Capítulo 4 descreve-se a implementação do trabalho, sendo detalhado todo o desenvolvimento do robô, dando especial atenção ao software e hardware desenvolvidos.

No Capítulo 5 são apresentados os testes realizados e os resultados obtidos, de forma a analisar as competências do protótipo desenvolvido e apurar as barbatanas mais adequadas para o robô.

Por último, no Capítulo 6 são reunidas as principais conclusões e apresentadas perspectivas de futuros desenvolvimentos do protótipo desenvolvido.

2. ESTUDO DA ROBÓTICA NO MEIO AQUÁTICO

Ao longo deste capítulo será apresentado o estudo realizado acerca da constituição fisiológica de um peixe, para que seja possível compreender a sua forma de locomoção. Seguidamente serão analisados os avanços tecnológicos no âmbito da robótica no meio aquático. Serão analisados alguns robôs, nomeadamente, a sua função, constituição, bem como os resultados experimentais obtidos em cada situação.

2.1. BIOLOGIA DOS PEIXES

O peixe consiste num animal vertebrado aquático, de corpo coberto de escamas, que se desloca na água principalmente com a ajuda de barbatanas, respirando por guelras e cuja reprodução é maioritariamente ovípara. Na respiração a água entra continuamente pela boca do peixe, passa pelas guelras e acaba por sair pelas partes laterais da cabeça. Cerca de 95% das 25000 espécies vulgarmente designados como peixes possuem esqueletos ósseos.

Os peixes são animais pecilotérmicos, isto é, a temperatura do seu corpo varia com a do ambiente. Em geral os peixes possuem a temperatura do ambiente em que se encontram inseridos.

A locomoção é assegurada por contrações musculares que se propagam ao longo de todo o corpo, da cabeça à cauda, e imprimem um movimento ondulatório aos flancos arqueados, empurrando-os para trás, contra a água (as ondas terminam na barbatana caudal, cujos movimentos oscilatórios aumentam o impulso). A musculatura do tronco do peixe é segmentada, o que permite os movimentos ondulatórios.

As barbatanas de um peixe ósseo (Figura 3), obedecem, primariamente, a objetos de orientação e equilíbrio. As barbatanas ímpares, dorsal e anal, dispostas ao longo do perfil superior e ventral, respetivamente, atuam como quilhas, evitando oscilações laterais do peixe. A barbatana caudal, ou cauda, opera imprimindo uma certa suavidade à locomoção. As peitorais, localizadas atrás das aberturas branquiais, permitem ao peixe mudar bruscamente de direção. As pélvicas, situadas abaixo das peitorais, exercem funções de travagem.

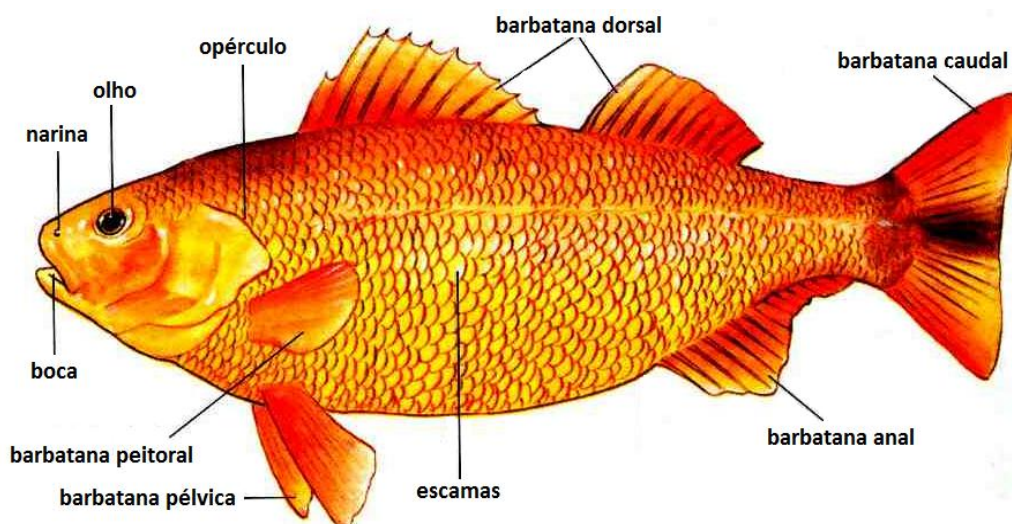


Figura 3 Constituição de um peixe ósseo [3]

O peixe é, maioritariamente, coberto de escamas lisas, cuja organização diminui o atrito com a água. A pele é composta de glândulas produtoras de muco, o que também contribui para reduzir o atrito com a água.

O modelo descrito, que, de certo modo, traduz a generalidade das situações, pode no entanto apresentar modificações substanciais. Assim, nos peixes que contenham um peso elevado, e que por sua vez não possam nadar de uma forma convencional, a movimentação é assegurada pelas barbatanas dorsal e anal [4].

2.1.1. Espécies de peixes

Esta secção tem como objetivo apresentar diferentes espécies de peixes. A Figura 4 apresenta enumeras formas/espécies de peixes.

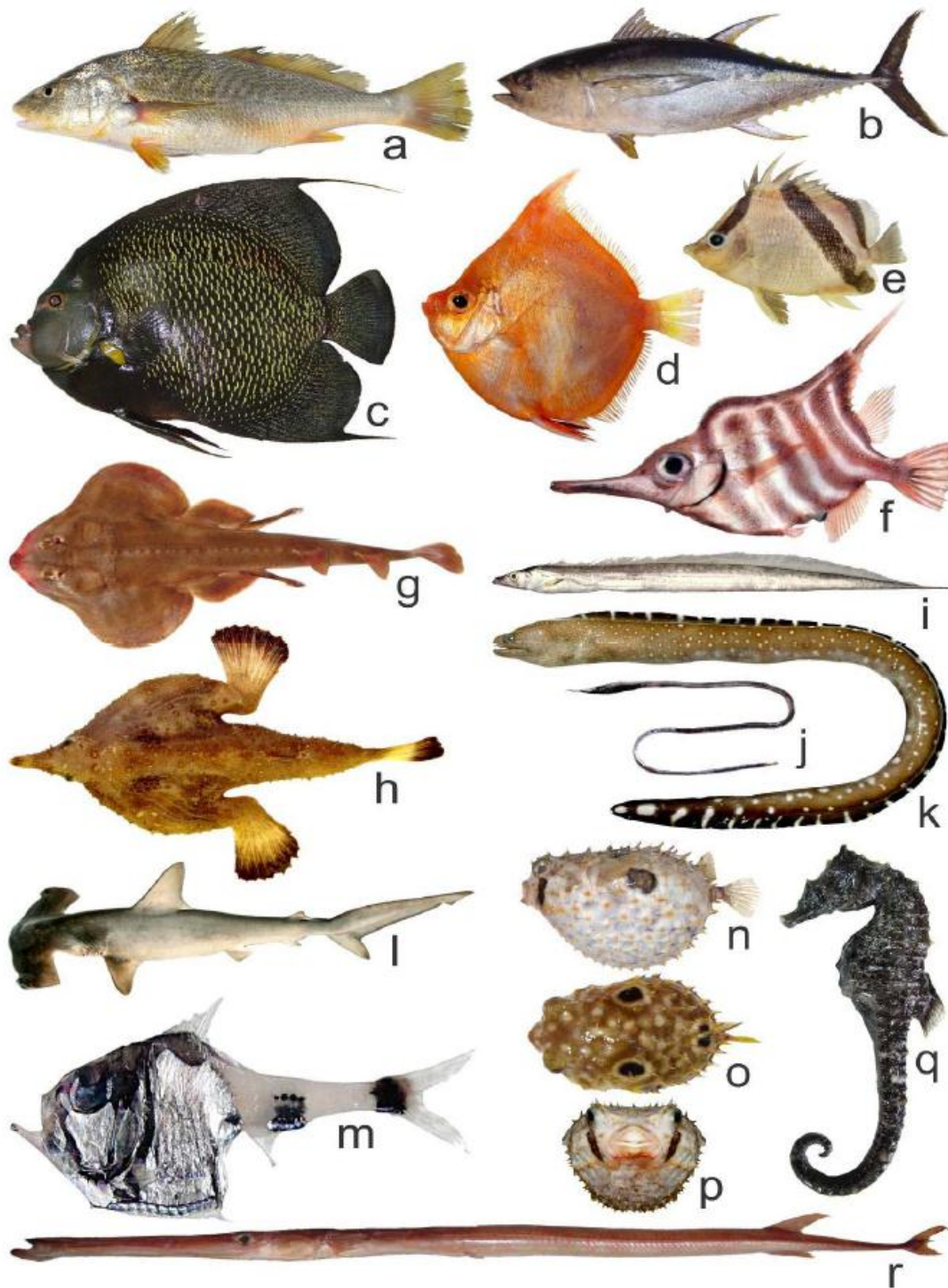


Figura 4 Algumas espécies de peixes [5]

As formas/espécies de peixes representadas na Figura 4 são:

- **Fusiforme:** (a) corvina (*Micropogonias furnieri*) e (b) atum (*Thunnus albacares*);

A corvina pode atingir até 70 cm de comprimento, tem o corpo alongado e comprimido, de tonalidade prateada a castanho, dorso mais escuro e ventre esbranquiçado, estrias escuras e oblíquas no dorso e flancos que se prolongam até a linha lateral sinuosa, e pequenos barbilhões abaixo da mandíbula.

O atum, representado na Figura 5, apresenta o corpo alongado, fusiforme, boca grande e alongada, duas barbatanas dorsais bem separadas e ajustáveis a um sulco no dorso para efetuar a locomoção, seguidas por grupos de lepidotríquias. A barbatana caudal é bifurcada e, no seu pedúnculo, ostenta duas quilhas de queratina.

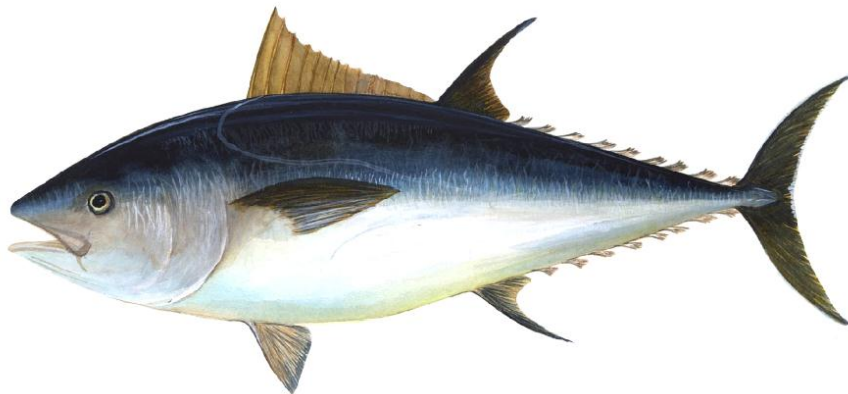


Figura 5 Representação do atum [6]

- **Achatado lateralmente:** (c) paru ou peixe-frade (*Pomacanthus paru*), (d) sem nome popular (*Antigonia capros*), (e) borboleta-de-profundidade (*Prognathodes guyanensis*) e (f) peixe-sapo (*Lophius gastrophysus*);

O peixe-frade é bastante alto, ovalado e achatado. Possui duas barbatanas dorsais que possibilitam a locomoção e uma anal com os raios prolongados em longos filamentos. Na fase inicial da sua vida, possuem o corpo e a cabeça pretos com arcos irregulares amarelos. Na fase adulta tem coloração cinza-escura, apresentando cada escama um pequeno ponto preto e a borda amarelada em forma de meia-lua.

A espécie *Antigonia capros* (Figura 6) consiste num tipo de peixe que frequenta as profundidades. Este peixe pode atingir os 30 cm de comprimento, no entanto a maioria não excede os 20 cm. A sua propulsão é efetuada através das barbatanas peitorais.



Figura 6 Representação da espécie *Antigonia* [7]

A borboleta de profundidade possui um nome derivado da particularidade de saltar fora de água e bater as barbatanas, percorrendo diversos metros num curtíssimo espaço de tempo, numa espécie de voo. Este peixe mede entre 4 e 6 cm e as suas barbatanas peitorais, atendendo à dimensão, são consideradas fortes. A locomoção é conseguida através das barbatanas dorsais.

O peixe-sapo é esbranquiçado, amarelo e preto, e possui um comprimento entre os 10 e 16 centímetros. A locomoção é garantida através das pequenas barbatanas peitorais que possuem.

- **Achatado dorso-ventralmente:** (g) raia-viola (*Zapterix brevirostris*) e (h) peixe-morcego (*Ocgocephalus vespertilio*);

A raia-viola, representada na Figura 7, tem um corpo semelhante a uma viola, possuindo barbatanas peitorais, que neste caso auxiliam apenas em manter a profundidade e planar, e o resto do corpo alongado, com duas barbatanas dorsais e uma caudal bem desenvolvidas para obter uma boa propulsão.



Figura 7 Exposição da raia-viola [8]

O peixe-morcego possui um corpo achatado das costas para a barriga, formando um triângulo. A coloração deste peixe é arenosa ou pardacenta com manchas escuras por toda parte superior de seu corpo. O comprimento deste peixe pode variar normalmente entre os 15 e 25cm.

- **Anguiliforme:** (i) peixe-espada (*Trichurus lepturus*), (j) peixe-fita (*Serrivomer schimidti*) e (k) moreia-pintada (*Gymnothorax conpersus*);

O peixe-espada (Figura 8) é um peixe teleósteo da família dos triquiurídeos, das regiões tropicais e temperadas dos oceanos. Pode ter até 3,5 metros de comprimento, possuindo um corpo alongado com a cabeça cônica e a cauda pontiaguda. A barbatana dorsal inteiriça e anal com espinhos proporcionam uma rápida locomoção.

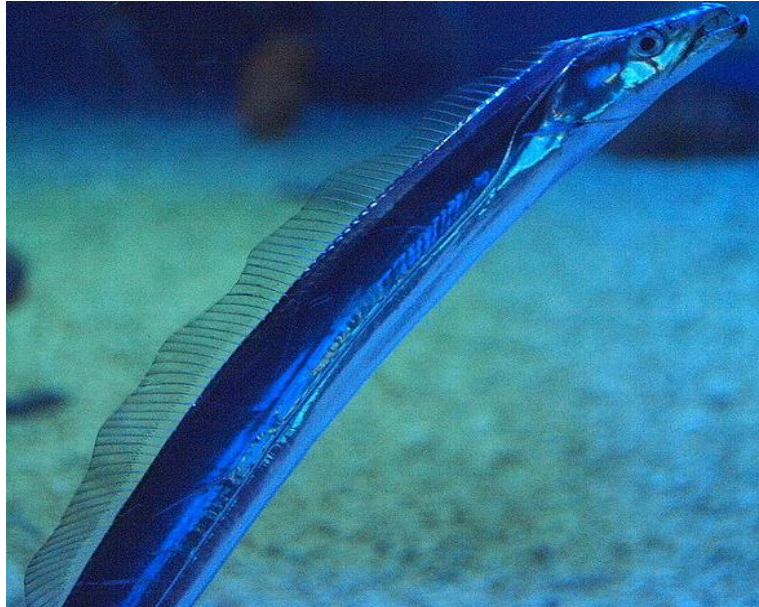


Figura 8 Peixe-espada [9]

O peixe-fita e a moreia-pintada medem aproximadamente 1,6 metros e 3 metros de comprimento, respectivamente. Ao nível da locomoção são equiparados ao peixe-espada.

- **Globular:** baiacu-de-espinho (*Cylichthys spinosus*) em vista lateral (n), superior (o) e frontal (p);

O baiacu-de-espinho, representado na Figura 9, pertence ao grupo dos Tetraodontiformes. Mede cerca de 15 cm, possui o corpo repleto de espinhos e movimenta-se através das barbatanas peitorais.



Figura 9 Exposição do baiacu-de-espinhos [10]

- **Outras formas:** (l) tubarão-martelo (*Sphyrna zigaena*), (m) peixe-machado (*Argyropelecus*), (q) cavalo-marinho (*Hippocampus*) e (r) peixe-trombeta (*Fistularia petimba*).

Os tubarões-martelo têm um comprimento entre 1 e 6 metros. Esta espécie tem duas projeções, uma de cada lado da cabeça, dando à cabeça o aspeto de um martelo, como se pode visualizar na Figura 10. Os olhos e fossas nasais estão localizados nas extremidades das projeções. Inicialmente pensava-se que a cabeça em forma de martelo ajudava os tubarões a obter os alimentos, dando ao tubarão a capacidade de virar a cabeça com precisão e rapidamente sem perder a estabilidade. Porém, foi descoberto que as suas vértebras o permitem virar com precisão a cabeça e o resto do corpo.



Figura 10 Tubarão-martelo [11]

O peixe machado (Figura 11), que vive habitualmente em cardume, desloca-se junto à superfície, local onde também se alimentam. O corpo tem mais que 6 cm, possui um aspeto prateado, com uma linha escura em cada lado, e as barbatanas peitorais possuem uma grande musculatura que faz com que consiga dar grandes saltos na superfície da água.

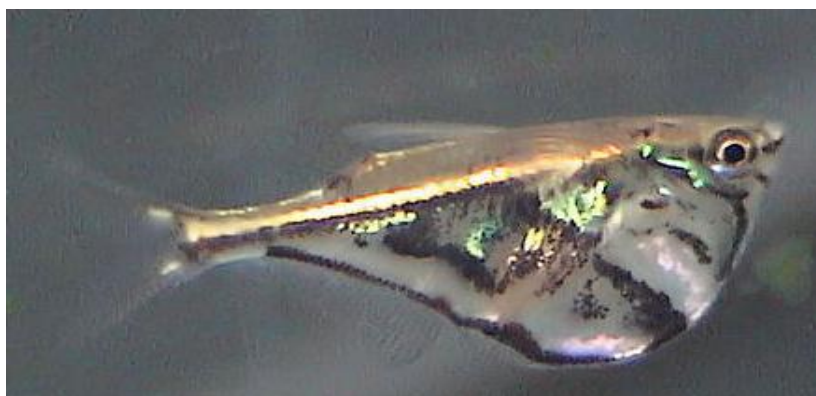


Figura 11 Representação do peixe-machado [12]

Os cavalos-marinhos caracterizam-se por uma cabeça alongada, com filamentos que lembram a crina de um cavalo, como se pode visualizar na Figura 12. A propulsão é feita com o corpo na vertical, movimentando rapidamente as suas barbatanas. Algumas espécies podem ser confundidas com plantas marinhas, com corais ou anêmonas marinhas. Contém no máximo 15 centímetros de comprimento e pesa cerca de 50 a 100 gramas.



Figura 12 Cavalo-marinho [13]

O peixe-trombeta, representado na Figura 13, é um peixe de corpo alongado com cerca de 1,50 metros, podendo chegar aos 2 metros. Possui olhos grandes e salientes. Todas as barbatanas são transparentes. A cor do peixe-trombeta é verde com manchas azuis por todo o corpo.



Figura 13 Exposição do peixe-trombeta [14]

Pretendia-se que o protótipo desenvolvido fosse semelhante a um peixe com formato fusiforme, por exemplo o Atum. Apesar de o acrílico ser manuseável, não foi possível alcançar o formato de um Atum.

2.2. ESTÁTICA DOS FLUIDOS

A estática dos fluidos é a parte da física que estuda as forças exercidas por e sobre um determinado fluido em equilíbrio estático. O fluido consiste numa substância líquida ou gasosa. O volume dos líquidos varia pouco com as condições de pressão e temperatura, mas os gases, devido à grande mobilidade das suas moléculas, apresentam uma propriedade denominada expansibilidade, de modo que ocupam todo o volume disponível.

Quando um fluido é submetido a uma força tangencial, deforma-se de uma forma contínua, ou seja, quando colocado num determinado recipiente, o fluido adquire o seu próprio formato.

A pressão resulta da força que atua sobre uma unidade de superfície. A pressão (p) é determinada pelo quociente da resultante das forças perpendiculares (F_{\perp}) à superfície de aplicação e a área (A) desta superfície.

$$p = \frac{F_{\perp}}{A} \quad (1)$$

Mede-se em N/m^2 , unidade denominada Pascal (Pa). A pressão existente num determinado ponto do interior de um líquido deve-se ao peso do líquido que está por cima dele.

A pressão hidrostática tem diversas aplicações, entre as quais, o abastecimento de água.

A densidade (d) é a grandeza que relaciona a massa (m) de um corpo com o seu volume (V).

$$d = \frac{m}{V} \quad (2)$$

Por exemplo, quando se verifica que dois corpos formados por materiais diferentes, mas com o mesmo volume, têm um peso diferente, na verdade estamos perante um corpo mais denso que o outro [15][16].

A estática dos fluidos permite concluir que **Erro! A origem da referência não foi encontrada.**

- a pressão no interior de um líquido em equilíbrio hidrostático aumenta com a profundidade;
- a superfície livre de um líquido em equilíbrio hidrostático é plana e horizontal;
- dois pontos que se encontrem ao mesmo nível, no interior de um líquido, em equilíbrio hidrostático, estão à mesma pressão;
- dois pontos que se encontrem ao mesmo nível, no interior de um líquido, contido num sistema de vasos comunicantes, em equilíbrio hidrostático, estão à mesma pressão.

2.2.1. Princípio de Arquimedes

Arquimedes foi um físico Grego, considerado um dos maiores cientistas da antiguidade clássica. Entre as diversas contribuições à Física, enaltece-se as fundações da hidrostática e da estática, tendo descoberto a lei do impulso, frequentemente designada por lei de Arquimedes.

A lei de Arquimedes define que um corpo mergulhado num fluido sofre, por parte do fluido, uma força vertical para o topo, cuja intensidade é igual ao peso do fluido deslocado pelo corpo, como se pode visualizar na Figura 14.

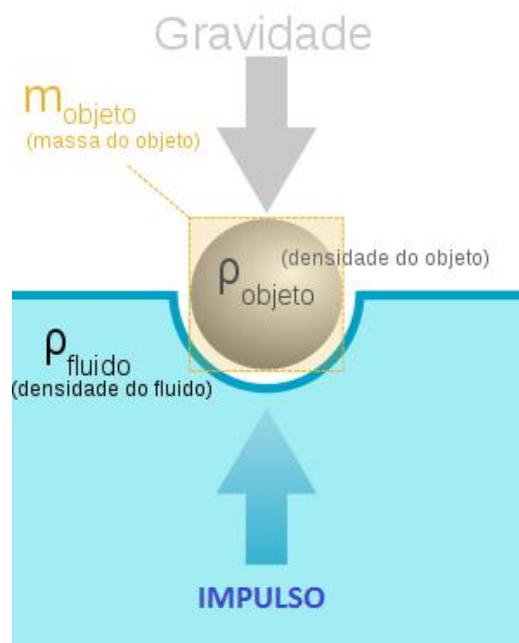


Figura 14 Princípio de Arquimedes [18]

Quando um corpo mais denso do que um líquido é imerso nesse líquido, observa-se que o valor do seu peso, dentro desse líquido, é aparentemente menor do que no ar. A diferença entre o valor do peso real e do peso aparente corresponde à impulsão exercida pelo líquido.

Quando a intensidade da força de impulsão é menor do que a intensidade do peso do corpo, o corpo afunda-se, como se pode visualizar na Figura 15.

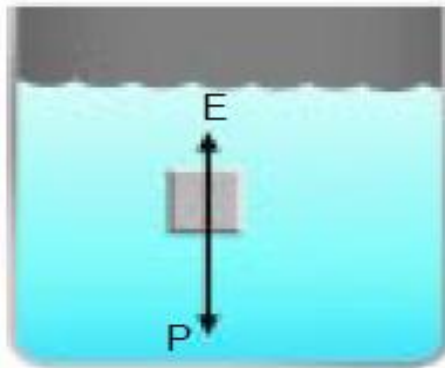


Figura 15 Corpo a afundar-se

Se a intensidade da força de impulsão for superior à intensidade do peso do corpo, o corpo eleva-se, como se pode visualizar na Figura 16.

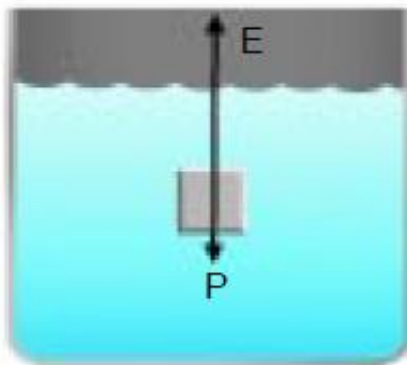


Figura 16 Corpo a elevar-se

A Figura 17 representa a possibilidade de a intensidade da força de impulsão ser igual à intensidade do peso do corpo, mantendo-se em equilíbrio, podendo este ser totalmente imerso (à esquerda) ou parcialmente imerso (à direita).

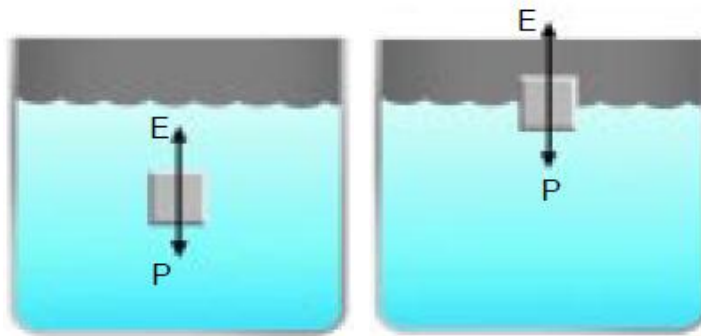


Figura 17 Corpo em equilíbrio totalmente imerso (à esquerda) e parcialmente imerso (à direita)

A flutuação depende da densidade. Um corpo flutua na água pura quando tem uma densidade inferior à desta, que é de 1 g/cm^3 (no Sistema Internacional, 1000 kg/m^3).

2.3. DINÂMICA DOS FLUIDOS

O estudo dos fluidos requer uma série de novos conceitos que permitam tratar tanto o movimento dos fluidos como os fenômenos que se produzem nos corpos submersos nas suas correntes. Peculiarmente, quando se fala nos fluidos líquidos, é necessário abordar a sua viscosidade. A viscosidade dos fluidos consiste no transporte microscópico de quantidade do movimento por difusão molecular, no qual se conclui que quanto maior a viscosidade, menor será a velocidade a que o fluido se movimenta. Quanto mais espesso for o líquido maior será a sua viscosidade. O coeficiente de viscosidade das substâncias indica o valor da força interna de atrito e a resistência que o fluido opõe à circulação. A classificação pode ser de diversos tipos, dependendo da velocidade a que o fluido circula. Normalmente classifica-se como regime laminar quando a velocidade não é excessivamente grande em relação à viscosidade, enquanto o regime não laminar ou turbulento alcança-se quando, ultrapassado um certo valor crítico para a velocidade, aparecem turbulências no seio do fluido. Na fase laminar a resistência é proporcional à velocidade relativa entre o fluido e o objeto, enquanto na turbulenta depende do quadrado da velocidade relativa, pelo que aumenta a grande velocidade [16].

2.3.1. Lei de Stokes

A lei de Stokes diz que a queda de um objeto no meio de um fluido é travada pela viscosidade deste. A lei afirma que o atraso depende da viscosidade do fluido, do tamanho do corpo e da velocidade com que mergulha no fluido. O atrito depende da viscosidade do corpo [16].

2.4. DESENVOLVIMENTOS DA ROBÓTICA NO MEIO AQUÁTICO

Ao longo dos últimos anos têm sido desenvolvidos diversos protótipos de robôs, que neste trabalho vamos classificar como robôs nadadores e robôs aquáticos. O robô nadador consiste num robô capaz de se deslocar, à superfície ou submerso, através de determinados movimentos auxiliares do corpo ou apêndices deste (tipicamente de inspiração biológica, como por exemplo: braços, barbatanas e/ou caudas) efetuados no meio aquático. O robô aquático movimenta-se à superfície ou submerso, e desloca-se sem a necessidade de movimentos auxiliares, sendo a propulsão geralmente assegurada através de propulsores mecânicos. A Figura 18 apresenta exemplos de um robô nadador (à esquerda) e um robô aquático (à direita).



Figura 18 Robô nadador vs robô aquático

Parte dos robôs referidos podem ser de inspiração biológica. Um robô de inspiração biológica define-se pela sua capacidade de emular as capacidades naturais dos animais em que se baseiam, incluindo os seres humanos.

Os robôs mencionados têm como objetivo o desempenhar de determinadas funções, entre as quais, busca e salvamento, limpeza ou até mesmo competições de âmbito meramente desportivo.

De seguida, são apresentados alguns exemplos de robôs das categorias acima mencionadas.

2.4.1. Robôs Nadadores

A presente secção aborda alguns exemplos de robôs nadadores, focando-se na análise das principais características que caracterizam os robôs representados.

- **Robô Tuna**

O robô Tuna, desenvolvido no MIT em 1994 e apresentado na Figura 19, foi construído de forma a assemelhar-se a um pequeno atum, tendo sido o primeiro peixe robô que impulsiona o seu corpo flexível e executa movimentos oscilatórios. É controlado por seis sensores, que se encontram colocados em vários locais ao longo do seu corpo. A locomoção é efetuada dentro de água e a sua eficiência é determinada tendo em conta as forças do seu corpo.



Figura 19 Robô Tuna [19]

Reunindo um conjunto de componentes sofisticados que permitem uma locomoção próxima da biológica, este robô possui uma capacidade de movimentação livre e autónoma. A estrutura do robô consiste numa superfície rígida de alumínio [19].

Engenheiros ligados ao MIT desenvolveram a primeira versão do robô, tendo-se sucedido os primeiros ensaios numa piscina. Chegou-se à conclusão que, graças aos seus constituintes físicos, este projeto poderia atingir o seu principal objetivo, que consiste em possuir um corpo dinâmico que tenha a capacidade para imitar um atum biológico. A

forma dinâmica de um verdadeiro atum nunca foi rigorosamente medida, por isso não há uma definição exata.

As experiências assentaram em duas fases. A primeira fase consistiu na análise dos controladores, sensores e no desempenho do *software* no que diz respeito à deslocação do robô Tuna numa doca. Esta primeira fase foi determinante para avaliar a capacidade de deslocação. A segunda fase consistiu num conjunto básico de movimentos de locomoção, em que o robô Tuna basicamente se deslocava com uma amplitude variável que atravessava o corpo na totalidade. Com este objetivo pretendia-se verificar o sistema na íntegra, de forma a constatar a estabilidade dos movimentos.

Como conclusão, verificou-se que o desempenho do robô dependia de um número de variáveis, no qual predominam a sua robustez e as características técnicas. Apesar de todos os obstáculos, os objetivos do projeto foram alcançados [19].

▪ **Peixe robô reconfigurável**

Analisando o robô, representado na Figura 20, verifica-se que o módulo da cabeça é constituído por diversos componentes eletrónicos. A parte da cabeça do robô é construída através de alumínio com duas coberturas transparentes fixadas na armação do robô. A antena da comunicação sem fios (*wireless*), o interruptor estanque e a tomada para carregar a bateria estão fixadas na parte superior do mesmo. O interior da cabeça é de tal forma profundo que lhe proporciona espaço suficiente para a colocação da bateria e de todos os componentes eletrónicos. Dois servomotores são colocados de forma simétrica na parte superior e os eixos dos mesmos estão diretamente ligados aos eixos rotativos que potenciam a rotação das barbatanas. O involucre exterior das membranas peitorais é composto de um semicilindro e de uma peça fabricada em forma de cubo, que são aparafusadas com anilhas estanques entre elas. O servomotor é colocado no interior da cavidade do semicilindro e o eixo rotativo é ligado aos eixos do servomotor através de uma estrutura de vedação no módulo em forma de cubo. Os módulos das barbatanas peitorais são colocados simetricamente e, em simultâneo, capazes de dois movimentos: a rotação sobre eixos e pela rotação da barbatana peitoral.



Figura 20 Representação do peixe robô reconfigurável [20]

O robô foi projetado para uma locomoção livre em que a sua construção incorpora microcontroladores e comunicação *wireless*. Está equipado com quatro baterias recarregáveis Ni-Cd de 2500 mAh, com capacidade para uma hora de autonomia. A locomoção do robô é processada através de um microcontrolador AT91SAM7A3 que integra uma arquitetura RISC de 32 bits de elevado desempenho e um processador ARM7TDMI. O controlador estabelece a ligação da comunicação sem fios através de uma porta *Universal Asynchronous Receiver Transmitter* UART. O acelerómetro ADXL202 é utilizado para medir os movimentos de aceleração. O funcionamento do servomotor depende do sinal PWM gerado pelo microcontrolador. Outras interfaces, como portas *Universal Serial Bus* (USB), *Controller Area Network* (CAN) bus, *Inter Integrated Circuits* (I2C) bus e *Analog Digital Converter* (ADC) podem vir a ser utilizadas em futuras aplicações [20].

▪ Robô AQUA

Investigadores da Universidade de York, sediada em Toronto, no Canadá, desenvolveram um robô nadador, representado na Figura 21 [21].

O objetivo do projeto AQUA foi desenvolver e implementar um robô totalmente autónomo, para explorar ambientes subaquáticos. Os seis motores que o constitui, proporcionam uma locomoção estável tanto à superfície como no fundo de areia. A versão 1.0 do robô possui as seguintes dimensões: 50×65×13 cm (largura × comprimento × altura) e pesa cerca de 18 kg. O corpo é feito de alumínio anodizado. As “pernas” do robô AQUA são intercambiáveis: barbatanas para nadar e pernas de borracha para andar ao longo da praia, contudo ainda contém algumas limitações ao caminhar. As pernas são controladas individualmente por motores de um único eixo, permitindo uma grande flexibilidade. O robô AQUA pode ser controlado através de um cabo de fibra ótica ou por controlo remoto. Possui uma câmara de vídeo que permite ajudar na locomoção e observar os locais que o robô atravessa.



Figura 21 Robô nadador controlado por um iPad [21]

O robô AQUA é controlado através de uma biblioteca desenvolvida na linguagem de programação C++, designada por RoboDevel, que consiste num conjunto de bibliotecas de programação da família RHex de robôs [22]. As funcionalidades de natação e caminhada são implementadas como módulos RHexLib [21].

2.4.2. Robôs Aquáticos

Esta secção apresenta alguns robôs aquáticos. Mesmo não sendo nadadores, nem de inspiração biológica, a sua apresentação torna-se válida atendendo às características/funções que estes robôs possuem.

- **Robô Ziphius**

A empresa Portuguesa Azorean desenvolveu um submarino, designado por Ziphius, com a particularidade de ser controlado por telemóvel. Trata-se de um robô pensado para ser de carácter lúdico, que se desloca à superfície da água e que pode ser controlado por um *smartphone* através de uma ligação *wi-fi*.

O robô Ziphius (Figura 22) contém numa das extremidades uma câmara capaz de apontar em várias direções e cujas imagens recolhidas são enviadas para o dispositivo através do qual se controla o robô.



Figura 22 Robô aquático Ziphius [2]

A comunicação possui um alcance de 100 metros, decorrente das limitações do próprio *wi-fi*, podendo no futuro ser melhorado, se for implementada uma ligação via satélite. A bateria tem autonomia para aproximadamente uma hora. Os dois motores que o robô possui são controlados individualmente e permitem-lhe girar sobre si próprio [2].

- **Robô salvador EMILY**

O robô EMILY (*Emergency Integrated Lifesaving Lanyard*) consiste num robô que executa serviços de socorro, como se pode visualizar na Figura 23. Foi desenvolvido em 2010, é autónomo e encontra-se em utilização em Zuma Beach, Malibu, podendo vir a ser utilizado em diversas outras praias norte-americanas.



Figura 23 Robô nadador Emily [23]

Com a tecnologia do *jet-ski*, este robô possui um motor leve e potente, mas alimentado por uma bateria. Este robô atinge velocidades na ordem dos 24 km/h e consegue transportar cerca de sete pessoas. Logo, este robô é aproximadamente seis vezes mais rápido a chegar ao local de socorro que um ser humano. Inicialmente este robô apresentava uma desvantagem, consistindo no facto de ser controlado remotamente; contudo, a nova versão do robô EMILY já é totalmente autónoma [23].

- **Robô PacX Wave Glider**

O PacX Wave Glider é um robô que percorreu 16 668 km, o que equivale à distância entre os EUA e Austrália, tendo demorado um ano e sendo já considerado um recorde de longa distância na navegação autónoma. Foi desenvolvido pela empresa Liquid Robotics, empresa esta que possui mais que um robô em alto mar.

A estrutura é composta por uma prancha de surf, como se pode observar na Figura 24, permitindo que a sua propulsão se efetue através da energia das ondas. Dispõe de painéis solares para efetuar o aproveitamento da energia solar.

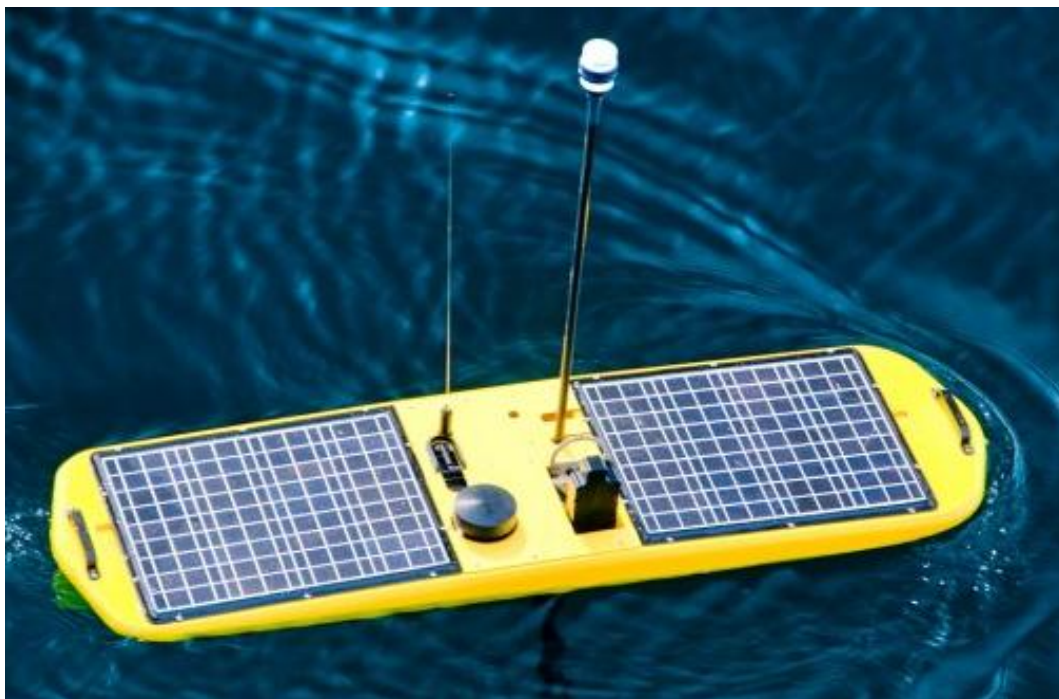


Figura 24 Robô PacX Wave Glider [24]

Uma vez que o robô permaneceu durante um ano em alto mar, os investigadores decidiram equipar o robô de forma a obter dados relevantes por onde o robô passou, tais como: condições do mar, salinidade, temperatura e o ecossistema [24].

- **Robô Grace**

Investigadores da Universidade de Michigan, nos Estados Unidos, desenvolveram um robô autónomo designado de Grace, cuja origem surge de *Gliding Robot ACE*. Este robô foi desenvolvido com o intuito de analisar as condições da água e os respetivos níveis de poluição por onde ele navega.

O robô Grace, representado na Figura 25, possui uma bomba de água para poder controlar o seu nível de profundidade, visto que atendendo ao local em que se encontra num determinado instante, pode ter a necessidade de alterar a profundidade a que se encontra.



Figura 25 Robô Grace [25]

A bateria do robô desliza para a frente e para trás, o que juntamente com a bomba de água proporcionam movimentos que impulsionam o robô. Este robô também possui uma cauda móvel.

- **Robô Zangão**

Elie Ahovi desenvolveu um robô aquático designado de Zangão, que procura e destrói os plásticos armazenados nos oceanos. O robô desloca-se de forma autónoma e suga todos os plásticos residentes no oceano. Como se pode visualizar na Figura 26, o robô possui uma estrutura que permite o armazenamento de resíduos no seu interior. Quando o robô se encontra repleto, desloca-se até à sua base para que possam ser removidos os resíduos capturados [26].



Figura 26 Robô de limpeza aquática [26]

A propulsão do robô é efetuada através de três motores com hélices. O robô possui um sistema de infrassons, que consiste na emissão de ondas sonoras extremamente graves com frequências abaixo dos 20 Hz, de forma a afugentar os peixes que se encontram nas proximidades para que não sejam capturados. O robô possui uma autonomia de aproximadamente duas semanas. Perspetiva-se que este robô conceda uma preciosa ajuda na limpeza dos oceanos [26].

3. ARQUITETURA E MÓDULOS UTILIZADOS

Ao longo deste capítulo é apresentada a arquitetura desenvolvida e os módulos utilizados, de forma a implementar o robô nadador de inspiração biológica. Pretende-se que o robô possua uma locomoção estável e direcional, sem alterar bruscamente a sua direção e movimentação.

De forma a alcançar os objetivos propostos, inicialmente procedeu-se à análise da estrutura, material e dimensões do robô. A estrutura do robô consiste numa estrutura equiparada à de um peixe biológico, atendendo ao facto de este ser um dos objetivos desta tese/dissertação.

O material a utilizar poderia ser acrílico, chapa, nylon, borracha entre outros. Contudo, teria de ser um material que permitisse o manuseamento de uma forma acessível e que garantisse sempre um acabamento estanque. Entre as soluções já referidas, optou-se pelo acrílico visto que possui as características mencionadas, e é um material de baixo custo. Relativamente às dimensões, encontram-se especificadas no Anexo A.

A propulsão do robô é obtida através de duas barbatanas peitorais. A barbatana caudal contribui para a orientação do robô. Para a locomoção do robô foi necessário a inclusão de

motores. Inicialmente analisaram-se os possíveis motores a utilizar: servomotor, motor DC, motor passo a passo, entre outros. Todavia, selecionou-se o servomotor, atendendo às suas características (ver secção 3.2). São utilizados três motores: dois para movimentar as barbatanas peitorais e um para movimentar a barbatana caudal. Com a aplicação dos três motores, em que cada motor proporciona apenas um tipo de movimento, o robô possui três graus de liberdade. De forma a permitir uma movimentação direcional, usou-se uma bússola, com 0,5 graus de resolução que comunica diretamente com o Arduino para controlar os movimentos direcionais do robô (ver secção 3.3). Decidiu-se utilizar o arduino neste projeto, mas também foi equacionada a utilização do Atmega16.

O módulo RF (apresentado em detalhe na secção 3.4) permite a comunicação sem fios com o robô, o que possibilita controlar o robô. Todos estes módulos são alimentados por uma bateria (descrita na secção 3.5). Assim, nas secções seguintes, serão detalhados os componentes constituintes do projeto (Figura 27), nomeadamente o Arduino, os servomotores, a bússola, o módulo RF e as baterias, respetivamente.

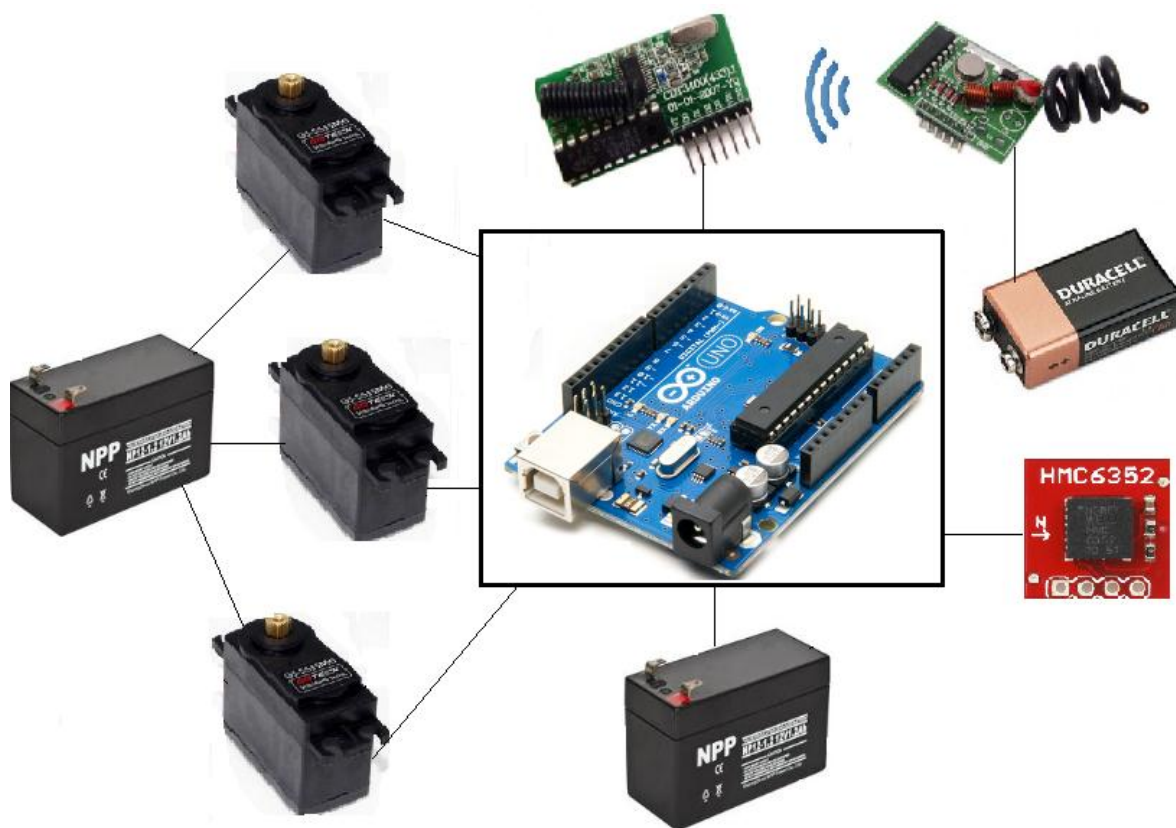


Figura 27 Arquitetura do sistema de controlo do robô

3.1. ARDUINO UNO

O Arduino consiste numa plataforma desenvolvida para o controlo de sistemas eletrónicos. É um sistema *open source* e permite a sua utilização em diversos sistemas operativos, por exemplo: Windows, Mac OS X e Linux. É composto em duas partes: *software* e *hardware* [27].

3.1.1. Software

O Arduino dispõe do seu próprio *software*, que pode ser obtido através da sua página oficial [27]. O ambiente de desenvolvimento do Arduino é um compilador *GNU Compiler Collection* (GCC), que utiliza uma interface gráfica desenvolvida em Java.

A interface gráfica com o utilizador, que se mostra na Figura 28, dispõe dos comandos:

- **Verify:** analisa o código para detetar possíveis erros.
- **Upload:** executa a compilação e efetua o *upload* deste para o Arduino.
- **New:** cria uma nova página para programar.
- **Open:** enumera as páginas existentes para selecionar a que se pretende.
- **Save:** guarda o código da página em que se encontra.
- **Serial Monitor:** exhibe os dados trocados através da linha de comunicação série.

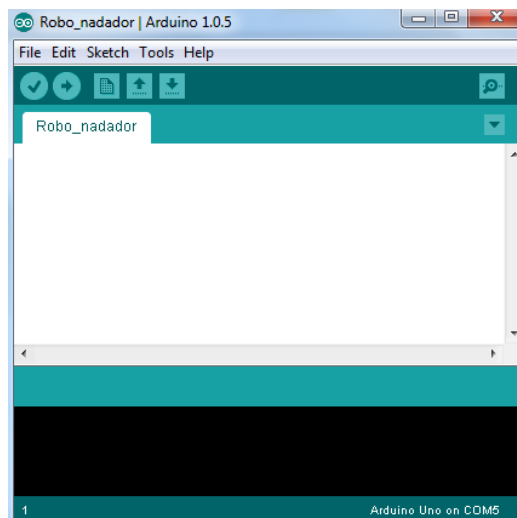


Figura 28 Interface com o utilizador do *software* Arduino v1.0.5

O programa que permite a programação do Arduino baseia-se em duas funções: função `setup()` e função `loop()`.

A função `setup()` permite a inclusão do código que inicializa a placa e o programa. Esta função é responsável pela inicialização de variáveis e definição dos *inputs* e *outputs*. Também permite a inicialização da utilização de bibliotecas e de comunicações série, entre outros. Esta função é executada apenas uma vez, voltando apenas a ser executada se for realizado o *reset* ou o *on/off* do *hardware*.

A função `loop()` permite que todo o código existente no seu interior seja sucessivamente repetido, resultando na constante leitura de portas e parâmetros, e atualização de saídas, de forma a atuar de acordo com as condições pretendidas.

Para além das funções referidas, o Arduino possui diversas funções que permite efetuar um determinado controlo, entre as quais:

- `pinMode (pino, modo)`

Configura o pino como entrada ou saída (modo).

- `digitalWrite (pino, valor)`

Coloca a saída digital no nível lógico “1” (5 V), “HIGH”, ou no nível lógico “0” (0 V), “LOW”.

- `digitalRead (pino)`

Efetua a leitura de uma entrada digital, podendo esta se encontrar no nível lógico “1” (5 V), “HIGH”, ou no nível lógico “0” (0 V), “LOW”.

- `analogRead (pino)`

Efetua a leitura de uma entrada analógica, em que o valor a receber varia entre os 0 e 5V.

- `analogWrite (pino, valor)`

Regista um determinado valor da saída analógica, podendo este ser qualquer valor entre 0 e 255, o que representa um valor de tensão entre 0 e 5 V respetivamente.

- `attachInterrupt` (interrupção, função, modo)

A função `attachInterrupt` permite que uma função seja executada apenas quando se verificar a alteração de estado da entrada associada à interrupção externa (ver secção 3.1.2.3). A função possui três parâmetros, em que o parâmetro “interrupção” define o número da interrupção que se pretende utilizar: interrupção “0” e interrupção “1” encontram-se associadas aos pinos 2 e 3, respetivamente. O parâmetro “função” define a função que será executada quando a interrupção é solicitada, enquanto o parâmetro “modo” determina quando é que a interrupção é executada. A interrupção pode ser executada de quatro modos distintos. No modo “LOW” a interrupção é executada sempre que o pino permaneça no estado lógico “0”, no “CHANGE” a interrupção é acionada sempre que se verifique a mudança do estado lógico, no “RISING” é acionada quando se altera o estado lógico de “0” para “1”, e por fim no “FALLING” é acionada sempre que o pino altere o seu estado lógico de “1” para “0”.

3.1.2. Hardware

O *hardware* do Arduino, representado na Figura 29, possui uma fonte de alimentação e um microcontrolador Atmel de 8 bits, no caso do utilizado neste projeto o ATmega328p, com diversas entradas e saídas de modo a permitir agregar outros circuitos/módulos expansivos designados por *shields*.



Figura 29 Hardware do Arduino Uno [28]

3.1.2.1. Fonte de alimentação

A fonte de alimentação do Arduino necessita de uma alimentação externa, entre 6 V e 20 V, e uma corrente mínima de 300 mA. Posteriormente efetua a filtragem e regulação para os valores de tensão que o Arduino Uno dispõe: 3,3 V e 5 V.

3.1.2.2. CPU

A *Central Processing Unit* (CPU), também conhecido como processador, é a parte de um sistema computacional que realiza as instruções de um determinado programa, para executar a aritmética básica, lógica, e a entrada e saída de dados. Como já foi mencionado, o Arduino utiliza o ATmega, sendo normalmente usados o ATmega8, o ATmega162 ou o ATmega328p. O Arduino Uno utiliza o ATmega328p, diferindo dos restantes na quantidade de memória disponível para o programa e na quantidade de entradas e saídas disponíveis.

3.1.2.3. Entradas e Saídas

O Arduino Uno dispõe de uma estrutura que permite definir os pinos como entradas ou saídas (Figura 29), através da utilização das funções `pinMode()`, `digitalWrite()`, `digitalRead()`, `analogRead()` e `analogWrite()`. A tensão de funcionamento das entradas e saídas é de 5 V. A corrente máxima que cada pino pode receber ou fornecer é de 40 mA.

Da totalidade de pinos mencionados para entradas e saídas digitais, 6 podem ser utilizados como entradas analógicas, bastando para isso efetuar a programação de acordo com o que se pretende. As entradas analógicas permitem ler um determinado valor de tensão. Normalmente as entradas analógicas são utilizadas para realizar a leitura de sensores, visto que os sensores convertem um determinado valor físico num sinal elétrico.

As saídas digitais permitem obter na saída 0 V ou 5 V, consoante o seu estado lógico se encontra a “0” ou “1” respetivamente, podendo assim ser acionado um determinado componente como por exemplo um led ou um relé.

O Arduino dispõe de funções específicas, associadas a determinados pinos, entre as quais:

- **LED: 13**

O Arduino Uno contém um LED no seu *hardware* conectado ao pino digital 13. Se o referido pino se encontrar no nível lógico “1” o LED encontrar-se-á ligado, caso contrário permanecerá no nível lógico “0”, isto é, apagado.

- **Serial: 0 (RX) e 1 (TX)**

Os pinos 0 e 1 podem ser utilizados para a comunicação série, correspondendo o pino 0 à receção (RX) e o pino 1 à transmissão (TX) de dados.

- **Interrupções externas: 2 e 3**

As interrupções externas permitem que o programa possa aceder a um pedido externo que surja num determinado instante. Estas interrupções são definidas através dos pinos 2 e 3.

- **AREF: Entradas analógicas**

Este pino dispõe da tensão de referência para as entradas analógicas. É utilizada através da função `analogReference()`.

- **I2C: 4 (SDA) e 5 (SCL)**

Através da utilização da biblioteca “wire” é possível estabelecer comunicações através do protocolo I2C, recorrendo para o efeito a estes dois pinos.

- **SPI: 10 (SS), 11 (MOSI), 12 (MISO) e 13 (SCK)**

Com a utilização da biblioteca SPI é possível estabelecer comunicações SPI, através dos pinos 10 a 13, com as funcionalidades indicadas acima.

- **Reset**

Este pino efetua o *reset* ao microcontrolador.

3.2. SERVOMOTOR - GOTECK

Os servomotores consistem em motores elétricos utilizados em situações que requerem uma elevada precisão do posicionamento. Recebem sinais elétricos que, por sua vez, transformam em movimentos de rotação.

Os servomotores utilizados (Figura 30) são dispositivos constituídos basicamente por um pequeno motor de corrente contínua (DC), um circuito eletrônico de controle, um potenciômetro que roda juntamente com o eixo do servo, um conjunto de engrenagens e três condutores para a respectiva ligação do servomotor.



Figura 30 Servomotor Goteck 2,5 kg.cm [29]

O motor, ao ser alimentado, faz rodar uma série de engrenagens (caixa redutora) que amplificam e transferem o binário do motor para o eixo, tal como se pode verificar no diagrama de blocos representado na Figura 31.

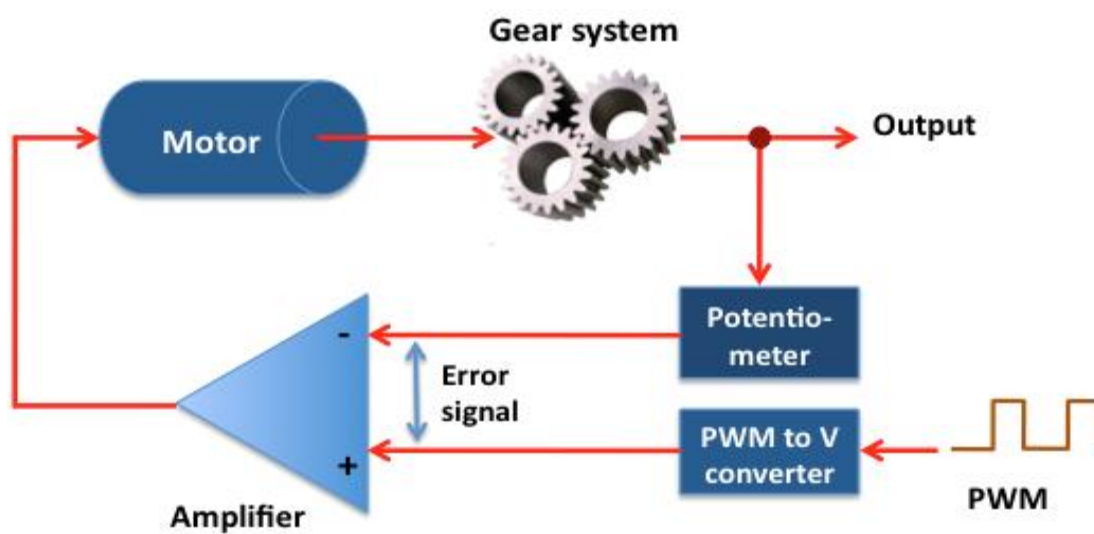


Figura 31 Diagrama de blocos de um servomotor

Os servomotores são normalmente utilizados em pequenos acionamentos e possuem movimentos angulares do eixo, normalmente entre 0° e 180° . Por norma não são dotados mecanicamente para rodar muito mais, devido à existência do potenciómetro e de um batente mecânico na engrenagem de saída.

O circuito eletrónico de controlo e o potenciómetro formam um sistema interno de realimentação para controlo da posição do eixo do servo. Como já foi referido, o eixo de um servo roda entre 0° e 180° , podendo este ser posicionado entre estes dois valores angulares, pela introdução de um sinal na entrada de controlo. Após aplicado (e mantido) o sinal, o servo mantém a posição do seu eixo. Se o sinal variar, o eixo do servo roda para a posição angular pretendida.

O potenciómetro existente encontra-se conectado mecanicamente ao eixo de saída do servo e funciona como sensor de posição do eixo, visto que a divisão de tensão nos terminais do potenciómetro produz uma tensão proporcional ao ângulo de rotação do eixo do servo, uma vez que a sua resistência varia em função da posição angular do seu eixo.

O circuito eletrónico realiza a comparação do valor do potenciómetro com os impulsos que recebe da linha de controlo, ativando o motor para corrigir a diferença que possa existir entre ambos. Resumindo, o potenciómetro permite ao circuito de controlo verificar a todo o momento a posição angular do eixo do servo. Se o eixo se encontrar no ângulo correto, o motor não rodará, mas se o ângulo não for o pretendido, este rodará no devido sentido até alcançar o ângulo correto. Este processo de comparação e correção do valor do potenciómetro com os impulsos gerados pela linha de controlo é designado por controlo em malha fechada.

O ângulo de rotação dos servomotores é determinado pela duração do impulso aplicado na linha de controlo. Nesta, aplica-se um sinal PWM, que consiste numa onda em que se varia a duração do tempo no estado lógico “1”, mantendo o mesmo período. A largura mínima e máxima do impulso depende do tipo de servo; contudo, na generalidade, apresentam os seguintes tempos (Figura 32):

- 1 ms, o eixo roda no sentido anti-horário, até atingir o limite do intervalo de rotação que corresponde a 0° ;

- 1,5 ms, o eixo roda até ficar estável no centro do intervalo de rotação, o que corresponde a 90°;
- 2 ms, o eixo roda no sentido horário, até atingir o outro limite de rotação, 180°.

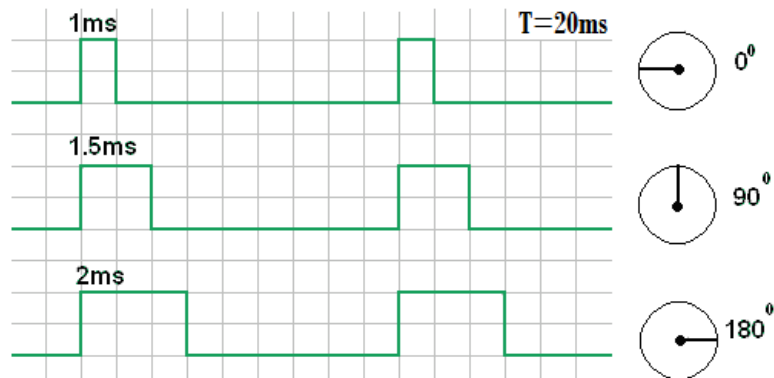


Figura 32 Diagrama de controle do ângulo de rotação dos servos [30]

Os impulsos devem ser gerados a cada 20 ms ($f = 50$ Hz), de forma a garantir o correto funcionamento do servomotor.

De seguida, apresentam-se as características técnicas dos servomotores Goteck (2,5 kg.cm) utilizados neste projeto:

- Tensão de operação: 4,8~6 V;
- Binário: 2,3 kg.cm (4,8 V) - 2,5 kg.cm (6,0 V);
- Velocidade de operação: 0,10 seg/60 (6 V); 0,11 seg/60 (4,8 V);
- Rolamento de esferas;
- Caixa redutora com engrenagens metálicas;
- Tamanho: 23×12,1×28,8 mm;
- Peso: 14,7 g.

A tensão de alimentação dos servos, tipicamente, encontra-se compreendida entre os 4,8 V e os 6 V, sendo normalmente alimentados a 5 V. Apesar de ser um intervalo de alimentação relativamente pequeno, quanto mais baixa for a tensão aplicada, mais lenta é a resposta do servo e menor é o seu binário.

O binário dos servomotores permite avaliar a “força” que os mesmos são capazes de exercer. Um servomotor, como o Goteck, tem um binário de 2,5 kg.cm a 5 V, considerando-se suficiente para projetos desta envergadura. Analisando este valor, verifica-se que num braço que possua um comprimento de 1 cm, o servo apresenta capacidade para levantar pesos até 2,5 kg.

3.3. BÚSSOLA DIGITAL

A bússola consiste num instrumento de orientação e navegação baseado em propriedades magnéticas dos materiais ferromagnéticos e do campo magnético terrestre. Neste trabalho é utilizada uma bússola de forma a garantir a movimentação do robô numa determinada direção.

3.3.1. Campo magnético

Com uma pequena agulha magnética sobre uma ponta ou suspensa por um fio sem torção pode-se verificar a existência de um campo magnético à volta de um íman. Chama-se campo magnético de um íman à região do espaço onde se fazem sentir ações magnéticas desse íman. Ao colocar um íman sob uma base de plástico e pulverizando a placa com limalha de ferro, verificamos que os diferentes grãos de limalha se orientam, pois cada grão fica magnetizado por se encontrar submetido à influência do íman. A limalha forma um conjunto de linhas que se designa de espectro magnético (Figura 33). Essas linhas que se fecham pelo interior do íman são linhas de fluxo. O conjunto de linhas que sai do polo norte é designado por fluxo de magnético. O fluxo magnético representa-se por Φ e a sua unidade S.I. é o Weber.

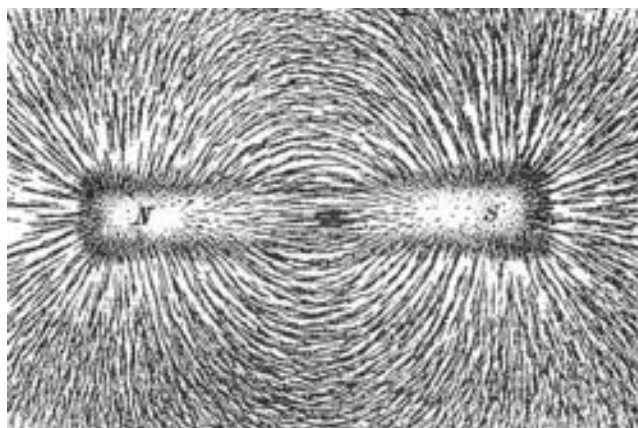


Figura 33 Espectro magnético [31]

O fluxo por unidade de secção do íman é designado por indução, representa-se por B e tem por unidade o weber por m^2 , a que também se chama Tesla (T).

$$B = \frac{\Phi}{S} \quad (3)$$

As linhas de fluxo designam-se por linhas de força no seu trajeto pelo ar e linhas de indução quando percorrem o interior do material magnético (Figura 34).

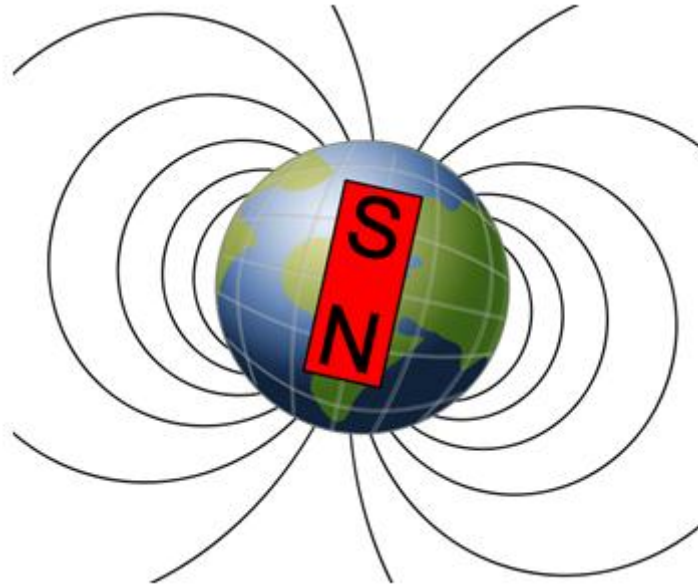


Figura 34 Representação do campo magnético terrestre [32]

Deixando orientar uma agulha magnética ela toma uma posição próxima da direção norte-sul terrestre. A Figura 35 representa uma bússola em que a extremidade vermelha representa o polo norte e a extremidade branca o polo sul. Na realidade é como se no interior da terra existisse um íman gigantesco cujo polo sul estivesse junto ao polo norte terrestre. Este íman é a causa do campo magnético terrestre, devido à ação que se faz sentir em toda a superfície da terra.

Para cada ponto da terra a direção norte-sul magnética faz um pequeno ângulo com a direção norte-sul terrestre. Esse ângulo chama-se declinação magnética. Em Portugal a declinação magnética é de aproximadamente 10° .

Ao dividirmos a meio um íman, verificamos que cada uma das partes constitui um íman pois apresenta um polo norte e um polo sul. Se continuarmos a divisão, obtemos sempre ímanes com dois polos cada vez mais pequenos.



Figura 35 Representação da bússola

3.3.2. Bússola Digital HMC6352

A bússola digital é constituída por um sensor magneto-resistivo (KMZ32), um bloco de condicionamento de sinal (SCU - *Signal Conditioning Unit*) e por um bloco responsável em determinar a direção (DDU - *Direction Determination Unit*).

Os sensores magneto-resistivos baseiam-se no efeito da magneto-resistência, variando o valor da resistência conforme o campo magnético da terra. Este sensor, representado na Figura 36, possui uma pequena camada de ferro-níquel sobre uma base isolada, em que a sua magnetização (M) depende das propriedades físicas dos metais. Ao aplicar um campo magnético perpendicular à circulação da corrente (I), surge uma força que atua sobre os portadores de carga, desviando-os da trajetória, resultando na alteração da resistência do material.

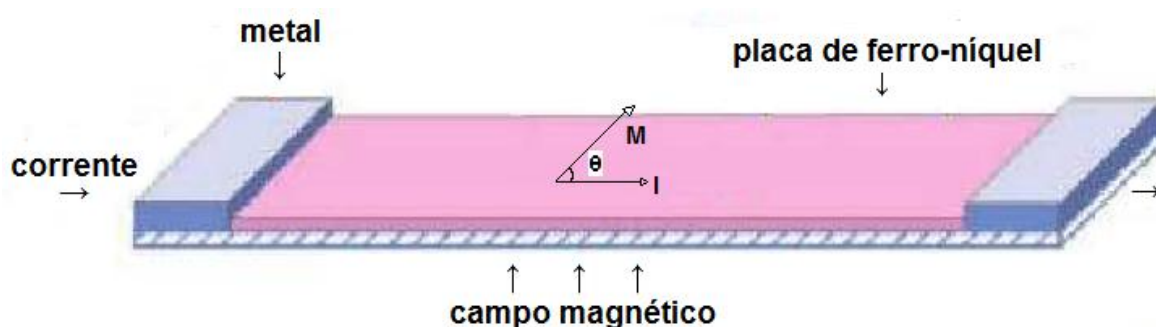


Figura 36 Constituição do sensor magneto-resistivo

A resistência é determinada através da seguinte expressão:

$$R = R_0 + \Delta R (\cos \theta)^2 \quad (4)$$

em que:

$$R_0 = R_{min} \quad (5)$$

$$\Delta R = R_{max} - R_{min} \quad (6)$$

Uma vez que a resistência depende da ação do campo magnético externo, pode-se concluir que:

$$\theta = 0, \quad R_{m\acute{a}x} \quad (7)$$

$$\theta = 90, \quad R_{min} \quad (8)$$

O sensor KMZ32 apresenta uma elevada sensibilidade, baixo nível de ruído e é influenciável por campos externos.

O bloco de condicionamento de sinal (SCU) é responsável por fornecer tensões proporcionais ao campo nas suas direções X e Y. Também amplifica o sinal proveniente do sensor e elimina o *offset*.

O bloco responsável por determinar a direção (DDU) realiza o cálculo matemático para obter o correspondente ângulo da bússola em hexadecimal.

A bússola digital utilizada neste projeto é a HMC6352 (Figura 37), visto que apresenta as características pretendidas, entre as quais se destacam:

- interface I2C;
- alimentação entre 2,7 e 5,2 V;
- taxa de amostras configurável entre 1 e 20 Hz;
- 0,5 graus de resolução;
- 1 grau de repetibilidade;
- corrente típica: 1 mA.



Figura 37 Bússola HMC6352 [33]

De forma a compreender o protocolo de comunicação da bússola, segue-se uma breve apresentação da interface de comunicação I2C.

3.3.3. Protocolo I2C

O protocolo I2C foi desenvolvido pela Philips em meados dos anos 80. Este protocolo baseia-se na comunicação a dois fios, um para o sinal de *clock* (SCL) e outro é responsável pela troca de dados (SDA). A comunicação baseia-se num sistema *Master-Slave* (mestre-escravo), como se pode visualizar na Figura 38. A comunicação é *half-duplex*, visto que não podem ser enviados e recebidos dados simultaneamente.

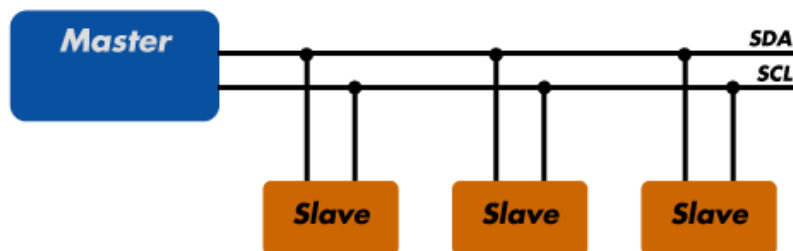


Figura 38 Barramento de comunicação I2C [34]

O *master* é responsável por gerir a ligação, isto é, é o único que pode efetuar pedidos e enviar ordens aos restantes dispositivos. Cada dispositivo *slave* contém um determinado endereço, diferente dos restantes. O barramento suporta como limite máximo a ligação até 112 dispositivos (1 *master* e 111 *slaves*), visto que o protocolo de comunicação especifica 7 *bits* para endereçamentos, e contém 16 endereços reservados. O comprimento máximo do barramento é de 100 metros. Relativamente à velocidade de comunicação, o protocolo I2C permite os seguintes modos de funcionamento:

- Modo *sleep* (0 - 10 kbps);
- Modo *standard* (10 - 100 kbps);
- Modo *fast* (100 - 400 kbps, possibilitando a utilização de 10 bits de endereçamento);
- Modo *high-speed* (400 kbps - 3,4 Mbps).

A Figura 39 ilustra o formato de uma trama de comunicação do protocolo I2C.

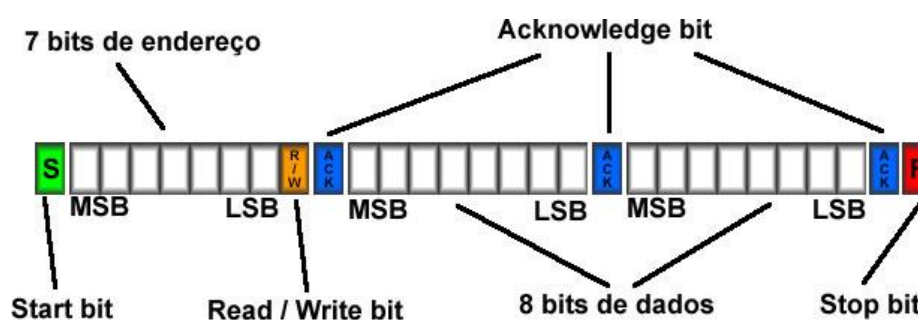


Figura 39 Trama de comunicação I2C [35]

O *start bit* é gerado pelo *master* e define o início da comunicação. Os *bits* de endereço são atribuídos pelo *master* de forma a identificar o *slave* com que pretende estabelecer a comunicação. O bit R/W atribui a intenção de leitura ou escrita ao dispositivo com que se pretende comunicar. O *slave* solicitado para estabelecer comunicação, através da identificação do seu endereço, confirma a recepção do pedido através do *bit Acknowledgement (ACK)*. De seguida é enviado um *byte* de dados, podendo estes serem enviados para o *slave* ou pelo *slave*, dependendo do bit mencionado anteriormente (R/W) se encontrar a “0” ou a “1”. Sempre que um *byte* de dados é enviado, segue-se o envio de um ACK por parte do dispositivo endereçado, de forma a confirmar a recepção do *byte*. O envio de dados permanece até que seja enviado um STOP bit pelo *master* para finalizar a comunicação.

3.3.4. Calibração da bússola

Para calibrar a bússola utilizada é necessário enviar o comando “C”, para que a bússola entre em modo de calibração. Depois, com a bússola colocada sobre uma superfície plana, é necessário efetuar diversas rotações completas, para que esta efetue várias leituras por segundo. A calibração pode ser efetuada num intervalo temporal de 6 segundos a 3

minutos, indicando-se no manual deste componente que duas rotações completas em 20 segundos permitem uma calibração perfeita. Por fim, é necessário enviar o comando “E” para retirar a bússola do modo de calibração, ficando esta pronta a ser utilizada.

3.4. MÓDULO DE RADIOFREQUÊNCIA

A radiofrequência (RF) consiste na propagação de sinais por um determinado condutor, no qual é irradiado no ar através de uma antena. A antena converte o sinal de um meio cablado em um sinal *wireless* e vice-versa. Os sinais irradiados no ar propagam-se sob a forma de ondas eletromagnéticas. As ondas eletromagnéticas são formadas através da combinação dos campos magnéticos e elétricos, que se propagam no espaço perpendicularmente entre si. A luz emitida por uma lanterna, as ondas de rádio, as micro-ondas e os raios X são exemplos de ondas eletromagnéticas.

A radiofrequência consiste na faixa de frequências com um intervalo de aproximadamente 3 kHz a 300 GHz.

3.4.1. Módulo RF - WLS102B5B

Para efetuar o controlo remoto do robô utilizou-se o módulo RF WLS102B5B, representado na Figura 40.



Figura 40 Módulo RF WLS102B5B [36]

Este módulo funciona a uma frequência de 433,92 MHz e dispõe de um alcance de 2 km, como se pode observar nas seguintes características:

- Tensão de funcionamento: 5 a 9 V;
- Corrente: 2,5 mA (5 VDC);
- Frequência de funcionamento: 433,92 MHz;
- Largura de banda: 1,5 MHz;
- Forma de descodificação: PT2272;
- Forma de codificação: PT2262;
- Distância de emissão: 2 km.

A largura de banda representa a capacidade de transmissão de uma determinada ligação, verificando a velocidade a que os dados atravessam essa ligação.

O descodificador de controlo remoto PT2272 descodifica o sinal enviado pelo codificador PT2262. Utiliza a tecnologia CMOS, possui 12 bits de endereços *tri-state* (Figura 41) que fornecem um máximo 3^{12} códigos de endereço, reduzindo acentuadamente a probabilidade de qualquer colisão e as possibilidades de código não autorizado.

Os dispositivos de lógica *tri-state* são utilizados para receber múltiplas linhas em barramentos de dados ou endereços. Quando múltiplas saídas *tri-state* são conectadas eletronicamente, apenas a saída ativa pode apresentar valores “1” ou “0”, devendo o restante das linhas manter-se em estado de alta impedância. Se duas ou mais linhas saírem de seu estado *tri-state* simultaneamente, surge um conflito de saídas no barramento, podendo gerar desde um simples erro no barramento até a danificação de uma das saídas. Para evitar isto, deve-se aplicar um controlo de acesso ao barramento [37].

O codificador de controlo remoto PT2262 codifica os dados e permite o envio através de RF ou infravermelhos.

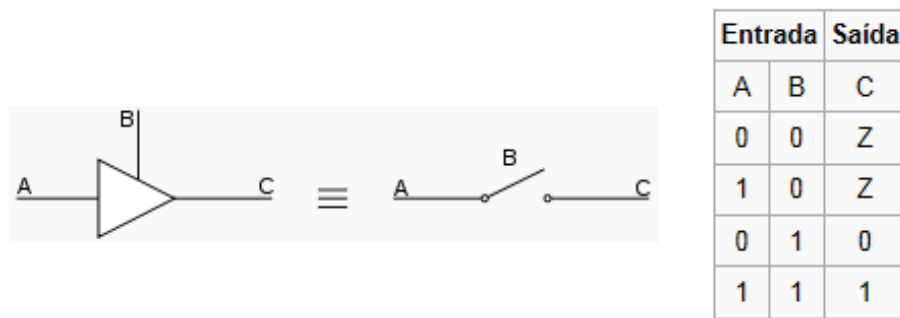


Figura 41 Representação da lógica de saídas *tri-state*

3.5. BATERIA

A bateria é um dispositivo de armazenamento de energia química que, quando solicitada, tem a capacidade de a transformar em energia elétrica. Isto é, as baterias não são depósitos de energia elétrica, mas sim de energia química, até que um circuito seja conectado através dos seus pólos, dando origem a uma reação química que ocorre no seu interior, convertendo esta energia química em elétrica que é então fornecida a um determinado circuito.

Cada célula de uma bateria de ácido-chumbo contém elétrodos feitos de chumbo (Pb) e de dióxido de carbono (CO_2) imersos num eletrólito com uma concentração de aproximadamente 33,5% de ácido sulfúrico (H_2SO_4).

Quando a bateria se descarregar ambos os elétrodos transformam-se em sulfato de chumbo II, ou PbSO_4 , enquanto o eletrólito perde o ácido sulfúrico dissolvido para se transformar na sua maioria em água. Devido a este fator o eletrólito pode congelar, principalmente no Inverno [38].

As baterias de ácido-chumbo (Figura 42), desenvolvidas pelo Físico Francês Gaston Planté, são as baterias recarregáveis mais antigas e mais económicas.

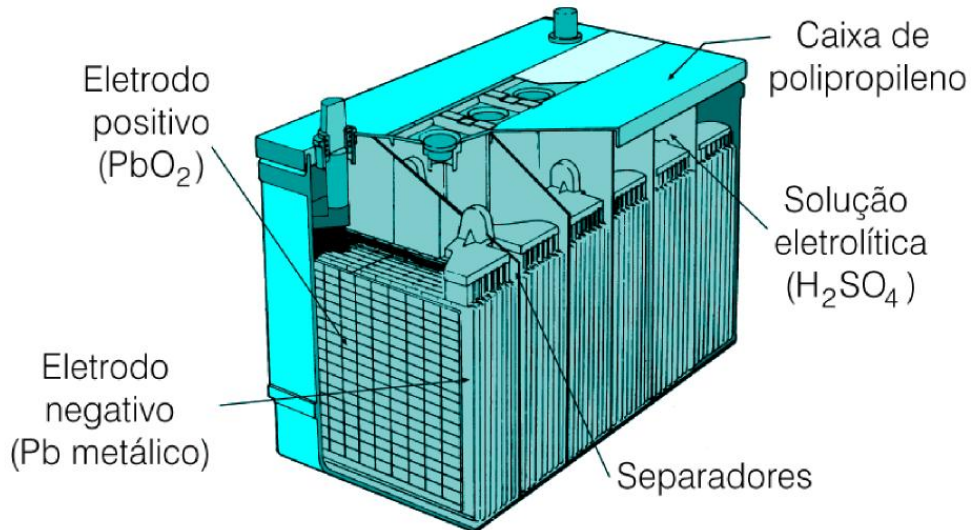


Figura 42 Constituição da bateria de ácido-chumbo [39]

Este tipo de baterias, comparativamente com outros tipos de baterias, por exemplo Ni-Cd e Ni-MH, garante melhores resultados ao nível da permanência da carga. Apresenta em determinados casos a desvantagem de possuir um volume elevado comparativamente a outros modelos de baterias. A bateria de ácido-chumbo não deve ser descarregada totalmente, e deve ser armazenada totalmente carregada, ao contrário da Ni-Cd que deve ser armazenada descarregada (não totalmente). As baterias de Ni-MH permitem um número mais elevado de cargas/descargas, necessitam de menos tempo para carregar, mas apresentam um preço elevado comparativamente com os outros modelos mencionados. Relativamente às temperaturas baixas, a bateria Ni-MH apresenta melhores resultados, ao não ser muito influenciável pela temperatura.

4. IMPLEMENTAÇÃO

Este capítulo pretende demonstrar o desenvolvimento e a implementação do robô. É analisada a estrutura do robô e detalhado o funcionamento dos vários elementos que o constituem, assim como a forma de interação dos mesmos.

4.1. ESTRUTURA FÍSICA DO ROBÔ

Esta secção apresenta a implementação da estrutura física robô, que foi idealizado com o propósito de assemelhar-se o máximo possível a um peixe biológico.

4.1.1. Corpo do robô

Procedeu-se ao estudo das dimensões que este deveria possuir. As dimensões teriam obrigatoriamente de permitir a introdução dos diversos componentes/equipamentos utilizados no seu interior, como por exemplo: baterias, motores e *hardware* desenvolvido. Seguidamente analisou-se a forma que este deveria ter, com o propósito de reduzir a resistência da água aos seus movimentos, para facilitar a sua locomoção. Entre os diversos formatos (ver secção 2.1.1) que o robô poderia adotar para ser de inspiração biológica, optou-se pelo formato fusiforme, isto é, alongado e com as extremidades mais estreitas que a zona central, mas na realidade não se conseguiu manusear de forma a ficar totalmente fusiforme. Relativamente ao material utilizado, este teria que possibilitar o manuseamento

de uma forma fácil e um acabamento estanque. Tal como já foi referido no capítulo anterior, “Arquitetura e módulos utilizados”, a escolha recaiu sobre o acrílico. As principais características do acrílico são:

- manuseável – permite estruturar o robô com um formato fusiforme;
- incolor – facilmente é detetada uma possível fuga de água para o interior do robô;
- estanque – para que possa ser introduzido no meio aquático;
- baixo custo – torna o projeto mais económico.

Recorrendo a uma placa de acrílico e aquecendo-a em diversas zonas, manuseou-se a placa aquecida, dobrando-a lentamente até atingir o formato fusiforme pretendido, similar ao de um peixe, tal como se pode visualizar na Figura 43.



Figura 43 Estrutura fusiforme do robô

Após concluir a estrutura central do robô, seguiu-se a implementação da “cabeça”. Neste caso foi executado um processo similar ao utilizado no desenvolvimento da estrutura central, procedendo-se ao aquecimento do acrílico e manuseando-o até obter a forma pretendida, como se pode visualizar na Figura 44.



Figura 44 Representação da “cabeça” do robô

Para acoplar a “cabeça” à estrutura do robô utilizou-se uma cola de elevada elasticidade, para possibilitar desacoplar estes dois elementos em caso de necessidade.

4.1.2. Barbatanas peitorais

As barbatanas são controladas por servomotores e foram pensadas de forma a prestar o apoio necessário para a locomoção do robô. Foram concebidas e testadas (ver Capítulo 5) três pares de barbatanas peitorais diferentes (cujos desenhos cotados se apresentam no Anexo A) com o propósito de avaliar as que proporcionam a melhor locomoção. A Figura 45 representa os três modelos de barbatanas concebidos, encontrando-se do lado esquerdo o modelo 3, e do lado direito em cima o modelo 2, e em baixo o modelo 1.



Figura 45 Três modelos de barbatanas concebidos

Para acoplar as barbatanas peitorais aos servos motores, utilizaram-se veios mecânicos que se encontram fixos numa extremidade ao motor, e na outra extremidade a um rolamento que, por sua vez, se encontra fixo na estrutura do robô.

- **Veio mecânico**

O veio consiste num eixo cilíndrico que transmite energia, potência rotacional ou binário de um motor ou fonte de energia rotacional para um mecanismo onde é usada para obter trabalho útil. O veio utilizado no projeto é em latão e possui 40 mm de comprimento e 8 mm de diâmetro, como se pode visualizar na Figura 46.



Figura 46 Veio da barbatana peitoral

- **Rolamento**

O rolamento ilustrado na Figura 47 é um dispositivo que permite o movimento relativo controlado entre duas ou mais partes. Serve para minimizar o atrito de deslizamento entre as superfícies do eixo.



Figura 47 Representação do rolamento de agulhas

Foram aplicados quatro rolamentos de agulhas, dois em cada barbatana peitoral, com as seguintes dimensões: diâmetro de 10 mm e furo de 8 mm. Para garantir uma maior estabilidade do veio perante a sua rotação, foram fixados na estrutura do robô em paralelo.

- **Retentor**

O retentor é uma peça mecânica que normalmente se utiliza acoplado ao veio do motor de forma a vedar uma determinada zona e evitar a fuga de óleo, água ou gás. Nos pontos do robô em que se verificava entrada de água para dentro da estrutura em acrílico foi necessário uma análise cuidada até conseguir a estanquicidade. Verificou-se, numa primeira fase, a entrada de água junto aos rolamentos dos motores, o que implicou a aplicação de retentores para eliminar a fuga. O retentor foi fixo com a frente a ficar em contacto com a água, garantindo o total isolamento naquele ponto. O retentor representado na Figura 48 contém duas faces, frente (à esquerda) e verso (à direita).



Figura 48 Representação das faces do retentor

Para fixar a barbatana, propriamente dita, implementou-se um acessório em nylon (mostrado na Figura 49) que acopla a barbatana ao veio. Este acessório possui um parafuso para ajustar e fixar a barbatana, permitindo assim a substituição das barbatanas. A Figura 50 apresenta a vista lateral do robô, no qual se pode observar a barbatana peitoral devidamente inserida.



Figura 49 Representação do acessório em nylon



Figura 50 Representação da barbatana peitoral no robô

A Figura 51 representa a vista de frente do robô, em que se podem visualizar as barbatanas peitorais (do modelo barbatanas “1”, descritas anteriormente) aplicadas.



Figura 51 Representação do robô com as barbatanas

4.1.3. Barbatana caudal

A barbatana caudal foi implementada para prestar auxílio na orientação do robô. Foi desenvolvido um mecanismo (cujos componentes se apresentam na Figura 52) para efetuar a movimentação da barbatana caudal. Inicialmente fixou-se o motor, na posição horizontal, à estrutura do robô e colocou-se a hélice. Seguidamente introduziu-se uma das extremidades da hélice no interior do tubo de nylon, para que quando o motor se movimenta também se movimenta a barbatana caudal que se encontra fixa na outra extremidade do tubo de nylon, que atravessa o interior do fole.



Figura 52 Componentes da estrutura do mecanismo da barbatana caudal

A Figura 53 mostra a barbatana caudal do robô, na qual se pode visualizar parte do mecanismo descrito no parágrafo anterior.

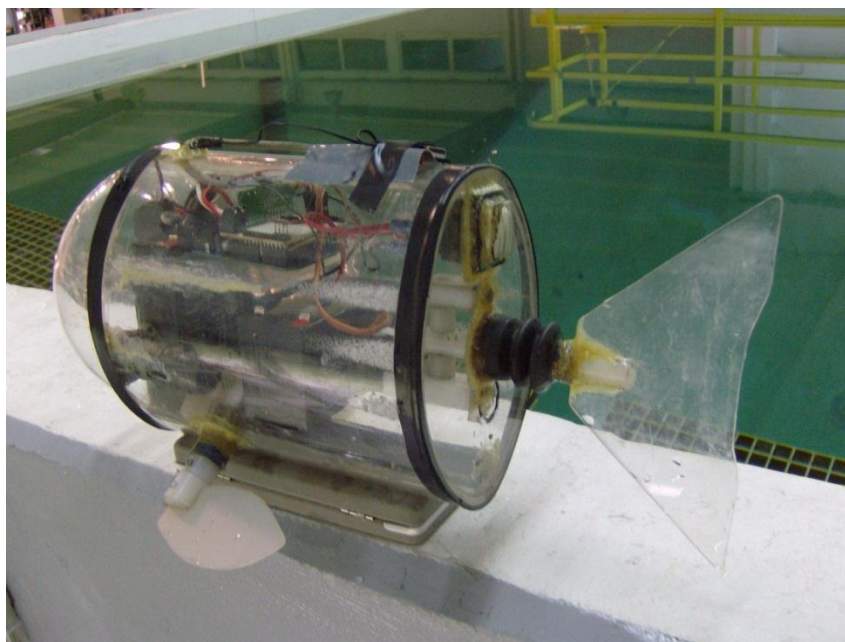


Figura 53 Aspecto da barbatana caudal no robô

O fole adquirido é formado por uma borracha pouco flexível, o que limitou ligeiramente a movimentação da barbatana ao nível da amplitude. Como o robô não possui a capacidade de inverter o sentido de locomoção, ação em que a barbatana caudal é fundamental, não se justificou adquirir um novo fole formado por uma borracha mais flexível.

O robô (Figura 54) possui um peso total de 2,4 kg (incluindo *hardware* e baterias, mas sem considerar o lastro – de 0,4 kg – que foi acrescentado numa fase posterior, como será descrito no capítulo seguinte) e tem 415 mm de comprimento, 125 mm de largura e 180 mm de altura. No Anexo A são apresentados desenhos cotados da estrutura deste.

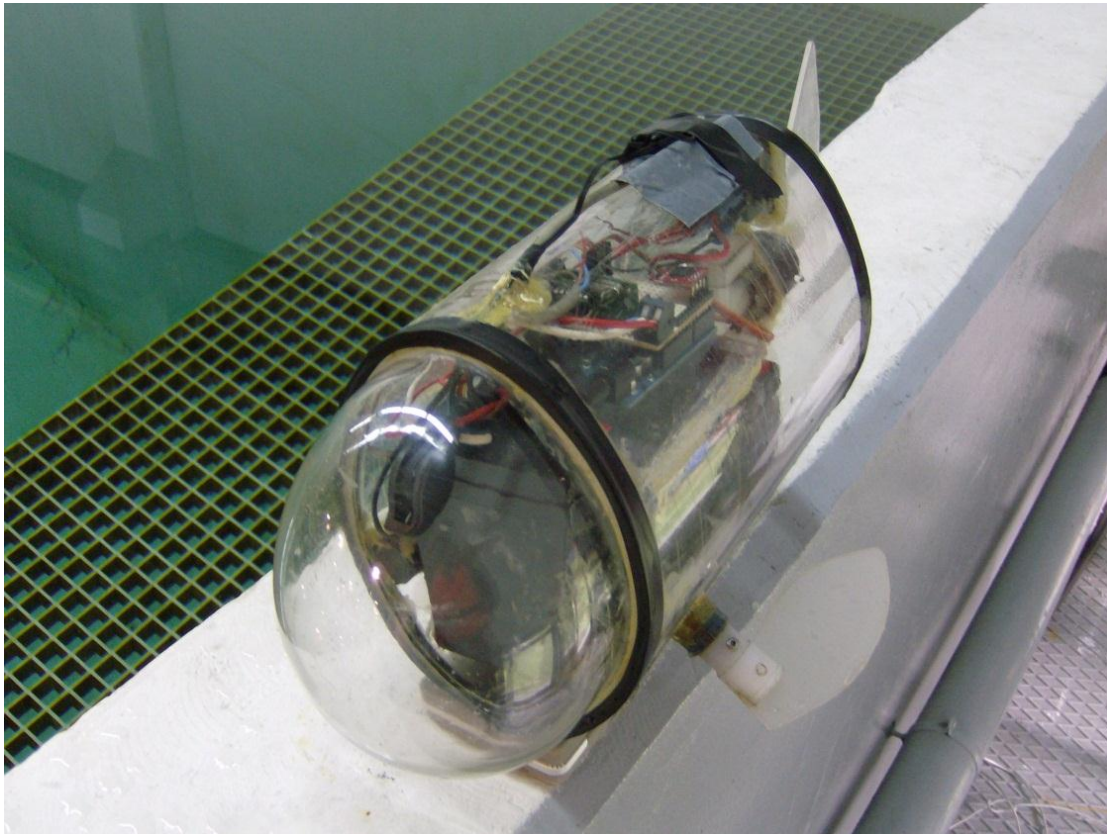


Figura 54 Representação do robô

4.2. CONTROLO DO ROBÔ

Esta secção tem como objetivo aprofundar as características funcionais do robô, do ponto de vista do sistema de controlo implementado, e descrever o funcionamento interno e forma de interação dos componentes que constituem o robô desenvolvido.

Como visto anteriormente, o Arduino possui as características necessárias para a elaboração do projeto. Permite o controlo de servomotores, e a comunicação com a bússola e com o módulo RF.

4.2.1. Controlo do Servomotor

Para efetuar o controlo de um servomotor através do Arduino, procedeu-se inicialmente à importação da biblioteca “servo.h”. Esta biblioteca possui uma função de controlo do servomotor, o que facilitou a programação do código correspondente à atuação do motor. A biblioteca “servo.h” suporta a ligação de até 12 motores na maioria das placas de Arduino, incluindo o Arduino Uno.

```
#include <Servo.h>
```

Seguidamente foram criados os objectos que permitem o controlo dos servos motores, como se mostra no seguinte extracto de código.

```
Servo servo1;  
Servo servo2;  
Servo servo3;
```

Na função `setup()` definiram-se as portas a que se conectaram os servomotores. Como se pode visualizar no extrato de código que se segue, os servomotores utilizados neste projeto são conectados nos pinos digitais 3, 5 e 6.

```
void setup()  
{  
  ...  
  servo1.attach(6);  
  servo2.attach(5);  
  servo3.attach(3);  
  ...  
}
```

O controlo dos servomotores é realizado na função `loop()`, considerando que a posição do servomotor é definida no interior desta função. A função `servo1.write()` posiciona o servomotor na posição pretendida. No exemplo que se segue, verifica-se que os servomotores 1 e 2 são posicionados a 90°, enquanto o servo motor 3 é posicionado a 20°. A função `delay()` estabelece uma pausa no programa, verificando-se neste excerto uma pausa de 800 ms até executar a próxima instrução.

```

void loop()
{
  ...
  servo1.write(90);
  servo2.write(90);
  servo3.write(20);
  delay(800);
  ...
}

```

4.2.2. Comunicação com a Bússola

A comunicação da bússola com o Arduino estabeleceu-se através do protocolo I2C. Para que a comunicação através do referido protocolo pudesse ser estabelecida, foi necessário introduzir a biblioteca “`wire.h`”, como mostrado de seguida.

```
#include <Wire.h>
```

Seguidamente procedeu-se à atribuição do endereço da bússola (0x42), consultado no manual do fabricante. Como esta biblioteca só utiliza 7 bits, verificou-se a necessidade de efetuar um deslocamento de forma a obter o bit mais significativo (MSB). Este processo é indicado no excerto de código seguinte.

```
int Address = 0x42 >> 1;
```

Seguiu-se a definição da taxa de transmissão de dados, que consiste no número médio de bits, ou caracteres por unidade de tempo, que passam entre dispositivos. Estabeleceu-se a taxa de transmissão de dados em 9600 bps.

```

void setup()
{
  ...
  Wire.begin();
  Serial.begin(9600);
  ...
}

```

O código descrito no excerto que se segue executa o pedido de ligação com a bússola. O carácter “A” efetua o pedido do ângulo. Após estabelecer a comunicação é necessário

efetuar uma pausa de, no mínimo, 6 ms para processamento de dados. Para garantir a fiabilidade do processamento estabeleceu-se uma pausa de 10 ms.

```
void loop()
{
  ...
  Wire.beginTransaction(Address);
  Wire.write('A');
  Wire.endTransmission();

  delay(10);
  ...
}
```

Segue-se o pedido de dois *bytes* à bússola. O ciclo *if* confirma se foram recebidos os dois *bytes*. A partir do momento em que se confirma a receção de dois *bytes*, são recebidos os bits mais significativos, efetuando-se um *shift* de forma a guardar também os bits menos significativos, recebidos após a receção dos MSB. Para que o valor guardado na variável “reading” seja em graus, este é dividido pelo valor de 10.

```
void loop()
{
  ...
  Wire.requestFrom(Address, 2);

  if(2 <= Wire.available())
  {
    reading = Wire.read();
    reading = reading << 8;
    reading += Wire.read();
    reading /= 10;
    Serial.println(reading);
  }
  ...
}
```

A função `Serial.println()` imprime através da porta série os dados contidos na variável `reading`, que neste caso corresponde ao ângulo da bússola. Através do Serial monitor do Arduino consegue-se monitorar os dados enviados pela bússola, de modo a analisar o seu funcionamento, como se pode observar na Figura 55.

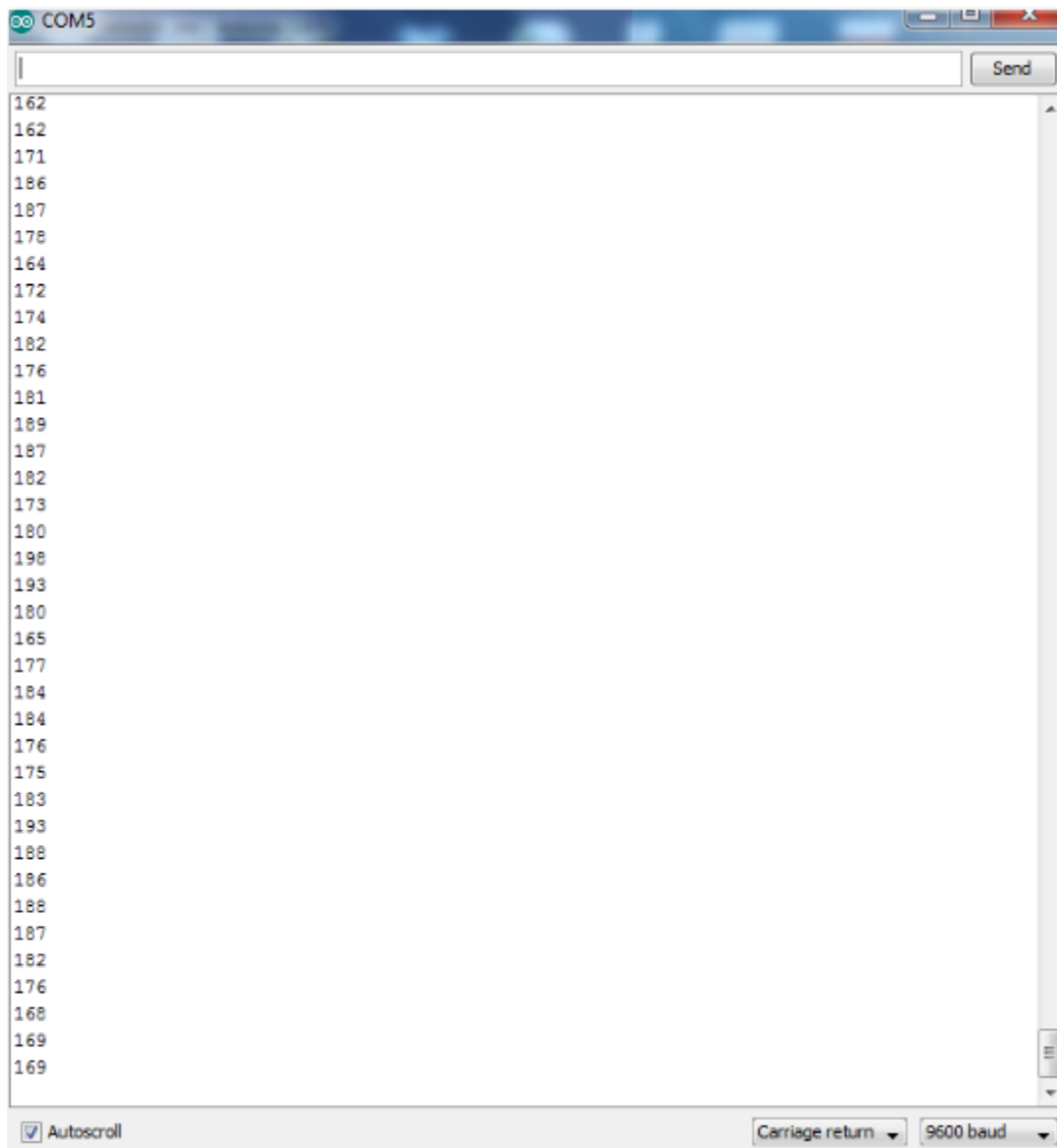


Figura 55 Monitoração dos dados da bússola

4.2.3. Emissão/Receção RF

A emissão/receção através do módulo RF oferece a possibilidade de ligar e desligar o robô remotamente. Para ligar e desligar o robô utiliza-se o mesmo botão do comando. O botão do comando encontra-se conectado a uma entrada do emissor RF (“data 0”). Sempre que este botão se encontrar pressionado, uma saída do recetor RF (“data 3”), que se encontra conectada ao pino digital 2 do Arduino, mantém-se no nível lógico “1” habilitando a interrupção externa.

A função descrita no extrato de código que se segue permite definir o funcionamento de interrupções externas. Como descrito na Subsecção 3.1.1, esta função contém três

parâmetros, em que o primeiro atribui o pino digital, encontrando-se a “0” para atribuir a interrupção ao pino digital 2. O segundo parâmetro atribui a função a executar, neste caso a função “blink”, e o terceiro parâmetro define a forma como esta ocorre. O modo “RISING” solicita a interrupção sempre que o valor lógico do pino (2) transite de “0” para “1”.

```
void setup()
{
  ...
  attachInterrupt(0,blink,RISING);
  ...
}
```

Sempre que é processada a função “blink” altera o valor da variável “estado” de forma alternada.

```
void blink(){
  estado = !estado;
}
```

Enquanto a variável “estado” se encontra no nível lógico “1” (HIGH) é executado o código que se encontra no interior do ciclo `while`, colocando o robô em funcionamento. Se a variável “estado” se encontrar no nível lógico “0” (LOW) não é acedido o código que se encontra dentro do ciclo `while`, resultando na interrupção do funcionamento do robô.

```
while(estado == HIGH)
{
  ...
}
```

4.3. PROCESSO DE LOCOMOÇÃO DO ROBÔ

O processo de locomoção do robô baseia-se numa locomoção direcional, idealmente sem alterações bruscas de direção, tendo como objetivo a locomoção estável por parte do robô. Como já foi mencionado ao longo da redação desta tese/dissertação, a introdução da bússola no projeto pressupõe o meio de facultar a orientação para a locomoção do robô.

Definiram-se os sentidos de locomoção do robô em: Norte ou Sul. Assim, sempre que o robô se movimenta para Norte ou para Sul a sua locomoção estabelece-se através do funcionamento em simultâneo das duas barbatanas peitorais e da barbatana caudal. Caso o robô se afaste da direção e sentido de movimento pré-programado, a sua locomoção fica restrita ao funcionamento de apenas uma barbatana, para tentar manter o sentido que mantinha até ao momento, procedendo-se às seguintes restrições:

- Quando o robô se movimenta para Norte, se desviar a trajetória para Oeste, apenas funcionará a barbatana do lado esquerdo;
- Quando o robô se movimenta para Norte, se desviar a trajetória para Leste, apenas funcionará a barbatana do lado direito;
- Quando o robô se movimenta para Sul, se desviar a trajetória para Oeste, apenas funcionará a barbatana do lado direito;
- Quando o robô se movimenta para Sul, se desviar a trajetória para Leste, apenas funcionará a barbatana do lado esquerdo.

Para os ensaios estabeleceu-se um controlo “restrito”. Após se posicionar o robô no preciso local em que este inicia o ensaio, e disposto na direção pretendida para o percurso, obtém-se através do *serial monitor* do Arduino o valor correspondente à posição que a bússola indica para esta orientação. Tendo como referência este valor obtido a partir da bússola, atribui-se um intervalo de $\pm 10^\circ$ em torno deste valor. Durante a locomoção do robô, sempre que o valor gerado pela bússola se encontre neste intervalo, permanecem todas as barbatanas em funcionamento; caso contrário apenas uma barbatana peitoral se mantém em funcionamento, dependendo do lado para o qual o robô se desvia nesse momento, de forma a procurar recuperar o desvio de trajetória.

O funcionamento da barbatana caudal teve de ser limitado a uma reduzida amplitude de movimento, de 30° , após a introdução do fole.

A Figura 56 representa o fluxograma do princípio de funcionamento do robô, de forma a permitir uma melhor compreensão do mesmo.

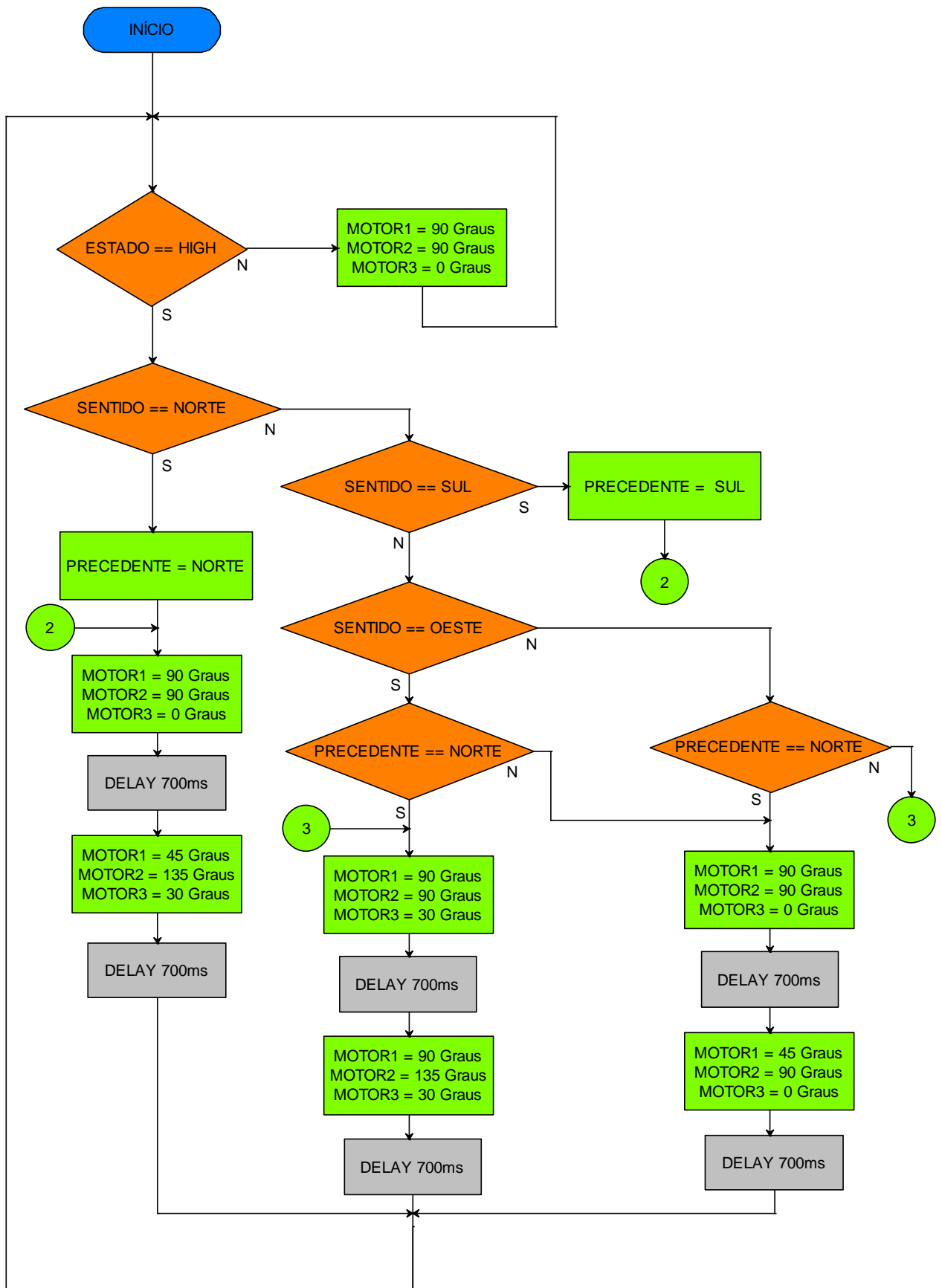


Figura 56 Fluxograma do princípio de funcionamento do robô

4.4. CONSUMO EM CORRENTE DO ROBÔ

Esta subsecção destina-se à análise do consumo em corrente do robô. De forma a obter o valor total, verificou-se o consumo de cada componente, como se descreve na Tabela 2.

Tabela 2 Consumo de corrente dos componentes constituintes do robô

Componentes	Consumo em corrente (mA)	Quantidade	Consumo em corrente total (mA)
Servomotor	350	3	1050
Placa Arduino	250	1	250
Bússola	1	1	1
Módulo RF	2,5	1	2,5

Os valores de consumo de corrente apresentados na Tabela 2 permitem efetuar a escolha das baterias adequadas para o robô. O robô irá dispor de duas baterias, uma de 12 V para a alimentação do Arduino e restantes módulos eletrónicos, e uma de 6 V para a alimentação dos servomotores. Efetuando a soma do consumo do Arduino, bússola e módulo RF verifica-se que é necessário uma bateria com uma capacidade de corrente superior a 253,5 mAh, para uma autonomia de uma hora. Para os motores é necessário utilizar uma bateria com uma capacidade superior a 1050 mAh, também para uma hora de autonomia.



Figura 57 Bateria de ácido-chumbo de 12 V e 1200 mAh para alimentação da eletrónica do robô

Perante as gamas existentes no mercado, adquiriram-se as seguintes baterias: 12 V de 1200 mAh, representada na Figura 57, e 6 V de 2800 mAh. Estas baterias para além de serem mais económicas, também cooperam no aumento do peso do protótipo de modo a garantir a estabilidade do corpo. Com as baterias adquiridas o robô apresenta uma autonomia de aproximadamente duas horas e meia.

4.5. ESQUEMAS ELÉTRICOS

Esta subsecção apresenta os esquemas elétricos do robô. A Figura 58 representa a ligação dos servomotores e da bússola ao Arduino. Os servomotores possuem três condutores, dois referentes à alimentação (tensão de alimentação entre 5 a 6 V) e um ao controlo (conetado ao Arduino). A bússola possui quatro condutores, dois referentes à alimentação (5 V), um para o sinal *clock* (SCL) e um para efetuar a troca de dados (SDA).

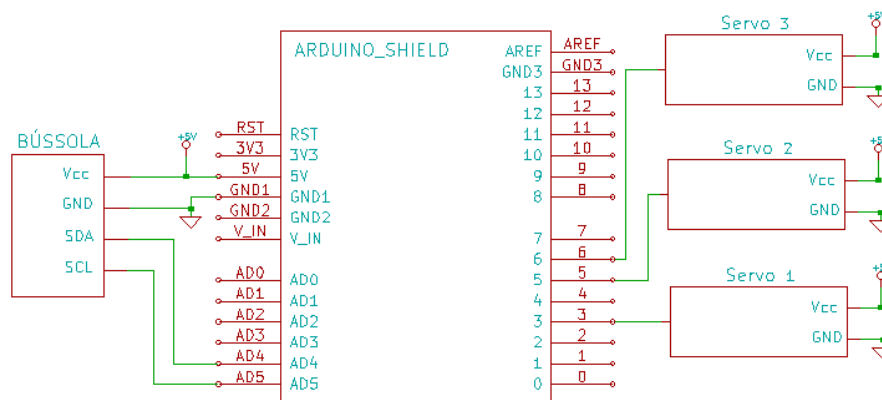


Figura 58 Esquema elétrico da ligação dos servomotores e da bússola ao Arduino

O módulo RF dispõe de quatro canais, em que apenas um será utilizado para efetuar o controlo *on/off* do robô. O módulo possui dois pinos de alimentação (5 a 9 VDC) e quatro canais de comunicação (data0, data1, data2 e data3) como se pode visualizar na Figura 59. A comunicação entre o emissor e o recetor é efetuada da seguinte forma: o pino “data3” do emissor (TX) comunica com o pino “data0” do recetor (RX).

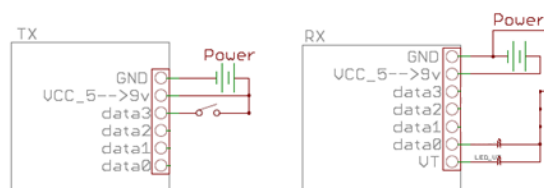


Figura 59 Esquema elétrico do módulo RF

5. ENSAIOS E TESTES REALIZADOS

Este capítulo apresenta os ensaios e testes realizados com o robô no tanque do (LSA) do Instituto Superior de Engenharia do Porto, na piscina Municipal de Espinho e numa piscina residencial.

5.1. ENSAIOS NO TANQUE DO LSA

O tanque representado na Figura 60, disponível nas instalações do LSA no ISEP, possui as seguintes dimensões: 10 metros de comprimento e 6 metros de largura.

Para facilitar o resgate do robô após cada ensaio, “limitou-se” o comprimento do tanque a 7 metros, até à localização da ponte representada na Figura 60, estabelecendo a área de testes em 7 metros de comprimento por 6 metros de largura.

Foram realizados diversos ensaios, numa primeira fase testou-se a estanquicidade, fluutuabilidade e estabilidade, seguindo-se a análise ao comportamento da bússola no tanque. Numa segunda fase efetuaram-se ensaios com diferentes modelos de barbatanas, diferentes amplitudes de movimento das barbatanas e diferentes tempos de ciclo das barbatanas, de forma a analisar o comportamento do robô.



Figura 60 Tanque do LSA

5.1.1. Teste de estanquicidade, flutuabilidade e estabilidade

Os primeiros testes do protótipo consistiram na avaliação da sua estanquicidade, flutuabilidade e estabilidade. No primeiro teste efetuado constatou-se que o corpo do protótipo não era completamente estanque, ocorrendo entrada de água pela junta de uma barbatana peitoral e pela junta da barbatana caudal. Ainda durante este primeiro ensaio também se verificou que o protótipo apresentava alguma falta de estabilidade, com o corpo a adornar ligeiramente nalgumas situações e de forma mais pronunciada noutros casos.

Para garantir a estanquicidade do protótipo foi necessário substituir um dos retentores, que não se encontrava a vedar correctamente a junta, e aplicar um pouco de cola na ligação do fole que protege a transmissão mecânica da barbatana caudal ao corpo do robô.

Para resolver os problemas de flutuabilidade e estabilidade foi necessário incorporar um lastro a todo o comprimento do robô para aumentar o seu peso, desviar o seu centro de gravidade para a parte inferior do corpo e, desta forma, proporcionar maior estabilidade ao robô. O lastro aplicado consiste num tubo compacto em ferro, revestido com fita isoladora, tendo a sua massa sido determinada por um processo de tentativa-erro.

5.1.2. Análise do funcionamento da bússola

Numa fase seguinte dos ensaios analisou-se o comportamento da bússola no tanque, devido à bússola digital poder ser afetada pela elevada presença de ferro nas armaduras das paredes do tanque. Após alguns ensaios realizados, a ler os dados gerados pela bússola, verificou-se que a bússola sofre perturbações, como se pode visualizar na Figura 61.

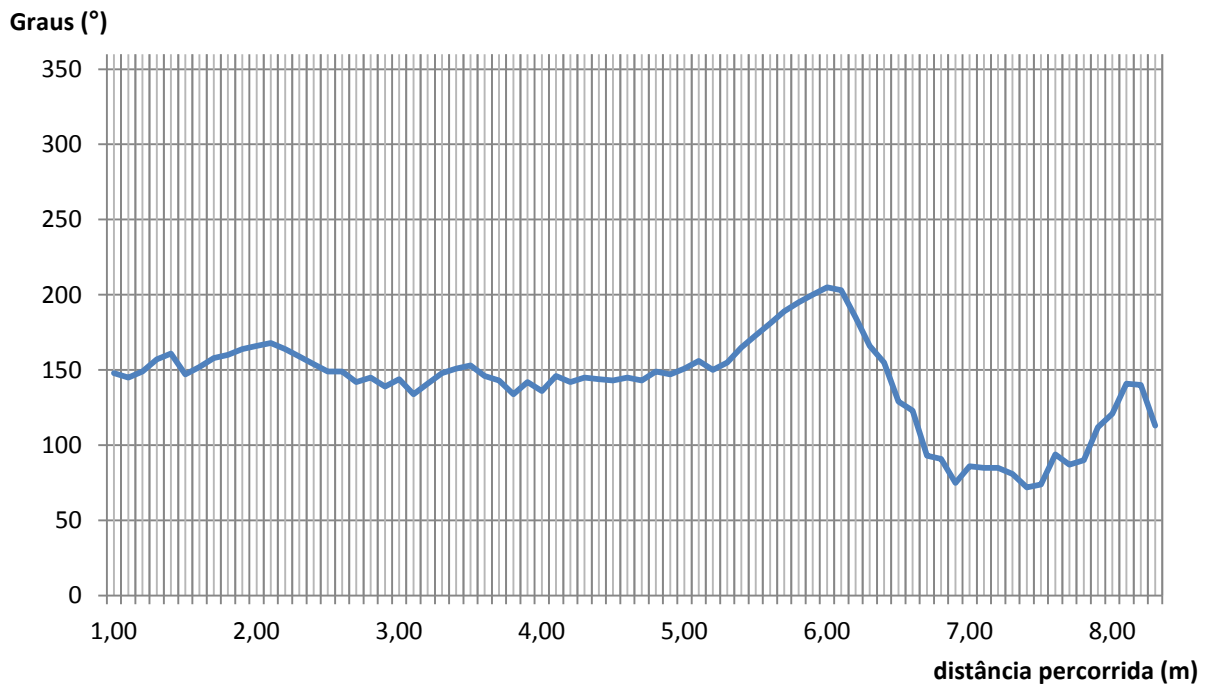


Figura 61 Valores gerados pela bússola no tanque

Aproximadamente a partir dos 5 metros de distância percorrida pelo robô, no sentido Poente – Nascente, verificam-se perturbações acentuadas nos valores gerados pela bússola. Nesta situação, a partir de determinado momento a bússola começa a gerar valores fora do expectável e apenas uma barbatana irá manter-se em funcionamento de forma a tentar redirecionar o robô. Nesta situação, verifica-se alguma oscilação no corpo do robô, podendo também a bússola sofrer algumas perturbações.

5.1.3. Ensaios do robô

Para a realização dos ensaios pressupôs-se a utilização de uma amplitude de movimento das barbatanas de 30° e 45°, Tabela 3 e Tabela 4, respetivamente. Os valores foram registados após diversos ensaios, com diferentes modelos de barbatanas e diferentes tempos de ciclo das barbatanas, como se pode visualizar nas tabelas seguintes. O desvio

obtido é em função de um ponto de referência que se estabeleceu no local de cada ensaio. Nos ensaios realizados no LSA e na piscina residencial em fibra de vidro, mediu-se a largura e definiu-se o centro como ponto de referência. Na Piscina Municipal de Espinho, estabeleceu-se o ponto de referência a 2,60 metros do topo Sul.

Tabela 3 Ensaio com as barbatanas a uma amplitude de movimento de 30°

Barbatanas	Tempo de ciclo (s)	Duração temporal do percurso (s)	Desvio (cm)
Modelo 1	1	84	- 131
	1,4	91	- 126
	1,8	102	- 121
Modelo 2	1	78	- 114
	1,4	82	- 106
	1,8	89	- 101
Modelo 3	1	157	178
	1,4	121	162
	1,8	109	132

Tabela 4 Ensaio com as barbatanas a uma amplitude de movimento de 45°

Barbatanas	Tempo de ciclo (s)	Duração temporal do percurso (s)	Desvio (cm)
Modelo 1	1	74	- 143
	1,4	81	- 134
	1,8	86	- 129
Modelo 2	1	66	- 119
	1,4	73	- 111
	1,8	82	- 106
Modelo 3	1	180	244
	1,4	164	228
	1,8	158	206

5.1.4. Análise comparativa dos resultados obtidos

Como se pode visualizar no gráfico da Figura 63, verifica-se que com os modelos 1 (Figura 62) e 2 das barbatanas, e aumentando o tempo de ciclo (diminuição da velocidade das barbatanas), a duração temporal do percurso (tempo que o robô demora a percorrer o tanque) aumenta.

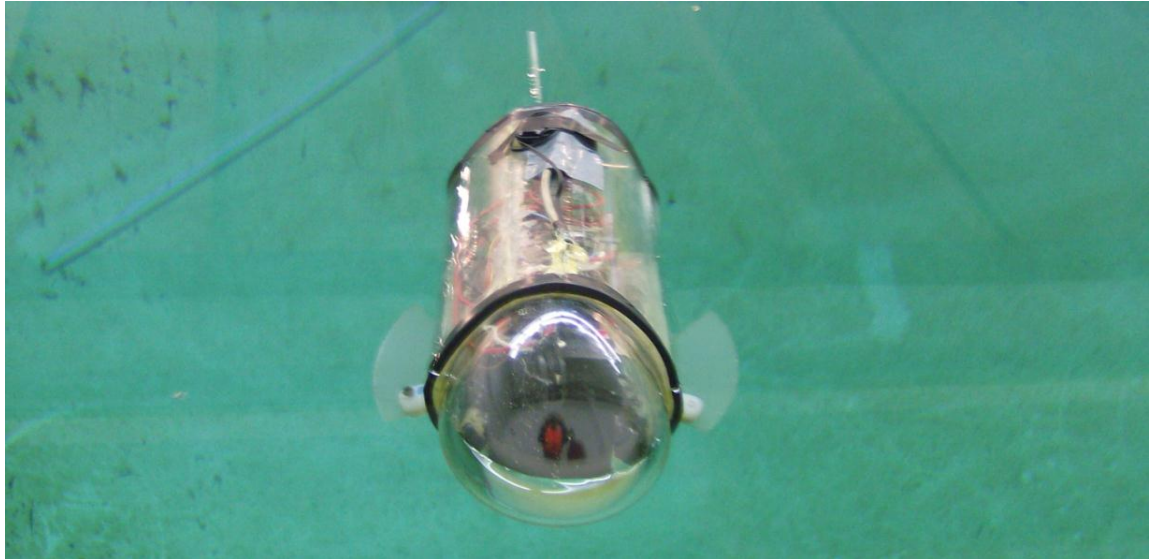


Figura 62 Robô a realizar ensaios no tanque do LSA com o modelo 1 de barbatanas

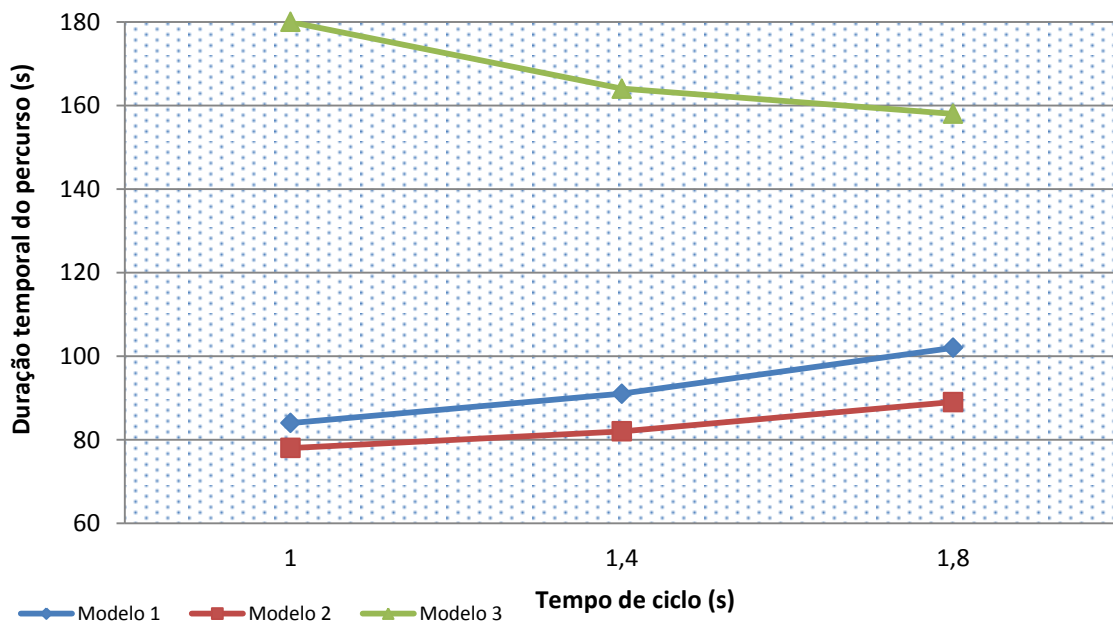


Figura 63 Duração temporal do percurso com as barbatanas a 30° de amplitude

Com o robô equipado com o modelo 3 das barbatanas (Figura 64) verifica-se que aumentando o tempo de ciclo o robô demora menos tempo a percorrer o tanque. O modelo 2 de barbatanas é o que apresenta melhores tempos, com o modelo 1 a apresentar tempos pouco superiores ao modelo 2.



Figura 64 Robô com o modelo 3 de barbatanas

O modelo 3 necessita de muito tempo para percorrer o tanque, comparativamente com os restantes modelos. Pensa-se que isto é devido à geometria das barbatanas não ser adequada ao corpo do robô. Nos ensaios verificou-se que com o modelo 3 o robô oscila de forma acentuada. Com este modelo de barbatanas, conforme se vai diminuindo o tempo de ciclo, o robô tende a reduzir a oscilação, o que permite melhorar a locomoção e reduzir a duração temporal do percurso.

Verificou-se nos três modelos de barbatanas que ao diminuir o tempo de ciclo, o desvio aumenta (Figura 65). O robô quando se movimenta com um tempo de ciclo baixo, tende a oscilar mais o corpo, e juntamente com as perturbações que este tanque introduz na bússola, o controlo é bastante mais afetado resultando no aumento do desvio. Quando se aumenta o tempo de ciclo o corpo permanece mais estável, melhora o controlo, e por consequência diminui o desvio.

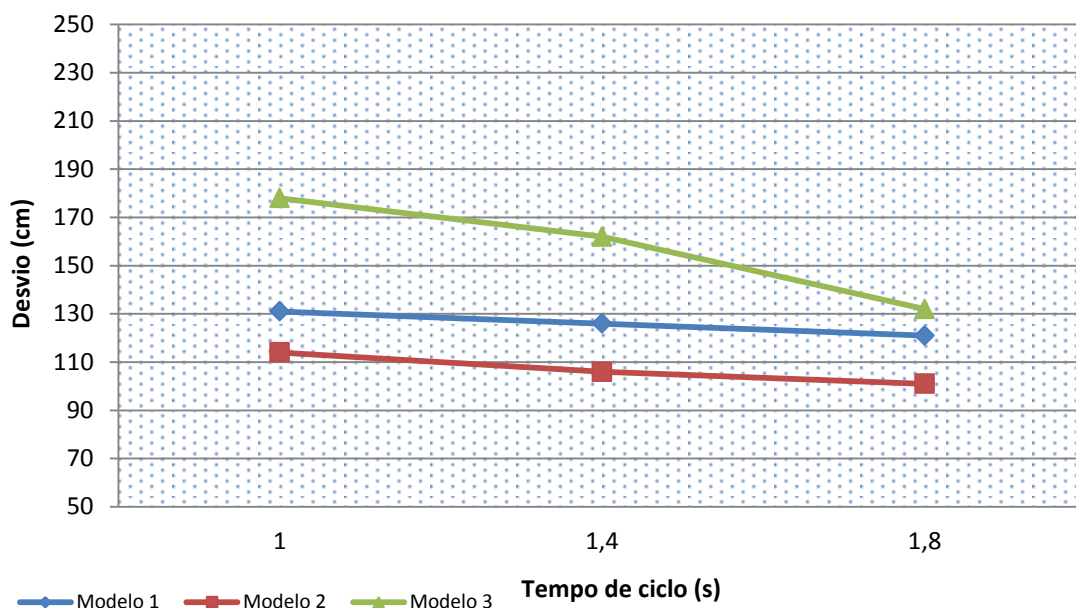


Figura 65 Desvio com as barbatanas a 30° de amplitude

Com a alteração da amplitude de movimento das barbatanas para 45°, verificou-se um decréscimo da duração temporal do percurso e um aumento do desvio, comparativamente com a amplitude de movimento das barbatanas a 30°. Como se pode visualizar no gráfico da Figura 66, os tempos são inferiores aos registados no gráfico da Figura 63, mantendo-se a proximidade entre o modelo de barbatanas 1 e 2, e os tempos elevados por parte do modelo 3 de barbatanas.

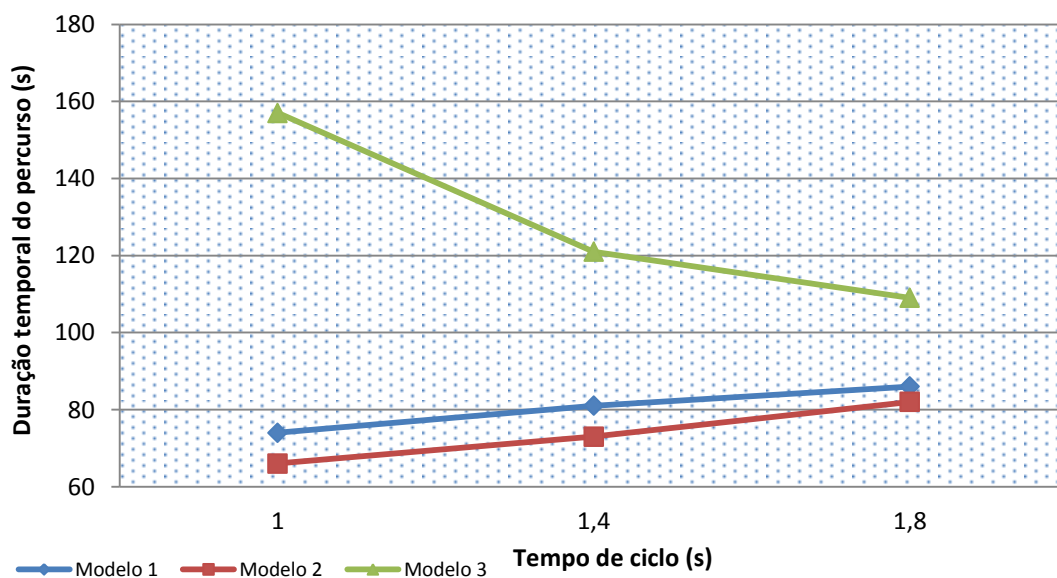


Figura 66 Duração temporal do percurso com as barbatanas a 45° de amplitude

Os desvios representados no gráfico da Figura 67 são superiores aos desvios registados no gráfico da Figura 65, reforçando a síntese já descrita de que com a diminuição do tempo de ciclo, o corpo tende a oscilar e aumenta as perturbações na bússola, agravando o controlo do robô e por consequência provoca o aumento do desvio da trajetória.

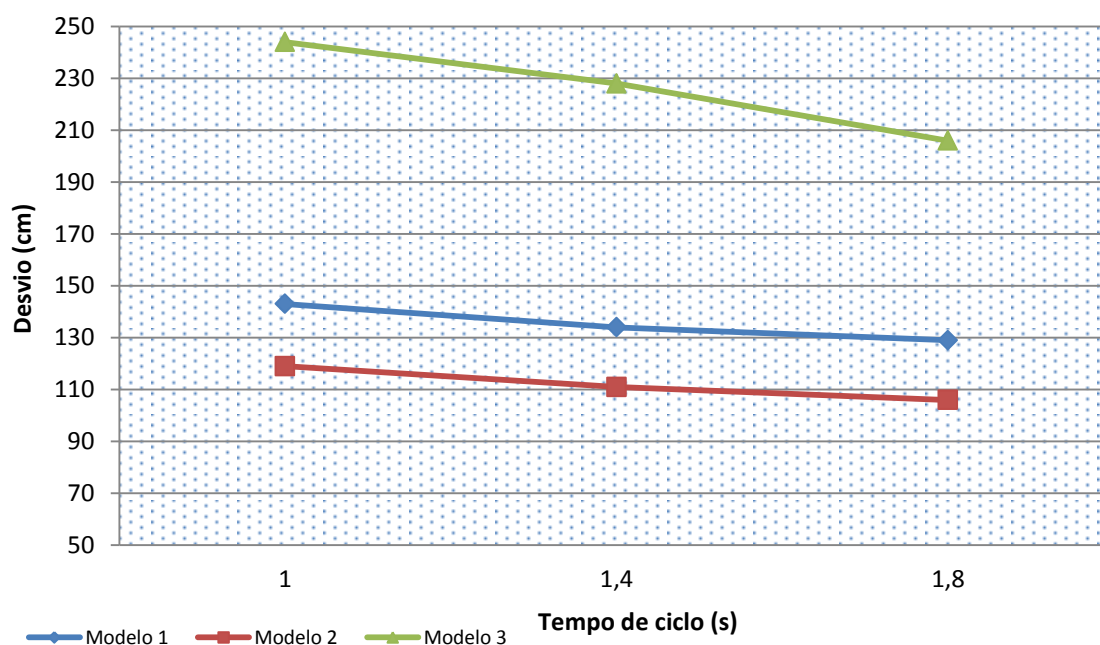


Figura 67 Desvio com as barbatanas a 45° de amplitude

Depois dos diversos ensaios realizados, e mesmo perante as perturbações sentidas na bússola, retiraram-se algumas conclusões dos ensaios da locomoção do robô no tanque do LSA. Concluiu-se que este apresenta uma locomoção estável com os modelos de barbatanas 1 e 2, não se verificando diferenças acentuadas entre ambas ao nível da estabilidade. Com o modelo 3 o robô não possui a mesma estabilidade, apresentando grandes oscilações do corpo.

Ao nível da direção o robô comporta-se melhor com o modelo 2 de barbatanas, obtendo desvios inferiores face ao trajeto planeado. Também se verificou que com o aumento da amplitude dos movimentos e diminuição do tempo de ciclo o robô aumentou o desvio face ao trajeto planeado.

Quanto aos tempos obtidos, verificou-se que o robô apresenta melhores resultados com o modelo 2 de barbatanas, com a diminuição do tempo de ciclo e com o aumento de amplitude dos movimentos.

Pode-se concluir que, de entre os modelos de barbatanas testadas neste robô, as ideais para este robô são o modelo 2; todavia, o modelo 1 também conduz a resultados aceitáveis. O modelo 3 de barbatanas apresenta valores pouco convincentes, logo não é aconselhável para se obter uma locomoção estável e direcional.

5.2. ENSAIOS NA PISCINA MUNICIPAL DE ESPINHO

Realizaram-se alguns ensaios na piscina Municipal de Espinho, representada na Figura 68, para analisar o comportamento do robô em diferentes recintos. A piscina Municipal de Espinho apresenta as seguintes dimensões: 60 metros de comprimento e 20 metros de largura.

Um dos objetivos ao realizar os ensaios na piscina Municipal de Espinho passava pela análise dos dados gerados pela bússola. Na fase inicial dos ensaios aproximou-se o robô da parede e verificou-se que a bússola alterava bruscamente os valores gerados, sendo claramente afetada pela presença de ferro nas paredes que limitam a piscina. Para evitar esta situação, e aproveitando o facto de a piscina possuir elevadas dimensões, desviou-se o robô da parede, verificando-se de imediato o funcionamento da bússola sem qualquer perturbação, o que possibilitou analisar o controlo do robô sem qualquer perturbação externa. Realizaram-se os ensaios a praticamente toda a largura da piscina, à excepção dos dois metros iniciais que se evitou para não causar interferências na bússola.



Figura 68 Robô a efetuar a travessia da piscina Municipal de Espinho

Os ensaios foram efetuados apenas com o modelo 2 das barbatanas e com uma amplitude de movimento de 45°, porque verificou-se nos diversos ensaios no tanque do LSA que esta era a conjugação mais adequada para o robô. Perante os dados recolhidos nos ensaios (Tabela 5), concluiu-se que o robô possui um controlo adequado, com erros inferiores a 3% da distância percorrida, atendendo aos valores de desvio de trajetória observados. Atendendo ao desempenho favorável do robô, nos primeiros ensaios, com tempos de ciclo de 1 s e 1,4 s, decidiu-se observar o comportamento do robô com um tempo de ciclo de 0,8 s, no qual se registou o desvio mais baixo, de apenas 5 cm. Constatou-se que o tempo de ciclo de 1 s proporcionou a menor a duração temporal do percurso. Com tempo de ciclo de 1,4 s registou-se uma elevada duração temporal do percurso, e o desvio mais elevado.

Tabela 5 Resultados obtidos nos ensaios na piscina Municipal de Espinho

Barbatanas	Tempo de ciclo (s)	Duração temporal do percurso (s)	Desvio (cm)
Modelo 2	0,8	376	5
	1	350	- 15
	1,4	510	- 50

Contrariamente ao que se sucedeu nos ensaios efetuados no LSA, o robô apresentou desvios reduzidos. De realçar que os ensaios realizados na piscina de Espinho foram numa extensão de 18 metros (como se pode observar na Figura 69) e no LSA apenas de 7 metros, tornando notória as acentuadas perturbações da bússola no tanque do LSA.

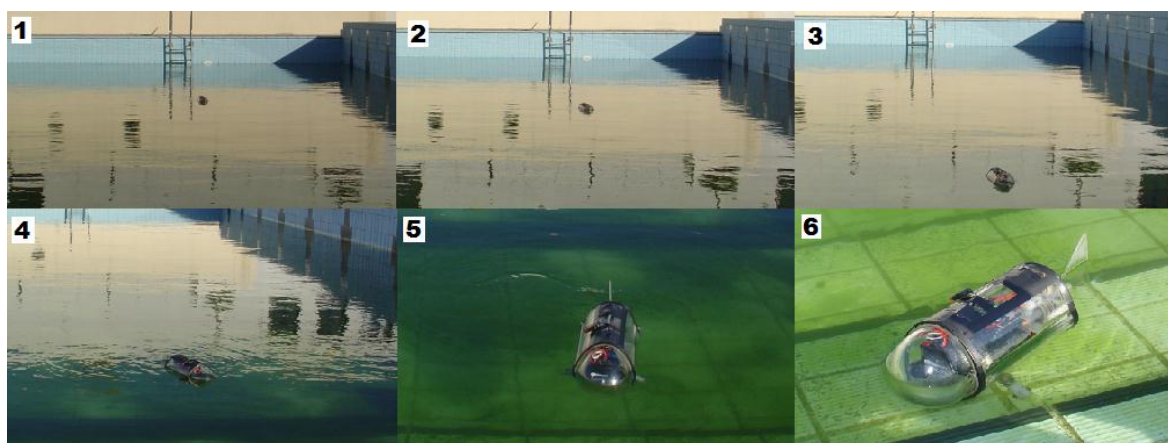


Figura 69 Sequência temporal do robô a atravessar a piscina Municipal de Espinho

Comparativamente aos ensaios no LSA, em que se tinha concluído que conforme se aumentava o tempo de ciclo, menor seria o desvio obtido, nestes ensaios verificou-se precisamente o contrário. Esta situação deve-se ao facto de a bússola na piscina de Espinho

encontrar-se a funcionar sem qualquer perturbação e a estabelecer o controlo adequado do trajeto do robô. Pequenas perturbações que a bússola possa “sentir” devido à oscilação do corpo do robô, perante o seu correto funcionamento são perfeitamente “ultrapassadas”, atendendo à maioria dos valores serem corretos. No tanque do LSA, verificou-se que a bússola diminuía o erro quando se aumentava o tempo de ciclo, devido à diminuição da oscilação do corpo do robô, permitindo gerar dados mais concisos, mas sempre com algum erro devido à elevada presença de ferro nas paredes do tanque, como já foi referido ao longo deste capítulo.

5.3. ENSAIOS NUMA PISCINA RESIDENCIAL

Foram realizados ensaios numa piscina residencial em fibra de vidro (mostrados na Figura 70), para verificar o comportamento da bússola com este tipo de material. A piscina possui 8 metros de comprimento e 3 de largura.



Figura 70 Robô a realizar ensaios na piscina de fibra

Inicialmente verificou-se o comportamento da bússola e concluiu-se que próximo das zonas que limitam a piscina surgem algumas perturbações por parte da bússola, devido ao ferro presente nas proximidades da piscina. Efetuou-se o ensaio com o modelo 2 das barbatanas e uma amplitude de movimento a 45°. Após o ensaio concluiu-se que no interior da piscina não se verificaram perturbações na informação dada pela bússola, porque o robô apresentou uma locomoção estável e direcional, apresentando os resultados presentes na Tabela 6.

Tabela 6 Resultados obtidos nos ensaios na piscina residencial

Barbatanas	Tempo de ciclo (s)	Duração temporal do percurso (s)	Desvio (cm)
Modelo 2	1,4	135	20

Após diversos ensaios realizados, em diferentes locais, verificou-se que o robô apresentou os melhores resultados na Piscina Municipal de Espinho e na piscina de fibra de vidro, no qual registou uma locomoção estável e direcional, devido às perfeitas condições de funcionamento da bússola, contrariamente ao que se sucedeu no tanque do LSA, que se registaram elevados desvios atendendo às frequentes perturbações da bússola.

6. CONCLUSÕES

A inspiração biológica suscita elevada curiosidade no mundo da robótica atendendo ao interesse em desenvolver protótipos que simulem os movimentos dos animais, incluindo os seres humanos.

O protótipo desenvolvido procura simular as capacidades de locomoção e orientação de um peixe. Este trabalho passou por diversas fases até ser finalizado o protótipo, entre as quais as fases de estudo bibliográfico da robótica no meio aquático e da locomoção dos peixes, o desenvolvimento da arquitetura do protótipo, a sua implementação e a realização de um conjunto de ensaios e testes de forma a aferir das capacidades de locomoção do robô implementado.

Inicialmente foi efetuado um estudo acerca da locomoção dos peixes, de modo a “copiar” os princípios base de locomoção para o protótipo a desenvolver. A fase seguinte consistiu na análise aos protótipos já desenvolvidos de forma a retirar conclusões sobre como é obtida a locomoção e o controlo de um robô nadador de inspiração biológica.

Na fase de desenvolvimento da arquitetura, começou-se por projetar o protótipo ao nível da estrutura e do sistema de controlo que o robô iria adotar. Foi necessária uma análise cuidada devido ao meio em que o robô viria a ser inserido, o que impediu logo à partida a consideração de diversos materiais para implementar a sua estrutura. Mesmo ao nível da

arquitetura de controlo, foi necessário analisar os sensores que poderiam vir a ser inseridos no robô, atendendo à impossibilidade de alguns sensores funcionarem corretamente quando submersos.

Na fase da implementação do protótipo foram surgindo alguns problemas, atendendo ao facto de este ser o primeiro protótipo deste género implementado no ISEP (e, pela informação que foi possível obter, também o primeiro a nível nacional) e haver uma falta de experiência prática na implementação de sistemas deste tipo. As situações que se previam necessitar de maiores cuidados foram a estanquicidade e a estabilidade do corpo do robô.

Quando se ensaiou pela primeira vez o robô num tanque verificou-se de imediato a entrada de alguma água no seu interior e a sua notória falta de equilíbrio. Para garantir a estanquicidade foi necessário substituir um dos retentores, que não se encontrava a vedar correctamente a junta, e aplicar um pouco de cola na ligação do fole que protege a transmissão mecânica da barbatana caudal ao corpo do robô. Para ultrapassar o problema da estabilidade foi adicionado um lastro no fundo do robô para aumentar o peso e proporcionar a necessária estabilidade.

Ao nível do sistema de controlo concluiu-se que a bússola utilizada não proporciona um sinal aceitável em locais de elevada presença de ferro e outros materiais ferromagnéticos. Contudo, em locais que não originem perturbações, possibilita um controlo bastante aceitável. De salientar que neste projeto o controlo não era um dos objectivos iniciais, mas acabou por ser implementado um controlo relativamente “simples” de forma a valorizar o protótipo.

Ao longo dos diversos ensaios observou-se a importância das barbatanas peitorais na locomoção do robô. Verificou-se, nomeadamente, que apenas a alteração do posicionamento da barbatana é suficiente para impedir ou permitir a locomoção do robô. Nos primeiros testes efetuados deparou-se com esta situação, ao serem inseridas as barbatanas em diversas posições que não conseguiam movimentar o robô, mesmo perante o excelente binário que estes motores proporcionam.

Ao nível de ideias para possíveis desenvolvimentos futuros, considera-se que poderá ser melhorado o protótipo desenvolvido, por exemplo através da aplicação de mais duas (ou até mesmo quatro) barbatanas peitorais, aplicadas de forma simétrica no corpo do robô.

Perante esta melhoria estima-se que seria possível diminuir de forma acentuada a duração temporal do percurso, atendendo à quantidade de barbatanas a proporcionarem a tração do robô.

Adicionalmente, também se poderia desenvolver uma interface gráfica que possibilitasse controlar e/ou visualizar a trajetória do robô remotamente.

O controlo também poderá ser melhorado, através de componentes/sistemas que permitam a fiabilidade em todo o tipo de tanques, piscinas, entre outros. Bússolas com sistema de correção acoplado, sistemas de posicionamento global (GPS), controlo remoto e outros sensores/sistemas chegaram a ser equacionados, mas devido à exigência de tempo que o desenvolvimento da estrutura mecânica originou ao longo da sua implementação, não os foi possível abordar.

Outra ideia passaria por efetuar a carga das baterias através da aplicação de painéis solares no corpo emerso do robô, possibilitando aumentar a sua autonomia de forma significativa.

Por último, uma aplicação também passível de consideração no futuro seria o controlo da profundidade de locomoção do robô no meio aquático.

Com o desenvolvimento e implementação deste protótipo adquiri novos conhecimentos ao nível da eletrónica e da mecânica. Na minha opinião, os robôs de inspiração biológica suscitam mais interesse que os restantes, devido à ambição em simular determinadas características dos animais (incluindo o ser humano). Considero que um dos aspetos mais gratificantes da realização deste protótipo, foi o facto de se ter conseguido implementar um robô de inspiração biológica e simular a locomoção dos peixes.

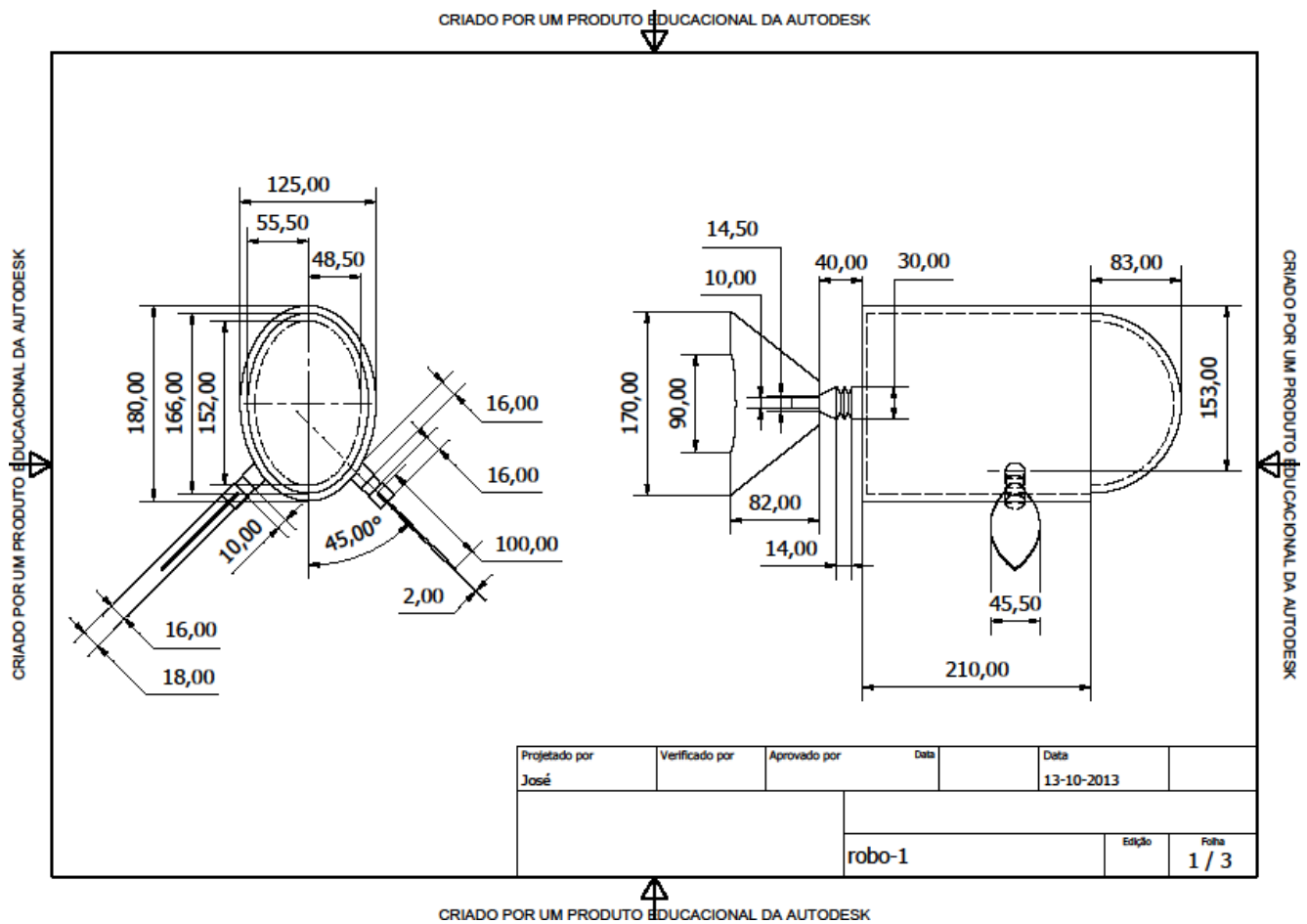
Referências Documentais

- [1] Whitesides, George M. – Robot flexible, University Harvard, EUA, 2011.
- [2] Robô Ziphius – Azorean Aquatic Technologies, Portugal, 2012.
- [3] <http://www.portalsaofrancisco.com.br>, Peixe Ósseo, último acesso em 6 de Abril de 2013.
- [4] William J. Cromie, William H. Amos, Durward L. Allen - Segredos do Mar, Selecções do Reader's Digest, 2ª Edição.
- [5] <http://www.demersais.furg.br/Files/2010.Bemvenuti.Fischer.Peixes.Morfologia.Caderno.Ecol.Aquat.pdf>, Ecologia Aquática, último acesso em 11 de Outubro de 2013.
- [6] <http://pt.wikipedia.org/wiki/Ficheiro:Bluefin-big.jpg>, Wikipédia, último acesso em 11 de Outubro de 2013.
- [7] [http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Boarfish_\(Antigonia_capros\).jpg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Boarfish_(Antigonia_capros).jpg), Wikipédia, último acesso em 12 de Outubro de 2013.
- [8] <http://pt.wikipedia.org/wiki/Rhinobatidae>, Wikipédia, último acesso em 11 de Outubro de 2013.
- [9] <http://de.wikipedia.org/wiki/Haarschw%C3%A4nze>, Wikipédia, último acesso em 12 de Outubro de 2013.
- [10] [http://pt.wikipedia.org/wiki/Ficheiro:Longspine_porcupinefish_\(Diodon_holocanthus\).jpg](http://pt.wikipedia.org/wiki/Ficheiro:Longspine_porcupinefish_(Diodon_holocanthus).jpg), último acesso em 12 de Outubro de 2013.
- [11] <http://tubaroes.com.sapo.pt/tubmartelo.html>, Tubarão martelo, último acesso em 12 de Outubro de 2013.
- [12] http://pt.wikipedia.org/wiki/Carnegiella_strigata.html, Wikipédia, último acesso em 12 de Outubro de 2013.
- [13] <http://pt.wikipedia.org/wiki/Cavalo-marinho>, Wikipédia, último acesso em 12 de Outubro de 2013.
- [14] <http://www.abys.com.br/galeria/intgal1/peixetro.html>, último acesso em 12 de Outubro de 2013.
- [15] Quintela, António de Carvalho – Hidráulica, 8ª ed. Lisboa: Ed. Fundação Calouste Gulbenkian, 2002.
- [16] Sabatina – Física e Química, Marina Editores Lda, 1998.
- [17] C.Gerthesen, Kneser, H.Vogel – Física, 2ª ed. Lisboa: Ed. Fundação Calouste Gulbenkian, 1998.
- [18] <http://pt.wikipedia.org/wiki/Impuls%C3%A3o>, Impulsão, último acesso em 12 de Junho de 2013.
- [19] Barrett, David – Robot Tuna, Massachusetts Institute of Technology (MIT), 1993.

- [20] Modular Design and Motion Control of Reconfigurable Robotic fish – 46th IEEE CDC, New Orleans, USA, 2007.
- [21] Dudek, Gregory; Jenkin, Michael - McGill University, York University, Canadá, 2006.
- [22] http://www.bostondynamics.com/robot_rhex.html, RHex – Devours Rough Terrain, último acesso em 3 de Outubro de 2013.
- [23] Robot Baywatch - Autonomously Patrolling Robot Lifeguard Swims, Popular Science, 2012.
- [24] <http://www.lrog.com/>, PacXWaveGlider - Liquid Robotics, último acesso em 9 de Maio de 2013.
- [25] <http://msutoday.msu.edu/news>, Robot Grace – Michigan State University, último acesso em 11 de Maio de 2013.
- [26] <http://elieahovi.com/marine-drone>, Ahovi Elie – Robô Zangão, último acesso em 20 de Junho de 2012.
- [27] <http://www.arduino.cc/>, Arduino, último acesso em 2 de Julho de 2013.
- [28] http://www.robotizando.com.br/curso_arduino_hardware_pg1.php, Robotizando, último acesso em 7 de Julho de 2013.
- [29] <http://www.goteckrc.com/>, Goteck, último acesso em 9 de Julho de 2013.
- [30] http://www.robotplatform.com/knowledge/servo/servo_control_tutorial.html, Robotplatform, último acesso em 10 de Julho de 2013.
- [31] <http://cienciasnaturales-fisica.blogspot.pt/2007/03/calor-y-temperatura.html>, Ciências Naturais – Física, último acesso em 7 de Outubro de 2013.
- [32] http://es.wikipedia.org/wiki/Dipolo_magn%C3%A9tico, Wikipédia , último acesso em 7 de Outubro de 2013.
- [33] <http://www.robotshop.com/spark-fun-hmc6352-compass.html>, RobotShop, último acesso em 4 de Agosto de 2013.
- [34] <http://www.totalphase.com/image/articles/i2c-diagram.png>, TotalPhase, último acesso em 18 de Julho de 2013.
- [35] <http://lusorobotica.com/index.php?topic=33.0>, LusoRobótica, último acesso em 14 de Julho de 2013.
- [36] <http://www.seeedstudio.com/depot/2km-long-range-rf-link-kits-w-encoder-and-decoder-p-321.html>, Seeed Technology, último acesso em 28 de Julho de 2013.
- [37] <http://pt.wikipedia.org/wiki/Tristate>, Wikipédia, último acesso em 14 de Outubro de 2013.
- [38] http://www.wikienergia.pt/~edp/index.php?title=Bateria_de_%C3%A1cido-chumbo, Wikienergia, último acesso em 21 de Agosto de 2013.
- [39] <http://qnint.sbg.org.br/qni/visualizarConceito.php?idConceito=45>, Química Nova, último acesso em 26 de Agosto de 2013.

Anexo A. Dimensões do Robô

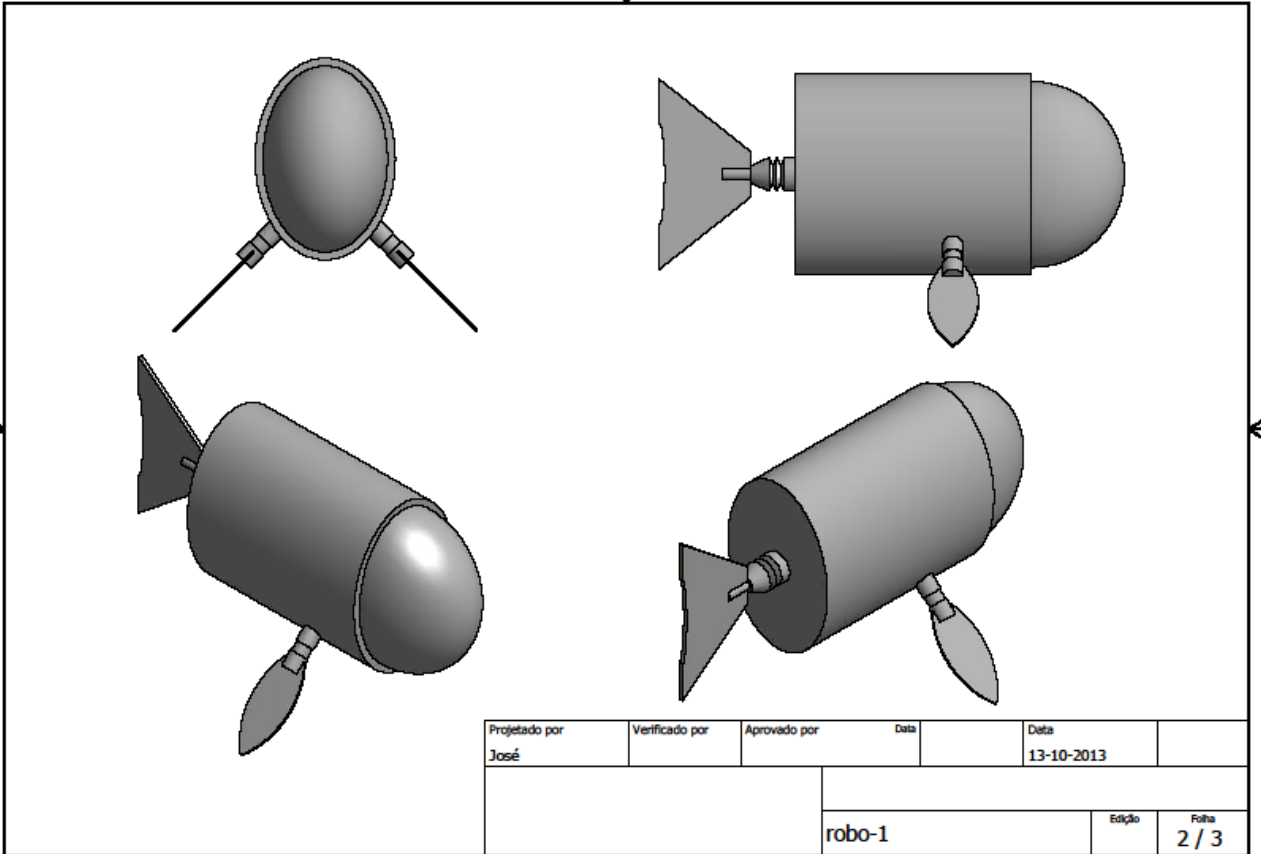
Neste anexo são apresentados três desenhos cotados do robô. O primeiro desenho representa o robô com as barbatanas do modelo 1e as respectivas dimensões. O segundo desenho ilustra o robô a três dimensões. Por fim, o terceiro desenho apresenta as dimensões das barbatanas modelo 2 (à direita) e modelo 3 (à esquerda).



CRIADO POR UM PRODUTO EDUCACIONAL DA AUTODESK

CRIADO POR UM PRODUTO EDUCACIONAL DA AUTODESK

CRIADO POR UM PRODUTO EDUCACIONAL DA AUTODESK



CRIADO POR UM PRODUTO EDUCACIONAL DA AUTODESK

