

Mestrado Engenharia Eletrotécnica e de Computadores
Sistemas Autónomos

***Sistema de Variação de Lastro para Controlo de
Movimento Vertical de Veículo Subaquático***

Tese de Mestrado

Fernando Jorge Almeida Gomes

Desenvolvida no âmbito da unidade curricular de Dissertação

Departamento de Engenharia Eletrónica do ISEP

Orientador: **Eng. Alfredo Martins**



Instituto Superior de Engenharia do Porto

Novembro 2014

Resumo

O principal motivo para a realização deste trabalho consistiu no desenvolvimento de tecnologia robótica, que permitisse o mergulho e ascensão de grandes profundidades de uma forma eficiente.

O trabalho realizado contemplou uma fase inicial de análise e estudo dos sistemas robóticos existentes no mercado, bem como métodos utilizados identificando vantagens e desvantagens em relação ao tipo de veículo pretendido. Seguiu-se uma fase de projeto e estudo mecânico, com o intuito de desenvolver um veículo com variação de lastro através do bombeamento de óleo para um reservatório exterior, para variar o volume total do veículo, variando assim a sua flutuabilidade.

Para operar a grande profundidade com AUV's é conveniente poder efetuar o trajeto *up/down* de forma eficiente e a variação de lastro apresenta vantagens nesse aspeto. No entanto, contrariamente aos gliders o interesse está na possibilidade de subir e descer na vertical.

Para controlar a flutuabilidade e ao mesmo tempo analisar a profundidade do veículo em tempo real, foi necessário o uso de um sistema de processamento central que adquirisse a informação do sensor de pressão e comunicasse com o sistema de variação de lastro, de modo a fazer o controlo de posicionamento vertical desejado.

Do ponto de vista tecnológico procurou-se desenvolver e avaliar soluções de variação de volume intermédias entre as dos gliders (poucas gramas) e as dos ROV's *workclass* (dezenas ou centenas de kilogramas).

Posteriormente, foi desenvolvido um simulador em matlab (Simulink) que reflete o comportamento da descida do veículo, permitindo alterar parâmetros do veículo e analisar os seus resultados práticos, de modo a poder ajustar o veículo real.

Nos resultados simulados verificamos o cálculo das velocidades limite atingidas pelo veículo com diferentes coeficientes de atrito, bem como o comportamento da variação de lastro do veículo no seu deslocamento vertical.

Por fim, verificou-se ainda a capacidade de controlo do veículo para uma determinada profundidade, e foi feita a comparação entre estas simulações executadas com parâmetros muito próximos do ensaio real e os respetivos ensaios reais.

Abstract

The main objective of this research was to develop robotic technology that allow the dive and ascension from great depths in an efficient way.

The project included an initial phase of analysis and study of the existing robotic systems in the market, as well as utilized methods, identifying advantages and disadvantages regarding the type of vehicle desired. This was followed by a phase of mechanical study and design in order to develop a vehicle with ballast variation through the pumping of oil to an outer shell, varying the total volume of the vehicle, resulting in the alternation of its buoyancy.

To operate at great depth with AUV's it is convenient to be able to make the up / down path efficiently, and the variation of the ballast represents huge advantages in this aspect. However unlike gliders, the interest of this method is on the possibility of getting up and down vertically.

To control the buoyancy and simultaneously analyze the depth of the vehicle in real time, it was necessary to use a central processing system that acquires the information from the pressure sensor and communicates with the ballast system, in order to guarantee the control of the vertical positioning desired.

From the technological point of view it was aimed to develop and evaluate solutions of middle volume variations between the gliders (few grams) and the ROV's workclass (tens or hundreds of kilograms).

Afterwards it was developed a simulator in Matlab (Simulink) which reflects the behavior of the descent of the vehicle, allowing the change of parameters of the vehicle and the examination of its practical results, giving the possibility of adjusting the real vehicle.

In the simulated results the calculation of the vehicle speed limits, with different coefficients of friction, were verified, as well as the behavior of the variation of the vehicle's ballast in its vertical displacement.

Finally, the capacity of control of the vehicle for a given water depth was analyzed and the simulations made with parameters closed to the real tests were compared to the real tests.

Índice

1. INTRODUÇÃO.....	15
1.1. MOTIVAÇÃO	18
1.2. OBJETIVOS.....	21
1.3. ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO	21
2. REQUISITOS	23
3. ESTADO DA ARTE	25
3.1. HISTÓRIA	25
3.2. EXEMPLOS DE AUV'S	29
3.2.1. <i>Mbari Dorado</i>	29
3.2.2. <i>Mbari Tethys</i>	29
3.2.3. <i>REMUS</i>	31
3.2.4. <i>Hugin 3000</i>	34
3.2.5. <i>Seaglider</i>	36
3.2.6. <i>Spray</i>	37
3.2.7. <i>Slocum</i>	38
3.3. SISTEMA DE VARIAÇÃO DE LASTRO (VBS).....	40
3.4. MATERIAIS	41
3.4.1. <i>Subsea Housings</i>	41
4. CONTROLO DA DESCIDA.....	47
4.1. MODELO DO VEÍCULO	47
4.2. MODELO DE SIMULAÇÃO EM MATLAB	52
5. PROJETO E IMPLEMENTAÇÃO.....	57
5.1. CONCEÇÃO MECÂNICA	57
5.1.1. <i>Arquitetura de Hardware</i>	64
5.1.2. <i>Sistema de Variação de lastro</i>	66
5.1.3. <i>Sistema Computacional</i>	70
5.1.4. <i>Aquisição de Dados</i>	72
5.1.5. <i>Arquitetura de Software</i>	74
5.1.5.1. <i>Software PC Principal</i>	76
5.1.5.2. <i>Software do Microprocessador</i>	78
5.2. IMPLEMENTAÇÃO.....	79
5.2.1. <i>Descrição de Problemas</i>	79
5.2.2. <i>Novo Circuito Hidráulico e Alterações Mecânicas</i>	80
6. RESULTADOS.....	85
6.1. RESULTADOS DE SIMULAÇÃO.....	85

6.2. RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....	90
7. CONCLUSÃO.....	93

Índice de Figuras

Figura 1	Imagem de ROV	17
Figura 2	Imagem de <i>Glider</i> à superfície	18
Figura 3	AUV Sams	19
Figura 4	Rastreamento do fundo do mar.....	20
Figura 5	Representação ilustrativa do “ <i>Turtle</i> ”	26
Figura 6	Imagem de AUV <i>Epaulard</i>	27
Figura 7	Mbari Dorado AUV.....	29
Figura 8	MBARI Tethys AUV	30
Figura 9	AUV REMUS.....	31
Figura 10	Arquitetura do REMUS	32
Figura 11	Ilustração AUV Hugin 3000.....	34
Figura 12	Hugin 3000	35
Figura 13	Seaglider	36
Figura 14	Estrutura do Seaglider	37
Figura 15	Spray.....	38
Figura 16	Slocum.....	39
Figura 17	Slocum em missão	39
Figura 18	Sistema de variação de lastro.....	40
Figura 19	Exemplo de Tubos para Profundidade em Titânio	42
Figura 20	Tubo de alumínio <i>Prevco</i>	43
Figura 21	Imagem de uma esfera de vidro selada a vácuo	44
Figura 22	Esfera de instrumentação num AUV	45
Figura 23	Representação das Forças no Sistema	47
Figura 24	Força <i>Drag</i> do cilindro	51
Figura 25	Força <i>Drag</i> com tampa esférica.....	51
Figura 26	Simulador do controlo do veículo	53
Figura 27	Simulador do controlo do veículo em detalhe.....	54
Figura 28	Diagrama de blocos do cilindro em Simulink	55
Figura 29	Diagrama de blocos do controlo da bomba em Simulink.....	55
Figura 30	Gráfico espessura/diâmetro relativo à profundidade para alumínio [17] ...	59
Figura 31	Gráfico espessura/diâmetro relativo à profundidade para tampa em alumínio [17].....	59
Figura 32	Gráfico espessura/diâmetro relativo à profundidade para aço [17].....	60

Figura 33	Gráfico espessura/diâmetro relativo à profundidade da tampa em aço [17] 61	
Figura 34	Representação mecânica do veículo em SolidWorks	63
Figura 35	Imagem de uma das tampas do cilindro em SolidWorks	63
Figura 36	Distribuição do <i>Hardware</i> no veículo	64
Figura 37	Diagrama de blocos do <i>Hardware</i> do sistema.....	65
Figura 38	Sistema de variação de lastro do veículo.....	66
Figura 39	Bomba de 5 Pistões Axial AKP.....	67
Figura 40	Simbologia Válvula Solenoide – SV15-8-C/CM	67
Figura 41	Motor Pittman com <i>encoder</i> Heds 9140-I00	68
Figura 42	Encoder Esquema de Ligações	69
Figura 43	Módulo de potência para controle do motor DC.....	69
Figura 44	Microprocessador STM32F4 Discovery	70
Figura 45	Mini Computador Industrial fit-PC2	71
Figura 46	Placa RaspberryPi.....	72
Figura 47	Sensor de Pressão Série 35X Ei da Keller.....	73
Figura 48	Diagrama de blocos do <i>software</i> do veículo.....	75
Figura 49	Fluxograma do <i>software</i> do computador central	77
Figura 50	Fluxograma do <i>software</i> do microprocessador.....	78
Figura 51	Simbologia Válvula Solenoide – SV11-8-4/4M.....	80
Figura 52	Esquema de uso da válvula no sistema.....	81
Figura 53	Válvula de 4 vias e esquema de uso da válvula no sistema.....	81
Figura 54	Ilustração do tipo de vedação por tampa com 3 <i>o-rings</i>	82
Figura 55	Estrutura do interior de um AUV	83
Figura 56	Gráfico da velocidade limite do veículo com $C_d = 1,17$	86
Figura 57	Gráfico da velocidade limite do veículo com $C_d = 0,42$	86
Figura 58	Gráfico da deslocação do veículo	87
Figura 59	Gráfico do volume de óleo bombeado para o reservatório exterior	88
Figura 60	Gráfico da deslocação do veículo com dobro do caudal	89
Figura 61	Gráfico da deslocação do veículo para 2 m	89
Figura 62	Gráfico da deslocação do veículo para descida de 20m	90
Figura 63	Gráfico da deslocação do veículo	90
Figura 64	Imagem do veículo no ensaio	91
Figura 65	Gráfico da deslocação do veículo no ensaio.....	92
Figura 66	Gráfico da velocidade do veículo no ensaio	92

Índice de Tabelas

Tabela 1	Caraterísticas do REMUS.....	33
Tabela 2	Coeficientes de arrasto se várias formas 3D e 2D [14]	50
Tabela 3	Cálculos físicos do cilindro em alumínio	58
Tabela 4	Cálculos físicos do cilindro em aço	61
Tabela 5	Caraterísticas do Sensor de Pressão Série 35 X Ei.....	74

Notação e Glossário

AUV	–	<i>Autonomous Underwater Vehicle</i>
ABS	–	<i>Acrylonitrile Butadiene Styrene</i>
CPR	–	<i>Cycles Per Revolution</i>
DC	–	<i>Direct Current</i>
DVL	–	<i>Doppler Velocity Log</i>
Fd	–	<i>Force Drag</i>
GPS	–	<i>Global Positioning System</i>
INS	–	<i>Inertial Navigation System</i>
IMU	–	<i>Inertial Measurement Unit</i>
NI-MH	–	<i>Nickel Metal Hydride</i>
NTP	–	<i>Network Time Protocol</i>
PID	–	<i>Proportional Integral Derivative</i>
RF	–	<i>Radio Frequency</i>
RTC	–	<i>Real Time Clock</i>
ROV	–	<i>Remotely Operated Vehicle</i>
SPURV	–	<i>Special Purpose Underwater Research Vehicle</i>
SSS	–	<i>Side Scan Sonar</i>
SW.MCH	–	<i>Shallow Water Modular Composite Housing</i>

- UUV – *Unmanned Underwater Vehicle*
- UART – *Universal Asynchronous Receive/Transmitter*
- VBS – *Variable Buoyancy Systems*
- WLAN – *Wireless Local Area Network*

1. INTRODUÇÃO

Desde há muito que o ser humano tem procurado superar as barreiras impostas pela natureza e mergulhar no seio dos oceanos para estudar os fenómenos físicos, químicos, biológicos e geológicos que ocorrem no seu interior e nas fronteiras com a atmosfera e o interior da Terra. Os sistemas robóticos têm vindo a afirmar-se como soluções tecnológicas eficientes para o estudo e exploração do oceano.

Esta dissertação preenche parcialmente os requisitos do Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores – perfil de Sistemas Autónomos do Instituto Superior de Engenharia do Porto.

O presente trabalho visa do desenvolvimento de um sistema robótico para efetuar mergulhos a grande profundidade. Em particular endereça o problema de mergulhar e submergir na vertical de forma eficiente recorrendo a variação de flutuabilidade.

Tradicionalmente mergulhadores, navios oceanográficos equipados com instrumentação científica, submersíveis tripulados e instalações colocadas no fundo do mar têm desempenhado um papel fundamental no estudo e exploração dos oceanos.

No entanto, sob muitos pontos de vista o ambiente marinho é muito mais inóspito e coloca vários problemas na sua exploração. Essas dificuldades devem-se às pressões enormes a que ficam sujeitos os equipamentos submersos, à impossibilidade de transmitir informação através de ondas eletromagnéticas a longa distância, bem como à ausência de um sistema de posicionamento global (GPS) debaixo de água.

Apesar destas dificuldades, tem-se assistido a progressos notáveis nas áreas da robótica marinha. Os avanços tecnológicos em sensores, computadores, comunicações e sistemas de informação têm contribuído com impacto visível no desenvolvimento de novas tecnologias e no aperfeiçoamento de tecnologias existentes para o estudo e exploração dos oceanos.

Um exemplo de tecnologia robótica consiste nos veículos autónomos submarinos designados por AUV's (da denominação anglo-saxónica "*Autonomous Underwater Vehicle*") que associados com sistemas de aquisição de dados irão seguramente revolucionar as metodologias acessíveis para a exploração dos oceanos.

Este tipo de sistemas tem já na corrente década passado do meio académico e de investigação para a oferta e utilização de soluções comerciais em múltiplas aplicações no oceano. Sendo certo que ainda existem problemas tecnológicos a serem resolvidos, a utilização deste tipo de sistemas é cada vez mais comum.

Para além dos AUV's podemos subdividir os robôs submarinos em dois tipos de veículos subaquáticos, os ROV's e os AUV's, em que as principais diferenças estão no seu modo de operar, ou seja, o ROV é operado remotamente e tem sempre ligação física com o exterior, por onde comunica e é controlado. Por outro lado o AUV não tem qualquer ligação ao exterior sendo totalmente autónomo na sua missão.



Figura 1 Imagem de ROV

A maioria dos veículos subaquáticos são equipados com, pelo menos, uma câmara de vídeo e luzes. Equipamentos adicionais são comumente adicionados para expandir a capacidade do veículo. Estes podem incluir sonares, magnetômetros, uma câmara fotográfica, um braço manipulador ou de corte, samplers de água e instrumentos que medem a claridade da água, temperatura da água, a densidade da água, velocidade do som, a penetração da luz e da temperatura.

Como modo de locomoção a maioria dos ROV's e AUV's usam propulsores com hélices existindo várias configurações de acoplamento e em muitos casos são usados vários propulsores. Este tipo de propulsão permite uma vasta flexibilidade nas capacidades de locomoção dos veículos deste sistemas desenhados para longas deslocções (como os AUV's tipo torpedo) a sistemas concebidos para posicionamento preciso e "hovering". No entanto a utilização de propulsores nem sempre é o mais eficiente, existindo outro tipo de sistemas adequados para percorrer longas distâncias com maior eficiência, os AUV do tipo "Glider" (planadores).

Um *Glider* é um planador subaquático autónomo que utiliza pequenas mudanças na flutuabilidade em conjunto com asas para converter o movimento vertical em movimento horizontal, e, assim, impulsionar-se para a frente com baixo consumo de energia.



Figura 2 Imagem de *Glíder* à superfície

Apesar de não ser tão rápido quanto os AUV'S convencionais, estes planadores utilizando propulsão à base de flutuabilidade representam um aumento significativo no alcance e duração em comparação aos veículos movidos por motores elétricos, estendendo missões de amostragem do oceano em semanas ou até alguns meses, percorrendo milhares de quilómetros sem recargas.

1.1. MOTIVAÇÃO

A profundidade crescente a que a actividade humana tem dedicado a sua atenção (da qual a extracção de hidrocarbonetos a profundidades superiores a 2000m é um exemplo) aliada a que uma grande parte do fundo oceanico se encontra na chamada planície abissal (com profundidades até 6000m), vem trazer problemas acrescidos aos sistemas robóticos.

Uma das questões de interesse consiste no desenvolvimento de tecnologia capaz de forma energeticamente eficiente efectuar a locomoção de sistemas robóticos entre a superfície e o fundo oceânico.

Em particular o presente trabalho enquadra-se na actividade de investigação e desenvolvimento do Laboratório de Sistemas Autónomos do ISEP na área da robótica marinha e no desenvolvimento de soluções de tecnologia portuguesa para o mar profundo do qual é exemplo o projecto de I&D TURTLE desenvolvido por um consórcio de empresas nacionais e centros de I&D endereçando estes problemas e do qual o ISEP é parceiro.

Com particular interesse de aplicação dos sistemas que são âmbito deste estudo temos os veículos submarinos autônomos e a sua crescente aplicação a grandes profundidades.

Até há relativamente pouco tempo, os AUV's têm sido utilizados para um número limitado de tarefas ditadas pela tecnologia disponível, em termos de sensorização, alimentação e comunicação dentro de água. Atualmente, com o desenvolvimento das capacidades de processamento mais avançadas, os AUV's passaram a ser usados para mais tarefas com papéis e missões em constante evolução.

A indústria de petróleo e gás usa AUV's para fazer mapas detalhados do fundo do mar, antes de começar a construir a infra-estrutura submarina; gasodutos ou oleodutos submarinos podem ser instalados de maneira mais eficaz com o mínimo de perturbação ao meio ambiente. O AUV permite que empresas de pesquisa possam realizar levantamentos precisos das áreas onde levantamentos barométricos tradicionais seriam menos eficazes ou muito caros.



Figura 3 AUV Sams

Relativamente à pesquisa, os Cientistas usam AUV's para estudar os lagos, o mar e o oceano. Uma variedade de sensores pode ser fixada num AUV's para medir a concentração de vários elementos ou compostos, a absorção ou reflexão da luz, e a presença de vida microscópica. Além disso, AUV'S podem ser configurados como veículos de reboque para fornecer pacotes de sensores personalizados para locais específicos.

As atividades atuais com AUV'S dividem-se em duas categorias, em primeiro lugar, há uma quantidade significativa de investigação em curso permitindo tecnologias de estimulação adicional ao desenvolvimento de sistemas de AUV. Em segundo lugar, existe um esforço considerável para conceber, fabricar e avaliar sistemas AUV sob condições operacionais. Esta atividade de desenvolvimento está a ser impulsionada pelos mercados em evolução para a tecnologia de AUV.

Cada vez mais os AUV's surgem no mercado como um produto de comercialização, embora existam ainda muitas oportunidades para a comercialização da tecnologia de AUV ao longo dos próximos anos. As empresas individuais, assim como as equipas de organizações, começam a centrar os seus esforços para tornarem os AUV's operacionais para a indústria petrolífrica e do gás.

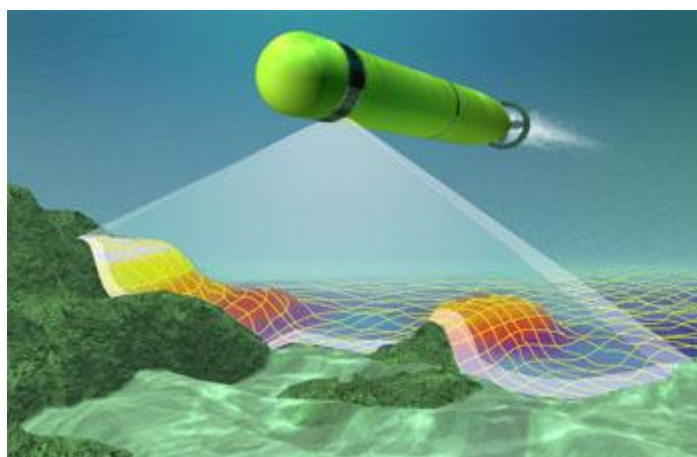


Figura 4 Rastreamento do fundo do mar

Nos mercados, estão a surgir novos sensores excepcionalmente adequados aos AUV's, o que fortalece a necessidade de comercialização destes. Na verdade, a preocupação é que se espera muito desta tecnologia em evolução, contudo o sucesso e as falhas dos próximos anos ajudarão a ajustar as capacidades do sistema e as expectativas dos usuários. Isso é sinal de um amadurecimento da tecnologia, pois a tecnologia num AUV tem um papel importante a desempenhar no futuro da ciência do oceano através da aquisição de dados.

1.2. OBJETIVOS

Os objetivos deste trabalho são:

- Estudar e desenvolver tecnologia de variação de lastro para sistemas robóticos submarinos;
- Desenvolver soluções estanques e resistentes à pressão adequadas para a protecção e implementação dos sistemas electrónicos de bordo de robôs submarinos de profundidade;
- Desenvolver um veículo robótico subaquático, para profundidades elevadas com recurso a meios energeticamente eficientes para mergulho e ascensão;
- Desenvolver e validar um protótipo de sistema de variação de lastro aplicável a veículos robóticos submarinos.

1.3. ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO

Este documento é composto por três partes. Inicialmente é efetuado um estudo sobre o problema em questão, analisando o estado da arte. Posteriormente, é realizado o estudo e o projeto de todo o sistema. E por fim, são apresentados resultados de simulação e resultados experimentais. São também apresentadas algumas conclusões sobre o trabalho desenvolvido, bem como apontadas perspectivas de trabalho futuro.

2. REQUISITOS

O principal motivo para o aprofundamento deste trabalho, é desenvolver tecnologia robótica que permita o mergulho e ascensão a grandes profundidades de forma eficiente.

Um aspeto relevante, consiste na possibilidade de incorporar esta tecnologia em outras soluções para veículos robóticos de profundidade.

Para operar a grande profundidade com AUV's é conveniente poder efetuar o trajecto *up/down* de forma eficiente e a variação de lastro apresenta vantagens nesse aspeto. No entanto, contrariamente aos gliders o interesse está na possibilidade de subir e descer na vertical.

Outro factor diferenciador, baseia-se no facto de se pretender aumentar a eficiência do processo de mergulho de uma maior gama de veículos robóticos, os volumes em causa serem à priori de maior valor dos usados pelos gliders. Estes usualmente operam com uma variação de pouco mais do que 100 gramas com velocidades muito reduzidas.

No nosso processo pretende-se utilizar variações de massa, que permitam aos veiculos em questão subir e descer com velocidades comparáveis às obtidas por propulsores com hélice.

Ou seja, do ponto de vista tecnológico pretende-se também, desenvolver e avaliar soluções de variação de volume intermédias entre as dos gliders (poucas gramas) e as dos ROV's workclass (dezenas ou centenas de kilogramas).

Assim sendo, para o sistema pretendido temos os seguintes requisitos de construção:

- Dimensões e peso na ordem dos 30-60 Kg, de modo a ser facilmente transportado;
- Permitir fácil operação com uma ou duas pessoas;
- Protótipo inicial concebido para 1000 metros de profundidade;
- Soluções facilmente escaláveis para maior profundidade;
- Ter um sistema computacional de bordo para processamento de sensores com base linux;
- Numa configuração inicial poder ter câmara de vídeo, luz, baterias;
- Poder transportar facilmente 1 ou 2 kg de payload com ajuste estático de flutuabilidade;
- Forma adequada a garantir eficiência na subida/descida.

Através destes requisitos podemos resumir que AUV pretendido é um veículo que tem a capacidade de realizar missões de um ROV, mas que ao mesmo tempo tenha capacidade de se movimentar e de se deslocar para longas profundidades sem necessidade de ser alimentado externamente, podendo realizar a sua missão e voltar com uma eficiência energética elevada, tal como um glider.

Para isso, o AUV tem que ter a capacidade de variar a sua flutuabilidade de modo a poder deslocar-se para profundidades elevadas e regressar tendo apenas de despende energia para variar a sua flutuabilidade.

Numa deslocação de alguns metros de profundidade essa diferença não seria significativa, mas no caso de missões a profundidades de milhares de metros essa deslocação seria mais eficiente do que, por exemplo, o uso de propulsores.

3. ESTADO DA ARTE

3.1. HISTÓRIA

O conceito de veículo submersível não é uma ideia nova. O primeiro submarino americano foi chamado de "*Turtle*". Foi construído em *Saybrook, Connecticut* em 1775 por *David Bushnell* e seu irmão, *Ezra. Trutle* era um pequeno submarino de madeira em forma de ovo construído em conjunto por tiras de ferro.

Turtle balançava como uma rolha com ventos de superfície áspera e os mares, mesmo que esta tendo chumbos ponderados na parte inferior. No outro lado, opera com o pé objeto, onde uma pessoa pode descer por uma válvula para admitir água para o tanque de lastro e subir com o uso de bombas para ejetar a água.

Tinha duas aberturas de ventilação do tipo aba na parte superior, era aberta quando a escotilha estava livre de água e fechada quando não estava livre de água. O fornecimento de ar dura apenas 30 minutos.

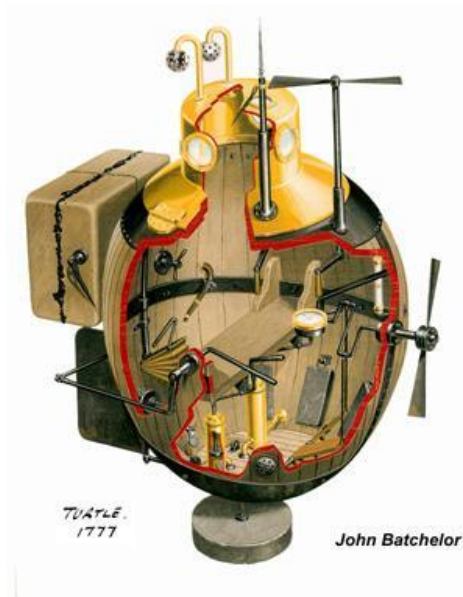


Figura 5 Representação ilustrativa do “*Turtle*”.

A primeira missão do *Turtle*, teve lugar em Nova York Harbor, em 1776, também foi a primeira batalha naval da história envolvendo um submarino.

O primeiro AUV da história foi desenvolvido no Laboratório de Física Aplicada da Universidade de *Washington*, já em 1957 por *Stan Murphy*, *Bob François* e, mais tarde, *Terry Ewart*. O "*Special Purpose Underwater Research Vehicle*", ou SPURV, foi utilizado para estudar a difusão e a transmissão acústica do submarino.

Outros AUV's foram desenvolvidos no Instituto de Tecnologia de Massachusetts em 1970. Um deles está em exposição na Galeria Náutico Hart no MIT. Ao mesmo tempo, os AUV's também foram desenvolvidos na União Soviética.

Após todos os veículos submarinos históricos, tem havido muitos mais submersíveis desenvolvidos e utilizados operacionalmente para um número de diferentes tarefas. Com estes submarinos, veio o desenvolvimento de torpedos. Os torpedos são verdadeiramente os primeiros AUV's. Embora haja um número de sistemas AUV's semelhantes que foram considerados antes de 1970, a maioria nunca foram usados durante períodos de tempo prolongados ou discutida na literatura aberta. Desde esse tempo que ocorreu uma grande parte do desenvolvimento.

Existem diferentes tipos de veículos subaquáticos. Um método de classificar estes veículos é identificá-los como membros de uma de duas classes de veículos, sistemas tripulados e não tripulados. Estamos todos familiarizados com os sistemas tripulados. Eles podem ser descritos simplesmente como cair em duas subclasses; submarinos militares e submersíveis não militares, como as utilizadas para apoiar as investigações subaquáticas e de avaliação. As marinhas do mundo utilizam um número de diferentes classes de submarinos para realizar suas missões.

Uma classe particular de submersíveis tripulados consiste nos veículos de profundidade (por vezes designados de batiscafos) que permitem com uma tripulação reduzida de um ou dois homens aceder a grandes profundidades, são exemplos destes submarinos de exploração o *Alvin* (EUA), *Epaulard*, *Mir*, *Shicnaki 6500* (Japan). O ponto mais profundo do planeta foi já atingido por humanos em dois destes veículos, pela primeira vez na década de 1960 com o submarino *Triestre* (EUA) e mais recentemente com a missão mediática de James Cameron para a *National Geographic*.



Figura 6 Imagem de AUV *Epaulard*

Os AUV's agem como plataformas para vários conjuntos de sensores conetados ao chassi do veículo. Um segundo tipo de sistema submersível é chamado de Veículo Operado Remotamente (ROV). Um ROV é um veículo com amarras, onde o cabo fornece energia e comunicação ao ROV e é controlado diretamente por um operador remoto. Um terceiro tipo de submersíveis não tripulados é um veículo não tripulado *Untethered* (UUV). Este veículo contém a sua própria alimentação de bordo, mas é controlado por um operador remoto através de algum tipo de ligação e de comunicação. Um AUV é um sistema submarino contendo o poder de auto-controlo ao realizar uma tarefa pré-definida. Uma outra distinção entre o AUV e UUV é que o AUV não requer

nenhuma comunicação durante a sua missão enquanto o UUV requer algum nível de comunicação para que possa completar a missão atribuída.

Um outro tipo de AUV que também iremos abordar e mostrar alguns exemplos trata-se dos Gliders [10][11], estes são conhecidos como planadores que através de pequenas mudanças na sua flutuabilidade e usando algumas asas, podem navegar na vertical assim como na horizontal, obtendo-se assim um sistema de propulsão baixo consumo de energia.

Embora não sejam tão rápidos quanto os veículos AUV's convencionais, os planadores têm uma grande melhoria em termos de tempo de duração e distância em relação aos veículos movidos a motor e hélice, devido ao uso de um sistema de propulsão com base em variações de impulso. De modo que esta melhoria, permite-lhes realizar missões com durações de meses a milhares de quilômetros.

O primeiro planador foi concebido pela primeira vez por Henry Stommel, em 1989, chamado de Slocum. Neste primeiro planador, Henry utilizou a energia do gradiente térmico entre o oceano profundo e a superfície para ter um desempenho global do sistema de propulsão, limitado apenas pela quantidade de baterias usadas para a comunicação, sensores e navegação computacional.

Os Planadores tipicamente fazem medições, tais como, temperatura, condutividade (para calcular a salinidade), correntes, clorofila fluorescência, ótico retroespalhamento, profundidade do fundo e eventualmente, retrodifusão acústica.

Eles navegam com a ajuda das correções periódicas do sinal de GPS, sensores de pressão, sensores de inclinação, e bússolas magnéticas. Estes são controláveis pelo lastro interno móvel (geralmente baterias), e a direção é realizada ou com um leme ou movendo o lastro interno para controlar o rolo. A flutuabilidade é regulada por meio de um pistão para inundar/evacuar um compartimento com água do mar ou por óleo em movimento in/out de uma bexiga externa. Os comandos e os dados são transmitidos entre planadores e costa por satélite.

3.2. EXEMPLOS DE AUV'S

3.2.1. MBARI DORADO

O AUV Dorado [5] tem 53,3 centímetros (21 polegadas) de diâmetro e pode ter como dimensões 2,4 metros (8 pés) ou 6,4 metros (21 pés), dependendo da missão. O primeiro Dorado teve a sua primeira missão no final de 2001, em que tinha como objetivo medir o fluxo da água na bacia do Ártico através do Estreito de Fram.

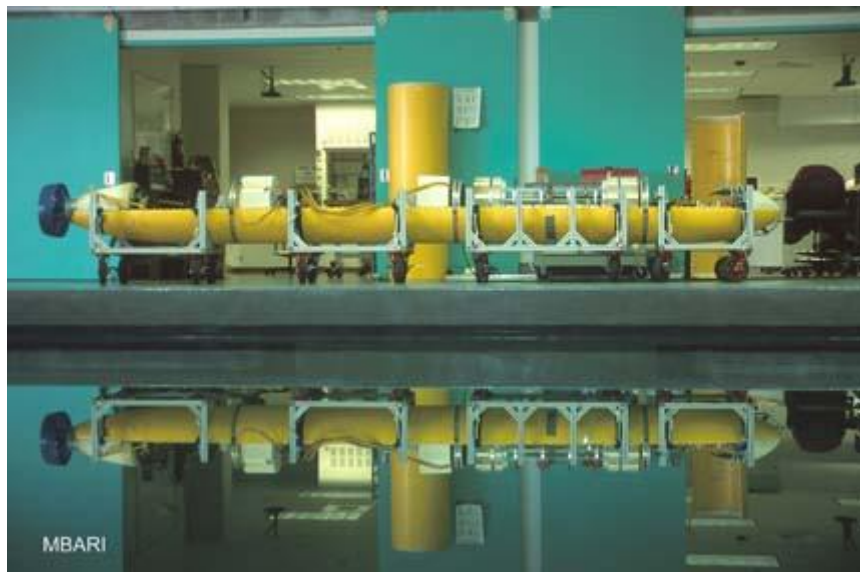


Figura 7 Mbari Dorado AUV

O AUV faz o mapeamento do fundo marinho, e realizou a sua primeira missão de mapeamento de profundidade em 2006. Os elementos principais do veículo a ter em atenção são, que o mapeamento deve ser realizado a 6.000 metros de profundidade e pode operar durante 20 horas.

3.2.2. MBARI TETHYS

O Tethys AUV [6][7], também chamado de AUV de longo alcance, é um novo AUV projetado para operar em intervalos mais longos do que seu primo maior. Tethys tem 30,5 cm (12 polegadas) de diâmetro, 230 cm (7,5 pés) de comprimento, e pesa 120 kg. O veículo pode suportar uma carga de 8 W, sensor para distâncias superiores a 1000 km a 1 m/s, opera a uma velocidade de 0,5 m/s com sensores o que permite os

intervalos mínimos de vários milhares de quilómetros. Possui também um sistema de variação de lastro que lhe permite variar a flutuabilidade em torno da flutuabilidade neutra.

O Tethys fornece capacidades compreendidas entre os veículos existentes de hélice, que normalmente têm durações da ordem do dia, e os veículos “gliders”, que podem operar por muitos meses.



Figura 8 MBARI Tethys AUV

Especificações do MBARI:

- Tamanho: 0,53 metros (1,7 pés) de diâmetro, 5,3 metros (17,3 pés) de comprimento, três secções modulares;
- Casco: ABS plástico (acusticamente transparente nas frequências relevantes e fornece resistência estrutural) espuma sintática entre caixas, fornece flutuabilidade;
- Peso: 680 kg no ar;
- Resistência: 17,5 horas;
- Velocidade: 1,5 metros por segundo e 5,4 km (3 nós) por hora;
- Avaliação profundidade: 6.000 metros. O AUV é moldada semelhante a um torpedo. A velocidade média do AUV é entrelaçado por três horas;
- Altitude: 50 a 100 metros acima do fundo do mar;
- Sistema de navegação inercial (INS) e Doppler Velocity Log (DVL);
- Intervalo: 55-85 km, dependendo da carga sonar;
- Diâmetro de viragem: menos de 20 metros;

- Taxa de subida / mergulho máxima: mais de 30 metros / minuto;
- Funcionamento: De MBARI R/V Rachel Carson e Flyer ocidental R/V.

3.2.3. REMUS

O REMUS [8] é uma unidade de medição ambiental remota, é um veículo submarino compacto e autónomo. Foi projetado para operações em ambientes costeiros até 100 metros de profundidade pelo WHOI (“Woods Hole Oceanographic Institute”) e é actualmente comercializado pela Hydroid.



Figura 9 AUV REMUS

O AUV REMUS pode ser configurado para incluir uma ampla variedade de padrão e/ou sensores especificados, e as opções do sistema para atender às suas necessidades de missão autónomas únicas.

Ao longo dos últimos anos, o REMUS AUV rapidamente tornou-se a pedra angular do mercado AUV costeiro, com milhares de missões e dezenas de milhares de horas de missão para o seu crédito. Nenhum outro sistema de AUV pode chegar perto de rivalizar com o histórico comprovado do REMUS para a qualidade do sistema e confiabilidade.

Os recursos do REMUS tornam-o idealmente adequado para a investigação marinha, defesa, hidrografia e offshore/mercados de energia. O veículo é pequeno o suficiente para ser carregado por duas pessoas, no entanto, contém sensores bastante sofisticados, navegação e recursos de poder que lhe permite realizar sonar intrincada e levantamentos oceanográficos em grandes áreas.



Figura 10 Arquitetura do REMUS

Recursos do REMUS:

- O tamanho compacto e peso - O tamanho compacto do REMUS permite o transporte económico. O REMUS também elimina a necessidade de vasos de maiores dimensões e caros equipamentos de manuseamento especial;
- A confiabilidade comprovada - O REMUS é o único AUV compacto, e o seu sistema possui mais de dez anos de desenvolvimento contínuo de produtos e milhares de horas de operações em campo;
- A facilidade de operação - um programa de interface intuitiva permite que qualquer pessoa se torne um operador de AUV com apenas alguns dias de treinamento;
- Poderoso e versátil - O REMUS contém um conjunto completo de sensores padrão, com novos sensores sendo integrados numa base contínua.

Aplicações típicas do REMUS:

- Levantamentos hidrográficos;
- Operações de segurança de portos;
- Monitorização ambiental;
- Mapeamento de fundos e arqueologia submarina;
- Operações de busca e salvamento;
- Operações de pesca;
- Amostragem científica e mapeamento.

Características REMUS	
Comprimento	158 cm
Diâmetro	19 cm
Peso seco	36 kg
Limite de Profundidade de Trânsito	100 m
Velocidade	0,25 m/s - 2,8 m/s
Corrente Marinha Máxima	1,0 m/s
Resistência	20 horas (1,5 m/s)

Tabela 1 Caraterísticas do REMUS

Especificações do REMUS:

- Faixa de velocidade: até 2,1 m / s (4 nós) variável ao longo do intervalo. Depende da configuração do sensor;
- Controlo: 3 aletas de controle independentes que prestam yaw, pitch e controle de rolo. Altitude, profundidade, yo-yo, e a faixa-line seguinte fornecido. Opcionais para a frente barbatanas disponíveis para o controle lateral e altura;
- External hook-up: Dois conectores, um para poder costa, e outro para dados em terra. Alternativamente, a rede wireless 802.11G fornecido via antena barbatana dorsal;
- Circuitos de acidentes: deteção de vazamentos e baixa tensão, todos os sensores e sistemas operacionais têm indicadores de falha;
- Navegação: Navegador Inercial / DVL, Long linha acústica base, WAAS GPS, P-Code GPS;
- Acompanhamento: transponder Acústico, modem acústico, modem Iridium. Equipamento fornecido com o sistema a bordo;
- Comunicação: modem acústico, Iridium, Wi-2.4 GHz, 100 base-T Ethernet;
- Sensores padrão: ADCP / Doppler Velocity Log, unidade de navegação inercial, sonar de varrimento lateral, Iridium, GPS, pressão, condutividade e temperatura;
- Sensores opcionais de carga: Usuário especificado, mas os exemplos incluem Dupla Frequência 300/900 kHz Sonar de varrimento lateral (SSS), câmera de vídeo, a Electronic Still Camera, fluorímetros, sonar multi-feixe, etc.

3.2.4. HUGIN 3000

O Hugin AUV [9] foi elaborado principalmente para o levantamento detalhado dos fundos marinhos. Os veículos Hugin I e II têm sido usados numa ampla gama de operações de levantamentos do fundo do mar até 1200 m, tanto para testes como para trabalho comercial.

O HUGIN 3000 é uma evolução em direção a águas mais profundas, tem carga alargada, e é melhor na navegação e autonomia. O primeiro HUGIN 3000 foi vendido à C & C Technologies Inc,. Atualmente, o veículo realizou extensos testes de mar para aceitação de clientes no Golfo do México. O Hugin 3000 já é comercializado pela Kongsberg Simrad atualmente, é um produto comercial e já foram vendidas unidades a diferentes empresas de levantamento batimétrico e instituições de investigação.



Figura 11 Ilustração AUV Hugin 3000

Hugin 3000 é um AUV offshore com 1 metro de diâmetro e vai até 3000 metros de profundidade. As principais empresas de pesquisa usam o Hugin 3000 para o mapeamento detalhado dos fundos marinhos para empresas de petróleo e gás.

O veículo é alimentado por uma bateria de célula de combustível com um fornecimento de mais de 60 horas de resistência às quatro nós de velocidade, sondador multifeixe com eco, sonar de varrimento lateral, perfilador de sub-fundo.

A sua longa resistência permite uma maior eficiência operacional, bem como a redução no número de recuperações e, assim, reduzir o risco operacional.

Caraterísticas importantes do Hugin 3000 incluem a precisão de navegação incomparável, flexibilidade em sensores de carga e um lançamento robusto e confiável, um sistema de recuperação para usar-se para o mar.



Figura 12 Hugin 3000

Especificações do Hugin 3000:

- Peso: 1400 kg;
- Comprimento: 5,5 m;
- Diâmetro: 1,00 m;
- Velocidade: 1-2 m/s;
- Profundidade: 3000 m;

- Bateria: Al / HP semi células de combustível, células de combustível semi Al / HP, 45 kWh;
- Resistência: 60hrs a 2m/s;
- Sistema e os sensores de navegação (principais opções): NaVP AINS, IMU, DVL, Depth, USBL, NaVP TP, GPS, TerrNav;
- Comunicação (principais opções): comando e ligações de dados acústicos, RF, irídio, Ethernet, WLAN;
- Cargas (principais opções): MBE, SSS, PAS, CTD ADCP, Camera;
- Principais Aplicações: Offshore, pesquisa.

3.2.5. SEAGLIDER

O Seaglider é um veículo submarino autónomo (AUV), com um peso de 52 kg e um comprimento de 1,8 metros, este peso e tamanho permitem um lançamento e uma recuperação fácil do veículo por duas pessoas.



Figura 13 Seaglider

Foi projetado para operar em profundidades de até 1000 metros, o casco comprime quando ele afunda, combinando com a compressibilidade da água do mar. O Seaglider plana através da água com necessidades de energia extremamente modestas, usando variações de impulsão movimentando-se de forma hidrodinâmica. Realiza medições oceanográficas em conjunto com navios de pesquisa ou instrumentos amarrados.



Figura 14 Estrutura do Seaglider

O seu casco cilíndrico consiste numa série de painéis de alumínio arqueado separado por quatro anéis. O casco está rodeado por uma carenagem de fibra de vidro para dar-lhe uma forma de baixo arrasto.

Depois de realizar cada mergulho, o Seaglider mergulha o nariz para levantar uma antena para fora da água, para esta determinar a sua posição através do GPS.

3.2.6. SPRAY

O Spray [12] tem um comprimento de 2 metros e pesa 52 kg. Ele comunica-se da costa usando o Iridium e navega com GPS. O Spray altera o seu centro de massa através do movimento das baterias pesadas no interior.

Num uso normal, o Spray consegue ir até 1000 metros de profundidade, viajando 6 km na horizontal em 6 horas. A sua velocidade na horizontal é de cerca de 0,25 m/s e a sua velocidade na vertical é de cerca de 0,1 m/s.



Figura 15 Spray

No seu interior é composto por sensores para medir um número de variáveis, incluindo a temperatura, a pressão, a salinidade, a velocidade e as propriedades ópticas. Muda o seu deslocamento utilizando uma bomba hidráulica, o que lhe permite deslizar para cima e para baixo ao longo de uma trajetória de descida e subida de ângulos que podem ultrapassar 20 graus. Tem a antena de GPS e Iridium nas asas, para quando o Spray estiver na superfície a 90° comunicar. Durante a comunicação, ele envia os dados para a praia e os pesquisadores na praia podem alterar os parâmetros da missão, como a profundidade do mergulho e *waypoints*.

3.2.7. SLOCUM

O Slocum [13] é um AUV tipo *Glider* acionado por um sistema de flutuação variável, ao invés de uma hélice tradicional, onde este planador se move horizontalmente e verticalmente.



Figura 16 Slocum

As suas capacidades de longo alcance e duração, torna-o ideal para a extensa colheita de dados sobre uma grande área. Carrega uma grande variedade de sensores, que podem ser programados para patrulhar durante semanas à tona e transmitir os seus dados para a costa.



Figura 17 Slocum em missão

O planador Slocum desliza lentamente pelo oceano através do controlo da flutuabilidade e das asas para mergulhar e subir ao longo do caminho. Transmite todos os dados colectados, e recebe comandos através de telemetria de dados de satélite, expondo sua antena acima da superfície do mar por alguns minutos entre os ciclos de mergulho.

Opera com pilhas alcalinas de células C, onde a duração da missão típica é de cerca de 30 dias e ele é projetado para operar em águas até 200m. Cada missão tem um custo reduzido, pois o Slocum pode ser lançado e recuperado manualmente a partir de barcos pequenos e com uma tripulação de duas pessoas, evitando a dependência de navios.

O Slocum vem com um sensor de condutividade e de temperatura, bem como um sensor de pressão e transdutor de altímetro, formando o pacote básico para medir as propriedades da água do mar e da estratificação, além disso, tem um sensor de oxigênio. O planador tem 1,8 metros de comprimento e viaja a uma velocidade típica de 0,25-0,40 m/s.

3.3. SISTEMA DE VARIAÇÃO DE LASTRO (VBS)

O modelo VBS-5000-120 é um exemplo de sistema de variação de lastro e está classificado para operar até 5.000 metros de água do mar tendo uma capacidade de lastro variável de 120 litros. O VBS é usado para ajustar a flutuabilidade de ROV's e veículos híbridos, que devem ser de flutuação neutra para algumas operações e, em seguida, tornar-se pesado para as operações no fundo do mar.



Figura 18 Sistema de variação de lastro

O sistema VBS é composto por dois grandes tanques de lastro de titânio Ti-6Al-4V, equipados com sensores de nível e de pressão interna que fornecem feedback ao operador por meio de sistema de telemetria do ROV. As sondas estão ligadas a uma bomba de água de alta pressão de aço inoxidável.

A variabilidade é obtida por inundação ou deslastro duro (isto é, resistente à pressão), inundando uma câmara de flutuação a partir de um veículo submerso, sendo uma técnica simples e eficaz. Deslastro a câmara de disco pode ser feito forçando a água com o ar, quando as válvulas estão abertas ou por bombeamento.

O sistema VBS inclui uma entrada de água de acionamento elétrico, uma descarga de água e um sistema de válvula solenoide de drenagem/enchimento de vaso de pressão. O VBS também vem de fábrica com várias válvulas de retenção colocadas para garantir uma operação adequada do sistema. Válvulas de esfera de aço inoxidável são usadas para encher e drenar as caixas, isolar os componentes e permitir diferentes configurações operacionais. Para aumentar o ciclo de vida dos sistemas, um filtro de entrada de água é incluído para minimizar a intrusão de partículas no sistema VBS. Esta bomba de água de alta pressão é operada hidráulicamente e controlada por pacote válvula servo do ROV que por sua vez fornece energia hidráulica a partir do *host* ROV.

3.4. MATERIAIS

3.4.1. SUBSEA HOUSINGS

Em geral para os veículos submarinos existem vasos resistentes à pressão, nestes usualmente estão alocados os componentes eletrônicos e todo o equipamento que opera à pressão atmosférica. Por uma questão de construção estes são em geral cilíndricos e, dependendo da profundidade, podem ser em plástico (baixas profundidades), alumínio, aço ou titânio.

“Shallow Water Modular Composite Housing” (SW.MCH) são um tipo de tubos feitos especificamente para operar em profundidade. Estas caixas são avaliadas e testadas para uma profundidade operacional de 6.000m.



Figura 19 Exemplo de Tubos para Profundidade em Titânio

Os diâmetros internos *standard* são de 110 milímetros e 180 milímetros. Comprimento interno padrão é 480 milímetros. O invólucro exterior de alojamento é fabricado a partir de uma fibra sintética reforçada, especialmente formulado com maior resistência à corrosão de longa duração.

As placas da tampa da caixa são fabricadas a partir de titânio que oferece a máxima rigidez para conectores ou outras instalações.

Os O-rings principais são combinados com anéis de apoio côncavo para proporcionar o máximo de durabilidade e confiabilidade, permitindo confortavelmente abrir e fechar a habitação sem quaisquer ferramentas.

Caraterísticas:

- Avaliado e testado para: 750 m / 6000 m;
- Shell exterior: Fibra reforçada POM / titânio;
- Shell interna: alta resistência de alumínio aeroespacial;
- Diâmetro externo: 153 milímetros;
- Comprimento exterior: 630 milímetros;
- Peso no ar: 11,4 kg / 15,2 kg.

Um outro tipo construtor de cilindros subaquáticos é a Prevco [14], um exemplo de um modelo muito popular é o A811 feito de revestimento duro de alumínio anodizado e com um diâmetro de 20 centímetros, e podem ser feitos a quase qualquer exigência de comprimento.

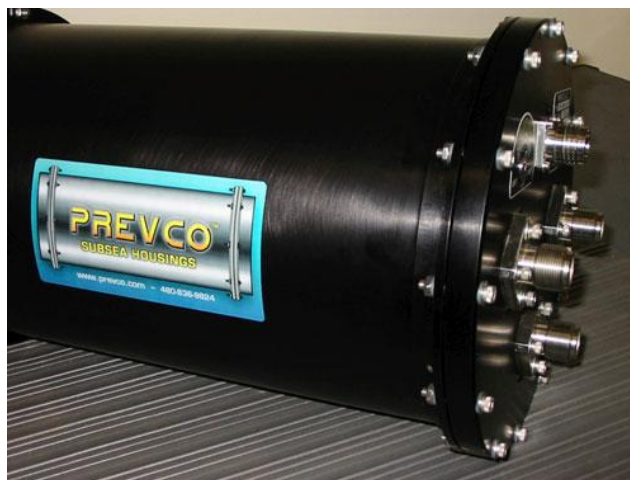


Figura 20 Tubo de alumínio *Prevco*

Existem algumas dimensões de comprimento *standard* tal como 12, 18 e 24 polegadas. O A811 está classificado para 1.100 metros de profundidade operacional e os *endcaps* podem ser modificados para atender às necessidades de conectores e montagem de interfaces.

Outro tipo de housings são as esferas de vidro (mais incomuns), muito usadas para isolar componentes eletrônicos em altas profundidades. Exemplo dessas esferas são as *VacuSealed* fabricadas pela *Teledyne Benthos*, fabricante líder mundial de esferas de vidro para profundidades elevadas.

Essas esferas são um método único, fiável e de baixo custo para usar como caixa de instrumentos eletrônicos num ambiente marinho, usando técnicas avançadas de montagem e selado a vácuo.

VacuSealed são esferas de vidro fabricados a partir de esferas moldadas com precisão para especificações exatas. A borda de cada hemisfério é um terreno plano com tolerâncias extremas. Os hemisférios são acasalados, e em seguida evacuados para uma pressão de ar interna absoluta de menos do que 0,3 atmosferas.



Figura 21 Imagem de uma esfera de vidro selada a vácuo

Após a evacuação, um selante e fita de proteção são aplicados em torno do equador. As esferas seladas neste método são quase impossíveis de abrir devido à força exercida sobre eles pela pressão atmosférica. No caso dos 43,2 centímetros (17 pol) de diâmetro do flutuador, esta força está em excesso de 880 kg.

Existe ainda a possibilidade de um orifício de vácuo de titânio (Modelo 204-VPT) poder ser instalado numa caixa do aparelho de vidro para facilitar a abertura e fecho da esfera. A opção de entrada de vácuo é recomendado para qualquer caixa que seja aberta com frequência.

Um outro fabricante do mesmo tipo de esferas de vidro seladas a vacuo é a VITROVEX [15], estas são feitas de vidro borossilicato. Este tipo de vidro foi desenvolvido pela primeira vez pelo vidreiro alemão Otto Schott no final do século XIX. Desde o início de 1990 Nautilus Marinha Service GmbH tem vindo a produzir com sucesso esferas de flutuação e carcaças de instrumentos para a investigação profunda do oceano.



Figura 22 Esfera de instrumentação num AUV

Vantagens da esfera de vidro VITROVEX e caixas de instrumentos:

- Baixo custo em relação às alternativas;
- Resistente à corrosão;
- Transparente, não magnético e não condutor elétrico;
- As esferas podem ser feitas com uma variedade de furos de elevada precisão para acomodar conectores, orifícios de passagem, e um orifício de vácuo para ligação à electrónica e às baterias;
- Comunicações rádio trabalham correctamente instalado internamente. GPS, transceptores ARGOS, ou Iridium, bem como links de rádio VHF penetram o vidro, sem problema.
- Facilidade de instalação de câmeras digitais de alta resolução a filmar para o exterior.

4. CONTROLO DA DESCIDA

4.1. MODELO DO VEÍCULO

Considerando o movimento vertical do veículo (ver figura 23) o modelo da dinâmica do mesmo é dado pela Lei de Newton. Este encontra-se sujeito a 3 forças, o efeito da gravidade (peso), a impulsão (força de origem hidrostática) e as forças de origem hidrodinâmica.

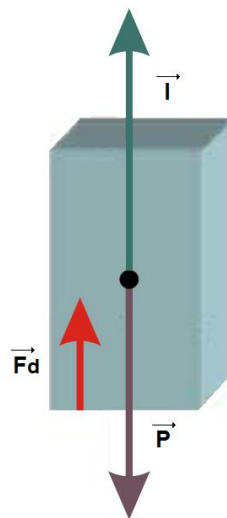


Figura 23 Representação das Forças no Sistema

Estas são constituídas pela força de arrasto e a massa acrescentada. Considerando que a massa acrescentada (massa de água que é arrastada no movimento do veículo) pode ser desprezada face ao peso do mesmo, temos então que as forças em consideração são o peso (P), impulsão (I) e de arrasto (F_d).

O peso de um objecto, é a força gravitacional exercida por um objeto devido à atração gravitacional nele exercida por um outro corpo massivo. No nosso caso, a Terra exerce uma aceleração gravitacional de aproximadamente $9,82 \text{ m/s}^2$ em todos os objetos.

$$\vec{P} = m \cdot g \quad [16]$$

Segundo o princípio de Arquimedes, todo o corpo imerso, total ou parcialmente, num fluido em equilíbrio, dentro de um campo gravitacional, fica sob a ação de uma força vertical, com sentido ascendente, aplicada pelo fluido; esta força é denominada impulso (I), cuja intensidade é igual à do peso do fluido deslocado pelo corpo.

$$\vec{I} = V \cdot \rho_{\text{fluido}} \quad [16]$$

Na dinâmica dos fluidos, arrasto é a força que faz resistência ao movimento de um objeto sólido através de um fluido (um líquido ou gás). Ao contrário de outras forças resistivas, como o atrito, que é quase independente da velocidade, as forças de arrasto dependem maioritariamente da velocidade.

Denomina-se resistência, ao componente da força que sofre um corpo ao mover-se através de um líquido na direção da velocidade relativa entre o líquido e o corpo. A resistência é sempre no sentido oposto à velocidade, pelo que habitualmente se diz que é a força que se opõe ao avanço de um corpo através de um líquido.

De maneira mais geral, para um corpo em movimento no seio de um fluido qualquer, tal componente recebe o nome de resistência fluidodinâmica. No caso da água, por exemplo, se denomina resistência hidrodinâmica.

Assim como, que com outras forças aerodinâmicas utilizam-se coeficientes aerodinâmicos que representam a efetividade da forma de um corpo, para o deslocamento através do ar. Seu coeficiente associado é conhecido popularmente como

coeficiente de penetração, coeficiente de resistência ou coeficiente aerodinâmico, sendo esta última denominação especialmente incorreta já que existem várias forças aerodinâmicas, com seus respectivos coeficientes aerodinâmicos, e cada um deles tem um significado diferente.

A fórmula da resistência criada pelo sistema na água:

$$F_d = qSC_D = \frac{1}{2}\rho V^2 SC_D \quad [16]$$

Onde:

$F_d \rightarrow$ Resistência, ou Força *Drag*

$\rho \rightarrow$ Densidade do fluido

$V \rightarrow$ Velocidade

$S \rightarrow$ Superfície em projeção

$C_D \rightarrow$ Coeficiente aerodinâmico de resistência

$q = \frac{1}{2}\rho V^2 \rightarrow$ Este termo denomina-se por Pressão Dinâmica

Portanto, a fórmula do coeficiente aerodinâmico de resistência é:

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2}\rho V^2 S} \quad [16]$$

Assim, a resistência aerodinâmica total é a soma da resistência parasita e a induzida, pelo que:

$$C_D = C_{D \text{ parasitas}} + C_{D \text{ induzida}} \quad [16]$$

Coeficientes de arrasto típicos destas e de outras formas básicas são comparados na tabela seguinte:



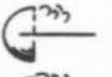

















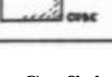
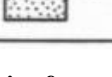
	SHAPE	C_D		SHAPE	C_D
1)		0.47	12)		1.17
2)		0.38	13)		1.20
3)		0.42	14)		1.16
4)		0.59	15)		1.60
5)		0.80	16)		1.55
6)		0.50	17)		1.55
7)		1.17	18)		1.98
8)		1.17	19)		2.00
9)		1.42	20)		2.30
10)		1.38	21)		2.20
11)		1.05	22)		2.05

Tabela 2 Coeficientes de arrasto se várias formas 3D e 2D [16]

A tabela da esquerda compara formas tridimensionais como discos, cones e esferas enquanto a tabela da direita é para formas bidimensionais, como placas, cunhas, e cilindros.

Sendo o nosso sistema um objeto tridimensional cilíndrico corresponde à forma #7 com coeficiente de arrasto de 1,17. Sabendo que a nossa área de atrito é a área da tampa do cilindro, podemos assim estimar o comportamento da força *drag* no nosso sistema.

$$F_d = \frac{1}{2} \rho V^2 S C_D = \frac{1}{2} \cdot 1000 \cdot V^2 \cdot 0,0314 \cdot 1,17$$

O gráfico seguinte mostra o comportamento da força *drag* no nosso veículo, variando a velocidade de 0 a 2 m/s. Verifica-se que a força rapidamente atinge valores que dificilmente o nosso veículo conseguirá vencer com a força do seu peso na água, ou seja, rapidamente iremos atingir a velocidade limite.

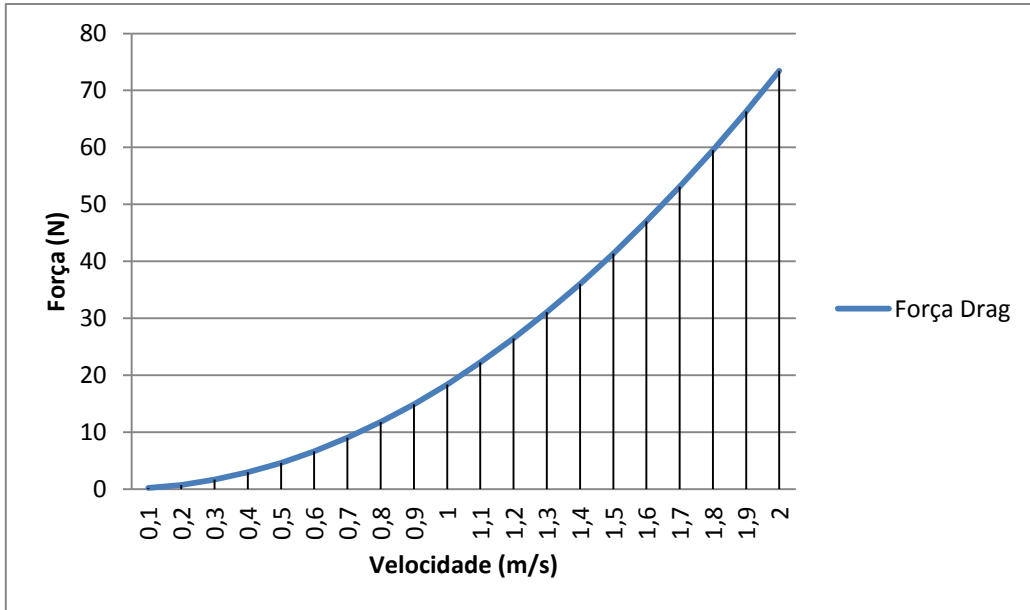


Figura 24 Força Drag do cilindro

Se por exemplo substituíssemos o tipo de tampa colocando uma tampa esférica em vidro, como seria desejado no futuro para poder filmar para o exterior, o coeficiente passaria a ser a forma #3 da tabela, com um coeficiente de 0,42. Assim sendo o comportamento da força drag seria significativamente melhor (figura 25).

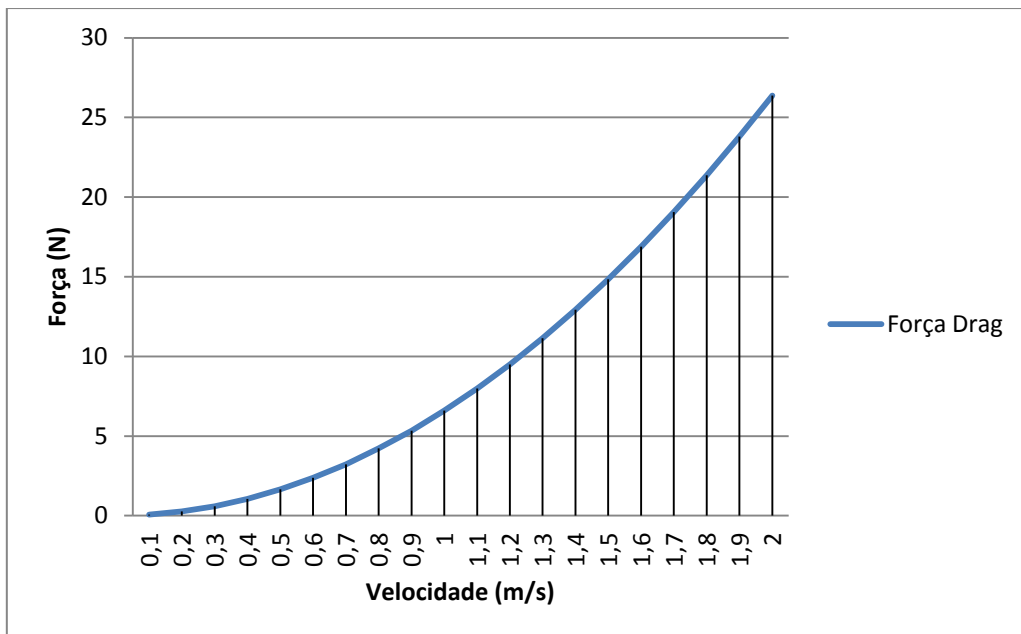


Figura 25 Força Drag com tampa esférica

Segundo o modelo matemático descrito anteriormente, um objeto em queda livre na água com uma força do peso superior à sua força de imersão vai aumentando a sua velocidade e conseqüentemente aumenta a força de atrito na água, descrita anteriormente como força *drag*. À medida que essa força aumenta, diminui a aceleração e a velocidade vai tender para um limite em que:

$$\vec{P} - \vec{I} = \vec{F}_d \quad [16]$$

Essa velocidade é denominada por velocidade limite ou terminal de um objeto em queda livre. Por exemplo se considerarmos os valores de coeficiente anteriormente referidos e aplicarmos um peso na água de 100 gramas ao veículo, este atingiria uma velocidade limite de:

$$\vec{P} - \vec{I} = \vec{F}_d \Leftrightarrow 0,98N = \frac{1}{2} \cdot 1000 \cdot V^2 \cdot 0,0314 \cdot 1,17 \Leftrightarrow V = 0,231 \text{ m/s}$$

Na demonstração de resultados simulados iremos representar o gráfico para estes parâmetros e confirmar o mesmo valor de velocidade limite do veículo.

4.2. MODELO DE SIMULAÇÃO EM MATLAB

Para auxiliar o estudo e a construção do veículo, houve a necessidade de calcular várias vezes o comportamento do sistema tendo em conta a modificação dos vários parâmetros que compunham o veículo, tais como, o seu peso, o seu volume, a sua capacidade de variação de lastro em volume externo, coeficiente de atrito que muda consoante a sua forma exterior e até a capacidade de bombeamento de óleo que depende diretamente da bomba e do poder de força motriz aplicada a ela.

De modo a simplificar e a clarificar esses cálculos decidiu-se criar um simulador que nos pudesse auxiliar e completar no estudo do sistema, e acompanhar em todas as modificações atuais e futuras.

Com base nessa necessidade desenvolvemos um simulador em Simulink (Matlab) que permite a configuração de todos esses parâmetros anteriormente referidos.

Considerando-os como entradas do sistema e retornando como saídas a distância, velocidade e aceleração em ordem ao tempo, como podemos ver na figura 26.

Este simulador permite ainda o controlo automático da variação de lastro para uma determinada profundidade de missão, que pode também ser configurada pelo utilizador.

Todos os valores de entradas estão configurados para valores com unidades SI. Existe ainda a possibilidade de desligar o controlo da variação de lastro, na entrada “Controlo On/Off” se pretendermos um ensaio em que o veículo não muda a sua fluutuabilidade. Essa opção pode servir por exemplo para cálculo de velocidade limite do sistema com uma determinada configuração de volume exterior do veículo, massa e coeficiente de atrito.

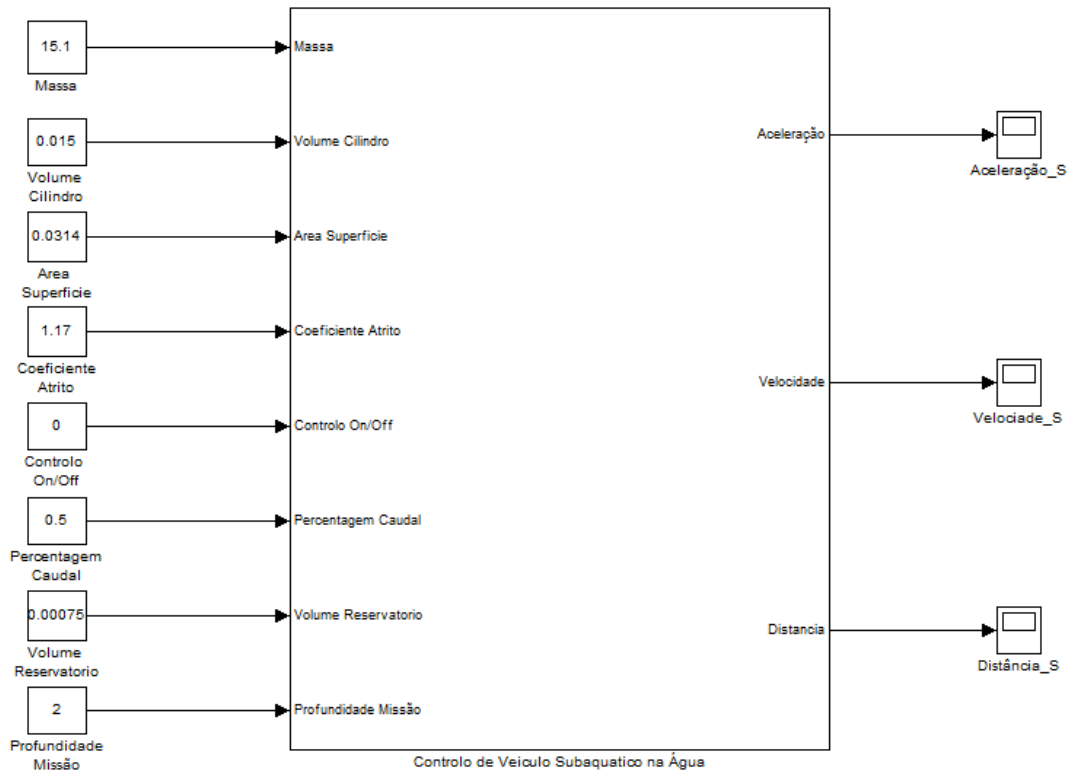


Figura 26 Simulador do controlo do veículo

Deste modo, o sistema internamente está dividido em duas partes principais, a primeira é designada por cilindro que tem apenas as entradas de massa volume exterior, área da superfície de atrito e coeficiente de atrito.

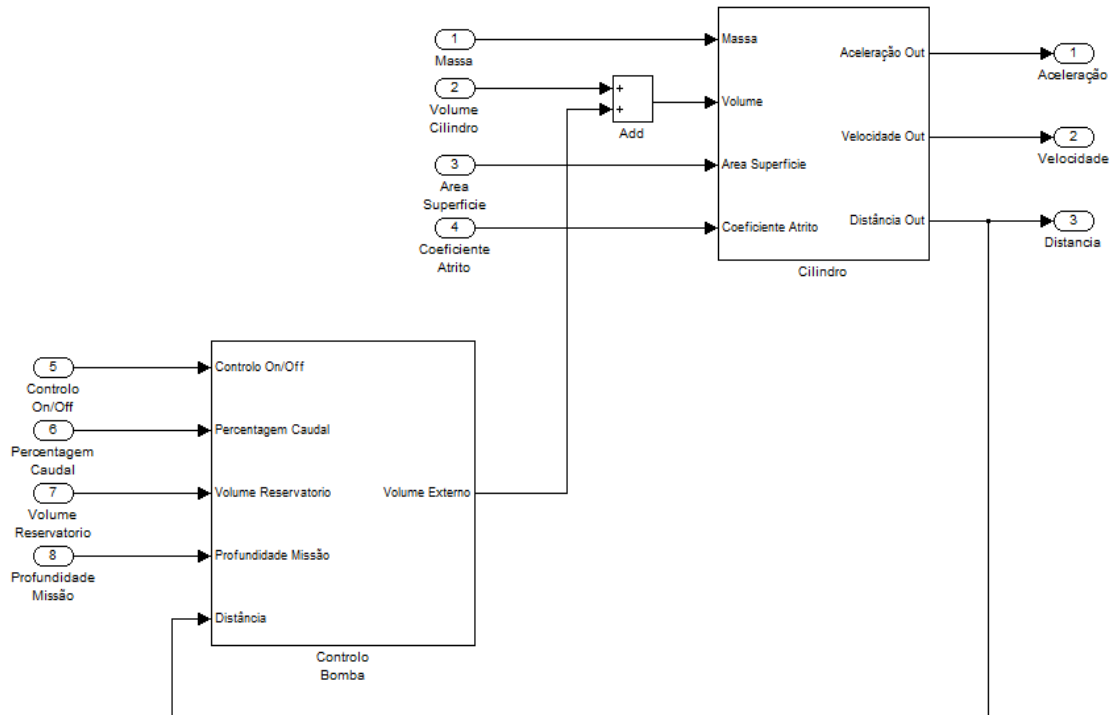


Figura 27 Simulador do controlo do veículo em detalhe

A segunda parte designa-se por Controlo da Bomba, e esta tem como entradas o ligar e desligar o controlo da variação de lastro, o tamanho máximo do reservatório externo, percentagem do caudal da bomba de óleo considerando que em 1 seria o caudal máximo admitido pela bomba na rotação máxima, e por fim a profundidade da missão que desejamos controlar o sistema, ver figura 27.

Em termos de configuração interna no bloco do cilindro temos o cálculo da força *drag* a ser subtraído à diferença entre a força do peso e a força de impulsão, disponibilizando nas saídas a aceleração, velocidade e distância, ver figura 28.

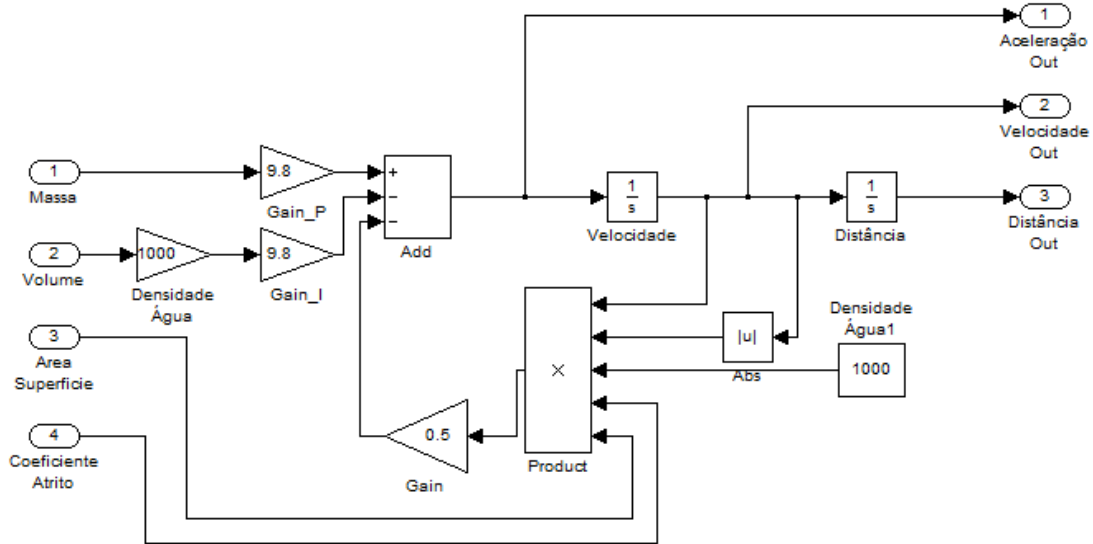


Figura 28 Diagrama de blocos do cilindro em Simulink

No bloco do controlo da bomba temos uma realimentação que compara a distância atual com a distância de missão (profundidade) e um controlador PID que reage a essa diferença, mas com limitações em termos de caudal e de limite máximo de volume externo.

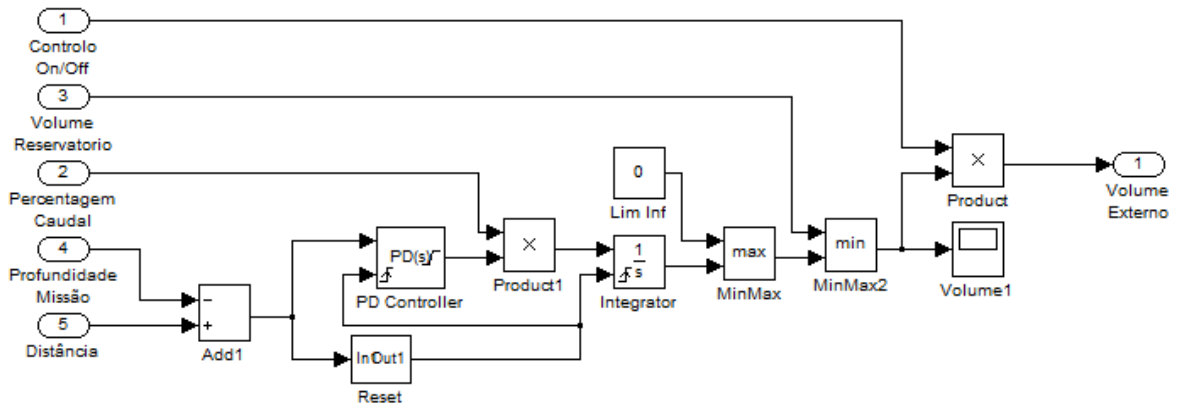


Figura 29 Diagrama de blocos do controlo da bomba em Simulink

É ainda aplicado no fim do cálculo atual do volume um On/Off a multiplicar o valor por 1 ou 0 consoante queremos que o volume influencie ou não o nosso sistema, ver figura 29.

5. PROJETO E IMPLEMENTAÇÃO

5.1. CONCEÇÃO MECÂNICA

No que diz respeito à conceção mecânica, as opções de projeto são definidas pelos requisitos identificados, nomeadamente a necessidade estanquicidade e resistência à pressão para a profundidade em questão e a disponibilidade de espaço para os componentes necessários, tais como, bombas, válvulas de alta pressão, o uso de um reservatório interno para armazenamento do óleo, baterias e um computador central.

Tendo em conta a elevada profundidade a operar, os requisitos em termos de espaço interior e tendo em conta que a robustez da estrutura teria de suportar a pressão da água exercida a essa profundidade, foram efetuados os cálculos de dimensionamento para 1000 metros de profundidade por forma a determinar:

- Espessura mínima do cilindro;
- Espessura mínima das tampas do cilindro;
- Relação do volume exterior e o peso da estrutura para calcular a flutuabilidade.

Estes cálculos foram efetuados para dois tipos de metais, alumínio e aço, em que uma comparação entre os mesmos é apresentada em seguida.

Comprimento Exterior	0,5 m
Comprimento Interior	0,45 m
Diâmetro Externo	0,2 m
Diâmetro Interno	0,18 m
Volume Externo	0,015708 m ³
Volume Interno	0,011451 m ³
Volume Alumínio	0,004257 m ³

Tabela 3 Cálculos físicos do cilindro em alumínio

Assim sendo temos uma espessura de 1 cm em toda lateral do cilindro e uma espessura de 2,5 cm nos topos. Com estas dimensões podemos calcular para cada material os seus limites de profundidade.

$$\frac{\text{Espessura}}{\text{Diâmetro Externo}} = \frac{0,01}{0,2} = 0,05$$

$$\frac{\text{Espessura Topo}}{\text{Diâmetro Interno}} = \frac{0,025}{0,18} = 0,1389$$

Através dos coeficientes calculados podemos verificar nos gráficos seguintes os pontos críticos de rutura do cilindro e dos seus topos.

Por exemplo neste caso, analisando os gráficos com o cilindro em alumínio, verificamos que o cilindro teria o ponto de rutura nos 1000 metros e os topos do cilindro indicam rutura a partir dos 1300 metros de profundidade.

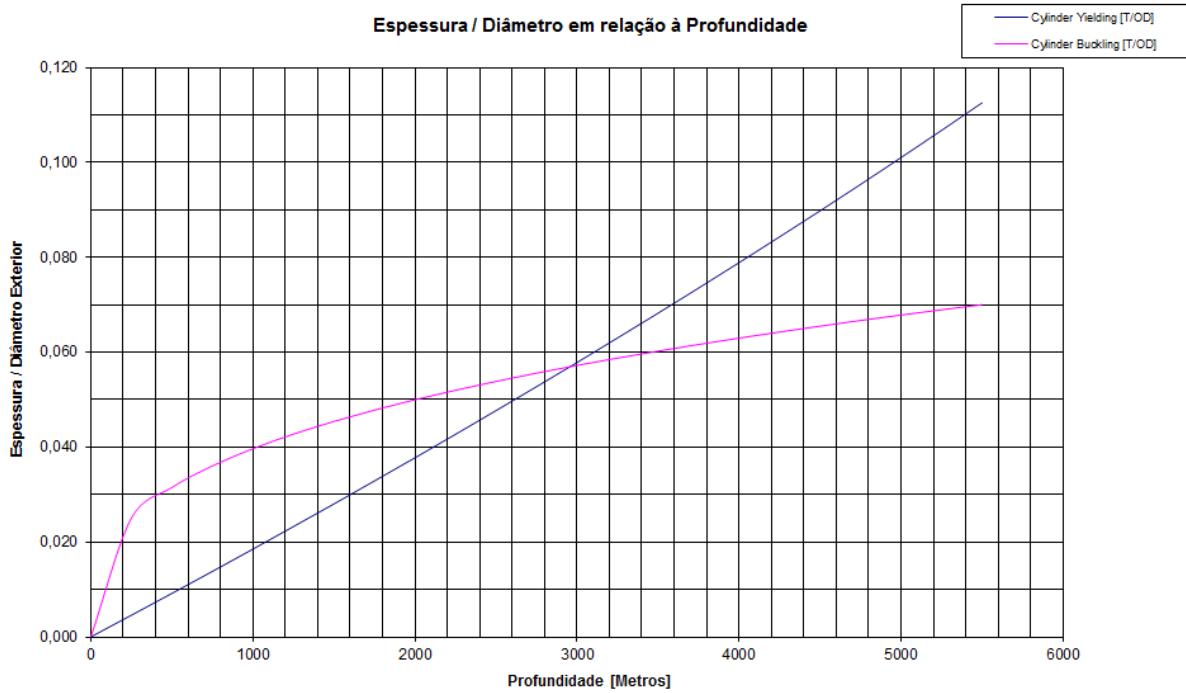


Figura 30 Gráfico espessura/diâmetro relativo à profundidade para alumínio [17]

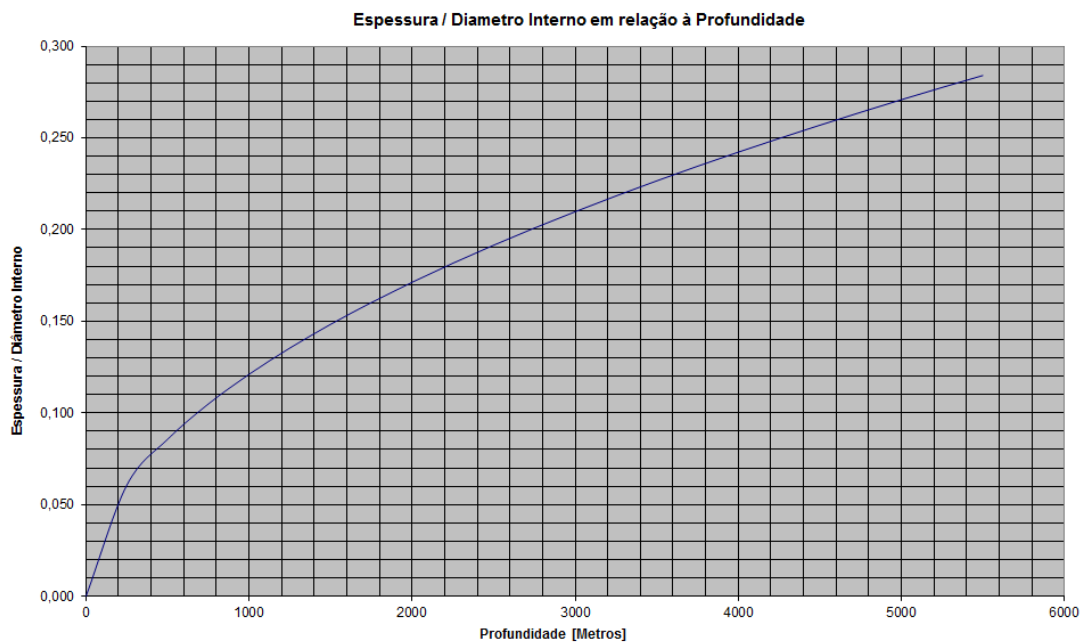


Figura 31 Gráfico espessura/diâmetro relativo à profundidade para tampa em alumínio [17]

Como mostra a figura 30 existem duas curvas que representam os dois tipos de colapso que um objeto cilíndrico pode sofrer em relação à pressão exterior. Uma dessas é chamada de *buckling*, ou seja, colapso estrutural por causa da forma, (o mesmo motivo que faz com que uma lata de coca-cola seja fácil de achatar na vertical mas o mesmo material e espessura numa esfera é muito mais difícil de comprimir (o *buckling*

acontece mais para estruturas compridas sujeitas a tração nesse eixo. E o *yieldin* que é basicamente a resistência limite do próprio material à pressão, acima dessa curva o próprio material com a espessura identificada rompe dando-se o colapso.

Por isso em geral, os vasos estanques colapsam a baixa profundidade (pouca pressão) por *buckling* (forma) e o material só cede (rompe) a pressões mais elevadas (sendo nesses os casos onde o *yielding* se torna preponderante).

Estes dois tipos de rutura seguem as seguintes expressões matemáticas:

$$TD_{yield} = \frac{1 - \sqrt{1 - \frac{2 \text{ press}}{Y}}}{2} \quad [18]$$

$$TD_{buckle} = \left(\frac{\text{press} (1 - \nu^2)}{2E} \right)^{\frac{1}{3}} \quad [18]$$

Em que $\text{press} = (1000 \cdot g \cdot \text{profundidade})$ e ν , Y e E correspondem ao "*Poisson's ratio*", "*Yield Stress*" e "*Young Modulus*".

Em seguida calculamos os pontos de rutura para o mesmo cilindro, mas agora usando um cilindro de aço e verificamos que o cilindro teria o ponto de rutura nos 2000 metros e os topos do cilindro indicam rutura a partir dos 1600 metros de profundidade.

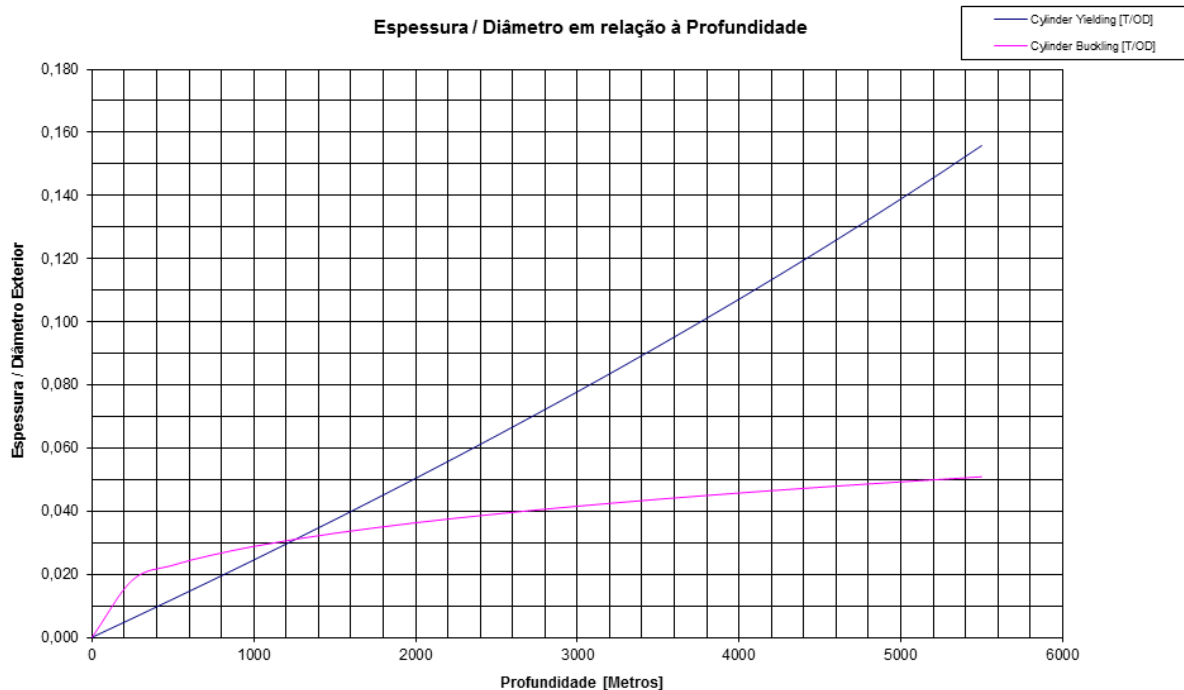


Figura 32 Gráfico espessura/diâmetro relativo à profundidade para aço [17]

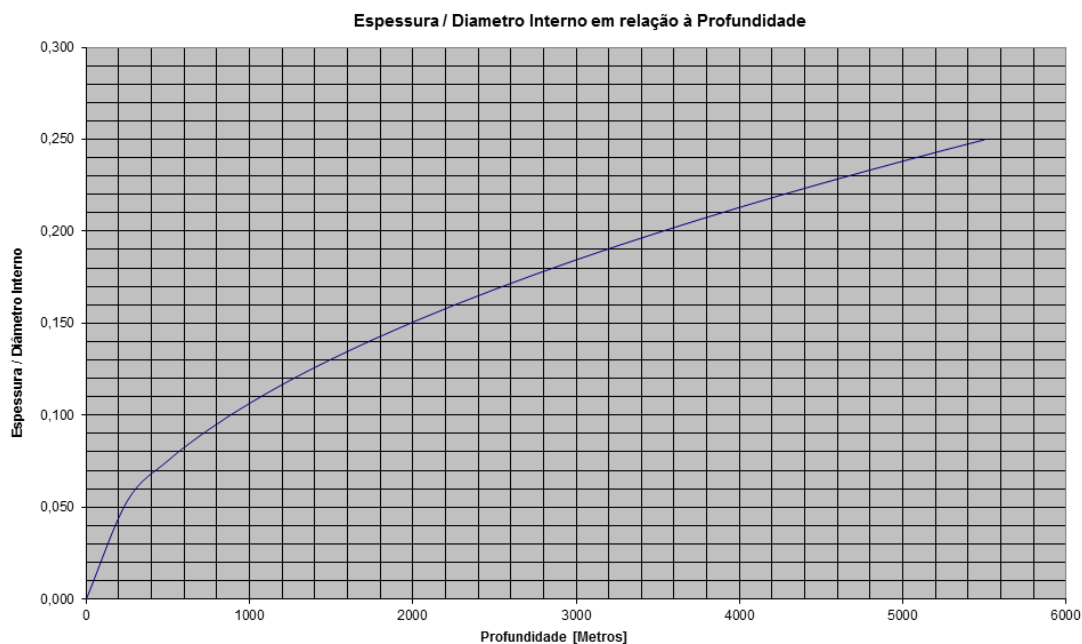


Figura 33 Gráfico espessura/diâmetro relativo à profundidade da tampa em aço [17]

Observa-se que para manter os parâmetros de ir até 1000 metros podemos retirar um pouco de espessura de parede do cilindro usando aço. Assim, reduzimos as espessuras até ficar com os parâmetros de rutura mais próximos do alumínio com as espessuras iniciais.

Comprimento Exterior	0,5 m
Comprimento Interior	0,455 m
Diâmetro Externo	0,2 m
Diâmetro Interno	0,187 m
Volume Externo	0,015707 m ³
Volume Interno	0,012493 m ³
Volume Alumínio	0,003215 m ³

Tabela 4 Cálculos físicos do cilindro em aço

Cálculo para as novas espessuras para o cilindro de aço:

$$\frac{\text{Espessura}}{\text{Diâmetro Externo}} = \frac{0,0065}{0,2} = 0,0325$$

$$\frac{\text{Espessura Topo}}{\text{Diâmetro Interno}} = \frac{0,0225}{0,18} = 0,120$$

Concluimos que o cilindro teria o ponto de rutura nos 1100 metros e os topos do cilindro indicam rutura a partir dos 1200 metros de profundidade.

Ou seja, conseguimos reduzir a espessura mantendo a mesma dureza do cilindro, mas agora teremos de analisar qual o mais pesado, pois interessa-nos a menor massa com a mesma capacidade de rigidez.

$$m = V \cdot \rho$$

Alumínio:

$$m = 0,004256858 * 2735 = 11,64 \text{ Kg}$$

Aço:

$$m = 0,003211576 * 7860 = 25,24 \text{ Kg}$$

Contata-se então que para a mesma resistência e com o mesmo tamanho exterior em alumínio e em aço, têm massas diferentes devido à grande diferença de densidades, assim sendo optamos pelo alumínio na construção do veículo. Uma outra vantagem de alumínio reside no seu baixo custo em relação ao aço e é um material com maior facilidade de maquinação.

Antes de iniciar o processo de construção do veículo, este foi projetado através de um programa de desenho (Solidworks) e o aspeto final seria algo como o que vemos na figura seguinte. Este projeto permitiu ajudar a entender como ligam as diferentes peças do veículo e também retirar as medidas de cada peça em 2D para ser mais fácil de construir.

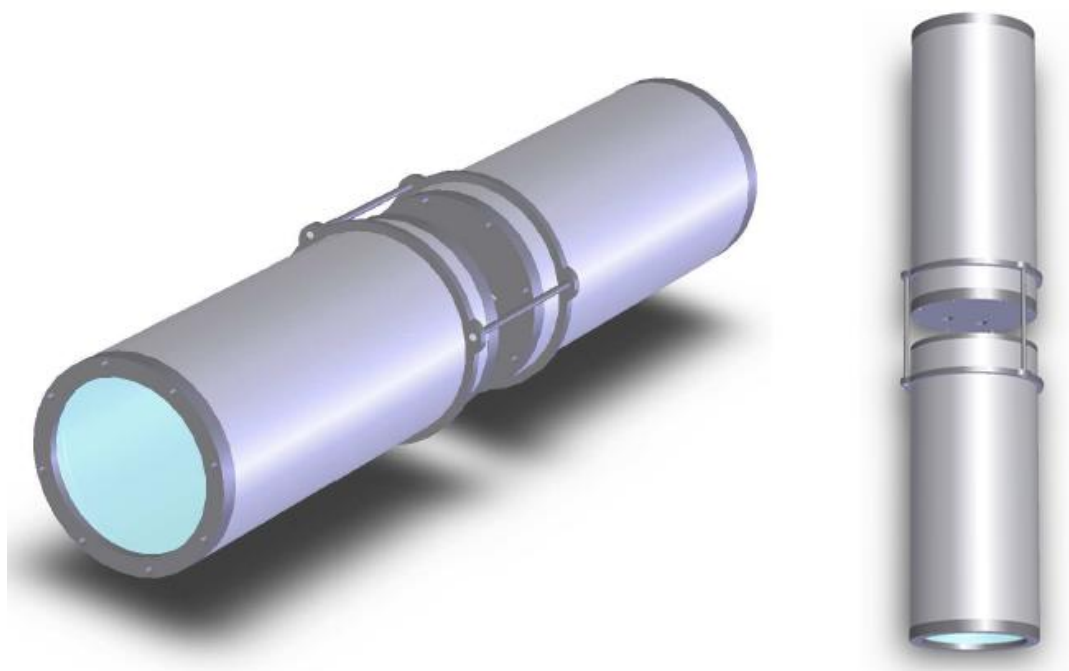


Figura 34 Representação mecânica do veículo em SolidWorks

Nesta fase foi construído apenas um dos cilindros de modo a podermos estudar o tipo de tampas para vedação e para que pudéssemos ensaiar o sistema hidráulico.

No futuro, a ideia seria criar o outro cilindro e dividir os mecanismos por cada um, separando a parte computacional e sensorização de alto nível da parte hidráulica, com o motor, a bomba, válvulas e *encoder* que permitem a variação de lastro.

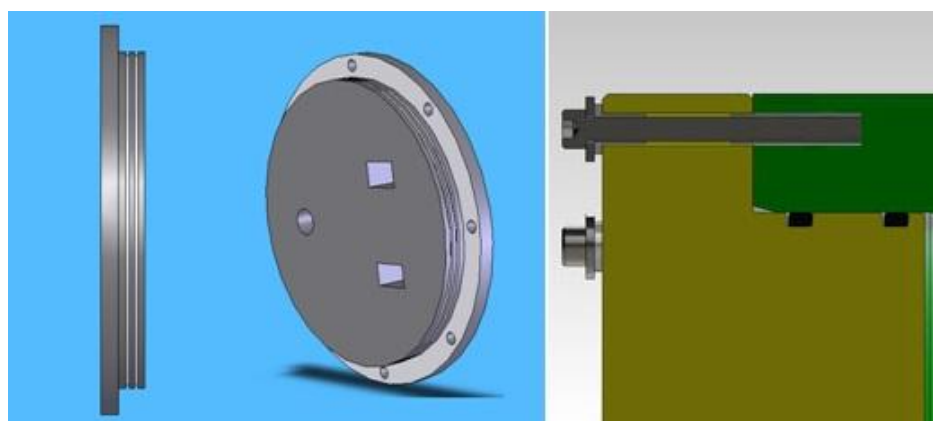


Figura 35 Imagem de uma das tampas do cilindro em SolidWorks

O tipo de vedação e tampas do cilindro é sem dúvida um ponto-chave do trabalho, uma vez que sendo este destinado a elevadas profundidades é necessário uma

boa vedação. Através de estudos verificou-se os tipos de vedação mais utilizados neste contexto e optou-se por construir tampas lisas, com furação de topo e com duplo *oring* de vedação como mostra a figura 35.

5.1.1. ARQUITETURA DE *HARDWARE*

O *hardware* do veículo está dividido em duas partes, o sistema de navegação/comunicação e o sistema de variação de lastro, que tal como foi referido anteriormente seriam divididos em cilindros diferentes e comunicariam entre eles.

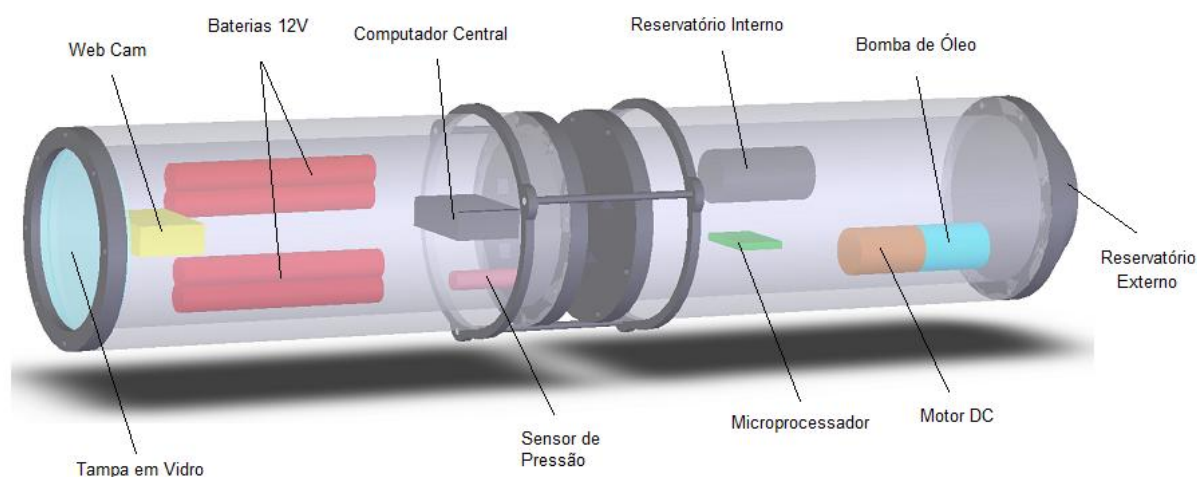


Figura 36 Distribuição do *Hardware* no veículo

Dentro do sistema de navegação existe computador central que usa o barramento RS485 para recolher os dados do sensor de pressão e acionar os motores externos. Este interage ainda com o módulo de variação de lastro controlado por um microprocessador STM32, esta comunicação é feita através de RS232. No sistema de navegação existe ainda a possibilidade de aquisição de dados GPS que permite a sua localização quando este se encontra à superfície, figura 37.

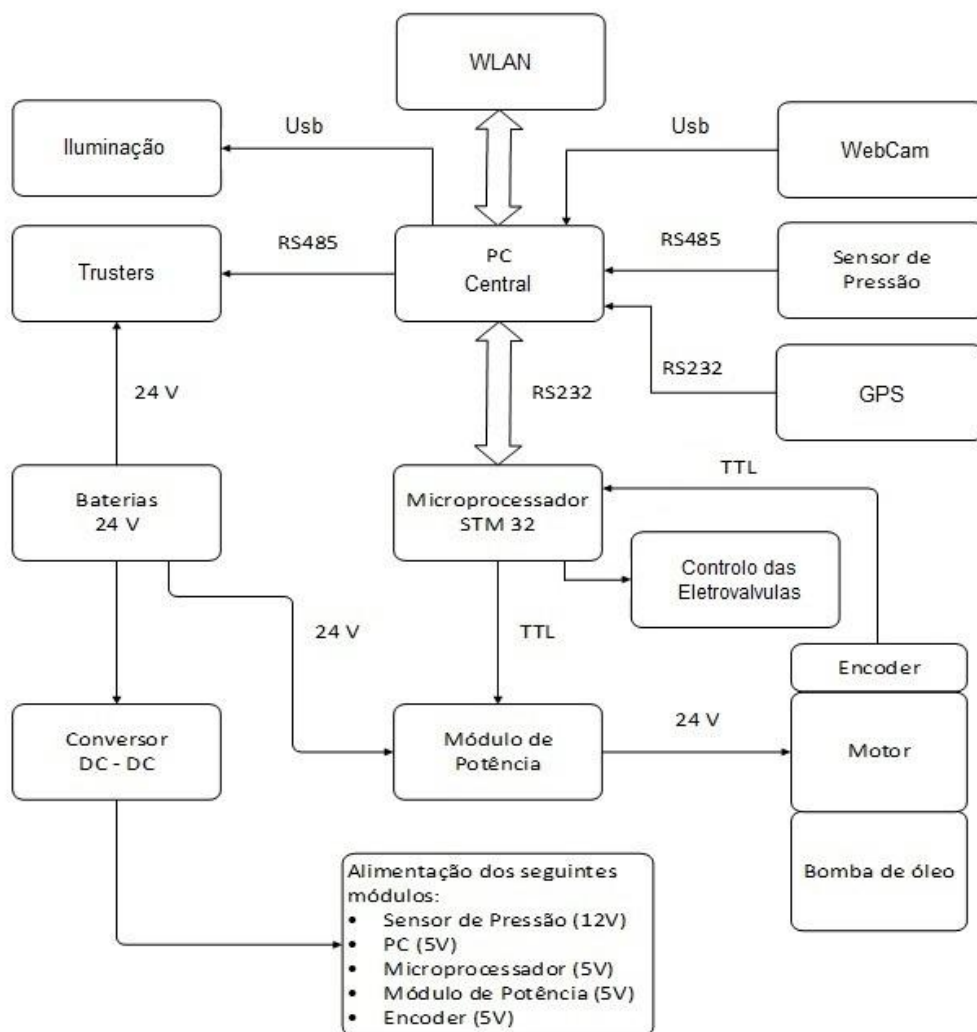


Figura 37 Diagrama de blocos do *Hardware* do sistema

Relacionado com a aquisição de dados temos ainda uma *webcam* que permite a filmagem de zonas importantes da missão, com auxílio da iluminação externa.

O *hardware* que compõe a variação de lastro é um microprocessador STM32 que aciona o motor da bomba de óleo e recebe os impulsos do *encoder* de modo a medir o volume de óleo extraído para o reservatório exterior, bem como o controlo das electroválvulas que controlam o fluxo do óleo.

Como mostra o diagrama da figura 37, existe ainda um módulo de potência que faz o acionamento do motor através das ordens recebidas pelo microprocessador.

Em relação à alimentação dos periféricos são usadas duas baterias de Ni-MH de 12V ligadas em série de modo a obter 24V, sendo que um conversor DC-DC garante as diferentes alimentações a todo o sistema.

5.1.2. SISTEMA DE VARIAÇÃO DE LASTRO

O sistema de variação de lastro é constituído por um motor DC com *encoder*, uma bomba de óleo, uma válvula de alta pressão e dois reservatórios de óleo. O motor encontr-se acoplado à bomba de óleo e bombeia o óleo do reservatório interno para o externo de modo a variar o volume total do veículo. A válvula impede o retorno do óleo do fole externo que se encontra sujeito à pressão exterior.



Figura 38 Sistema de variação de lastro do veículo

À medida que a profundidade aumenta, aumenta a pressão do óleo no fole exterior e consequentemente aumenta a pressão a vencer por parte da válvula e da bomba, por isso estes componentes foram escolhidos com base na profundidade que pretendemos operar. Em seguida iremos apresentar em detalhe as características de cada um dos componentes utilizados no nosso sistema.

Usamos uma bomba de pistões axial AKP de elevada pressão, alta eficiência global a velocidades muito baixas, permitindo uma grande faixa de velocidades de funcionamento. Tem também um sistema de auto lubrificação e arrefecimento através da entrada contínua de óleo.



Figura 39 Bomba de 5 Pistões Axial AKP

Esta bomba é constituída por 5 pistões axiais com eixo oscilante e permite a rotação em qualquer direção, possibilitando o bombear até $0,3 \text{ cm}^3/\text{rotação}$ e permite uma pressão máxima de funcionamento de até 500 bar.

A sua velocidade de funcionamento varia proporcionalmente ao seu fluxo de óleo, podendo variar entre as 100 e as 5000 rpm, e o seu peso ronda as 900 gramas.

Esta bomba encontra-se ligada ao reservatório exterior através de tubos de óleo, passando por uma válvula onde o óleo flui apenas no sentido da bomba para o reservatório exterior, evitando assim o seu refluxo.

É uma válvula com solenoide de 2 posições, de alta pressão, operadas por piloto, normalmente fechada. Usada em aplicações que requerem baixo vazamento, tais como aplicações de carga ou como um desvio de finalidade geral ou válvula de descarga.

A válvula de solenoide normalmente é fechada, tendo um fluxo máximo de 37 L/min e pressão máxima de 350 bar (5000 psi).

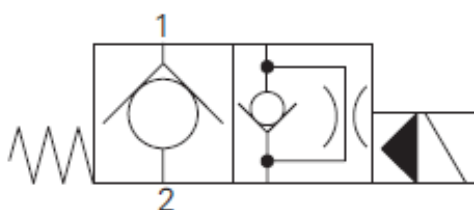


Figura 40 Simbologia Válvula Solenoide – SV15-8-C/CM

Na posição desenergizada, a válvula bloqueia o fluxo da porta 2 para 1 e permite fluxo da porta de 1 para a 2. Quando o solenoide é energizado, o cone piloto é puxado

para fora do assento permitindo que a válvula abra da porta 2 para 1, no sentido inverso o fluxo é restringido pelo orifício piloto.

Já que a válvula na posição de descanso permite a passagem num só sentido, bloqueando a passagem do óleo em sentido oposto, esta foi montada de modo a funcionar sempre na posição de descanso, tal como um díodo.

Como força motriz para fazer rodar a bomba de óleo foi usado um Motor DC Pittman de 48V com um *encoder* Heds 9140-I00 acoplado como podemos ver na figura 41.



Figura 41 Motor Pittman com *encoder* Heds 9140-I00

O HEDS-9140 é um módulo codificador incremental ótico de canais. Quando utilizado com uma *codewheel*, estes módulos de baixo custo permitem detetar a posição de rotação. Cada módulo é composto por uma fonte de LED com lentes e um detetor fechado numa pequena embalagem plástica.

Este *encoder* é alimentado a 5V e precisa de resistências pull up nas saídas, a cada volta de 360° do veio do motor o *encoder* envia 512 impulsos (512 CPR) que são adquiridos pelo microprocessador que controla o sistema de variação de lastro.

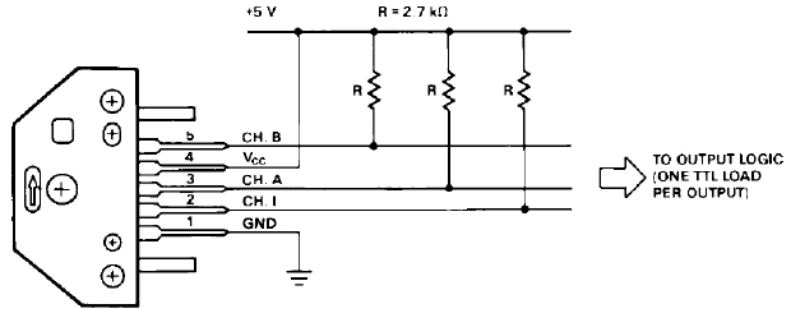


Figura 42 Encoder Esquema de Ligações

Para controlo do sistema de variação de lastro foi utilizado um microprocessador STM32 que recebe informações do computador central para variar a flutabilidade do veículo. Este micro processador actua o motor DC da bomba através de um módulo de potência constituído por uma ponte H, que permite através de impulsos de 5V controlar a velocidade do motor DC.

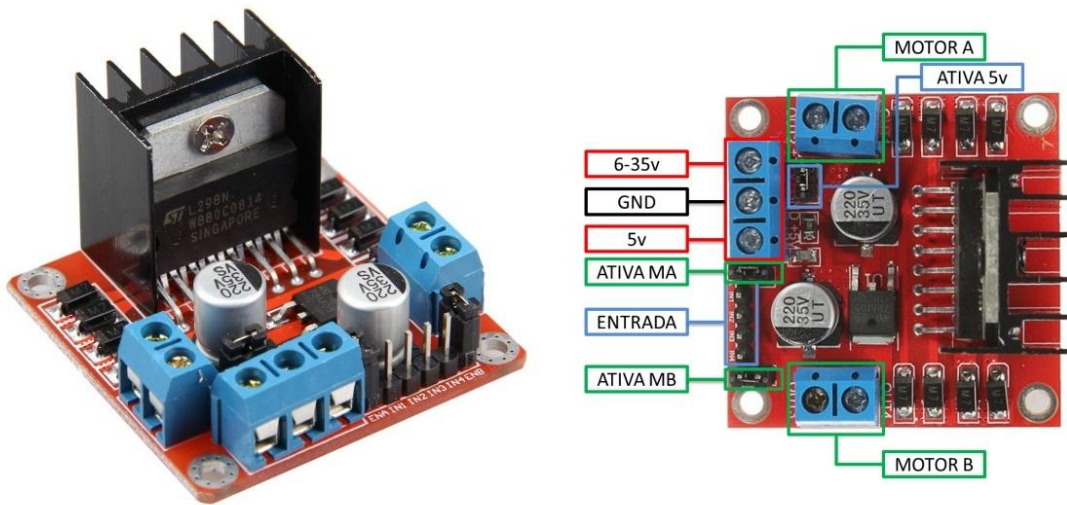


Figura 43 Módulo de potência para controlo do motor DC

O microprocessador utilizado foi o STM32F4 *Discovery* com processador ARM Cortex-M4F de 32 bits, 1 MB Flash, 192 KB de RAM fonte de alimentação a partir de uma tensão de alimentação de 5V externos contém acelerômetro interno de 3 eixos.

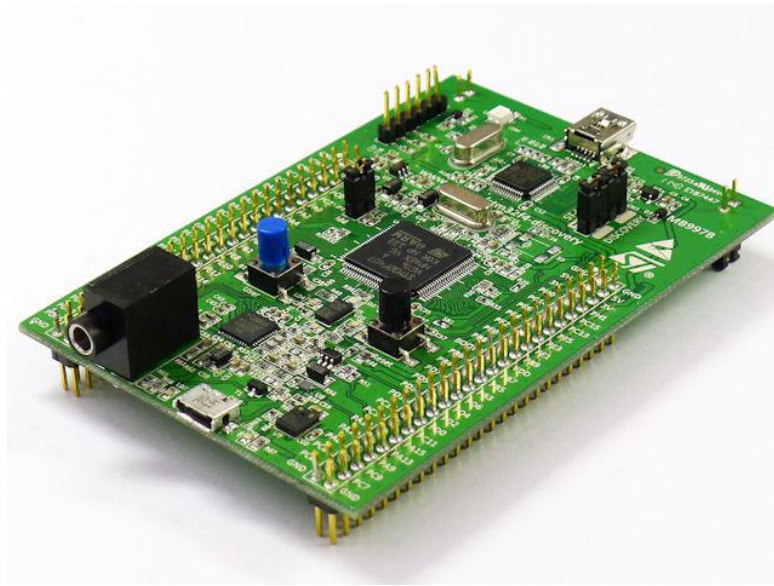


Figura 44 Microprocessador STM32F4 Discovery

Esta permite vários tipos de comunicações tais como, UART, SPI, I2C entre outras. Todos os seus portos de IO encontram-se disponíveis através de *pinout* externo facilitando as ligações aos outros periféricos envolventes do sistema de variação de lastro.

5.1.3. SISTEMA COMPUTACIONAL

Um veículo autónomo robótico necessita sempre de um sistema computacional para fazer o controlo de todo os veículos, controlo de movimento, aquisição de dados do veículo e para além disso tem de executar a sua missão. Esta pode ser aquisição de imagens, aquisição de dados relativos à qualidade da água ou mesmo rastreamento do meio onde se encontra. Todas as missões para o qual um AUV é concebido necessitam de sensorização externa que lhe permita recolher essas informações, a maioria dos sensores atualmente comunicam através de protocolos de alto nível o que facilita quando são por exemplo conectados a um computador central.

Por isso que cada vez mais os sistemas estão a adotar o uso de mini computadores para substituir os microprocessadores, ficando assim com uma maior capacidade de processamento, melhor facilidade de comunicações e vantagens na programação, sendo que estes admitem versões de *software* baseadas em Linux por exemplo.

No nosso sistema optamos inicialmente pelo uso de um mini computador industrial designado por fit-PC2, com processador Intel Atom Z530 1.6 GHz e 1GB DDR2 RAM, possui 4 portas USB e um *Slot* para Mini SD Card.



Figura 45 Mini Computador Industrial fit-PC2

Este computador tem ainda WLAN integrada com antena exterior removível podendo esta ser prolongada para a parte exterior do AUV de modo a ficar com comunicações externas. Outros dados importantes para o nosso sistema são o facto de ser alimentado a 12V, pesa cerca de 130 gramas e tem um consumo de 9W.

Uma outra alternativa seria o RaspberryPi que é um computador do tamanho de um cartão de crédito, em que todo o seu hardware é integrado numa única placa.

Este é baseado num *chip* (SoC) Broadcom BCM2835,7 que inclui um processador ARM1176JZF-S de 700 MHz, GPU VideoCore IV, e 512 MB de memória RAM. Possui uma entrada de cartão SD para armazenamento de dados onde foi instalado todo o software.

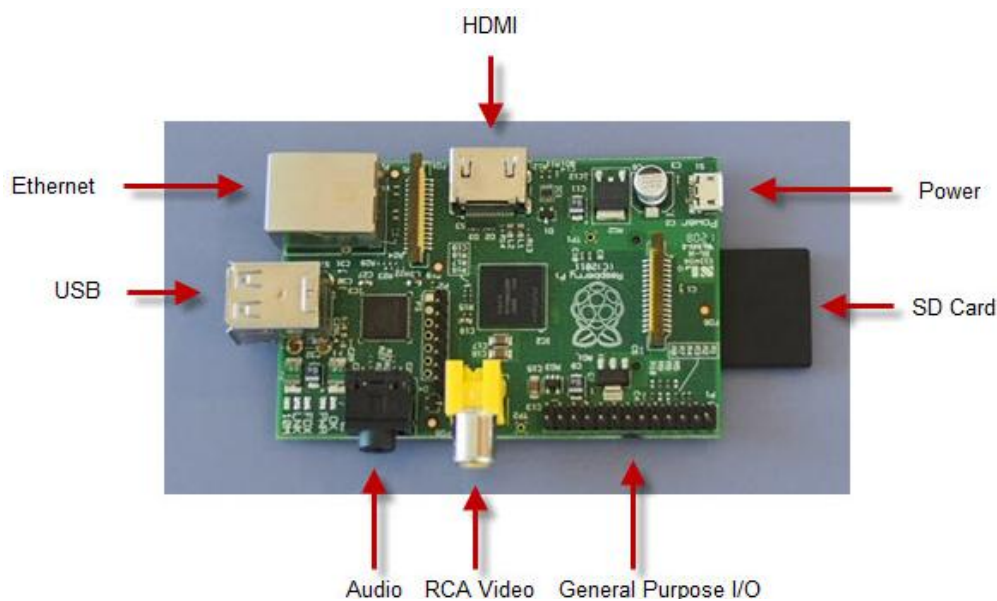


Figura 46 Placa RaspberryPi

O RaspberryPi não possui um relógio de tempo real (RTC), criando a necessidade do sistema operacional usar um *Network Time Protocol* (NTP), ou do usuário fornecer a hora ao sistema. Porém, um relógio de tempo real (como o DS1307) pode ser adicionado pela interface I2C.

Este possui 2 entradas USB e uma entrada Ethernet RJ45, tem ainda um porto de 26 pins com entradas e saídas que podem ser configuradas de acordo com o desejado, nesse porto tem ainda disponível comunicação UART e I2C.

Se, comparado com o computador anteriormente mencionado, este é bastante mais leve, com apenas 40 gramas, e muito mais eficiente em termos energéticos consumindo apenas 3,5 W, três vezes menos.

O RaspberryPi apresenta um preço muito mais reduzido em relação aos mini computadores industriais, sendo este também compatível com sistemas operacionais baseados em Linux.

5.1.4. AQUISIÇÃO DE DADOS

Para o controlo de movimento vertical do nosso veículo é necessário o uso de sensores para determinar em tempo real, e com o máximo de precisão possível a

profundidade do veículo, e assim em função do tempo verificar a sua velocidade e aceleração instantâneas, usando esses dados no controlo do veículo.

O modo adotado para medir a distância a que o veículo se encontra da superfície foi o uso de um sensor de pressão de elevada precisão, que nos dá a informação em tempo real da pressão exterior a que o veículo está sujeito. Assim, se o veículo está com uma profundidade de 10 metros, encontra-se sujeito a uma pressão de:

$$P = \rho \cdot g \cdot h = 1000 \cdot 9,8 \cdot 10 = 98000 \text{ Pa} = 0,98 \text{ Bar}$$

O sensor usado no veículo foi o sensor de pressão série 35X Ei da fabricante Keller. Este transmissor de pressão piezoresistivo foi homologado para trabalhar em zonas do grupo II onde existe um alto risco de explosão.

Esta série dispõe de uma eletrónica para o tratamento do sinal assegurando a máxima precisão. Cada transmissor está calibrado para o intervalo completo de pressão e temperatura. Os resultados das medições são utilizados para calcular um modelo matemático que corrige todos os erros que possam ser reproduzidos. Assim, a Keller pode garantir uma alta precisão (margem de erro) ao longo da totalidade do intervalo compensado de pressão e temperatura. As sondas de nível estão calibradas somente para operar dentro do intervalo 0...50°C. O valor de pressão calculado pode ser lido através da interface, ao mesmo tempo que é processado como sinal analógico.



Figura 47 Sensor de Pressão Série 35X Ei da Keller

A interface foi desenhada como porta RS485 *half-duplex*, para 9600 e 115200 bauds. Para ser utilizada em linhas com um comprimento de até 1400 m e um máximo de 128 aparelhos ligados ao bus.

Os instrumentos de medida podem ser configurados (escala de saída analógica, comunicação da unidade, alteração da configuração do filtro, reposição a zero, etc.) e os valores medidos podem ser registados com os programas gratuitos CCS30 e READ30/PROG30, os quais permitem as seguintes funções:

- Leitura dos valores de pressão e temperatura atuais, com resolução máxima;
- Leitura de informação sobre o estado do instrumento;
- Reprogramação da saída analógica;
- Calibração: ajuste do ponto zero e do fator de amplificação;
- Possibilidade de ajuste dos filtros passa baixo e dos parâmetros de comunicação.

Comunicação	RS485
Alimentação (U)	10...30 Vcc
Precisão à temperatura ambiente	0,02%FS
Margem de erro (10...40°C)	0,05%FS
Consumo	< 9 mA

Tabela 5 Caraterísticas do Sensor de Pressão Série 35 X Ei

Podemos verificar na tabela anterior as pequenas margens de erro do sensor na ordem dos 0,05% o que em 1000 metros de profundidade corresponde a um erro de posicionamento de 0,5 metros, valor de erro não significativo para o nosso tipo de missão.

Este sensor apresenta baixos consumos energéticos, um peso e dimensões aceitáveis para o nosso veículo. De referir ainda, que o método de comunicação RS485 permite uma maior facilidade no processo de aquisição de dados para o computador central e possibilita ainda a troca de sensor por um com mais range de profundidade, se assim o desejarmos.

5.1.5. ARQUITETURA DE SOFTWARE

O sistema desenvolvido contém dois processadores distintos que controlam partes diferentes do sistema, o computador central é responsável pela aquisição de

dados e cálculo da localização, assim como receber os parâmetros da missão através de protocolo de comunicação com o exterior e controla o sistema de acordo com a missão recebida.

Este tem a capacidade de dar ordens de controlo, tal como ligar os propulsores externos ou enviar pedido de variação de lastro para um outro processador que está encarregue de controlar o sistema de variação de lastro, e retornar constantemente o seu estado atual.

A existência desse segundo controlador deve-se à necessidade de atuação de periféricos de potência e de aquisição de dados por impulsos elétricos (*encoder*), pois são tarefas que não se devem misturar com as tarefas de alto nível protocolar usado pelo computador central. Uma outra razão, será o facto cada cilindro ter um processador para que seja possível uma maior e mais eficiente interação entre os dois.

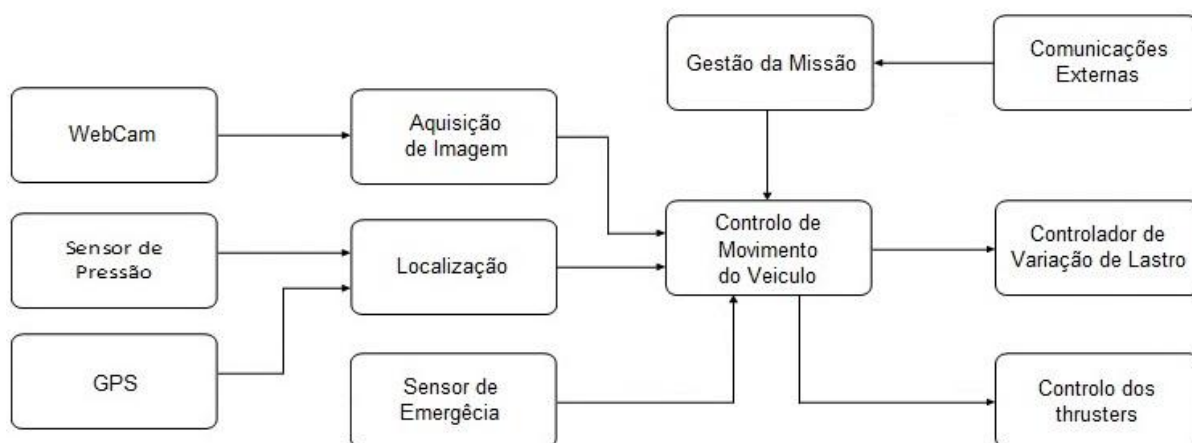


Figura 48 Diagrama de blocos do software do veículo

O computador central trata ainda da aquisição de imagem e tem a capacidade de, na eventualidade de algo correr menos bem com a missão este poder abortá-la. Tal poderá acontecer ao reunir condições de falha como por exemplo deixar de receber informação do sensor de pressão, ou receber informação dum sensor de emergência de que existe água no interior.

O microprocessador que está no interior do outro cilindro, sendo responsável pela variação de lastro, pode também ele abortar a missão se reconhecer que ao fim de algum tempo deixou de conseguir comunicar com o computador central.

Seja qual for o processador a querer abortar a missão ou seja qual for a razão, o que será realizado como método de fuga será sempre encher o reservatório exterior até ao valor máximo permitido, de modo a salvar o veículo. Em seguida iremos mostrar os fluxogramas dos *software's* implementados no computador central e no microprocessador de controlo de variação de lastro.

5.1.5.1. SOFTWARE PC PRINCIPAL

O computador central estabelece comunicação com o operador através de WLAN e assim que arranca o programa de missão é questionado ao utilizador a profundidade e a quantidade de óleo que deseja variar, após isso estes valores são guardados e enviados para o microprocessador.

Em seguida o veículo está pronto a iniciar a missão e ser colocado na água, normalmente já com uma flutuabilidade negativa de forma a iniciar facilmente a descida, após o envio dos dados para o microprocessador é iniciada uma rotina de leitura do sensor de pressão (pressão e temperatura) com um tempo de ciclo de 1 segundo e são guardados todos esses valores num ficheiro de texto juntamente com a hora atual de aquisição de cada ciclo.

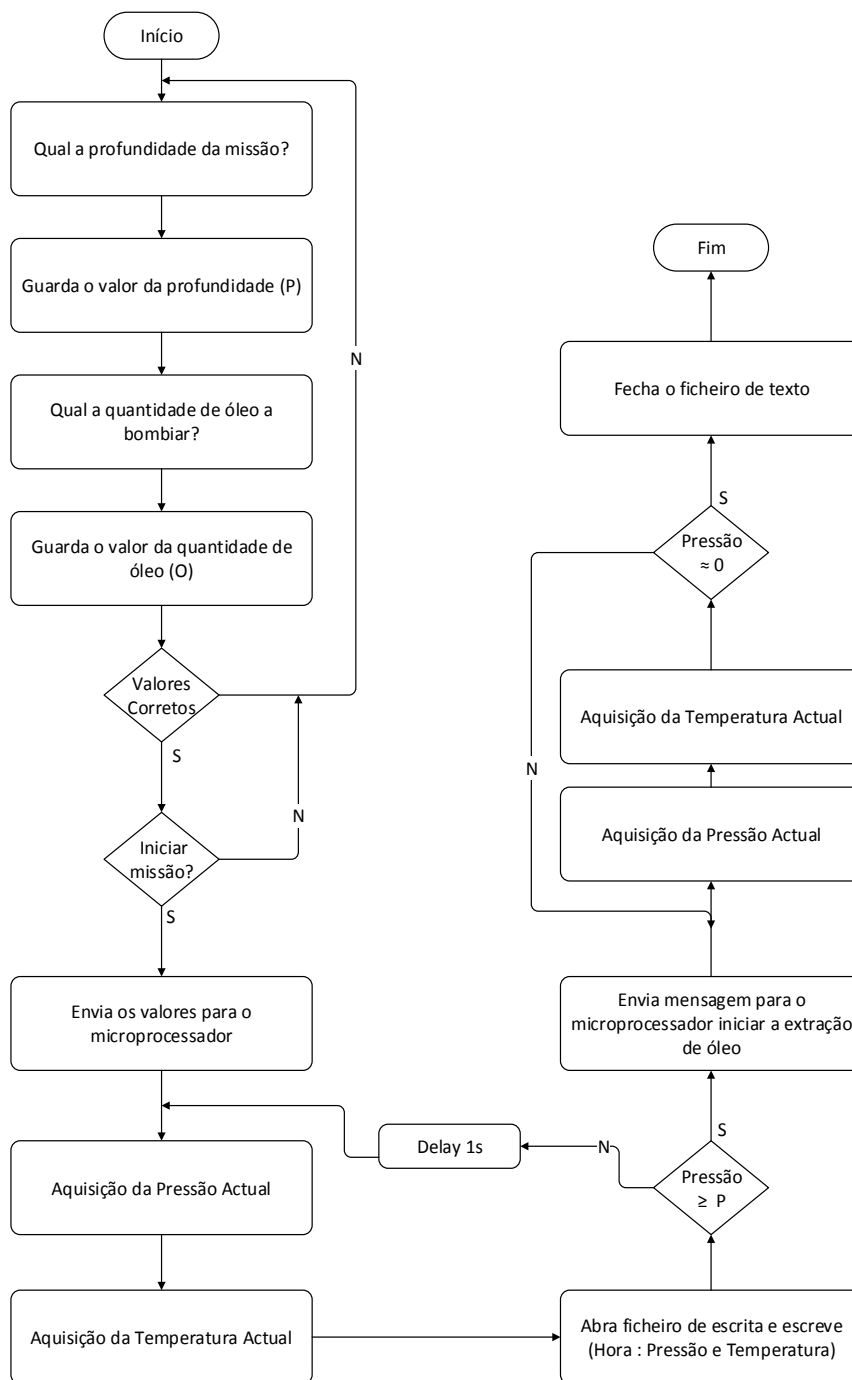


Figura 49 Fluxograma do software do computador central

Simultaneamente a profundidade atual é constantemente comparada com a profundidade de missão, e assim que esta é atingida este envia informação para o microprocessador de controlo da variação de lastro variar o volume de óleo que foi inicialmente parametrizado pelo utilizador.

Os dados do sensor continuam a ser obtidos e guardados até o veículo subir para a superfície e terminar a missão. Após isso o utilizador pode ligar-se novamente ao sistema e parar o programa ficando assim com um log completo de toda a missão.

5.1.5.2. SOFTWARE DO MICROPROCESSADOR

Quanto ao microprocessador, este inicia o programa assim que recebe a informação dos parâmetros de missão enviados pelo computador central e guarda-os em memória, depois fica em espera por uma ordem para atuar a variação de lastro.

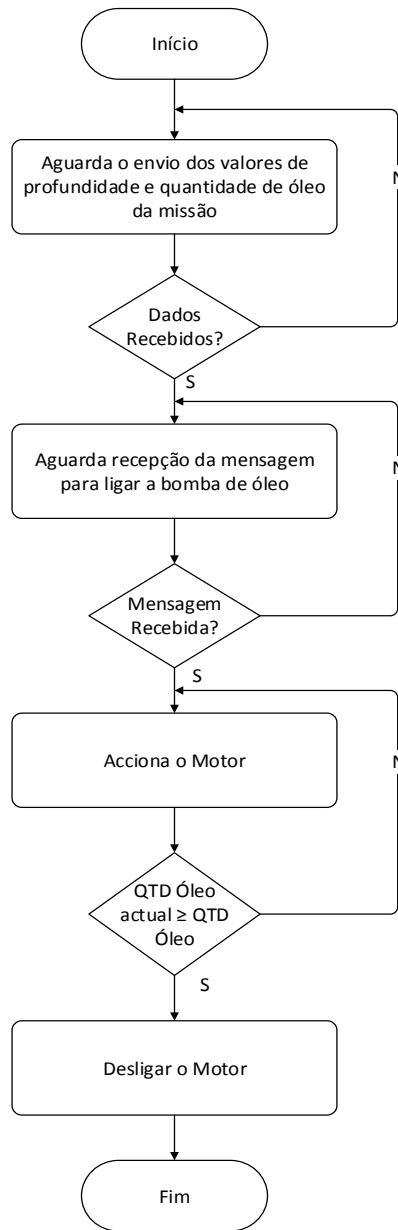


Figura 50 Fluxograma do *software* do microprocessador

Quando recebe essa ordem, este aciona o módulo de potência do motor DC e inicia a contagem de rotações do motor através da receção dos impulsos do *encoder*, e assim mede o fluxo aproximado que a bomba injeta no reservatório exterior.

Assim que atinge o valor de volume de óleo pretendido na missão, este desliga o motor e avisa o computador central que terminou o processo.

O Processo descrito destes dois processadores foi o processo desenvolvido para os ensaios que realizamos, mas como podemos perceber no diagrama da figura 48, o sistema pretendido teria mais funcionalidades que serão descritas no capítulo seguinte, como trabalhos futuros.

5.2. IMPLEMENTAÇÃO

5.2.1. DESCRIÇÃO DE PROBLEMAS

Uma das limitações do veículo construído prende-se com o sistema de variação de lastro só permitir a extração do óleo para o reservatório exterior e não ao contrário. Isto, impossibilita que o sistema fique numa posição fixa, num determinado valor de profundidade onde desejamos por exemplo recolher imagens.

Essa limitação deve-se ao facto das válvulas que usamos só permitirem a passagem de óleo nos dois sentidos quando sujeitos a elevada pressão, ou seja, quando esta se encontra no estado de repouso o fluxo de óleo bombeado é suficiente para vencer a força da válvula, mas quando queremos esvaziar o reservatório exterior o mesmo não acontece, já que não temos pressão suficiente para conseguir que a válvula no estado energizada permita a passagem de óleo.

Para o problema encontrado na construção do sistema de variação de lastro, foi estudada uma nova solução que será apresentada em seguida como trabalho futuro.

Uma outra dificuldade encontrada, foi de como armazenar corretamente todos os periféricos sem ter uma estrutura interna para nos ajudar nesse sentido. Essa estrutura foi desenhada e seria aplicada no outro cilindro do sistema de navegação, uma vez que no cilindro onde temos a variação de lastro a criação de uma estrutura seria mais difícil de implementar.

5.2.2. NOVO CIRCUITO HIDRÁULICO E ALTERAÇÕES MECÂNICAS

Para que no futuro seja possível encher e esvaziar o reservatório exterior usando a força da bomba, a impulsionando o óleo sobre pressão em ambos os sentidos poderíamos usar uma válvula solenoide – SV11-8-4/4M.

Esta é uma válvula com solenoide de 2 posições, de alta pressão, operadas por piloto, normalmente fechada. Esta válvula pode ser usada em aplicações em que o movimento de um cilindro de duplo efeito ou um motor precisa de ser invertido.

A válvula de solenoide normalmente fechada, permite um fluxo máximo de 11 L/min e pressão máxima de 350 bar (5000 psi).

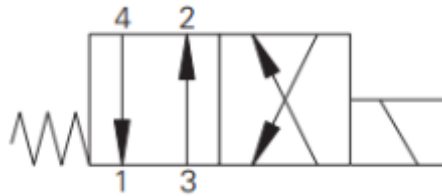


Figura 51 Simbologia Válvula Solenoide – SV11-8-4/4M

Na posição desenergizada a válvula permite o fluxo da porta 4 para a porta 1 e da porta 3 para a porta 2. Na posição de energizado é permitido o fluxo a partir da porta de 3 para a 4 e da porta 2 para a porta 1.

A ideia de uso desta válvula seria inverter o sentido do fluxo de óleo da bomba quando esta fosse energizada. No estado normal a válvula permite a injeção de óleo no reservatório exterior através da bomba de óleo, e quando está energizada esvazia o reservatório exterior usando a mesma bomba de óleo, tal como mostra a figura 52.

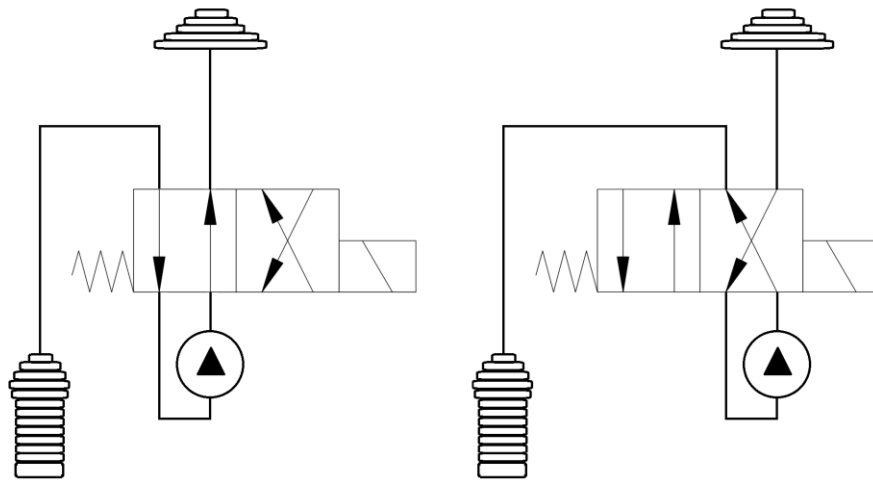


Figura 52 Esquema de uso da válvula no sistema

Em seguida mostramos o tipo de montagem do sistema de variação de lastro completo dentro do cilindro, e de como uma única válvula poderia conter todas as ligações de tubos a todas as peças do sistema, reservatório exterior, bomba e reservatório interior.

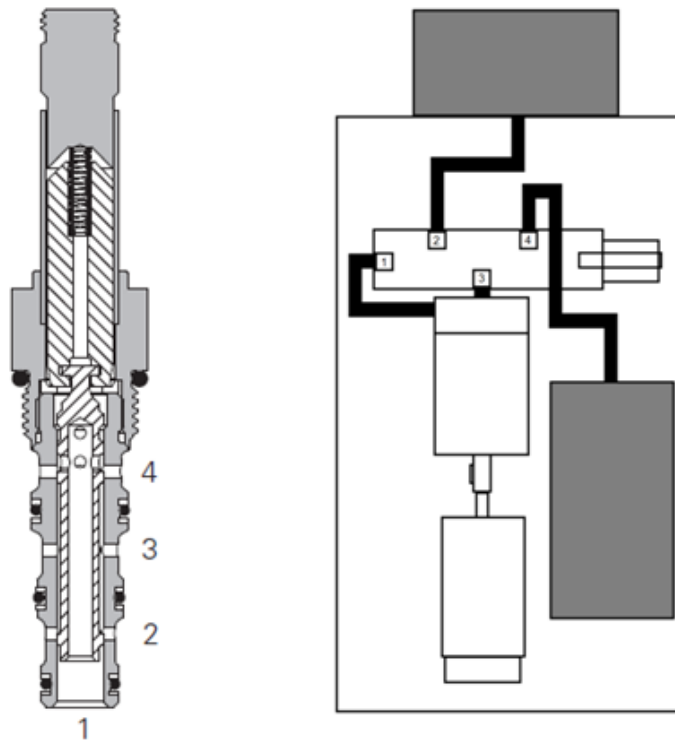


Figura 53 Válvula de 4 vias e esquema de uso da válvula no sistema

Ainda em relação à variação de lastro, uma outra modificação futura será o aumento de capacidade de força motriz aplicada à bomba de óleo, sendo que o motor DC atual apenas oferece 1/3 da velocidade que a bomba precisa para atingir os valores de fluxo máximo, assim esta poderá encher o reservatório 3 vezes mais rápido segundo *datasheet*.

Outro trabalho a realizar no futuro poderá ser a construção de outro cilindro e uma estrutura exterior capaz de juntar os dois cilindros. Para tal seria necessário efetuar a conexão entre ambos com fichas nas tampas, de modo a passar cabos de um cilindro para outro. Também o sistema de antena GPS e antena WLAN deverá ser instalada no exterior dos cilindros para permitir comunicações sem fios para o exterior.

Atualmente o veículo tem como sistema de vedação 2 *o-rings* por tampa, mas poder-se-á futuramente realizar um novo sistema de vedação passando para 3 *o-rings*, ou seja, acrescentar um *o-ring* de topo tal como mostra a figura 54.



Figura 54 Ilustração do tipo de vedação por tampa com 3 *o-rings*

Este modo de vedação, proporcionará uma maior vedação do veículo e conseqüentemente uma maior imunidade a altas pressões. Também no futuro será necessário levar o nosso sistema a diferentes profundidades uma vez que até agora só foi ensaiado até 5 metros de profundidade, para ver como este reage.

Outro aspeto de melhoramento consiste na construção de uma infraestrutura interior, com vista a organizar melhor os componentes e a cabelagem, tornando-os fixos numa única estrutura. Na extremidade da estrutura permitir-nos-ia colocar uma camara tal como mostra a figura 55, apontando para a tampa de vidro.



Figura 55 **Estrutura do interior de um AUV**

Como tal, para aplicação da camara teria que se criar a tampa de vidro com um tipo de vedação semelhante à usada nas outras tampas para manter a pressão máxima que o veículo permite. Assim sendo, como não podemos prender essa estrutura interna à tampa de vidro seria importante acoplar à outra tampa.

6. RESULTADOS

6.1. RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

Tal como explicamos anteriormente, o simulador desenvolvido em Matlab (*Simulink*) permite o estudo do sistema com diferentes tipos de parâmetros, o que nos ajuda na evolução do nosso veículo, uma vez que sendo ele um protótipo em constante modificação todos os seus parâmetros de peso, volume e coeficientes de atrito estão em constante mudança.

Calculamos anteriormente a velocidade limite para o nosso veículo considerando para este um peso em água de 100 gramas. Apresentamos em seguida o gráfico com a evolução da velocidade em ordem ao tempo do nosso sistema simulado. Constata-se que o veículo atinge a velocidade limite de aproximadamente 0,23 m/s em apenas 1 segundo.

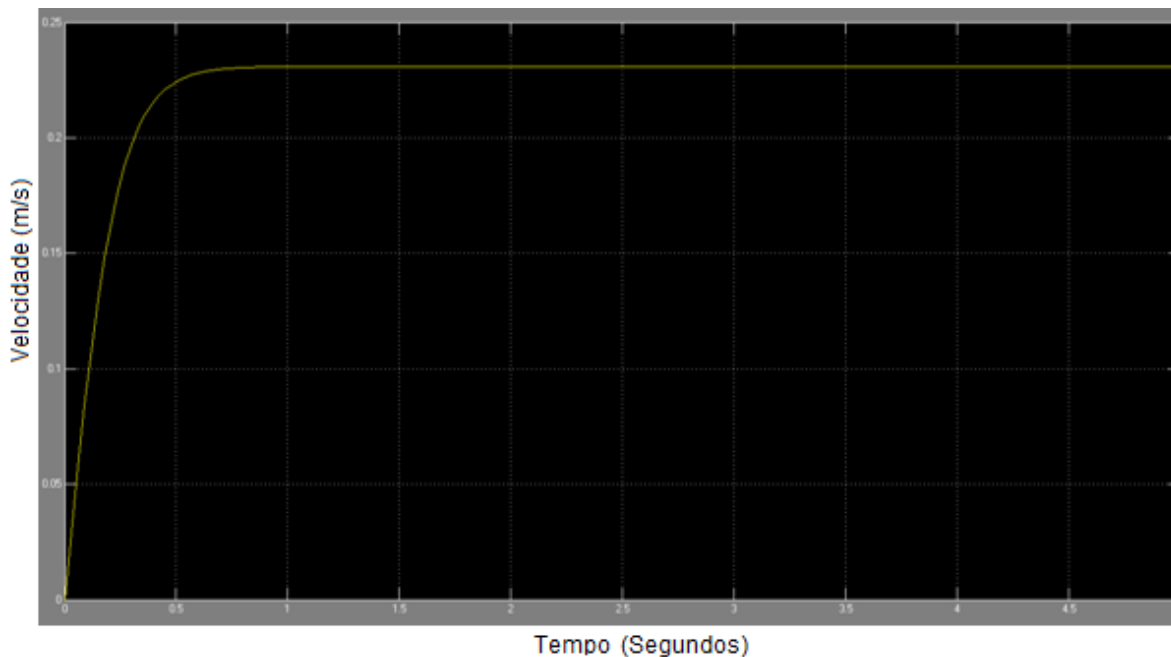


Figura 56 Gráfico da velocidade limite do veículo com $C_d = 1,17$

Se por exemplo mudarmos o tipo de tampa para uma tampa esférica em vidro possibilitando o uso de uma camara, o índice de coeficiente seria alterado e mesmo mantendo o mesmo peso em água de 100 gramas o comportamento seria melhor.

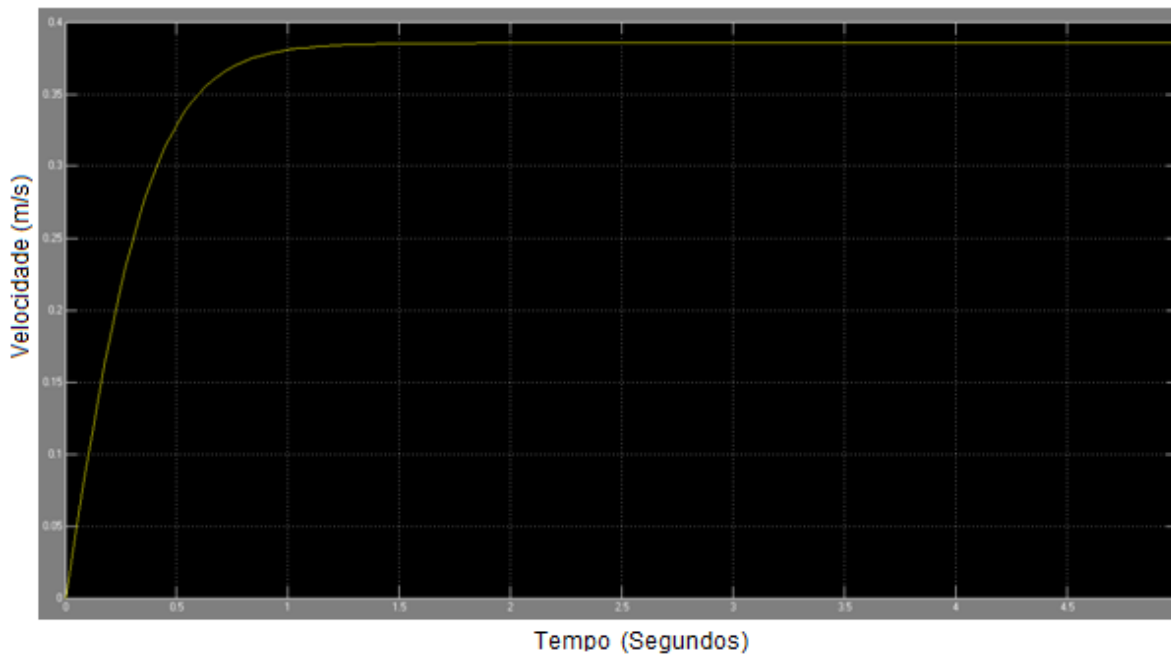


Figura 57 Gráfico da velocidade limite do veículo com $C_d = 0,42$

Analisando o gráfico da figura 57 verifica-se que o veículo atinge a velocidade limite de aproximadamente 0,38 m/s em aproximadamente 2,5 segundos.

A velocidade quase que duplicou sendo que apenas melhoramos uma característica da face do veículo, este pode ser um parâmetro a levar em conta se desejarmos ter um veículo mais rápido do que o atual. Esta análise vem comprovar a relevância da forma e conseqüentemente dos seus coeficientes de *drag* no desempenho do veículo. É pois relevante em fases mais avançadas do projecto, a consideração do uso de uma carenagem por forma a melhorar o desempenho.

Um dos ensaios reais que realizamos do nosso veículo permitiu verificar a sua capacidade de inverter o sentido de deslocação, variando a sua flutuabilidade através do sistema de variação de lastro. Num tanque de 5 metros configuramos o sistema, para aos 2 metros de profundidade variar toda a sua flutuabilidade, esse ensaio irá ser analisado em pormenor de seguida nos ensaios experimentais, mas queremos agora simular o mais real possível esse ensaio.

Parâmetros para simulador:

- Massa: 17,84 kg
- Volume: 0,0177 m³
- Área Superfície: 0,0314 m²
- Coeficiente de Atrito: 1,17
- Percentagem Caudal: 0,33 (deve-se ao facto da potência do motor DC, só permitir rodar o bomba com 1/3 da sua velocidade total)
- Volume Reservatório: 0,0003 m³

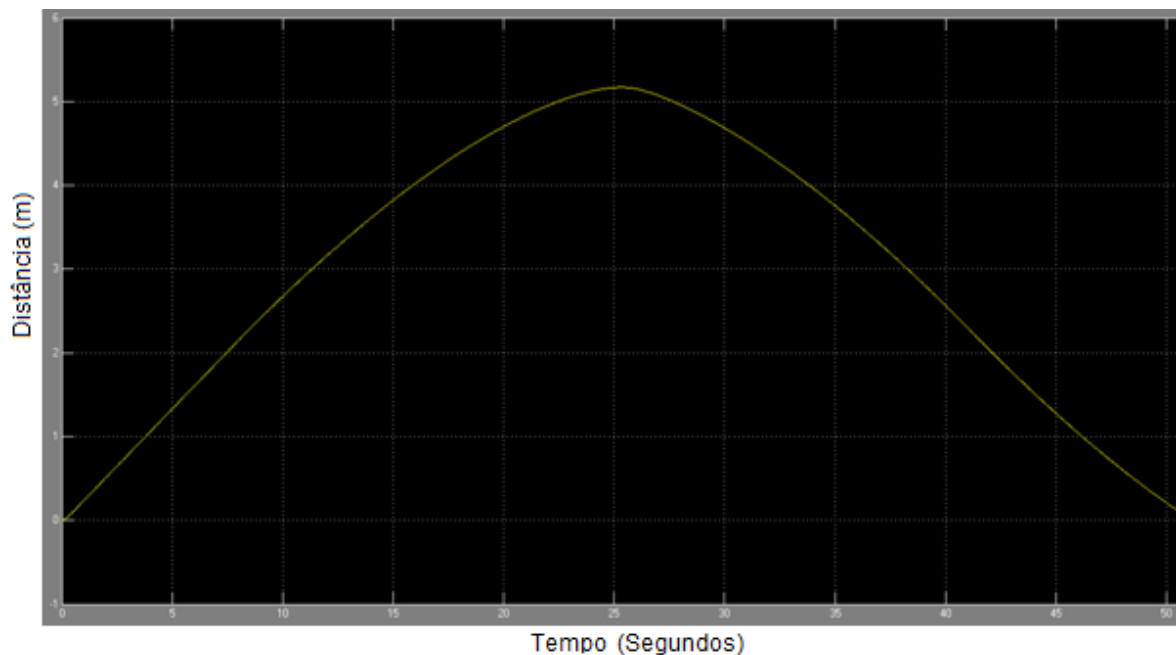


Figura 58 Gráfico da deslocação do veículo

O sistema de mudança de fluutuabilidade reagiu de um modo lento devido a alguns parâmetros, sendo o mais problemático a capacidade de caudal da bomba, o que faz com que o reservatório encha de um modo muito lento. Na figura 59 verifica-se que quando o veículo para, o reservatório ainda se encontra a metade da sua capacidade de enchimento.

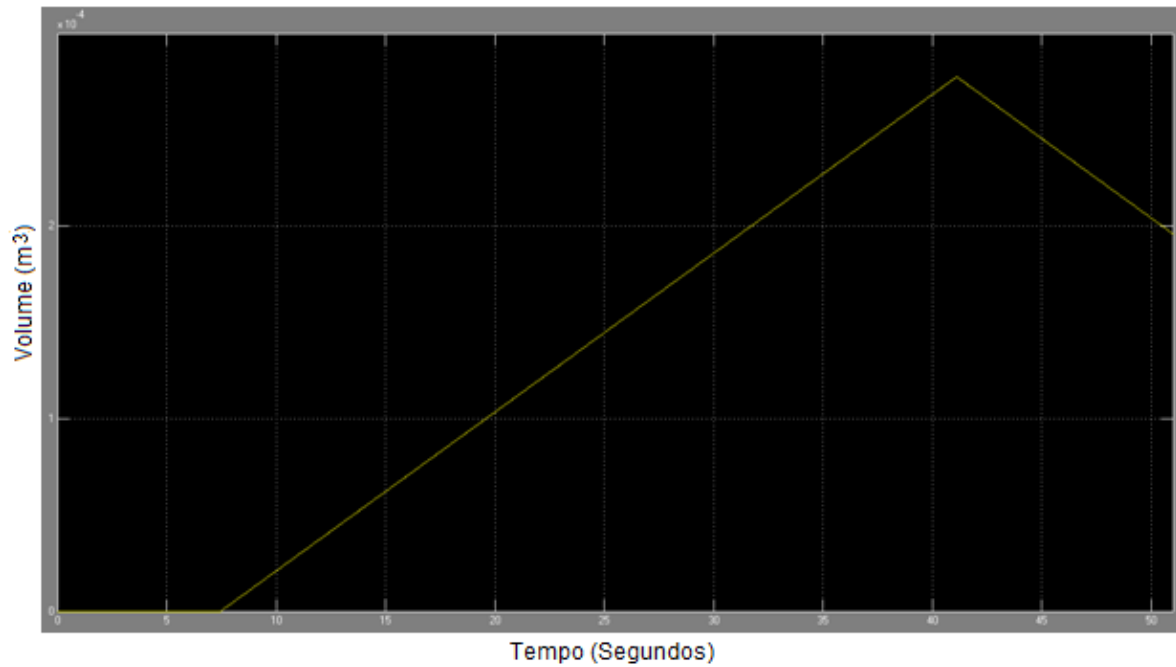


Figura 59 Gráfico do volume de óleo bombeado para o reservatório exterior

Se aumentarmos o caudal da bomba para o dobro do seu fluxo de óleo, ficando com 66% da capacidade máxima de bombeamento da bomba, o comportamento do veículo seria o apresentado na figura 60.

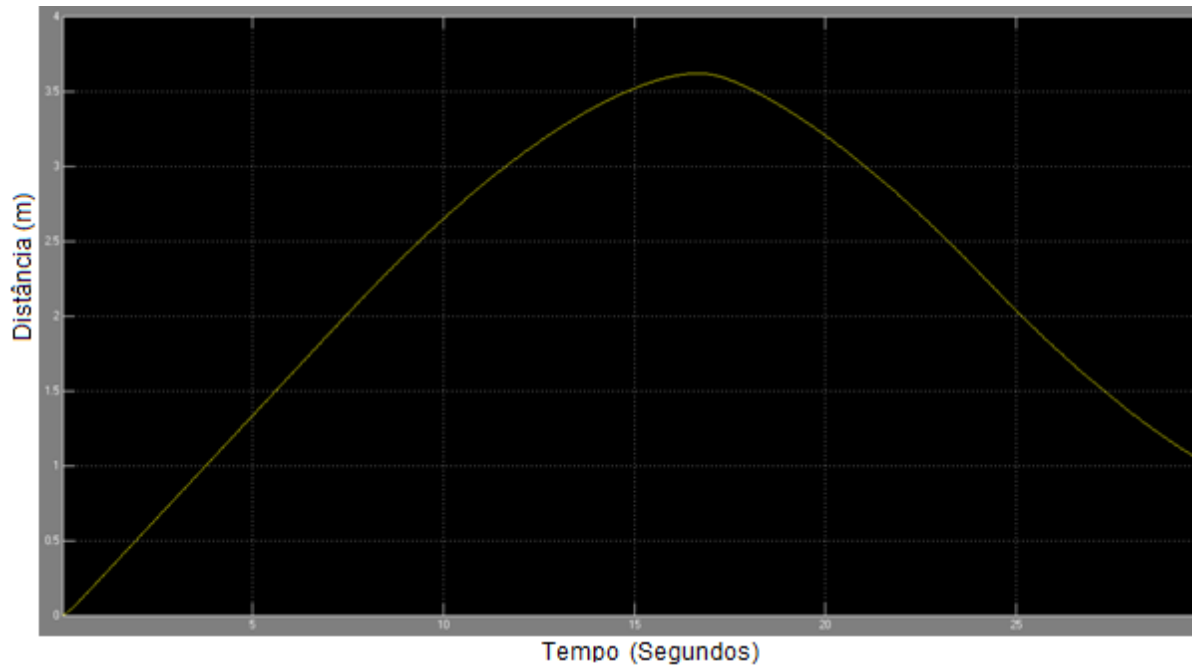


Figura 60 Gráfico da deslocação do veículo com dobro do caudal

Desta forma reduzimos o desvio do sistema em relação à sua missão em 1,5 metros. Podemos agora observar na figura 61, que o tempo que o veículo demora até estabilizar é de cerca de 80 segundos, ficando depois a oscilar em cerca de 10 cm.

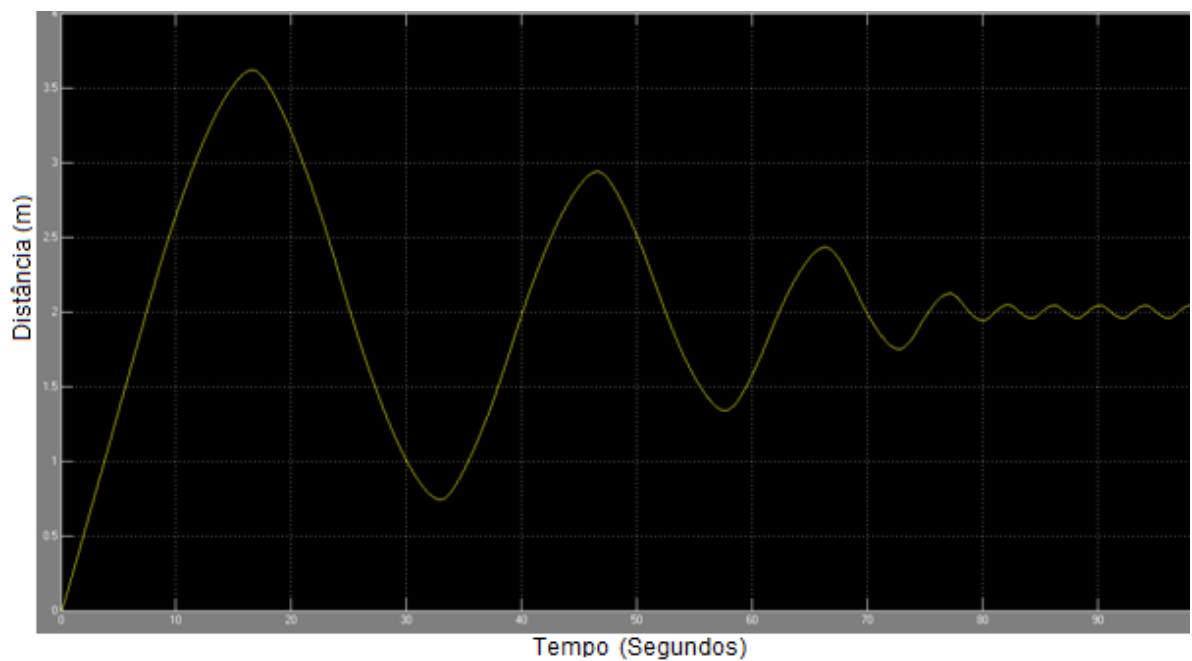


Figura 61 Gráfico da deslocação do veículo para 2 m

Verifica-se assim um *overshoot* na ordem de 1,6 metros, se fizermos uma descida de maior profundidade o *overshoot* irá sempre manter-se uma vez que a

velocidade limite do veículo como vimos no início é atingida nos primeiros segundos da sua deslocação. Logo, numa descida de 1000 metros um erro de 1,6 metros não é algo muito crítico. Mostramos em seguida para uma descida de 20 metros.

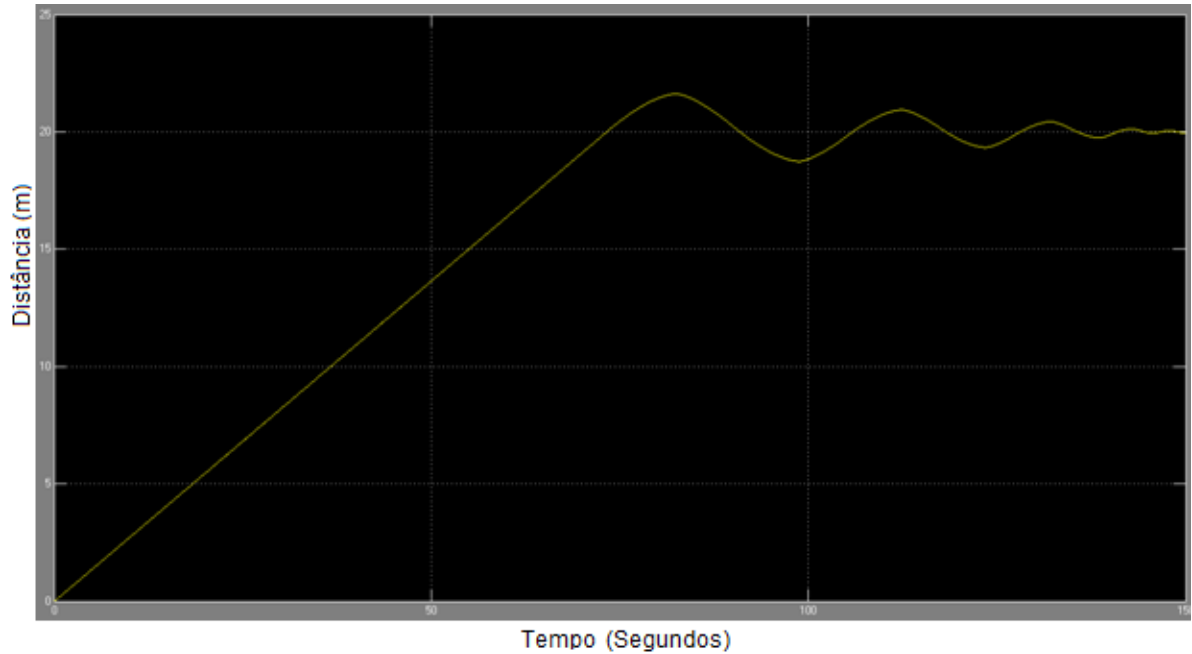


Figura 62 Gráfico da deslocação do veículo para descida de 20m

6.2. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Como ensaios experimentais realizamos inicialmente alguns ensaios ao sensor de pressão e à estrutura registando o seguinte gráfico de informação.

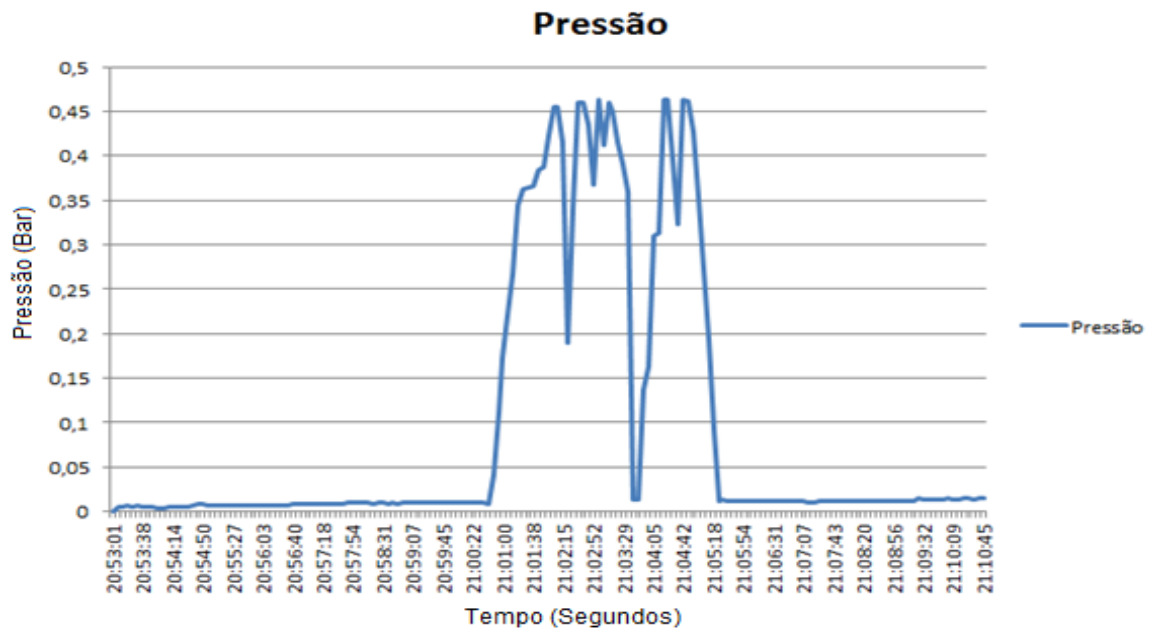


Figura 63 Gráfico da deslocação do veículo

Este demonstra as variações de profundidade do nosso veículo dentro do tanque de ensaios, com profundidade de 5 metros. Há que salientar que, nestes ensaios o sensor estava na parte superior do veículo e por isso não media o fundo do tanque menos a sua própria altura.

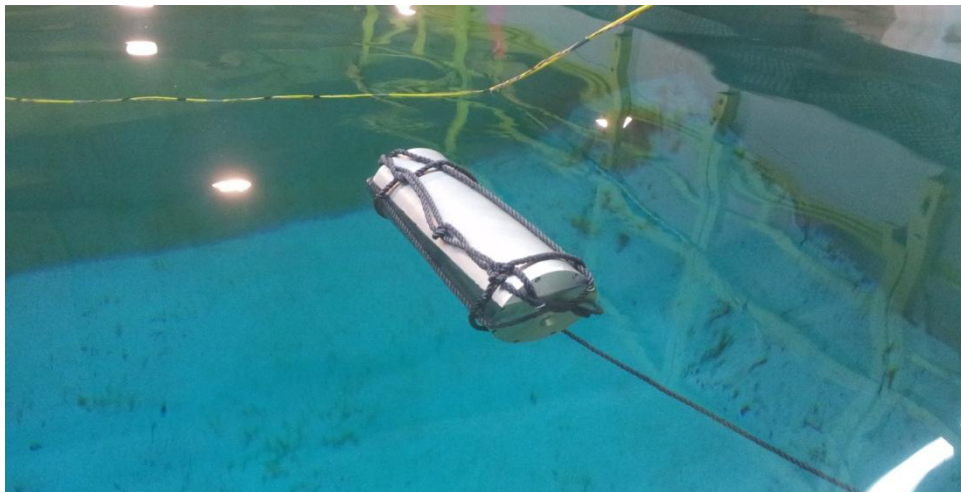


Figura 64 Imagem do veículo no ensaio

Posteriormente a esses ensaios iniciais, e assim que tivemos o sistema de variação de lastro funcional, foi possível efetuar outros ensaios, sendo que o ensaio de maior relevância trata-se de uma descida em que configuramos o sistema com os seguintes parâmetros:

- Massa: 17,84 kg;
- Volume: 0,0177 m³;
- Volume Reservatório: 0,0003 m³.

Ou seja, o veículo estava com um peso em água de aproximadamente 140 gramas e configurado para aos 2 metros de profundidade iniciar a extração de 30 cl de óleo para o reservatório exterior variando assim a sua flutuabilidade. Ao variar o seu peso em água de 140 gramas para -160 gramas ($0,0003 \text{ m}^3 \times 1000 = 0,3 \text{ kg}$) torna-o assim flutuante.

O gráfico seguinte foi construído a partir do log da missão, que permite verificar que os 5 metros de profundidade não foram suficientes para a inversão de sentido da deslocação do veículo. O veículo tocou no fundo perdendo alguma velocidade e rapidamente iniciou a sua volta para a superfície. Todo este processo demorou cerca de 60 segundos.

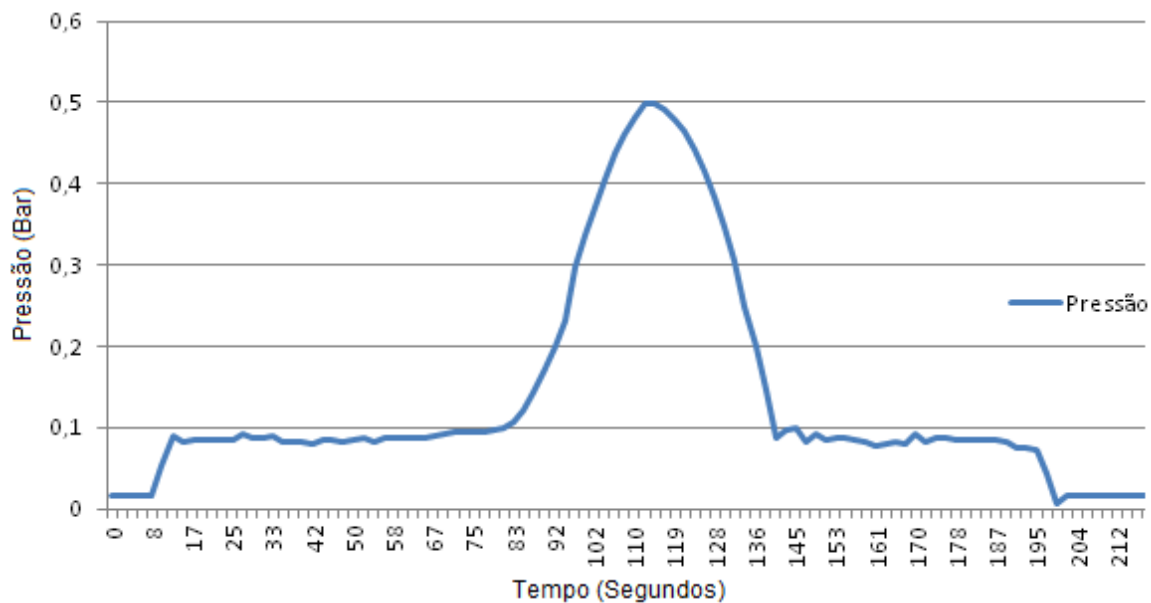


Figura 65 Gráfico da deslocação do veículo no ensaio

No capítulo anterior foi realizada uma simulação com o intuito de aproximar ao máximo os valores deste ensaio real, e o resultado obtido ficou muito perto do resultado experimental.

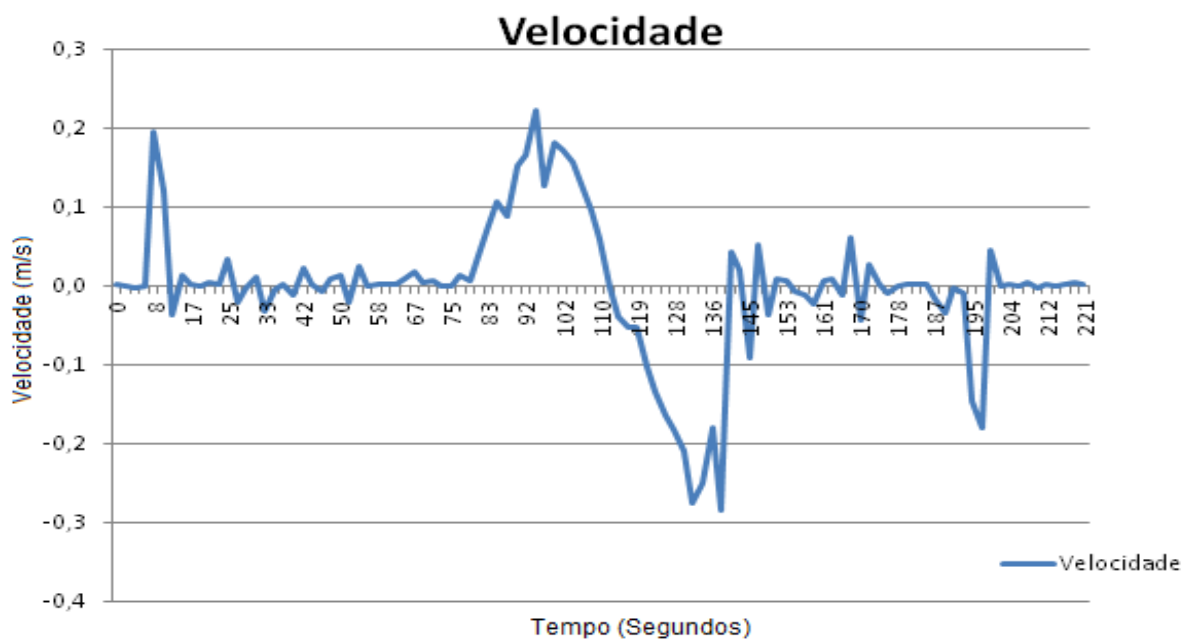


Figura 66 Gráfico da velocidade do veículo no ensaio

No gráfico da velocidade da figura 66 para o mesmo ensaio, constatamos que o veículo em alguns pontos ficou perto da velocidade limite de 0,23 m/s.

7. CONCLUSÃO

O presente trabalho simbolizou um primeiro passo no desenvolvimento de tecnologia de variação de lastro, para sistemas robóticos submarinos, no ISEP. Foram estudados os problemas associados ao desenvolvimento de sistemas robóticos para o oceano profundo, e em particular questões associadas à locomoção na vertical e conceção de vasos estanques e pressurizados para acomodação dos sistemas eletrónicos de bordo.

A abordagem inicial do trabalho permitiu conhecer e explorar os tipos de AUV's existentes no mercado, bem como outros sistemas submersíveis e as suas características.

Também o estudo do sistema a desenvolver e todas as preocupações no projecto do sistema mecânico, devido à sua pressão de operação exterior, foram um desafio em termos de cálculo mecânico, desenho e de construção do mesmo.

O sistema de variação de lastro, várias vezes modificado e melhorado, permitiu colocar toda a sua teoria de variação de flutuabilidade em prática através dos ensaios reais efectuados. Comprovando-se assim a eficiência energética da descida, sendo que o motor só precisava funcionar cerca de 30 segundos para mergulhar e emergir, independentemente da profundidade.

De uma forma geral, este trabalho permitiu desenvolver um veículo robótico subaquático, projectado para operar a elevadas profundidades e usando um método de mergulho e ascensão altamente eficientes.

O simulador tornou-se um elemento de elevada importância neste projecto, sendo alvo de vários ensaios e de várias experiências a fim de antever o que seria possível de modificar no veículo. Ajudou a tomar algumas decisões importantes acerca do tipo de controlo a configurar.

Como termo de comparação ao ensaio realizado experimentalmente, definimos todos os parâmetros da missão e do veículo no simulador e concluímos que estes resultados se aproximavam dos resultados experimentais, tanto na curva de deslocamento do veículo como na profundidade máxima atingida de aproximadamente 5 metros.

Embora o veículo implementado não esteja ainda totalmente funcional, tendo em vista a operação a 1000m de profundidade, a implementação efectuada quer em termos mecânicos, de hardware e de software foi já avaliada em tanque de testes. Este trabalho permitiu assim adquirir experiência, ao desenvolver um primeiro protótipo de sistema de variação de lastro aplicável a uma vasta gama de veículos subaquáticos. Sistema este que endereça uma lacuna nos actualmente existentes, permitindo o uso mais eficiente de soluções robóticas para tarefas de exploração marinha.

Constituindo um passo inicial no processo de desenvolvimento de um sistema robótico de tecnologia nacional para operação no fundo do oceano, este trabalho contempla naturalmente amplas perspectivas de trabalho futuro.

De um ponto de vista mais específico, perspectiva-se a implementação de teste das alterações ao sistema hidráulico de controlo de lastro, bem como a validação do protótipo para maiores profundidades. Em termos de desenvolvimento do veículo será implementado o segundo cilindro estanque bem como a integração dos restantes subsistemas e sensores.

Referências Documentais

- [1] B. Sumantr, M. . Karsiti, and H. Agustiawan, "Development of variable ballast mechanism for depth positioning of spherical URV," in *2008 International Symposium on Information Technology*, 2008, pp. 1–6.
- [2] Z. Qiu, "Design and research on a variable ballast system for deep-sea manned submersibles," *J. Mar. Sci. Appl.*, vol. 7, no. 4, pp. 255–260, Mar. 2009.
- [3] J. S. Riedel, A. J. Healey, D. B. Marco, and B. Beyazay, "Design and Development of Low Cost Variable Buoyancy System for the Soft Grounding of Autonomous Underwater Vehicles," in *Proceedings of 11th International Symposium on Unmanned Untethered Submersible Technology (UUST'99)*, 1999.
- [4] S. Tangirala and J. Dzielski, "A Variable Buoyancy Control System for a Large AUV," *IEEE J. Ocean. Eng.*, vol. 32, no. 4, pp. 762–771, 2007.
- [5] W. J. Kirkwood, "Development of the DORADO mapping vehicle for multibeam, subbottom, and sidescan science missions," *J. F. Robot.*, vol. 24, no. 6, pp. 487–495, Jun. 2007.
- [6] W. J. Kirkwood and D. E. Steele, "Active variable buoyancy control system for MBARI's ROV," in *Proceedings of OCEANS'94*, 1994, vol. 2, p. II/471–II/476.
- [7] M. Brown, M. Kelley, and P. McGill, "MBARI Vertical Profiler," in *MTS/IEEE Oceans 2001. An Ocean Odyssey. Conference Proceedings (IEEE Cat. No.01CH37295)*, 2001, vol. 4, pp. 2482–2485.
- [8] B. Allen, R. Stokey, T. Austin, N. Forrester, R. Goldsborough, M. Purcell, and C. von Alt, "REMUS: a small, low cost AUV; system description, field trials and performance results," in *Oceans '97. MTS/IEEE Conference Proceedings*, 1997, pp. 994–1000.
- [9] O. Hegrenaes, O. Hallingstad, and B. Jalving, "Comparison of Mathematical Models for the HUGIN 4500 AUV Based on Experimental Data," in *2007 Symposium on Underwater Technology and Workshop on Scientific Use of Submarine Cables and Related Technologies*, 2007, pp. 558–567.

- [10] E. Fiorelli, P. Bhatta, and N. E. Leonard, "Adaptive Sampling Using Feedback Control of an Autonomous Underwater Glider Fleet," in *13 th Int. Symp. Unmanned Untethered Submersible Technology (UUST)*, 2003, August.
- [11] D. L. Rudnick, R. E. Davis, C. C. Eriksen, D. M. Fratantoni, and M. J. Perry, "Underwater Gliders for Ocean Research," *Mar. Technol. Soc. J.*, vol. 38, no. 2, p. 12, 2004.
- [12] J. Sherman, R. E. Davis, W. B. Owens, and J. Valdes, "The autonomous underwater glider 'Spray,'" *IEEE J. Ocean. Eng.*, vol. 26, no. 4, pp. 437–446, 2001.
- [13] D. C. Webb, P. J. Simonetti, and C. P. Jones, "SLOCUM: an underwater glider propelled by environmental energy," *IEEE J. Ocean. Eng.*, vol. 26, no. 4, pp. 447–452, 2001.
- [14] PREVCO Subsea Housings, <http://prevco.com/products/stock-items/aluminum-housings>
- [15] VITROVEX Deep Sea Housings, <http://www.nautilus-gmbh.com/vitrovex-deep-sea-housings>
- [16] Hoerner, S. F. *Fluid-dynamic drag*. USA: edited by author, 1965.
- [17] Roark's Formulas for Stress and Strain, 6th Edition by Warren C. Young 1989 McGraw-Hill.
- [18] Arnold Sharp, "Design curves for oceanographic pressure-resistant housings", Technical Memorandum 3-81, Woods Hole Oceanographic Institution, 1981.

Anexos

1. Código do microprocessador STM32 (main.c)

```

/* Includes -----*/
#include "main.h"
#include "string.h"

/* Missão -----*/
/* A variável QTD_OIL é a quantidade de impulsos do encoder, ou seja,
(500000 / 512)*0,3 = 293 cm3 = 29,3 cl.*/

#define QTD_OIL    500000

/* UART handler declaration */
UART_HandleTypeDef UartHandle;

/* Buffer used for transmission */
uint8_t aTxBuffer[] = "encher";

/* Buffer used for reception */
uint8_t aRxBuffer[RXBUFFERSIZE];

/* Private function prototypes -----*/
static void SystemClock_Config(void);
static void Error_Handler(void);
static uint16_t Buffercmp(uint8_t* pBuffer1, uint8_t* pBuffer2, uint16_t
BufferLength);
int cnt;

/*Função que conta os impulsos do encoder*/
void contador()
{
    cnt=0;
    BSP_LED_On(LED3);
    while (cnt <= QTD_OIL)
    {
        if (BSP_PB_GetState(BUTTON_KEY) == SET)
            cnt++;
        while(BSP_PB_GetState(BUTTON_KEY) == SET);
        while(BSP_PB_GetState(BUTTON_KEY) == RESET);
    }
    BSP_LED_Off(LED3);
}
/* Private functions -----*/

```

```
int main(void)
{
    /* STM32F4xx HAL library initialization:
     - Configure the Flash prefetch, instruction and Data caches
     - Configure the SysTick to generate an interrupt each 1 msec
     - Set NVIC Group Priority to 4
     - Global MSP (MCU Support Package) initialization
    */
    HAL_Init();

    /* Configure LED3, LED4, LED5 & LED6 */
    BSP_LED_Init(LED3);
    BSP_LED_Init(LED4);
    BSP_LED_Init(LED5);
    BSP_LED_Init(LED6);

    /* Configure the system clock to 168 Mhz */
    SystemClock_Config();

    /*##-1- Configure the UART peripheral
    #####*/
    /* Put the USART peripheral in the Asynchronous mode (UART Mode) */
    /* UART1 configured as follow:
     - Word Length = 8 Bits
     - Stop Bit = One Stop bit
     - Parity = None
     - BaudRate = 9600 baud
     - Hardware flow control disabled (RTS and CTS signals) */
    UartHandle.Instance = USARTx;
    UartHandle.Init.BaudRate = 9600;
    UartHandle.Init.WordLength = UART_WORDLENGTH_8B;
    UartHandle.Init.StopBits = UART_STOPBITS_1;
    UartHandle.Init.Parity = UART_PARITY_NONE;
    UartHandle.Init.HwFlowCtl = UART_HWCONTROL_NONE;
    UartHandle.Init.Mode = UART_MODE_TX_RX;

    if(HAL_UART_Init(&UartHandle) != HAL_OK)
    {
        Error_Handler();
    }

    while (1)
    {
        char aRxBuffer[]=" ";
        HAL_UART_Receive(&UartHandle, (uint8_t *)aRxBuffer, 3, 5000);
        if(!Buffercmp((uint8_t*)aTxBuffer,(uint8_t*)aRxBuffer,3))

        contador();
    }
}
```

```
// HAL_UART_Transmit(&UartHandle, (uint8_t*)aRxBuffer, TXBUFFERSIZE,
5000);
    }
}
```

```
/* The system Clock is configured as follow :
* System Clock source = PLL (HSE)
* SYSCLK(Hz) = 168000000
* HCLK(Hz) = 168000000
* AHB Prescaler = 1
* APB1 Prescaler = 4
* APB2 Prescaler = 2
* HSE Frequency(Hz) = 8000000
* PLL_M = 8
* PLL_N = 336
* PLL_P = 2
* PLL_Q = 7
* VDD(V) = 3.3
* Main regulator output voltage = Scale1 mode
* Flash Latency(WS) = 5
*/
```

```
static void SystemClock_Config(void)
```

```
{
    RCC_ClkInitTypeDef RCC_ClkInitStruct;
    RCC_OscInitTypeDef RCC_OscInitStruct;

    /* Enable Power Control clock */
    __PWR_CLK_ENABLE();

    /* The voltage scaling allows optimizing the power consumption when the device is
    clocked below the maximum system frequency, to update the voltage scaling value
    regarding system frequency refer to product datasheet. */

    __HAL_PWR_VOLTAGESCALING_CONFIG(PWR_REGULATOR_VOLTAGE_S
    CALE1);
```

```
    /* Enable HSE Oscillator and activate PLL with HSE as source */
    RCC_OscInitStruct.OscillatorType = RCC_OSCILLATORTYPE_HSE;
    RCC_OscInitStruct.HSEState = RCC_HSE_ON;
    RCC_OscInitStruct.PLL.PLLState = RCC_PLL_ON;
    RCC_OscInitStruct.PLL.PLLSource = RCC_PLLSOURCE_HSE;
    RCC_OscInitStruct.PLL.PLLM = 8;
    RCC_OscInitStruct.PLL.PLLN = 336;
    RCC_OscInitStruct.PLL.PLLP = RCC_PLLP_DIV2;
    RCC_OscInitStruct.PLL.PLLQ = 7;
    if(HAL_RCC_OscConfig(&RCC_OscInitStruct) != HAL_OK)
    {
        Error_Handler();
    }
}
```

```
/* Select PLL as system clock source and configure the HCLK, PCLK1 and PCLK2
   clocks dividers */
RCC_ClkInitStruct.ClockType = (RCC_CLOCKTYPE_SYSCLK |
RCC_CLOCKTYPE_HCLK | RCC_CLOCKTYPE_PCLK1 |
RCC_CLOCKTYPE_PCLK2);
RCC_ClkInitStruct.SYSCLKSource = RCC_SYSCLKSOURCE_PLLCLK;
RCC_ClkInitStruct.AHBCLKDivider = RCC_SYSCLK_DIV1;
RCC_ClkInitStruct.APB1CLKDivider = RCC_HCLK_DIV4;
RCC_ClkInitStruct.APB2CLKDivider = RCC_HCLK_DIV2;
if(HAL_RCC_ClockConfig(&RCC_ClkInitStruct, FLASH_LATENCY_5) !=
HAL_OK)
{
    Error_Handler();
}

/*Função que faz a comparação de dois Buffers */

static uint16_t Buffercmp(uint8_t* pBuffer1, uint8_t* pBuffer2, uint16_t BufferLength)
{
    while (BufferLength--)
    {
        if ((*pBuffer1) != *pBuffer2)
        {
            return BufferLength;
        }
        pBuffer1++;
        pBuffer2++;
    }

    return 0;
}
```

2. Código do computador central (main.c)

```
/*  
Simple example to open a maximum of 4 devices - write some data then read it back.  
Shows one method of using list devices also.  
Assumes the devices have a loopback connector on them and they also have a serial  
number.  
To build use the following gcc statement  
(assuming you have the d2xx library in the /usr/local/lib directory).  
gcc -o simple main.c -L. -lftd2xx -Wl,-rpath /usr/local/lib  
*/
```

```
#include <stdio.h> /* Standard input/output definitions */  
#include <stdlib.h>  
#include <string.h> /* String function definitions */  
#include <unistd.h> /* UNIX standard function definitions */  
#include <math.h>  

```

```
int mainfd=0; /* File descriptor */
//char character;
//char cnt=0;
char string1[] = "encher";
struct termios options;

mainfd = open_port();
fcntl(mainfd, F_SETFL, FNDELAY); /* Configure port reading */
/* Get the current options for the port */
tcgetattr(mainfd, &options);
cfsetispeed(&options, B9600); /* Set the baud rates to 9600 */
cfsetospeed(&options, B9600);
/* Enable the receiver and set local mode */
options.c_cflag |= (CLOCAL | CREAD);
options.c_cflag &= ~PARENB; /* Mask the character size to 8 bits, no parity */
options.c_cflag &= ~CSTOPB;
options.c_cflag &= ~CSIZE;
options.c_cflag |= CS8; /* Select 8 data bits */
options.c_cflag &= ~CRTSCTS; /* Disable hardware flow control */
/* Enable data to be processed as raw input */
options.c_lflag &= ~(ICANON | ECHO | ISIG);

/* Set the new options for the port */
tcsetattr(mainfd, TCSANOW, &options);

/***** ESCREVER *****/

write(mainfd, string1, strlen(string1));
sleep(1);

/* Close the serial port */
close(mainfd);
}

static void dumpBuffer(unsigned char *buffer, int elements)
{
    int j;

    printf(" [");
    for (j = 0; j < elements; j++)
    {
        if (j > 0)
            printf(", ");
        printf("0x%02X", (unsigned int)buffer[j]);
    }
    printf("]\n");
}

float expo(int nr)
{

```

```

float val=2;
int c;
if(nr==0)
    val=1;
if(nr>0)
    for(c=1;c<nr;c++)
        val=val*2;
if(nr<0)
    {
    val=0.5;
    nr=nr*(-1);
    for(c=1;c<nr;c++)
        val=val*0.5;
    }
return val;
}

float converter(unsigned char *buffer)
{
    int j,i;
    char valh[5];
    char valfh[20];
    char valfb[40];
    char val[10];
    int res1;
    int res2;
    float res;
//    printf("\n");
    for (j = 2; j < 6; j++)
    {
        sprintf(valh,"%02X", (unsigned int)buffer[j]);
        if(j==2)
            strcpy(valfh,valh);
        else
            strcat(valfh,valh);

//        printf("\nHEX=%s\n",valfh);
        for(i=0;i<2;i++)
        {
            //        printf("->%c<-",valh[i]);
            //val=0;
            switch (valh[i])
            {
                case '0':
                    { strcpy(val,"0000");break;}
                case '1':
                    { strcpy(val,"0001");break;}
                case '2':
                    { strcpy(val,"0010");break;}
                case '3':
                    { strcpy(val,"0011");break;}
            }
        }
    }
}

```

```

        case '4':
            { strcpy(val,"0100");break;}
        case '5':
            { strcpy(val,"0101");break;}
        case '6':
            { strcpy(val,"0110");break;}
        case '7':
            { strcpy(val,"0111");break;}
        case '8':
            { strcpy(val,"1000");break;}
        case '9':
            { strcpy(val,"1001");break;}
        case 'A':
            { strcpy(val,"1010");break;}
        case 'B':
            { strcpy(val,"1011");break;}
        case 'C':
            { strcpy(val,"1100");break;}
        case 'D':
            { strcpy(val,"1101");break;}
        case 'E':
            { strcpy(val,"1110");break;}
        case 'F':
            { strcpy(val,"1111");break;}
        default: {printf("\nErro!!!!\n"); break;}
    }
//      printf("%s\n",val);
//      if((j==2) & (i==0))
//          strcpy(valfb,val);
//      else  strcat(valfb,val);
//      }
//      //valt[k]=valt[k]+val;
//      //k++;
//  }
//  printf("\n");
//  printf("BIN=%s\n",valfb);
for(i=0;i<33;i++)
    valfb[i]=(int)valfb[i]-48;
res1=0;j=7;
for(i=1;i<9;i++)
    {res1=res1+(int)valfb[i]*(int)expo(j);j--;}
res2=0;j=22;
for(i=9;i<32;i++)
    {res2=res2+(int)valfb[i]*(int)expo(j);j--;}
//  res=expo(-3);
res=(1+(float)res2/8388608)*expo(res1-127);

//  printf("\nResultadoFinal=%0.5f Bar",res);
//  printf("%d\n %d\n %d\n %d\n",valt[0],valt[1],valt[2],valt[3]);
return res;

```



```

}

int main()
{
    unsigned char cBufWrite[BUF_SIZE_TX];
    unsigned char * pcBufRead = NULL;
    char * pcBufLD[MAX_DEVICES + 1];
    char cBufLD[MAX_DEVICES][64];
    DWORD dwRxSize = 0;
    DWORD dwBytesWritten, dwBytesRead;
    FT_STATUS ftStatus;
    FT_HANDLE ftHandle[MAX_DEVICES];
    int iNumDevs = 0;
    int i,T=1,x=0;
    int iDevicesOpen;
    float res;
    time_t tempo = time(0);
    struct tm *tlocal = localtime(&tempo);
    char output[128];
    FILE *log;
    log=fopen("log.txt","a+");
    fprintf(log,"\nRelatorio de missao:\n");
    fclose(log);

    int prof=0,oil=0;
    char ch;

    printf("\n-----\n");
    printf("| Software Veiculo Variação de Lastro |\n");
    printf("| |\n");
    printf("| Fernando Gomes 1080458 |\n");
    printf("-----\n");
do{
    printf("Profundidade da missão? [1 - 600] metros\n");
    scanf("%d",&prof);
    printf("Quantidade de óleo a variar? [1 - 70] cl\n");
    scanf("%d",&oil);
    printf("\n-----\n");
    printf("| Dados da Missão |\n");
    printf("| Profundidade: %3d metros |\n",prof);
    printf("| Oleo: %2d cl |\n",oil);
    printf("-----\n");
    printf("Os dados que pretende estão correctos? [S/N]\n");
    scanf(" %c",&ch);
}while((ch!='s')&&(ch!='S'));

    for(i = 0; i < MAX_DEVICES; i++) {
        pcBufLD[i] = cBufLD[i];
    }
    pcBufLD[MAX_DEVICES] = NULL;

```

```

ftStatus = FT_ListDevices(pcBufLD, &iNumDevs, FT_LIST_ALL |
FT_OPEN_BY_SERIAL_NUMBER);

if(ftStatus != FT_OK) {
    printf("Error: FT_ListDevices(%d)\n", (int)ftStatus);
    return 1;
}

for(i = 0; ( i <MAX_DEVICES) && ( i < iNumDevs) ); i++) {
    printf("Device %d Serial Number - %s\n", i, cBufLD[i]);
}

cBufWrite[0] = 0xfa;
cBufWrite[1] = 0x30;
cBufWrite[2] = 0x04;
cBufWrite[3] = 0x43;
// Inicializar:  fa 30 04 43

for(i = 0; ( i <MAX_DEVICES) && ( i < iNumDevs) ) ; i++) {
    /* Setup */
    if((ftStatus = FT_OpenEx(cBufLD[i],
FT_OPEN_BY_SERIAL_NUMBER, &ftHandle[i])) != FT_OK){
        /*
            This can fail if the ftdi_sio driver is loaded
            use lsmod to check this and rmmod ftdi_sio to remove
            also rmmod usbserial
        */
        printf("Error FT_OpenEx(%d), device %d\n", (int)ftStatus, i);
        printf("Use lsmod to check if ftdi_sio (and usbserial) are
present.\n");
        printf("If so, unload them using rmmod, as they conflict with
ftd2xx.\n");
        return 1;
    }

    printf("Opened device %s\n", cBufLD[i]);

    iDevicesOpen++;
    if((ftStatus = FT_SetBaudRate(ftHandle[i], 9600)) != FT_OK) {
        printf("Error FT_SetBaudRate(%d), cBufLD[i] = %s\n",
(int)ftStatus, cBufLD[i]);
        break;
    }
}
while(1)
{
    sleep(1);
    if(T==1)
        T=0;
    else T=1;
    //cBufWrite[0] = '\xfa';

```

```

        cBufWrite[0] = 0xfa;
        cBufWrite[1] = 0x30;
        cBufWrite[2] = 0x04;
        cBufWrite[3] = 0x43;
        // cBufWrite[4] = 0x67;
        // Inicializar: fa 30 04 43
        printf("...%c...",cBufWrite[0]);

//      printf("Calling FT_Write with this write-buffer:\n");
//      dumpBuffer(cBufWrite, BUF_SIZE_TIN);

        /* Write */
        ftStatus = FT_Write(ftHandle[i], cBufWrite, BUF_SIZE_TIN,
&dwBytesWritten);
        if (ftStatus != FT_OK) {
            printf("Error FT_Write(%d)\n", (int)ftStatus);
            break;
        }
        if (dwBytesWritten != (DWORD)BUF_SIZE_TIN) {
//      printf("FT_Write only wrote %d (of %d
bytes\n",(int)dwBytesWritten,BUF_SIZE_TX);
            break;
        }
        ///sleep(1);

        /* Read Inicio*/
        dwRxSize = 0;
        while ((dwRxSize < BUF_SIZE_RIN) && (ftStatus == FT_OK))
        {
            ftStatus = FT_GetQueueStatus(ftHandle[i], &dwRxSize);
        }
        if(ftStatus == FT_OK) {
            pcBufRead = realloc(pcBufRead, dwRxSize);

//      memset(pcBufRead, 0xFF, dwRxSize);
//      printf("Calling FT_Read with this read-buffer:\n");
//      dumpBuffer(pcBufRead, dwRxSize);
            ftStatus = FT_Read(ftHandle[i], pcBufRead, dwRxSize,
&dwBytesRead);

            if (ftStatus != FT_OK) {
                printf("Error FT_Read(%d)\n", (int)ftStatus);
                break;
            }
//      if (dwBytesRead != dwRxSize) {
//      printf("FT_Read only read %d (of %d) bytes\n",
//      (int)dwBytesRead,
//      (int)dwRxSize);
//      break;
//      }

```

```
//          printf("FT_Read read %d bytes. Read-buffer is
now:\n",(int)dwBytesRead);
//          dumpBuffer(pcBufRead, (int)dwBytesRead);
//          if (0 != memcmp(cBufWrite, pcBufRead, BUF_SIZE_RX)) {
//              printf("Error: read-buffer does not match write-buffer.\n");
//              break;
//          }
//          printf("Inicialização Concluída.\n");

////sleep(1);

/*Obter Pressão e Temperatura*/

if(T==1)
{
cBufWrite[0] = 0xfa;
cBufWrite[1] = 0x49;
cBufWrite[2] = 0x01;
cBufWrite[3] = 0xa1;
cBufWrite[4] = 0xa7;
//Pressão: fa 49 01 a1 a7
}
else
{
cBufWrite[0] = 0xfa;
cBufWrite[1] = 0x49;
cBufWrite[2] = 0x04;
cBufWrite[3] = 0xa2;
cBufWrite[4] = 0x67;
//Temperatura: fa 49 04 a2 67
}

//          printf("Calling FT_Write with this write-buffer:\n");
//          dumpBuffer(cBufWrite, BUF_SIZE_TX);

/* Write */
ftStatus = FT_Write(ftHandle[i], cBufWrite, BUF_SIZE_TX,
&dwBytesWritten);
if (ftStatus != FT_OK) {
printf("Error FT_Write(%d)\n", (int)ftStatus);
break;
}
if (dwBytesWritten != (DWORD)BUF_SIZE_TX) {
//          printf("FT_Write only wrote %d (of %d)
bytes\n",(int)dwBytesWritten,BUF_SIZE_TX);
break;
}
//sleep(1);
```

```

/* Read Pressão*/
dwRxSize = 0;
while ((dwRxSize < BUF_SIZE_RX) && (ftStatus == FT_OK))
{
    ftStatus = FT_GetQueueStatus(ftHandle[i], &dwRxSize);
}
if(ftStatus == FT_OK)
{
    pcBufRead = realloc(pcBufRead, dwRxSize);

    ftStatus = FT_Read(ftHandle[i], pcBufRead, dwRxSize,
&dwBytesRead);
    if (ftStatus != FT_OK)
        {
            printf("Error FT_Read(%d)\n", (int)ftStatus);
            break;
        }
//    printf("FT_Read read %d bytes. Read-buffer is
now:\n", (int)dwBytesRead);
//    dumpBuffer(pcBufRead, (int)dwBytesRead);
    log=fopen("log.txt", "a+");
    res=converter(pcBufRead);
    if(T==0){
        tempo = time(0);
        tlocal = localtime(&tempo);
        strftime(output,128,"%d/%m/%y %H:%M:%S",tlocal);
        fprintf(log,"\n%s Temperatura= %0.2f °C",output,res);
        printf("\n%s Temperatura= %0.2f °C",output,res);
    }
    if(T==1){
        tempo = time(0);
        tlocal = localtime(&tempo);
        strftime(output,128,"%d/%m/%y %H:%M:%S",tlocal);
        fprintf(log,"\n%s Pressão= %0.5f Bar",output,res);
        printf("\n%s Pressão= %0.5f Bar",output,res);
    }
    fclose(log);
    if(T==1)
        {
            if(res>P_MISSAO && x==0)
                {
                    x=1;
                    enviar_string();
                }
        }
    else {
        printf("Error FT_GetQueueStatus(%d)\n", (int)ftStatus);
    }
}

```

```
        }  
    }  
  
    iDevicesOpen = i;  
    /* Cleanup */  
    for(i = 0; i < iDevicesOpen; i++) {  
        fclose(log);  
        FT_Close(ftHandle[i]);  
        printf("Closed device %s\n", cBufLD[i]);  
    }  
  
    if(pcBufRead)  
        free(pcBufRead);  
    return 0;  
}
```