

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO



Sistema Inteligente de Posicionamento Acústico Subaquático

Rui Miguel Sousa Almeida

Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores

Orientador: Nuno Cruz (Eng.)

Co-orientador: Aníbal Matos (Prof. Dr.)

Junho de 2010

A Dissertação intitulada

“SISTEMA INTELIGENTE DE POSICIONAMENTO ACÚSTICO SUBAQUÁTICO”

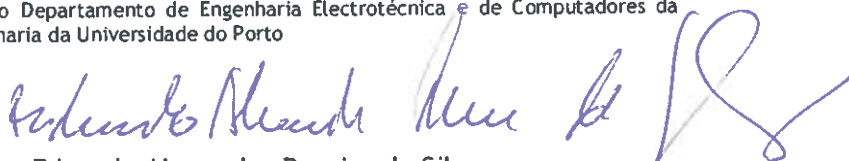
foi aprovada em provas realizadas em 15/Julho/2010

o júri



Presidente Professor Doutor António Paulo Gomes Mendes Moreira

Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores da
Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



Professor Doutor Eduardo Alexandre Pereira da Silva

Professor adjunto do Departamento de Engenharia Electrotécnica do Instituto Superior de
Engenharia do Porto



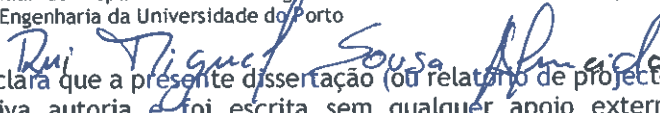
Professor Doutor Nuno Alexandre Lopes Moreira da Cruz

Assistente do Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores da Faculdade
de Engenharia da Universidade do Porto



Professor Doutor Aníbal Castilho Coimbra de Matos

Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores da
Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



O autor declara que a presente dissertação (ou relatório de projecto) é da
sua exclusiva autoria e foi escrita sem qualquer apoio externo não
explicitamente autorizado. Os resultados, ideias, parágrafos, ou outros
extractos tomados de ou inspirados em trabalhos de outros autores, e
demais referências bibliográficas usadas, são correctamente citados.

Autor - Rui Miguel Sousa Almeida

Resumo

Desde sempre os oceanos despertaram a curiosidade e o imaginário do homem. No entanto, nos dias de hoje conhecemos mais do vácuo do espaço que nos rodeia do que das suas profundezas. Mesmo assim já foi percorrido um longo caminho desde as primeiras expedições científicas de observação, até aos sistemas de monitorização e inspecção existentes actualmente. Hoje em dia existem vários tipos de abordagens para os sistemas de monitorização, que de uma forma geral podem ser divididos em dois grandes grupos, o dos observatórios permanentes, e o dos observatórios de curto a médio prazo. O âmbito deste trabalho insere-se no grupo dos observatórios de curto prazo, mais especificamente nos observatórios costeiros portáteis. Este tipo de observatórios compreende a utilização uma rede de diversos equipamentos de monitorização de fácil e rápida instalação, que poderão incluir desde veículos autónomos subaquáticos, de superfície e mesmo aéreos, a bóias de navegação equipadas de sensores. Uma das questões endereçadas neste trabalho é efectivamente a do posicionamento dos veículos submarinos, baseado em sinais acústicos.

Os oceanos são um meio extremamente complexo, que só nos últimos anos começou a ser verdadeiramente compreendido. A propagação de sinais acústicos neste meio, embora tendo sido identificada há já alguns séculos, continua a representar um problema para sistemas que dela dependem. Os mecanismos de transmissão dos sinais acústicos são extremamente complexos e estão dependentes de inúmeros factores. Para além disso, há que contar com a presença constante de ruído ambiente, extremamente variável, emitido por fontes naturais e artificiais.

Sistemas pensados para aplicação em diferentes cenários, devem portanto possuir a capacidade de se adaptarem a qualquer condição acústica do meio. Nesse sentido este trabalho começa por apresentar um algoritmo optimizado para calibração automática da rede de comunicações acústicas.

É também abordada a questão da autonomia deste tipo de observatórios costeiros. Por não possuírem qualquer ligação a terra, em muitas situações a duração de uma missão está limitada pelo tempo de vida das baterias do sistema. No decorrer do trabalho é dimensionado e implementado um sistema de baixo consumo energético capaz de suportar e gerir os equipamentos necessários.

Por último é projectado e construído um protótipo de uma sono-bóia, que respondendo aos requisitos mencionados, sirva de suporte físico ao sistema desenvolvido.

Abstract

The sea has always aroused the curiosity and imagination of man. Nonetheless, we know more from the vacuum of space surrounding us than from the deep ocean. Nevertheless, we have gone a long way since the first observation expeditions, to the monitoring and inspection systems of today. Nowadays, there are many approaches for monitoring systems, but in general they all can be divided in two main groups, those of permanent observatories, and those of short to medium term observatories. The scope of this project falls in the group of the short term observatories, more exactly in the portable coastal observatories group. Such observatories include the use of various equipments for quick and easy installation, which may range from autonomous underwater, surface and even aerial vehicles, to navigation buoys equipped with sensors. One of the questions addressed in this work is indeed underwater vehicle positioning, using acoustic signals.

Oceans are extremely complex environments, which only recently began to be truly understood. The propagation of acoustic signals in this medium, although it has been identified a few centuries ago, remains an important issue since there are many systems that rely on it. The mechanisms of acoustic signal transmissions are extremely complex and are dependent on many factors. In addition, variable background noise, emitted from natural and artificial sources, must be reckoned.

Systems designed for application in different scenarios, should therefore have the ability to adapt to any condition of the acoustic environment. In this sense, this paper begins by presenting an optimized algorithm for automatic calibration of the acoustic network.

The issue of system autonomy is also addressed. By not having any connection to land, in many situations the duration of a mission is limited by the systems battery life. During this project a low power system, capable of support and manage all the required equipments was designed and implemented.

Finally a prototype of an acoustic buoy, which fulfilling all the mentioned requirements serves as a support to the developed system, was designed and built.

Agradecimentos

Primeiramente, gostaria de agradecer ao meu orientador o Professor Nuno Cruz pela excelente orientação, por todos os conhecimentos transmitidos, tanto a nível teórico como prático e principalmente pelo entusiasmo com que me acompanhou ao longo deste projecto. Gostaria também de agradecer por todas as conversas de circunstância que tanto contribuíram para o meu enriquecimento pessoal e intelectual.

Agradeço também, ao Professor Aníbal Matos por uma excelente co-orientação, por todas as sugestões e esclarecimentos, e pela prontidão demonstrada para o auxílio em questões relacionadas com *software*.

A nível pessoal, gostaria de agradecer aos meus pais por todo o apoio demonstrado ao longo da minha vida, que me possibilitaram atingir a posição onde hoje me encontro.

Um forte agradecimento à minha namorada Paula, por todo o apoio e incentivo. Pela compreensão e paciência, principalmente nos momentos mais difíceis deste projecto.

Finalmente, gostaria de agradecer ao engenheiro Leandro Bento da empresa Martifer Solar, pela disponibilidade para construção dos módulos solares, sem os quais parte deste projecto não teria sido possível.

O Autor

*“The great tragedy of Science -
the slaying of a beautiful hypothesis by an ugly fact.”*

Thomas H. Huxley

Conteúdo

1	Introdução	1
1.1	Motivação	1
1.2	Objectivos	2
1.3	Organização do Documento	2
2	Revisão Bibliográfica	5
2.1	Acústica Subaquática	5
2.2	Observatórios Costeiros Portáteis	7
2.3	Sistema Acústico GIB	8
2.4	Sistema Acústico OceanSys	11
2.4.1	Hardware do Sistema Acústico	11
2.4.2	Calibração do Sistema Acústico	13
2.4.3	Sincronização de Relógios	16
3	Algoritmos de Calibração	17
3.1	Introdução	17
3.2	Algoritmo de Calibração com Sincronismo	17
3.2.1	Aplicação de Gestão da Calibração	24
3.2.2	Aplicação de Calibração	25
3.2.3	Sincronização Temporal	29
4	Sistema Computacional	31
4.1	Embedded PC	31
4.1.1	Configuração	34
4.2	Periféricos	36
4.2.1	Pen Wi-Fi	36
4.2.2	Módulos GPS	36
4.2.3	"Stack" de Hardware do Sistema de Acústica	38
4.3	Energia	40
5	Suporte Físico	43
5.1	Projecto	43
5.1.1	Restrições Mecânicas	45
5.2	Construção	47
5.2.1	Módulos de Flutuação	48
5.2.2	Módulo da Torre	50
5.2.3	Módulo da Antena	53
5.2.4	Módulo de Suporte do Transdutor, Sensores e Ancoragem	53

6	Resultados	55
6.1	Testes Laboratoriais	55
6.2	Testes no Terreno	56
7	Conclusões e Trabalho Futuro	57
7.1	Síntese do Trabalho Realizado	57
7.2	Propostas de Trabalho Futuro	58
	Referências	59

Lista de Figuras

2.1	Esquema de Princípio do Sistema GIB [1]	9
2.2	Bóia de Superfície do Sistema GIB-Plus	9
2.3	Bóia de Superfície do Sistema GIB-Lite	9
2.4	Veículo Autônomo Submarino MARES	12
2.5	Bóias de Navegação	12
2.6	Módulo de Recepção de Sinais Acústicos	12
2.7	Módulo de Emissão de Sinais Acústicos	12
2.8	Módulo de Controlo	12
2.9	"Stack" da Acústica	12
2.10	Esquema de Princípio da Electrónica de Detecção de um Sinal Acústico	13
2.11	Representação Gráfica do Algoritmo 1	14
3.1	Esquema de uma Rede Composta por uma Baseline e um AUV	18
3.2	Restrição à Emissão de Sinais nos Elementos y e z Associada à Emissão em x	21
3.3	Esquema de Evolução do Método das Bissecções	26
4.1	Esquema da Arquitectura do Sistema Computacional	32
4.2	TS-7260	33
4.3	Exemplo de Ficheiro de Configuração da Interface de Rede	35
4.4	Pen Wi-Fi	36
4.5	Módulo de GPS Ublox RCB-4H	37
4.6	Esquema da Conexão Rádio entre o PC e o Módulo de Acústica	38
4.7	Esquema de Conexão do PC ao Módulo de Acústica	38
4.8	Esquema de Conexão Futura Entre o PC e os Módulos de Emissão e Recepção	39
4.9	Esquema de Ligação dos Módulos Solares	41
4.10	Módulo Solar no Módulo da Torre	42
5.1	Esqueleto da torre	45
5.2	Módulo de Flutuação Primário	45
5.3	Módulo de Flutuação Secundário	45
5.4	Sistema de Fixação da Antena	46
5.5	Fechos de Bloqueio	47
5.6	Módulo de Flutuação Principal com Reforço Estrutural	48
5.7	Módulo de Flutuação Secundário com Reforço Estrutural	48
5.8	Esquema de Transição de Forças ao Longo do Sistema	49
5.9	Moldes dos Módulos de Flutuação	50
5.10	Módulo de Flutuação Secundário com Pinos de Retenção e Orifícios	51
5.11	Conjunto Durante o Processo de Aplicação da Resina	52
5.12	Base, Perfis em "L" e Peças de Encaixe do Módulo da Torre	52

5.13 Sistema de Sinalização Luminosa	53
5.14 Módulo de Suporte do Transdutor, Sensores e Ancoragem	54
6.1 Tanque de Ensaio Com Dois Transdutores Submersos	55

Lista de Tabelas

2.1	Algumas das Principais Características da "Stack" da Acústica	12
4.1	Descrição dos Jumpers	34
4.2	Dados de Configuração da Ligação Série	34

Abreviaturas e Símbolos

AUV	Autonomous Underwater Vehicle
ROV	Remotely Operated Vehicle
LBL	Long BaseLine
SBL	Short BaseLine
USBL	Ultra Short BaseLine
GPS	Global Positioning System
GIB	GPS Intelligent Buoy
US	United States
USDoD	United States Department of Defence
LAN	Local Area Network
NTP	Network Time Protocol
<i>ntpd</i>	Network Time Protocol Daemon
PPS	Pulse Per Second
<i>gpsd</i>	Global Positioning System Daemon
PC	Personal Computer
USB	Universal Serial Bus
MARES	Modular Autonomous Robot for Environmental Sampling
CNC	Computed Numerically Controlled

Capítulo 1

Introdução

1.1 Motivação

Este trabalho insere-se no âmbito de projectos do grupo de investigação de robótica submarina OceanSys, da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Mais especificamente na área de comunicações acústicas subaquáticas.

O uso de comunicações sem fio de baixo de água pode ser encontrado em diversas aplicações comerciais como exploração petrolífera, e científicas como a monitorização ambiental, mapeamento de fundos oceânicos e detecção de objectos. Tipicamente estas comunicações são estabelecidas através de sinais acústicos. Embora não sendo o único meio de comunicação mantêm-se o mais eficiente e fiável até ao momento. A utilização de sinais de rádio debaixo de água não se apresenta muito viável, pois estes apenas se propagam a longas distâncias se forem emitidos a baixas frequências (30Hz-300Hz), necessitando de grandes potências de emissão. Os sinais ópticos embora não sofrendo do problema de atenuação, são fortemente afectados pela refacção da luz na água, sendo necessários sistemas de alta precisão para apontar os feixes de laser. A descoberta da acústica subaquática remonta ao tempo de Leonardo Da Vinci, quando este terá descoberto a possibilidade de ouvir navios à distância através de um tubo emergido no oceano. Porém os maiores avanços nesta área só foram alcançados por altura da Primeira Guerra Mundial, para fins militares. No entanto a utilização de sinais acústicos em comunicações subaquáticas continua a apresentar alguns problemas relacionados com a grande variação das condições acústicas dos meios de operação. Estas variações estão fortemente relacionadas com características oceanográficas como temperatura, salinidade e correntes, que introduzem um elevado grau de incerteza no comportamento dos sinais acústicos emitidos [2] [3].

Há cerca de uma década que o grupo de investigação OceanSys trabalha com sistemas de emissão e recepção de sinais acústicos. Este sistemas que inicialmente surgiram como simples *transponders*, que apenas possibilitavam a alteração do nível de detecção de um sinal, rapidamente evoluíram para módulos de emissão e recepção geridos por módulos de controlo, capazes

de efectuar simples tarefas de emissão e resposta a detecções de sinais acústicos. Com a expansão das áreas de investigação, estes módulos passaram a integrar um sistema de posicionamento acústico de veículos autónomos submarinos para monitorização ambiental, baseado em faróis acústicos instalados em bóias ancoradas no cenário de operação. Desde sempre este sistema foi obrigado a lidar com a influência das condições ambientais na propagação dos sinais acústicos. Dessa forma, a possibilidade de variação do nível de detecção, inicialmente usado como compensação à distância entre dispositivos, passava agora a possibilitar o ajuste do nível de recepção dos vários canais, minimizando assim a influência do meio na rede acústica [4].

O trabalho aqui apresentado surgiu então como evolução natural a este sistema, tentando responder às crescentes necessidades desta área de aplicação. A sua realização foi então dividida em três componentes principais, desenvolvidas paralelamente. Elas são o desenvolvimento de um algoritmo baseado em sincronismo temporal que optimize o processo de calibração da rede acústica, o projecto e implementação de um sistema computacional de baixo consumo a integrar no sistema de bóias e o projecto e construção do protótipo de uma sono-bóia modular.

1.2 Objectivos

O principal objectivo deste trabalho era o desenvolvimento de um algoritmo de calibração automático da rede acústica. Pretende-se que este algoritmo seja executado sempre que se instala a rede acústica num novo local de operação de veículos submarinos, de modo a permitir uma análise exaustiva às condições acústicas no local e adaptar o funcionamento dessa rede em função dessas condições. Apesar de ser possível fazê-lo de uma forma manual, essa operação é relativamente demorada e requer a dedicação exclusiva de um operador, o que é extremamente difícil num ambiente operacional. A automatização desta tarefa permite acelerar o processo, assegurar a sua repetibilidade, prevenir erros humanos e gerar relatórios automáticos que permitam uma análise posterior mais detalhada.

Em segundo lugar, pretendia-se projectar e escolher os componentes de um sistema computacional, que seria integrado em cada uma das sono-bóias. Para além de interagir com o sistema acústico, o computador de bordo deveria ainda comunicar com outros sensores instalados na bóia e transmitir informação para um operador situado à distância, constituindo a base de um observatório portátil.

Finalmente, um objectivo adicional passava pela construção do protótipo de uma sono-bóia, que seria o suporte físico para o referido observatório portátil.

1.3 Organização do Documento

Este documento embora não seguindo inteiramente a ordem cronológica do desenvolvimento do projecto, tenta seguir uma ordem lógica e encadeada dos assuntos tratados.

Assim, no capítulo 2 são feitas algumas referências históricas do conceito base e feito um posicionamento do assunto abordado. É descrito um sistema disponível comercialmente, com algumas

características semelhantes às que se pretendia para o novo sistema. Também é apresentado o sistema até agora utilizado pelo grupo de investigação OceanSys. Aqui são descritos os principais componentes do seu sistema de monitorização ambiental, composto por duas bóias de navegação e um AUV, para além dos algoritmos utilizados para a calibração da rede acústica.

No capítulo 3, é descrita a proposta de um novo algoritmo de calibração automática das comunicações acústicas subaquáticas. São identificadas algumas limitações de um algoritmo automático actualmente utilizado pelo grupo de investigação e apresentadas as principais inovações. É efectuada a dedução matemática das equações que ditam o funcionamento do algoritmo e uma descrição do mesmo. São também apresentados dois métodos para a sincronização dos relógios dos nós da rede acústica.

No capítulo 4, são apresentados os principais requisitos do sistema computacional e as escolhas efectuadas. São descritos os principais passos de configuração e instalação dos diferentes dispositivos. São apresentadas algumas características chave que levaram à escolha dos componentes e pormenores da sua integração.

No capítulo 5, é descrito o projecto e construção do protótipo da sono-bóia modular. São descritos os principais passos e considerações iniciais, os requisitos e restrições definidas. Para além disso é apresentada a ferramenta de desenho utilizada, assim como métodos e técnicas de construção. É apresentada uma descrição pormenorizada das características e funcionalidades dos diferentes módulos.

No que a resultados diz respeito, no capítulo 6 são apresentados os resultados obtidos no decorrer de testes laboratoriais e no terreno. São apresentados resultados preliminares adquiridos num tanque laboratorial, que serão posteriormente confrontados com teste realizados num ambiente de operação real.

No capítulo 7, são feitas algumas considerações sobre o trabalho realizado, sendo dada alguma ênfase aos sistemas sobre quais será necessário realizar trabalho posterior. São apresentadas propostas para projectos futuros que poderão partir das bases deixadas pelo trabalho aqui exposto.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

2.1 Acústica Subaquática

"If you cause your ship to stop and place the head of a long tube in the water and place the outer extremity to your ear, you will hear ships at a great distance from you."

Esta terá sido a primeira observação científica da acústica subaquática. Foi escrita pelo cientista, inventor e artista italiano Leonardo Da Vinci em 1490. A técnica descrita foi usada até à Primeira Guerra Mundial, e fornecia uma forma simples de escutar o meio aquático. Porém não se apresentava muito fiável, em função da fraca transmissão do som do meio acústico para o meio aéreo, devido às suas diferentes propriedades acústicas, e pelo facto de ser impossível ao observador determinar a direcção do som.

Em 1827 foi realizada a primeira medição quantitativa da velocidade do som na água. Esta experiência foi levada a cabo pelo físico Suíço Daniel Colladon e pelo matemático Francês Charles Sturm, no Lago Geneva na Suíça. Foi medido o tempo decorrido entre um flash de luz e a captação do som produzido por um sino submerso, tendo sido determinada assim a velocidade do som na água com uma surpreendente exactidão. Alguns anos mais tarde o crescente interesse no fenómeno da "transdução" — conversão da electricidade em som e vice versa — levou a grandes avanços nesta área. Nomeadamente a descoberta da piezoelectricidade por Jacques e Pierre Curie em 1880, e o surgimento do microfone de carbono, que terá constituído a base para o primeiro hidrofone.

A água apresenta-se como um meio extremamente complexo para a propagação do som, juntamente com os seus limites inferior e superior causam diversos efeitos nas ondas sonoras que a atravessam. Uma onda sonora que viaje em meio aquático irá sofrer fenómenos de atraso, distorção e enfraquecimento. A magnitude destes fenómenos, pode de alguma forma ser quantificada

em termos de "perdas na transmissão". Esta pode ser descrita como o enfraquecimento do som entre dois quaisquer pontos. Se definirmos I_0 como a intensidade de um sinal num ponto de emissão e I_1 a intensidade de um ponto distante, a perda na transmissão será dada por,

$$PT = 10 \times \log \frac{I_0}{I_1} \text{ dB} \quad (2.1)$$

Qualitativamente, as perdas na transmissão podem ainda ser descritas como uma soma das perdas de propagação e das perdas por atenuação. As perdas de propagação representam o enfraquecimento da onda sonora à medida que esta se afasta da sua fonte. As perdas por atenuação incluem efeitos de absorção, espalhamento e fuga dos canais sonoros. Destes o fenómeno de absorção pode ser quantificado através do coeficiente logarítmico de absorção, dado pelo quociente entre as perdas de transmissão e as distâncias, r_1 e r_2 , à fonte emissora, de acordo com a expressão,

$$\alpha = \frac{10 \log I_2 - 10 \log I_1}{r_2 - r_1} \text{ dB/m} \quad (2.2)$$

Das equações 2.1 e 2.2 facilmente se retira que à medida que o som se propaga, as perdas vão aumentando.

Além dos fenómenos descritos anteriormente, que afectam directamente uma onda sonora emitida debaixo de água, é necessário considerar a interferência causada pelo ruído ambiente existente no meio. Este pode ser descrito como o ruído de fundo observado com um hidrofone não direccionado, que não é resultado do próprio hidrofone e da maneira como este está montado, ou devido a uma qualquer outra fonte identificável. O ruído ambiente pode ter origem em diversos fenómenos, sendo alguns deles, a variação da pressão hidrostática causada pelas ondas e marés, fenómenos sísmicos, rajadas de vento, ondas de superfície e navios. Estudos levados a cabo durante a segunda guerra mundial demonstraram uma forte relação entre o estado do mar ou a força do vento, e o ruído de fundo a frequências entre os 500 Hz e os 25 kHz. Outros estudos realizados em águas costeiras revelaram um aumento da intensidade do ruído de fundo em cerca de 7,2 dB por cada duplicação da velocidade do vento [5].

Outra fonte de ruído oceânico tem origem em sons biológicos emitidos por peixes, golfinhos e baleias. Mas há quase 50 anos que uma espécie de crustáceo tem merecido a atenção de investigadores, pela sua contribuição para este ruído de fundo. Trata-se do camarão *Alpheus heterochaelis* popularmente conhecido por "*snapping shrimp*" com cerca 2 a 5 cm, facilmente distinguível por possuir uma garra desproporcionalmente grande. Ao fechar esta garra com extrema rapidez, ele é capaz de criar um estalido com um nível sonoro elevado. Durante o fecho da garra é expelido um jacto de água a alta velocidade, que excede as condições de cavitação. Na realidade o estalido é emitido quando a bolha de cavitação colapsa, devido à estabilização do nível de pressão. Durante o colapso da bolha, ocorre também a emissão de um flash de luz, criado por um fenómeno semelhante ao da sonoluminescência. Os estalidos são altamente impulsivos com níveis sonoros pico-a-pico de cerca de 190 dB re 1 μ Pa a 1 metro, e emitidos com frequências que vão desde os 600 Hz até aos 250 kHz. Entender como o ruído causado por estes camarões influencia o ruído ambiente geral torna-se importante para sistemas de sonar e telemetria acústica [6] [7].

Em suma, poder-se-á concluir que tanto as perdas como o ruído ambiente, são altamente variáveis de local para local. E que estando a transmissão de sinais acústicos subaquáticos intimamente dependente destes factores, é necessário que um sistema baseado em acústica seja capaz de se adaptar às condições do meio. É então crucial, que este possua mecanismos de avaliação prévia das condições acústicas do cenário de operação, e ajuste dos seus parâmetros face a estas.

2.2 Observatórios Costeiros Portáteis

Longe vão os tempos em que o paradigma da observação oceânica consistia em expedições científicas de curta duração. Desde então esse conceito terá migrado para o de uma observação regular e sistemática, muito à semelhança da que actualmente é feita para atmosfera. Surgia então a necessidade da existência de métodos sustentáveis para efectuar a monitorização sistemática do meio aquático. Inicialmente a observação através de satélite permitiu a monitorização de parâmetros de vastas áreas de oceano, no entanto persistia a necessidade de medição no local das condições verificadas abaixo da superfície, não observáveis do espaço. Surgem então as primeiras abordagens, sobe a forma de observatórios costeiros permanentes. Este consistiam numa rede de sensores ancorados no fundo oceânico, conectados a terra via cabo, tornando-se assim possível a monitorização e avaliação, em tempo real, do meio subaquático. Um dos primeiros observatórios a ter surgido terá sido o *Long-term Ecosystem Observatory* situado nas águas costeiras de Nova Jersey (US) a 15 metros de profundidade, razão pela qual foi apelidado de *LEO15*. Mais recentemente, surgiram novos observatórios como o NEPTUNE e o laboratório subaquático VENUS (*Victoria Experimental Network Under Sea*) localizados no Canada, e o DONET (*Dense Oceanfloor Network System for Earthquakes and Tsunamis*), localizado no Japão [8] [9] [10] [11]. Porém continuava a existir a necessidade, da capacidade de monitorização de zonas que não eram cobertas por este tipo de observatórios. De possuir meios de resposta rápida a fenómenos com características temporais e de localização pontuais. Novas tecnologias eram então necessárias para colmatar estas necessidades de monitorização a curto e médio prazo.

Nas últimas décadas assistiu-se ao desenvolvimento, cada vez mais acentuado de veículos subaquáticos não tripulados como ROVs ou AUVs. Estes veículos apresentam-se como uma mais valia na exploração do meio subaquático, podendo ser usados em aplicações militares, científicas ou comerciais. Estando no entanto livres de qualquer conexão mecânica os AUVs apresentam uma clara vantagem, tornado-se numa ferramenta por excelência para a monitorização do meio aquático. O seu sucesso estava no entanto dependente da existência de sistemas robustos de navegação e posicionamento. Tornava-se portanto imperativo o desenvolvimento de sistemas capazes de responder a estas exigências. Os sistemas de navegação, que estão ligados à medição da posição linear e angular do veículo, não serão aprofundados nesta exposição, uma vez que este trabalho está intimamente ligado aos sistemas de posicionamento. Mas importa referir que estes dois sistemas estão fortemente ligados, sendo as suas informações cruzadas para se obter uma melhor estimativa da posição do veículo. Surgiram então algumas abordagens para colmatar este problema, dos quais se pode referir o método Long Baseline (LBL), ShortBaseline (SBL) e

Ultra-Short Baseline (USBL). Destes o que merecerá maior destaque será o LBL devido à sua capacidade de fornecer coordenadas absolutas precisas de forma constante. Este método usa uma rede de faróis acústicos posicionados no leito oceânico com posições GPS conhecidas. Um veículo submarino pode então calcular a sua posição ao medir a sua distância acústica a esses faróis. Esse cálculo é feito medindo o tempo decorrido entre o envio de um sinal acústico de interrogação e a recepção dos sinais acústicos de resposta dos faróis. A posição pode então ser calcula usando a triangulação dessas distâncias, juntamente com as coordenadas GPS dos faróis.

Com o miniaturização da tecnologia GPS assistiu-se ao surgimento de novos sistemas de posicionamento baseados em sono-bóias com receptores de GPS integrados. Livres das implicações logísticas da instalação de uma rede de faróis no leito oceânico, apresentaram-se como uma excelente alternativa aos métodos tradicionais. Mais importante, com a possibilidade de instalação de módulos de transmissão/recepção sem fios (Wi-Fi, Iridium, GSM, etc), surge uma forma de quebrar a barreira entre a água e o ar, tornando a monitorização remota uma realidade. A empresa ACSA terá sido a primeira a desenvolver um sistema de localização baseado em sono-bóias, denominado de "GPS Intelligent Buoy"(GIB) que será descrito na secção seguinte [12]. Actualmente o paradigma da monitorização aquática reside na existência de redes inteligentes de monitorização, fixas ou dinâmicas, compostas por elementos subaquáticos, de superfície e mesmo aéreos. Neste contexto os sistemas de posicionamento baseados em sono-bóias, continuando a sua linha de evolução, torna-se-ão parte integrante nestas redes, passando de simples faróis acústicos para plataformas inteligentes de sensores. Ou seja, podem constituir elementos fundamentais para os novos observatórios costeiros portáteis [13] [1] [14].

2.3 Sistema Acústico GIB

O sistema GIB surgiu da crescente necessidade de sistemas que permitissem a operação em meio subaquático de forma simples e com custos reduzidos. Mais especificamente, emergiu como resposta directa à necessidade de um sistema eficiente de posicionamento e navegação de veículos submarinos. Actualmente este sistema é comercializado pela empresa ACSA - *Underwater Systems* [1], sendo oferecidas duas versões principais, uma mais vocacionada para *tracking* de móveis subaquáticos e outra vocacionada para o seu posicionamento, para além de soluções à medida.

O princípio de funcionamento da versão de tracking, é baseado numa rede de bóias de superfície (fig 2.2 e 2.3) que mede o tempo de chegada de sinais acústicos enviados por um transmissor acústico montado num veículo submarino. A cada ciclo é enviado um sinal sincronizado com o tempo GPS e outro com um atraso proporcional à profundidade do veículo. Cada bóia mede então os tempos de chegada dos dois sinais e envia-os, via rádio, juntamente com a sua posição GPS para a unidade central de controlo. Assumindo um valor constante para a velocidade de propagação do som na água, a posição do veículo é calculada por triangulação das distâncias às sono-bóias. Sendo a profundidade dada pelo método descrito, torna-se apenas necessário um numero mínimo de duas bóias para o cálculo de uma solução X e Y.

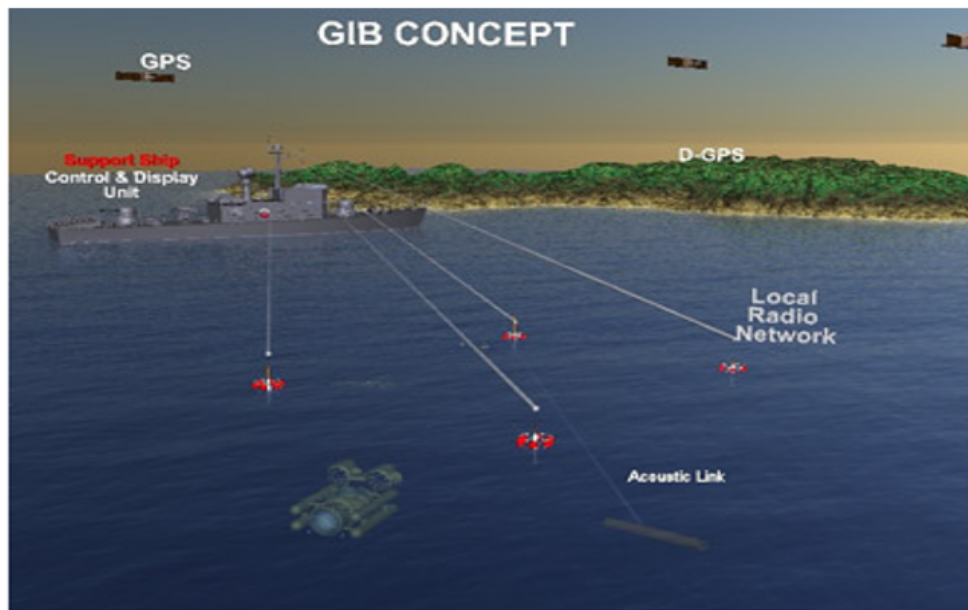


Figura 2.1: Esquema de Princípio do Sistema GIB [1]

Este método assenta no entanto numa transmissão ascendente da informação acústica, no qual o sistema de navegação do veículo está dependente de actualizações enviadas da camada superior via ligação acústica. A utilização deste sistema pressupõe então a utilização de um veículo supervisionado "Supervised Underwater Vehicle"(SUV) e não de um totalmente autónomo.



Figura 2.2: Bóia de Superfície do Sistema GIB-Plus



Figura 2.3: Bóia de Superfície do Sistema GIB-Lite

A versão de posicionamento é composta por um conjunto de pelo menos quatro faróis acústicos sincronizados, posicionados no fundo oceânico. A cada segundo, todos os faróis, enviam um

sinal acústico à mesma frequência usando uma técnica patenteada de Time Spectral Spread Codes (TSSC) que os permite diferenciar. Um número ilimitado de móveis pode ser colocado no espaço por cima dos faróis. Sendo conhecida a posição de cada farol, e assumida uma constante para a velocidade de propagação do som na água, estes móveis poderão calcular a sua posição a cada segundo.

2.4 Sistema Acústico OceanSys

Este trabalho insere-se no âmbito de projectos do grupo de investigação de robótica submarina OceanSys. Uma das áreas de interesse do grupo passa exactamente pelo uso de AUVs para missões de monitorização ambiental, usando técnicas de posicionamento baseada no método LBL através de sono-bóias (fig 2.5). A arquitectura do sistema de monitorização é composta pelo AUV MARES [15] (fig 2.4), uma *baseline* definida por bóias dotadas de um transdutor acústico e um sistema de emissão e recepção de sinais acústicos. O veículo MARES está dotado de um sistema de navegação baseado em dados de bússola, inclinómetros e sensor de pressão, fundidos com dados de posicionamento. A sua posição horizontal é calculada por um filtro de Kalman que combina dados de posição e direcção do veículo com medição de distâncias aos faróis acústicos juntamente com a odometria dos *thrusters* [16]. Os dados de posicionamento são obtidos ciclicamente, questionando cada uma das sono-bóias da *baseline* e medindo o tempo de chegada das suas respostas. O tempo de ciclo está no entanto dependente da distancia entre os elementos da rede. A comunicação entre o AUV e as sono-bóias é efectuada numa base de múltiplas frequências, atribuídas no início de cada missão. Assim sendo a cada bóia é atribuída uma frequência de interrogação e uma frequência de resposta. Ao AUV é ainda atribuída uma frequência extra que é utilizada em caso de emergência. A cada ciclo de actualização de posição o AUV envia um sinal acústico à frequência de interrogação da primeira bóia e mede o tempo que decorre até à recepção de um sinal à frequência de resposta. De igual modo interroga a segunda bóia e mede o tempo que decorre até à recepção da resposta. Sendo admitida uma constante para a velocidade de propagação do som na água e para o processamento da interrogação por parte das bóias, é calculada uma solução X e Y por triangulação das distâncias obtidas. O cálculo da profundidade é obtido recorrendo a um medidor de pressão localizado a bordo do AUV, obtendo assim o veículo uma estimativa X, Y e Z da sua posição. Qualquer uma das frequências de comunicação das bóias e AUV é programável, estando disponível uma banda de 8 frequências localizada entre os 20kHz e os 27kHz. Dados os diferentes cenários de operação, no início de cada missão torna-se necessário efectuar um procedimento de calibração, que envolve a verificação da qualidade de cada canal. Consistindo na determinação de um nível inferior no qual um sinal se confundirá com ruído, e um nível superior a partir do qual o sinal não será detectado.

Antes de descrever o algoritmo de calibração utilizado em maior pormenor importará compreender o funcionamento do hardware do sistema acústico.

2.4.1 Hardware do Sistema Acústico

Tanto o AUV MARES como o sistema de bóias estão equipados com transdutores acústicos e uma "stack"(fig 2.9) de hardware de processamento dos sinais. A "stack"é constituída por três módulos: um módulo de condicionamento e detecção de sinais recebidos (fig 2.6), um módulo de envio de sinais acústicos (fig 2.7) e um módulo de controlo (fig 2.8) responsável pelo processamento de um sinal de resposta a uma interrogação. Estão também disponíveis comunicações via porta série ou rádio com o exterior. Em modo autónomo o módulo de controlo recorre a um



Figura 2.4: Veículo Autônomo Submarino MARES

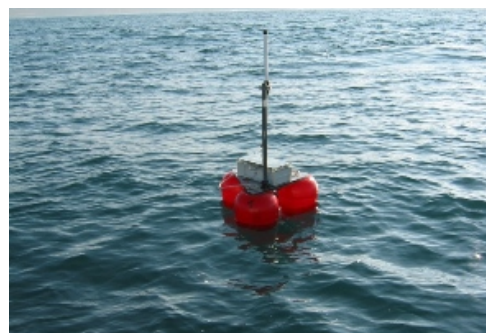


Figura 2.5: Bóias de Navegação

mapa de frequências de comunicação, carregado no início de uma missão para reconhecer um sinal de interrogação e processar a resposta adequada. Na tabela 2.1 são apresentadas algumas das principais características da "stack" da acústica.

Tabela 2.1: Algumas das Principais Características da "Stack" da Acústica

<i>Característica</i>	Valor
Potência máxima de emissão	400W
Taxa máxima de emissão de pings	cada 500ms
Taxa máxima de recepção de pings	N/A
Tempo de surdez após envio de ping acústico	100ms
Numero de frequências programáveis	8

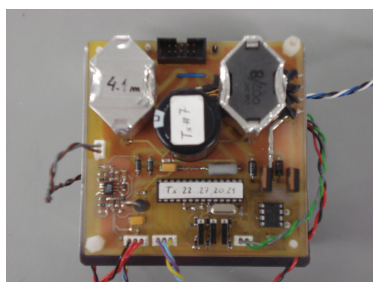


Figura 2.6: Módulo de Recepção de Sinais Acústicos

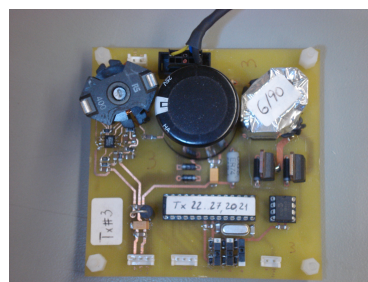


Figura 2.7: Módulo de Emissão de Sinais Acústicos



Figura 2.8: Módulo de Controlo

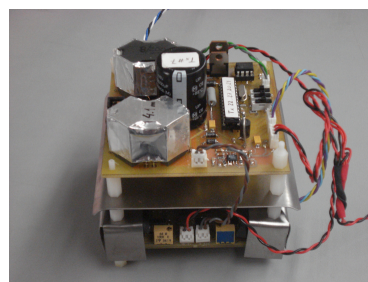


Figura 2.9: "Stack" da Acústica

A detecção de um sinal ocorre, sempre que este é captado pelo transdutor acústico. O sinal eléctrico gerado pelo transdutor é depois condicionado e comparado com um nível de referência, sendo gerado um sinal de detecção para o módulo de controlo. O condicionamento consiste no escalamento do nível de tensão do sinal gerado pelo transdutor, que é alimentado ao paralelo de 8 filtros passa banda afinados para as 8 frequências utilizadas. Um esquema desta arquitectura é apresentado na (fig 2.10). A "stack" pode ainda funcionar com um sistema de controlo externo, no qual o módulo de controlo passa a funcionar como mero interface entre os módulos de recepção e envio de sinais e o controlo externo. Este modo de funcionamento é utilizado durante a fase de calibração.

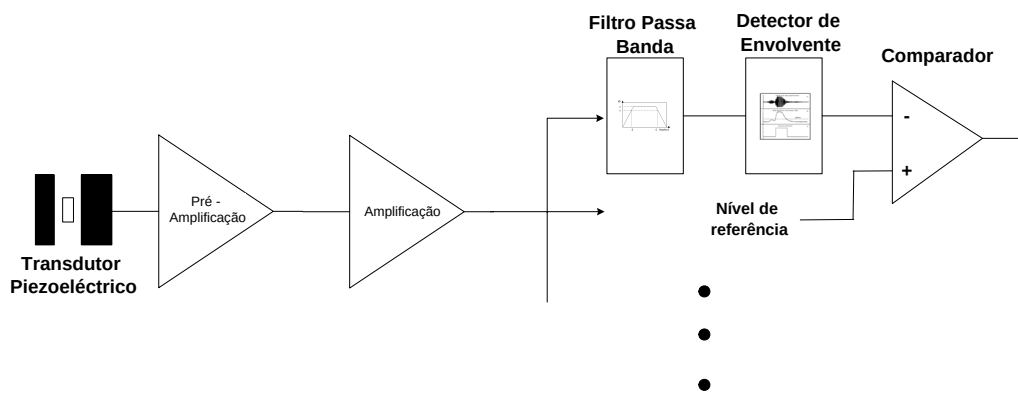


Figura 2.10: Esquema de Princípio da Electrónica de Detecção de um Sinal Acústico

Poderá perguntar-se, porquê utilizar este sistema e não um simples A/D associado a filtros digitais? A resposta reside na evolução deste sistema. As suas origens remontam a simples placas *transceiver*, que com o passar do tempo evoluíram para o actual sistema de três módulos. Não havendo, na altura do projecto do sistema de monitorização ambiental, qualquer requisito de processamento para as bóias de navegação, estas apenas foram dotadas do sistema de três módulos. Assim sendo, não havendo um sistema computacional, e possuindo um sistema perfeitamente funcional de detecção e resposta, o grupo optou pela sua continuação.

2.4.2 Calibração do Sistema Acústico

Desde a criação deste sistema de monitorização que a calibração da rede de comunicações acústicas se apresentou como um procedimento incontornável. Mais importante do que isso, constituía uma parte substancial do tempo de execução de uma missão, sendo por isso considerada um dos pontos fracos deste sistema. Inicialmente esta calibração era ainda mais problemática, sendo que era efectuada manualmente. Por esta altura importará definir o que é efectivamente a calibração do sistema de comunicações acústicas. Como já referido o sistema é utilizado em variados

cenários de operação, que podem apresentar diferentes propriedades acústicas e fontes de ruído. Importa assim adequar os canais de comunicação ao meio em questão, escolhendo as frequências com melhor qualidade. O nível de qualidade de uma frequência é atribuído medindo a relação sinal ruído para essa frequência. Para cada frequência é então medido o nível de ruído variando o nível de referência do módulo de condicionamento e detecção referido em 2.4.1 até à ocorrência de uma detecção. De salientar que esta parte da calibração é efectuada sem qualquer emissão de sinais acústicos. Em seguida é medido o nível máximo de detecção para cada frequência. Para isso, o nível de referência do módulo de condicionamento e detecção é variado desde o seu nível máximo até a ocorrência de uma detecção. A variação do nível é coordenada com a emissão de sinais acústicos enviados por um segundo elemento da rede. A calibração consiste então na determinação, para cada frequência de cada dispositivo da rede, de um nível de referência inferior, referente ao nível de ruído, e de um nível superior, referente ao nível máximo do sinal.

Numa versão mais recente, este procedimento passou a ser efectuado automaticamente, consumindo muito menos tempo de missão. Para além disso passa a ser possível uma verificação exhaustiva das características acústicas da rede. O factor de repetibilidade que a automatização deste procedimento introduz, acaba também por se revelar importante para a geração de *reports*, que possibilitam a análise das condições habituais de trabalho e futuras optimizações do procedimento baseadas nesses valores. À semelhança da descrição feita anteriormente também este procedimento automático é composto por duas etapas. Numa primeira descrita pelo algoritmo 1, e na figura 2.11 é feita a detecção dos níveis de ruído de forma paralela para todas as frequências de cada elemento da rede. Na segunda descrita pelo algoritmo 2 é efectuada a detecção do nível máximo do sinal a cada frequência. Este algoritmo percorre cada uma das frequências de cada um dos elementos da rede de forma individual.

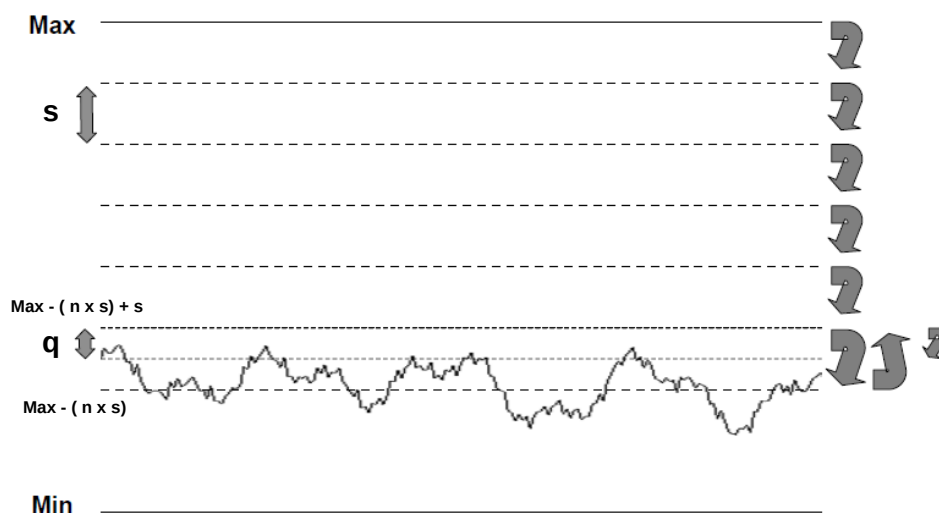


Figura 2.11: Representação Gráfica do Algoritmo 1

Algorithm 1 Calibração Automática do Nível de Ruído

```

1: Início da detecção dos níveis de ruído
2: for all Bóias do
3:   Níveis de detecção colocados no máximo (Max)
4:   Decremento dos níveis com degrau s até ocorrer detecção ou nível igual mínimo
5:   if Detecção then
6:     Nível incrementado para  $Max-(n \times s) + s$ , sendo n o número de degraus até ao momento

7:     Decremento do nível com degrau q < s até ultrapassar  $Max-(n \times s)$ 
8:     if Detecção then
9:       Nível Encontrado
10:    end if
11:  else
12:    Nível de ruído não encontrado
13:    Repete pontos 3 a 9 uma vez mais para confirmação
14:  end if
15: end for

```

Algorithm 2 Calibração Automática do Nível Máximo do Sinal

```

1: Início da detecção do nível máximo do sinal
2: Seleccionado um par emissor receptor B1 e B2
3: for all Pares B1 e B2 do
4:   for all Frequências do
5:     Nível de detecção da frequência i do receptor B2 colocado no nível máximo (Max)
6:     Enviado ping acústico da entidade B1
7:     Decremento do nível com passo s até ocorrer detecção ou nível no mínimo.
8:     if Primeira Detecção then
9:       if Nível no máximo then
10:        Decremento do nível com degrau q < s até ultrapassar  $Max-(n \times s)$ 
11:      end if
12:      if Nível menor que o máximo then
13:        Nível incrementado para  $Max-(n \times s)+s$ 
14:        Passo s passa a q, com q < s
15:        Decremento do nível com degrau q < s até ultrapassar  $Max-(n \times s)$ 
16:      end if
17:    end if
18:    if Nova Detecção then
19:      Nível detectado
20:    end if
21:  end for
22: end for
23: Terminou

```

2.4.3 Sincronização de Relógios

Independentemente das suas diferenças ou grau de complexidade, todos os sistemas anteriormente descritos possuem sistemas que de alguma forma necessitam de sincronização entre relógios. Seja para coordenação de eventos, ou para simples etiquetagem de dados existe sempre a necessidade de algum tipo de sincronismo temporal, especialmente em sistemas distribuídos. A sincronização de relógios tem sido uma área alvo de estudo desde há já bastantes anos.

Um bom exemplo deste tipo de protocolos, e talvez o mais conhecido, será o protocolo NTP [17], usado para a sincronização de redes por cabo. Usa uma hierarquia de fontes de relógio, chamadas *stratum*, que são organizadas segundo o nível de precisão e nível de confiança. Embora este seja um método robusto e confiável, para o uso em sistema de redes por cabo, começa a demonstrar algumas fraquezas quando aplicado a redes sem fios.

Como resultado do grande desenvolvimento na área das redes de sensores em geral, surgiram diversas propostas de novos protocolos de sincronização de relógios para este tipo de sistemas [18] [19] [20] [21] [22]. De um modo geral podem ser divididos em duas categorias, os de sincronização global e os de sincronização local de relógios. A sincronização global e local pode ser feita através de *single-hop* ou *multi-hop* (ad-hoc). Uma sincronização global ou local através de *multi-hop* estabelece um caminho através de múltiplos nós que podem sincronizar os seus relógios por um nó fonte ou então entre eles difundindo as informações de sincronização localmente.

Actualmente existem diversas propostas de protocolos de sincronização, aplicáveis aos mais diversos tipos de sistemas. Tornando-se assim apenas necessário encontrar a solução que melhor se enquadra nos requisitos definidos.

Capítulo 3

Algoritmos de Calibração

3.1 Introdução

Como foi dito na secção 2.4.2 do capítulo 2, a calibração da rede de comunicações acústicas do sistema OceanSys é actualmente efectuada de forma automática. No entanto, ela é feita de forma sequencial, percorrendo uma após a outra todas as frequências de cada um dos elementos da rede. Se tomarmos o simples exemplo de uma rede composta por uma *baseline* definida pelas bóias B1 e B2, e um AUV, estando todos os elementos igualmente distanciados entre si por 3 quilómetros (fig 3.1). Iriam ser gastos um mínimo de 2 segundos entre cada ciclo de execução do algoritmo 2. Assumindo que mesmo numa execução sem falhas, serão necessárias algumas dezenas de iterações, este processo continua a representar uma parte apreciável do tempo de uma missão. Para além disso o módulo de acústica apresenta a possibilidade de emissão de 1 *ping* a cada 500ms, que está claramente a ser desaproveitada. Neste capítulo irá ser apresentado um novo algoritmo que visa a optimização do processo de calibração, recorrendo a métodos iterativos de primeira ordem e sincronismo entre os elementos da rede acústica. Serão também apresentados dois métodos de sincronização dos relógios internos dos elementos da rede.

3.2 Algoritmo de Calibração com Sincronismo

O algoritmo até agora utilizado possuía uma mecânica de evolução baseada em eventos. A recepção ou o timeout da recepção de um sinal, desencadeia a iteração seguinte. Mais ainda, num qualquer momento do processo apenas uma frequência de um elemento se encontra a ser calibrada. Dessa forma, o tempo de calibração da rede acústica está fortemente dependente do seu número de elementos e da distancia entre estes. Tendo isto em mente, e tomando novamente o exemplo anterior, poder-se-à questionar. Porque não, ter mais do que um elemento a ser calibrado a cada momento? Mais ainda, porque não enviar um novo sinal antes mesmo de o anterior ter chegado ao destino? Pegando nas características apresentadas na tabela 2.1, rapidamente se verifica que seria

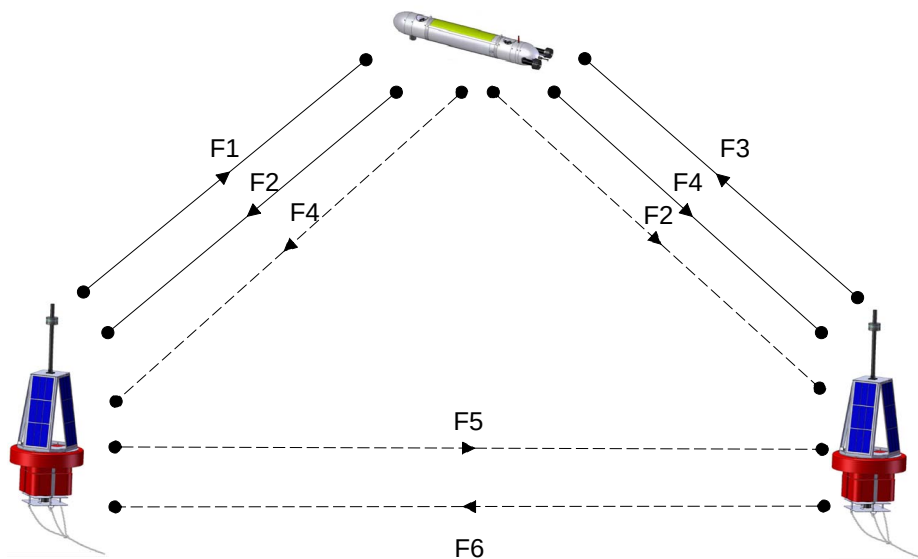


Figura 3.1: Esquema de uma Rede Composta por uma Baseline e um AUV

possível enviar mais quatro sinais durante o tempo de viagem do primeiro. Além disso, durante a calibração de uma frequência outras 7 permanecem livres. Não existe nenhum impedimento para que ao mesmo tempo um outro par de elementos utilize uma outra frequência. São assim introduzidos dois novos conceitos ao algoritmo anterior:

- Mais do que dois elementos podem estar activos simultâneamente
- É possível enviar vários sinais mesmo antes de o primeiro atingir o destino

Um dos requisitos para o bom funcionamento da rede é que as frequências atribuídas a um elemento sejam correctamente detectadas por qualquer um dos outros elementos da rede. É então necessário determinar o nível de recepção de uma frequência emitida por um elemento em todos os outros. No exemplo dado, para verificar o nível de recepção das frequências da bóia B1 em qualquer um dos outros elementos, o algoritmo anterior irá proceder da seguinte forma:

1. Emparelhar os elementos B1 com B2.
2. Verificar os níveis de recepção de B1 em B2.
3. Emparelhar B1 com o AUV.
4. Verificar os níveis de recepção de B1 no AUV.

Quando um sinal acústico é emitido, este propaga-se sobre a forma de uma onda mecânica à frequência emitida, em todas as direcções. Assim quando um sinal é emitido pelo transdutor

acústico de um dos elementos da rede, este vai-se propagar em todas as direcções e eventualmente irá atingir todos os elementos dessa mesma rede. Dessa forma quando B1 envia o primeiro sinal para B2, este irá eventualmente chegar ao AUV. Se o AUV souber que esse sinal provém de B1, porque não utiliza-lo para verificar o nível de recepção. Desta forma as duas iterações necessárias para a calibração dos sinais de B1 ficaram reduzidas a apenas uma. O algoritmo evolui assim de um conceito de calibração de um para um, para um conceito de 1 para n.

Se a este conceito de calibração 1 para n, juntarmos o conceito anteriormente definido de que vários elementos podem estar activos simultâneamente obtemos um novo conceito, extremamente apelativo, de calibração de n para n. Ou seja, em qualquer instante do algoritmo de calibração todos os elementos da rede estão activos. Além disso, poderão ainda existir diversos sinais em viagem provenientes do mesmo elemento.

Se aplicarmos estes conceitos ao exemplo a ser utilizado, facilmente se verificam as melhorias alcançadas. Cada emissão de sinal acústico destina-se agora aos restantes dois elementos, ficando assim diminuídas para metade o número de iterações necessárias. Enviando múltiplos sinais, antes de o primeiro ter atingido o seu alvo, ao fim de quatro segundos mais três terão sido recebidos pelos restantes elementos da rede. Em suma, neste exemplo, introduziriam-se melhorias da ordem de metade das iterações necessárias, com um período de execução até duas vezes e meia menor.

Porém nesta fase começam a surgir questões relacionadas com problemas temporais. Por exemplo, como garantir que não ocorram colisões entre sinais? Como garantir que um elemento não recebe um sinal durante o período de surdez que segue uma emissão? Estas questões levantam o véu sobre a real problemática deste assunto. Pois começa a surgir a necessidade de sincronismo temporal e comunicação entre os diferentes elementos da rede para que sejam respeitadas as condições necessárias ao bom funcionamento do sistema.

Por esta altura importará relembrar as características e limitações do hardware utilizado, listadas anteriormente na tabela 2.1 do capítulo 2, e definir algumas variáveis, que nos irão permitir estabelecer equações que ditarão o funcionamento do sistema. Assim teremos,

- t_c - Taxa máxima de envio de 500ms.
- t_s - Período de surdez após emissão de sinal acústico de 100ms.
- T_{x_k} - Envio de sinal acústico pelo elemento k.
- $R_{x_{k \leftarrow m}}$ - Recepção de sinal acústico proveniente de m em k.
- $t_{d_{k/m}}$ - Tempo de viagem de um sinal acústico entre o elemento k e o elemento m, com $t_{d_{k/m}} = t_{d_{m/k}}$
- t_p - Tempo de espera para garantir a alteração dos potenciómetros digitais que regulam o nível

Prosseguindo com o exemplo da rede composta pelo AUV MARES e uma *baseline* definida por duas sono-bóias, podemos descrever as relações entre emissão e recepção de sinais acústicos dos vários elementos como:

O envio de um sinal acústico da bóia 1, T_{xB1}

irá originar uma recepção na bóia 2, dada por,

$$R_{xB2 \leftarrow B1} = T_{xB1} + t_{dB1/B2} \quad (3.1)$$

Para que a recepção do sinal não ocorra durante o período de surdez ou colida com a emissão de um sinal de B2,

$$T_{xB2} < R_{xB2 \leftarrow B1} - t_s \quad \vee \quad T_{xB2} > R_{xB2 \leftarrow B1} \quad (3.2)$$

Da mesma forma, a recepção do mesmo sinal enviado por B1 no AUV será dado por,

$$R_{xAUV \leftarrow B1} = T_{xB1} + t_{dB1/AUV} \quad (3.3)$$

e o envio de um sinal pelo AUV terá que respeitar,

$$T_{xAUV} < R_{xAUV \leftarrow B1} - t_s \quad \vee \quad T_{xAUV} > R_{xAUV \leftarrow B1} \quad (3.4)$$

Na figura 3.2 pode-se ver um exemplo em que a emissão de sinais dos elementos y e z é condicionada pelo facto de estarem a aguardar a recepção do sinal proveniente do elemento x. Note que esta indisponibilidade (a sombreado) é proporcional ao tempo de surdez.

De igual modo, para as restantes emissões de sinal acústico,

T_{xB2}

$$R_{xB1 \leftarrow B2} = T_{xB2} + t_{dB1/B2} \quad (3.5)$$

$$T_{xB1} < R_{xB1 \leftarrow B2} - t_s \quad \vee \quad T_{xB1} > R_{xB1 \leftarrow B2} \quad (3.6)$$

$$R_{xAUV \leftarrow B2} = T_{xB2} + t_{dB2/AUV} \quad (3.7)$$

$$T_{xAUV} < R_{xAUV \leftarrow B2} - t_s \quad \vee \quad T_{xAUV} > R_{xAUV \leftarrow B2} \quad (3.8)$$

T_{xAUV}

$$R_{xB1 \leftarrow AUV} = T_{xAUV} + t_{dB1/AUV} \quad (3.9)$$

$$T_{xB1} < R_{xB1 \leftarrow AUV} - t_s \quad \vee \quad T_{xB1} > R_{xB1 \leftarrow AUV} \quad (3.10)$$

$$R_{xB2 \leftarrow AUV} = T_{xAUV} + t_{dB2/AUV} \quad (3.11)$$

$$T_{xB2} < R_{xB2 \leftarrow AUV} - t_s \quad \vee \quad T_{xB2} > R_{xB2 \leftarrow AUV} \quad (3.12)$$

Reorganizando as equação anteriores rapidamente se obtêm restrições para os tempos de emissão de sinais acústicos.

$$T_{xB1} < T_{xB2} + t_{dB1/B2} - t_s \quad \vee \quad T_{xB1} > T_{xB2} + t_{dB1/B2} \quad (3.13)$$

$$T_{xB1} < T_{xAUV} + t_{dB1/AUV} - t_s \quad \vee \quad T_{xB1} > T_{xAUV} + t_{dB1/AUV} \quad (3.14)$$

3.19. Porém este estado inicial não nos garante que a evolução temporal do sistema será ótima.

Para encontrar uma solução para os instantes de início de emissão de sinais acústicos em cada um dos elementos da rede, admita-se uma rede acústica composta por três elementos, com quaisquer $t_{d_{m/n}}$ entre eles. Atribua-se x, y e z, tal que $t_{d_{x/y}} \geq t_{d_{x/z}} \geq t_{d_{y/z}}$. Admita-se também que todos eles estão sincronizados com o mesmo referencial de tempo, e defina-se um instante inicial t_0 nesse referencial. Nestas condições pretende-se então determinar t_{x_0} , t_{y_0} e t_{z_0} , onde t_{k_0} corresponde ao instante de início da emissão de sinais acústicos no elemento k.

Numa tentativa de minimizar o tempo global de execução do algoritmo de calibração, optou-se por um esquema de atribuição de prioridades com base nas distâncias entre os dispositivos. Deste modo, $t_{z_0} \geq t_{y_0} \geq t_{x_0} \geq t_0$.

Se fizermos $t_{x_0} = t_0$, e pegando na equação 3.19 vamos ter que,

$$t_{x_0} = t_0 \quad (3.20)$$

$$t_0 \leq t_{y_0} < \min(t_0 + t_{d_{x/y}}, t_{z_0} + t_{d_{y/z}}) - t_s \quad \vee \quad t_{y_0} > (t_0 + t_{d_{x/y}}) \quad \vee \quad t_{y_0} > (t_{z_0} + t_{d_{y/z}}) \quad (3.21)$$

$$t_0 \leq t_{z_0} < \min(t_0 + t_{d_{x/z}}, t_{y_0} + t_{d_{y/z}}) - t_s \quad \vee \quad t_{z_0} > (t_0 + t_{d_{x/z}}) \quad \vee \quad t_{z_0} > (t_{y_0} + t_{d_{y/z}}) \quad (3.22)$$

Nesta fase restringimos o instante de emissão sinal acústico inicial de todos os elementos da rede. Porém não é contemplada a interferência da emissão do sinal inicial de um elemento nas emissões seguintes dos restantes. A questão que agora se coloca é, qual o instante de emissão do sinal acústico seguinte? E a resposta poderá estar nas características da "stack" de acústica. Se for possível que cada elemento emita um sinal à sua taxa máxima de emissão, a partir de um instante inicial, então essa será a melhor situação possível.

Se definirmos então que $t_{x_1} = t_{x_0} + t_c$, com $t_{x_0} = t_0$ estaremos a introduzir novas restrições a 3.21 e 3.22. Senão vejamos,

Com $t_{x_1} = t_0 + t_c$, t_{y_0} e t_{z_0} passam a estar restritos a,

$$t_{y_0} + t_{d_{x/y}} < t_{x_1} - t_s \quad \vee \quad t_{y_0} + t_{d_{x/y}} > t_{x_1} \quad (3.23)$$

$$t_{z_0} + t_{d_{x/z}} < t_{x_1} - t_s \quad \vee \quad t_{z_0} + t_{d_{x/z}} > t_{x_1} \quad (3.24)$$

Reescrevendo,

$$t_{x_1} - t_{d_{x/y}} < t_{y_0} < t_{x_1} - t_s - t_{d_{x/y}} \quad (3.25)$$

$$t_{x_1} - t_{d_{x/z}} < t_{z_0} < t_{x_1} - t_s - t_{d_{x/z}} \quad (3.26)$$

Se da mesma forma definirmos $t_{y1} = t_{y0} + t_c$, obtemos mais uma restrição para t_{z0} .

$$t_{z0} + t_{d_{y/z}} < t_{y1} - t_s \quad \vee \quad t_{z0} + t_{d_{y/z}} > t_{y1} \quad (3.27)$$

As equações 3.25 a 3.27 não são, no entanto, válidas para $t_{d_{n/m}} > t_c$. Ou seja, se o tempo de viagem de um sinal acústico de m para n, for superior ao tempo de carga. Nesse caso estas equações não serão compatíveis com as equações 3.21 a 3.22, pois $t_{m0} < t_0$. Deverão ser então reescritas como,

$$\left(\text{int}\left(\frac{t_{d_{x/y}}}{t_c}\right) + 1\right) \times t_c - t_{d_{x/y}} < t_{y0} < \left(\text{int}\left(\frac{t_{d_{x/y}}}{t_c}\right) + 1\right) \times t_c - t_s - t_{d_{x/y}} \quad (3.28)$$

$$\left(\text{int}\left(\frac{t_{d_{x/z}}}{t_c}\right) + 1\right) \times t_c - t_{d_{x/z}} < t_{z0} < \left(\text{int}\left(\frac{t_{d_{x/z}}}{t_c}\right) + 1\right) \times t_c - t_s - t_{d_{x/z}} \quad (3.29)$$

$$\left(\text{int}\left(\frac{t_{d_{y/z}}}{t_c}\right) + 1\right) \times t_c - t_{d_{y/z}} < t_{z0} < \left(\text{int}\left(\frac{t_{d_{y/z}}}{t_c}\right) + 1\right) \times t_c - t_s - t_{d_{y/z}} \quad (3.30)$$

Em que $\text{int}\left(\frac{t_{d_{k/m}}}{t_c}\right) + 1$ representa a primeira emissão de sinal acústico de k, que será afectada pela emissão de um sinal acústico por m.

Com estas restrições, estamos agora em condições para produzir o algoritmo 3 que nos determinará o instante inicial para cada elemento da rede que nos garanta o menor tempo de execução global. Para simplicidade da descrição do algoritmo defina-se,

$$t_0 \leq t_{k0} < \min(t_0 + t_{d_{k/m}}) - t_s \quad \vee \quad t_{k0} > (t_0 + t_{d_{k/m}}) \quad (3.31)$$

como restrição de tipo 1 e,

$$\left(\text{int}\left(\frac{t_{d_{k/m}}}{t_c}\right) + 1\right) \times t_c - t_{d_{k/m}} < t_{k0} < \left(\text{int}\left(\frac{t_{d_{k/m}}}{t_c}\right) + 1\right) \times t_c - t_s - t_{d_{k/m}} \quad (3.32)$$

como restrição de tipo 2.

Este algoritmo está integrado numa aplicação de alto nível que para além disto, é também responsável pela alocação de frequências de emissão para cada elemento e pela gestão do estado de calibração dessas mesmas frequências.

O algoritmo de calibração em si é composto pela aplicação global de alto nível descrita, e por uma aplicação local de baixo nível, a correr em cada um dos elementos da rede, responsável pela emissão de sinais e pela detecção dos sinais acústicos enviados pelos restantes elementos da rede. Em seguida serão apresentados, o algoritmo 4 que é executado na aplicação de alto nível, e os algoritmos 6, 7 e 8 executados na aplicação de emissão e recepção de sinais acústicos.

Algorithm 3 Determinação dos Instantes Iniciais de Emissão para cada Elemento

```

1: Calcular das distancias entre elementos, baseado nas suas posições GPS
2: Ordenação dos elementos de  $\max(\sum d_{k/n})$  para  $\min(\sum d_{k_n})$ , em que  $\sum d_{k_n}$  é o somatório das
   distancias de um elemento a todos os outros
3: for all Elementos excepto  $t_{x_0}$  do
4:   Determinar a restrição de tipo 1
5: end for
6: for all Elementos excepto  $t_{x_0}$  do
7:   Determinar a restrição de tipo 2
8: end for
9: for all Elementos excepto  $t_{x_0}$  do
10:  Determinar primeiro intervalo livre que se repita a cada  $t_c$ 
11: end for
12: Terminou

```

3.2.1 Aplicação de Gestão da Calibração

O algoritmo de alto nível não apresenta grande complexidade, pois apenas recebe pedidos de frequências por parte das aplicações de baixo nível, às quais responde com as frequências livres. Importará definir o conceito de frequência livre. Uma frequência é considerada livre sempre que no instante do seu envio nenhum sinal de frequência igual se encontre em viagem. No entanto esta restrição por si só não garante o correcto funcionamento da rede. Até agora apenas foram referidos os tempos de emissão e recepção de sinais acústicos sem qualquer influência da variação do nível de detecção. Este nível de detecção foi introduzido na secção 2.4.1 do capítulo 2, mas não foi referido que este se tratava de um sinal gerado por potenciómetros digitais. Para efectuar a detecção do nível máximo de um sinal, é necessário que coordenado com a emissão de sinais ocorra a variação do nível de detecção. Sendo este nível gerado por potenciómetros digitais, sempre que se pretenda a alteração de um nível é necessário enviar os respectivos sinais de comando e esperar que estes os processem. Torna-se assim necessário a inclusão deste tempo t_p nas restrições do sinal a emitir. Mais ainda, este tempo atinge valores da ordem de um segundo, que representa mais do que um tempo de ciclo do algoritmo.

Assim definindo mais algumas variáveis,

- t_{ls} - Instante do ultimo envio
- $\max(t_{d_{k/m}})$ - distância máxima verificada entre qualquer par de elementos da rede
- $\min(t_{d_{k/m}})$ - distância mínima verificada entre qualquer par de elementos da rede

Teremos que uma frequência é considerada livre se,

$$Time + \min(t_{d_{k/m}}) > t_{ls} + \max(t_{d_{k/m}}) + t_p \quad (3.33)$$

Algorithm 4 Algoritmo de Alto Nível

```

1: Inicialização
2: Definição de  $t_0$  em relação ao tempo do sistema
3: Envio de  $t_0$  e  $t_{k0}$  a todos os elementos da rede
4: Envio da frequência inicial a todos os elementos da rede
5: if Mensagem da Porta Série then
6:   if Pedido de frequência then
7:     Alocar pedido
8:   end if
9:   if Frequência calibrada then
10:    Frequência fechada
11:   end if
12: end if
13: while Pedidos em espera do
14:   for all Pedidos do
15:     for all Frequências do
16:       if  $Time + \min(t_{d_{k/m}}) > (\text{Ultimo envio}) + \max(t_{d_{k/m}}) + t_p$  then
17:         Enviar Frequência
18:         Atualizar Ultimo envio
19:       end if
20:     end for
21:   end for
22: end while

```

3.2.2 Aplicação de Calibração

Como referido no inicio do capítulo irá ser utilizado um método iterativo de primeira ordem para a determinação do nível de pico de um sinal acústico. Foi escolhido o método das bissecções sucessivas, por ser um método extremamente fiável, de rápida progressão, que nos garante a uniformidade do numero de iterações. Além disso este método pode ser optimizado de forma considerável com uma escolha sensata do intervalo de partida. Este método foi implementado no algoritmo da aplicação de calibração de forma não muito explicita, uma vez que a sua progressão está dependente de um processo de avaliação do nível de confiança do valor de um sinal, baseado num esquema de votação de 2 para 1. Assim são enviados três sinais acústicos por cada iteração no método das bissecções.

O algoritmo é iniciado definindo um intervalo $[N_1, N_2]$, onde N_1 corresponde a um nível onde não é detectado qualquer sinal e N_2 a um nível onde ocorre a detecção (fig 3.3). Em seguida é verificada a detecção num nível intermédio $N_3 = \frac{N_1 + N_2}{2}$ evoluindo por bissecções sucessivas com uma mecânica descrita no algoritmo 5, até ser atingida uma condição de paragem.

Para além deste método a aplicação de calibração também é responsável pela variação do nível dos potenciômetros. Sempre que uma iteração é concluída, o potenciômetro correspondente é libertado, e pode ser alterado para a recepção seguinte. Esta aplicação é então responsável pela emissão de sinais acústicos, pela recepção de sinais dos restantes elementos da rede com aplicação do método das bissecções e pela variação dos potenciômetros digitais. Para simplicidade, cada

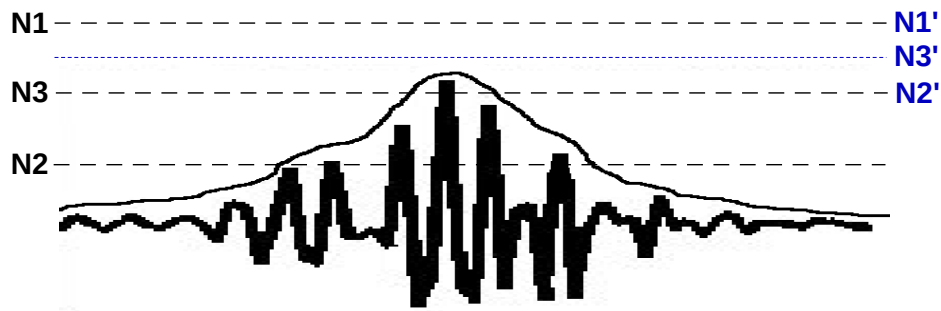


Figura 3.3: Esquema de Evolução do Método das Bissecções

Algorithm 5 Mecânica de Evolução do Método das Bissecções

```

1: while NOT Condição de paragem do
2:   if Detecção em  $N_3$  then
3:      $N'_1 = N_1$ 
4:      $N'_2 = N_3$ 
5:      $N'_3 = \frac{N_1 + N_2}{2}$ 
6:   end if
7:   if NOT Detecção em  $N_3$  then
8:      $N'_1 = N_3$ 
9:      $N'_2 = N_2$ 
10:     $N'_3 = \frac{N_1 + N_2}{2}$ 
11:   end if
12: end while

```

uma destas funcionalidades irá ser descrita num algoritmo separado (algoritmos 6, 7 e 8).

Algorithm 6 Comunicação com a Aplicação de Gestão da Calibração

```

1: if Mensagem de Software then
2:   if Recepção de Frequência para envio then
3:     Adicionar ao buffer de emissão de sinais
4:     if Primeira frequência then
5:       Enviar mensagem de alocamento de sinal a emitir em  $t_0 + t_{k_0}$ 
6:     end if
7:   end if
8:   if Recepção de Alocamento de Frequência then
9:     Adicionar ao buffer de recepção de sinais com carimbo temporal  $T_{x_k} + t_{d_{k/me}}$ 
10:    Ordenar buffer de recepção por ordem temporal
11:  end if
12:  if Recepção de tempos then
13:    Guardar tempo de início do algoritmo
14:    Guardar tempo de início de emissão de sinais
15:  end if
16:  if Recepção de aviso de frequência terminada then
17:    Coloca flag na frequência do elemento em questão
18:    Evita o emissão de sinais desnecessários em caso de falha da aplicação de alto nível
19:  end if
20: end if

```

Algorithm 7 Detecção de Sinais Acústicos com Aplicação do Método das Bissecções

```

1: if Mensagem da Porta Série then
2:   if Sinal Acústico Detectado then
3:     if Sinal Acústico no buffer then
4:       if Primeira Iteração then
5:         if Nível de Detecção no Máximo then
6:           Pico Detectado
7:         end if
8:       end if
9:       if Segunda Iteração then
10:        Nível igual a  $\frac{N_1+N_2}{2}$ 
11:      end if
12:      if Iteração > 2 then
13:         $N_2 = N_3$ 
14:         $N_3 = \frac{N_1+N_2}{2}$ 
15:      end if
16:    end if
17:  end if
18: end if
19: if Timeout para a chegada de sinal acústico then
20:   if Primeira Iteração then
21:     Nível colocado no mínimo
22:   end if
23:   if Segunda Iteração then
24:     Frequência descartada
25:   end if
26:   if Iteração > 2 then
27:      $N_1 = N_3$ 
28:      $N_3 = \frac{N_1+N_2}{2}$ 
29:   end if
30: end if

```

Algorithm 8 Emissão de Sinais Acústicos e Variação do Nível dos Potenciômetros

```

1: if Buffer de emissão > 0 then
2:   Enviar Sinal
3:   Enviar mensagem a alocar sinal seguinte
4:   Espera até poder enviar novo sinal
5: end if
6: if Sinal alocado para chegar then
7:   if Potenciômetro livre then
8:     Envia comando para alteração do valor
9:   end if
10: end if

```

3.2.3 Sincronização Temporal

Como já foi referido inúmeras vezes ao longo do documento, uma das questões centrais deste trabalho é a sincronização temporal entre os diferentes elementos da rede acústica. Nesta secção irão ser apresentados dois métodos para sincronização de relógios com o tempo GPS. Um deles baseado no serviço *ntpd* para linux, e um segundo baseado num algoritmo demonstrado em [18].

3.2.3.1 NTP

O Network Time Protocol (NTP) é um protocolo utilizado para sincronização de relógios de computadores em redes de dados de latência variável, através de protocolo UDP. É capaz de manter uma variação até 10 milissegundos sobre a Internet publica, e manter uma precisão de 200 micro-segundos ou menos em LANs. Usa um sistema de níveis hierárquicos de fontes de relógio, chamados *stratum*. Cada um destes níveis é numerado, sendo os mais precisos os do nível zero. Algumas das fontes deste nível são os relógios atómicos e GPS. Normalmente dispositivos que não estão directamente conectados à rede. A numeração dos níveis seguintes tem como objectivo o agrupamento de relógios com a mesma distância a um relógio de referência, e não indica a qualidade ou precisão do tempo desse nível. Este protocolo é implementado nos sistemas UNIX através de um *daemon* a correr no espaço do utilizador (*ntpd*).

Como será referido mais à frente no capítulo 4, o sistema inclui um PC embebido capaz de correr uma qualquer distribuição de Debian Linux. A sincronização do seu relógio com o dos restantes elementos da rede, poderá ser então efectuada, utilizando esta aplicação. Além disso o sistema também inclui um módulo de recepção GPS, capaz de fornecer tempo GPS e sinal PPS. Colocando assim ao alcance uma fonte de relógio de extrema precisão.

No entanto o *daemon ntpd*, foi projectado para obter a sua referência temporal de servidores de rede. A obtenção directa do tempo GPS e de sinal PPS não faz farte das suas funcionalidades. Para resolver esta situação utilizou-se um segundo serviço capaz de obter as grandezas necessárias e fornece-las à aplicação *ntpd*. Foi então utilizado um segundo *daemon* chamado *gpsd* que é capaz de monitorizar vários dispositivos GPS, conectados a um PC através de porta série ou USB. A interacção entre os dois *daemons* é conseguida editando o ficheiro de configuração *ntpd.conf*, como demonstrado em seguida,

```
server 127.127.28.0 minpoll 4 maxpoll 4
fudge 127.127.28.0 time1 0.420 refid GPS
server 127.127.28.1 minpoll 4 maxpoll 4 prefer
fudge 127.127.28.1 refid GPS1
```

Quando o *gpsd* recebe uma mensagem com um carimbo temporal, ele empacota-a, coloca-lhe um carimbo com o tempo do sistema e envia-a para um espaço de memória partilhada com um *id* conhecido ao *ntpd*. O endereço 127.127.28.0 identifica a unidade 0 do driver de memória partilhada do *ntpd* e é usada para as mensagens temporais normais. O endereço 127.127.28.1, identifica a unidade 1 e é usada para as mensagens de tempo derivadas do sinal de sincronização PPS. A diferenciação entre as duas permite ao *ntpd* usar heurística normal para as pesar.

3.2.3.2 Algoritmo de Sincronização para Redes Sem Fios

O serviço NTP, é no entanto, fortemente dependente da existência de pelo menos um servidor de tempo. Além de assumir que esse servidor possui acesso a uma fonte de tempo real. Mesmo quando a fonte de tempo é um servidor criado pelo serviço *gpsd*, a simples falha de sinal no módulo GPS levará a um mau funcionamento do serviço. Para além destes factores, o serviço NTP surge sobre a forma de aplicações *standard*, não havendo controlo sobre a actualização do relógio do sistema. Durante a realização de uma missão não é prudente permitir a ocorrência da alteração do valor do relógio do sistema. Porém, poderá ser interessante a monitorização de um eventual desvio do tempo de sincronismo da rede.

Por essa razão decidiu-se avançar com a implementação de um algoritmo baseado no algoritmo apresentado em [18], para sincronização de relógios em redes sem fios. Este algoritmo tem uma implementação extremamente simples, possibilitando efectuar uma sincronização local e global dos relógios da rede. Para além disso pressupõe a utilização de tempo GPS, o que se enquadra perfeitamente na arquitectura do sistema implementado.

Capítulo 4

Sistema Computacional

A automatização dos sistema de monitorização do meio aquático é uma questão de crescente importância. Cada vez mais se caminha para um universo de equipamentos cooperativos dotados de inteligência local, obtendo-se no limite uma rede de monitorização completamente autónoma.

Embora centrando-se apenas numa das peças que comporá essa rede, este trabalho aborda as questões referidas. Uma parte importante deste projecto centra-se na capacidade de calibração da rede de comunicações de forma completamente autónoma. Para isso é necessário que cada nó possua algum tipo de inteligência. Uma outra questão de extrema relevância é a necessidade de sincronismo entre os diferentes componentes da rede para a execução dos algoritmos descritos no capítulo anterior. O sistema actualmente utilizado não dispõe de capacidade computacional suficiente, mais importante ainda, não tem qualquer característica de tempo real. Também do ponto de vista de uma rede de sensores o antigo sistema era completamente passivo, uma vez que apenas respondia a estímulos acústicos enviados pelo veículo submarino.

Tendo em conta estes factores tornou-se necessário a reformulação do sistema computacional que é utilizado na anterior versão das sono-bóias. Nesta nova versão (fig 4.1) foram impostos como requisitos base a utilização de uma arquitectura com uma capacidade de processamento local, baixo consumo e características de tempo real. Também que caminhando na direcção de um sistema de monitorização cooperativo seja capaz de suportar vários dispositivos de monitorização, tornando a sono-bóia uma parte integrante do observatório portátil.

4.1 Embedded PC

Uma das grandes preocupações quando se lida com sistemas autónomos é a questão da autonomia. O horizonte temporal de operação destes sistemas está na maior parte das vezes limitado devido a este problema. Torna-se assim interessante a utilização de sistemas com baixo consumo energético e capacidade de gestão dos seus recursos. Esta plataforma teria no entanto de ser capaz de suportar a conexão de diversos tipo de sensores e periféricos.

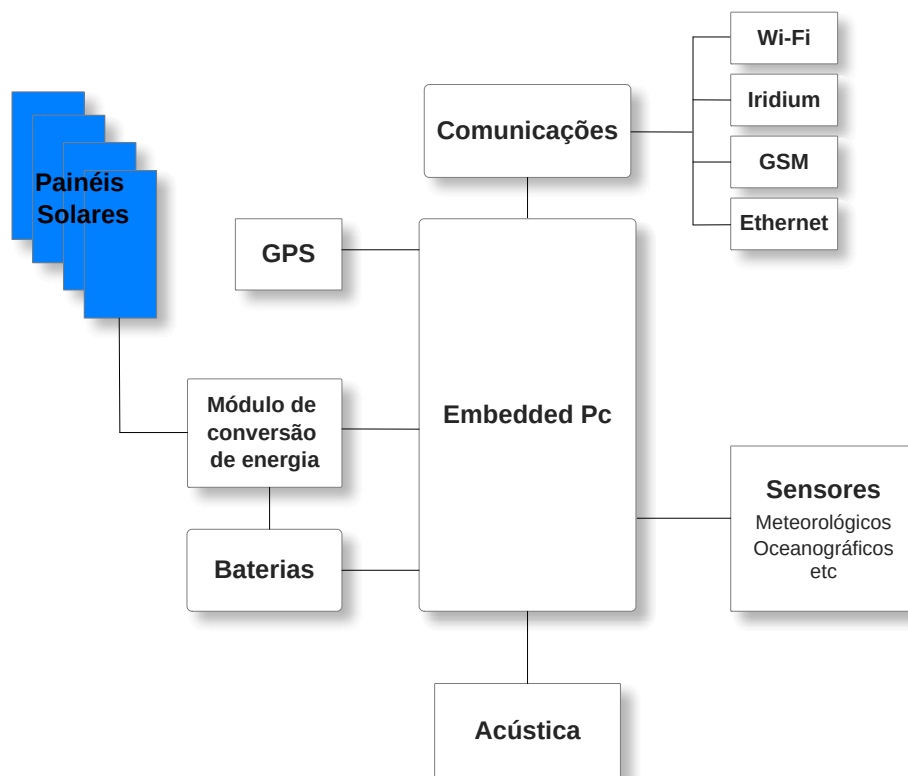


Figura 4.1: Esquema da Arquitectura do Sistema Computacional

Inicia-se assim o desafio de projecto de um sistema com capacidade computacional suficiente para responder às necessidades existentes, apresentando no entanto baixos consumos. Esta demanda levou a diferentes tipos de arquitecturas com variadas capacidades e funcionalidades. No entanto apenas uma correspondeu aos diferentes requisitos de forma satisfatória, apresentando ao mesmo tempo excelentes características ao nível energético, capacidade de processamento adequada, características de tempo real, e possibilidade de gestão dos recursos. A solução escolhida foi então um *single board computer* (SBC) da Technologic Systems modelo TS-7260 (fig 4.2). Este modelo foi especificamente criado para sistemas de muito baixa potência, alimentados a bateria ou painéis solares. Tem um consumo médio, sem ligação ethernet, de apenas meio watt, razão pela qual consegue funcionar até 172 horas com uma pequena bateria de 12 Volts e 7.2 Amperes hora. Poderá até funcionar para além deste horizonte graças à possibilidade de abrandar os seus relógios internos. O seu baixo consumo de potência significa também que tem um baixo aquecimento podendo funcionar em ambientes fechados sem qualquer tipo de ventilação. Tornando-se assim ideal para a utilização num ambiente hermeticamente fechado, como o necessário para a operação em ambiente aquático.

Esta placa disponibiliza ainda um bus de expansão PC/104, uma porta ethernet 10/100, duas portas USB 2.0 expansíveis através de um hub, três portas COM, trinta I/Os digitais, saída para

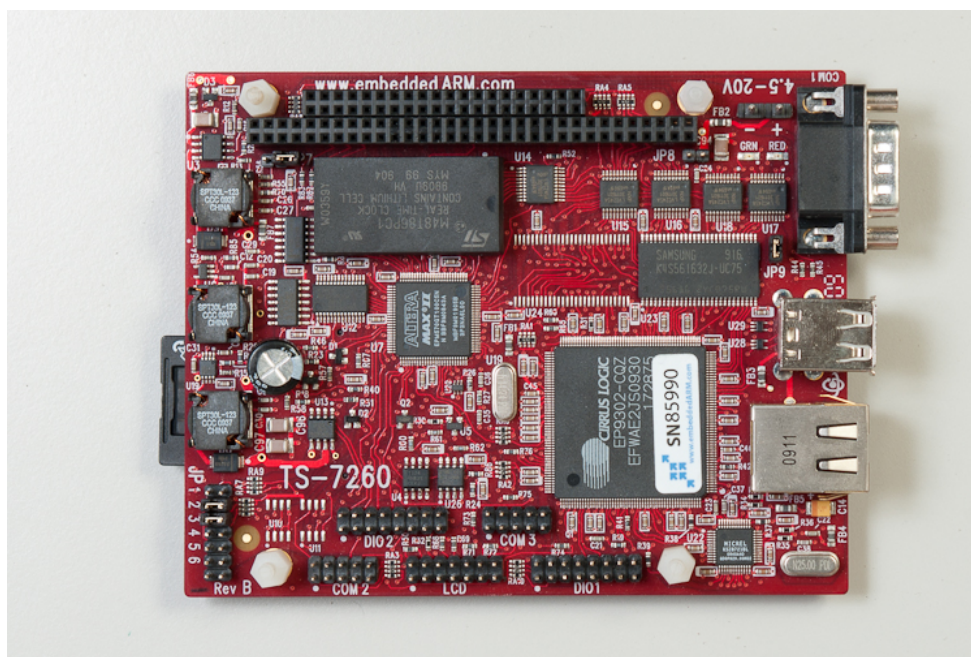


Figura 4.2: TS-7260

LCD de duas linhas, dois ADCs de 12-bits, um leitor de cartões SD e um relógio de tempo real. Além disso possui um conjunto de interruptores controlados por software que permitem a qualquer altura desligar a alimentação da porta USB, o chip PHYceiver da porta ethernet, o relógio de tempo real e os conversores de nível RS232, diminuindo ainda mais o consumo de energia. Juntamente com a possibilidade de abrandamento dos seus relógios internos o seu consumo poderá ser reduzido até um quarto de watt. A existência de um relógio de tempo real foi um factor com grande peso na escolha desta placa. A sua existência permitirá a sincronização dos vários nós da rede de comunicações acústicas, essencial para a execução dos algoritmos de calibração de forma otimizada.

Toda a gama TS-72xx ARM SBCs da Technologic Systems é compatível com uma vasta gama de Sistemas Operativos (OS). No entanto é recomendado o uso de Linux, sendo esta a instalação enviada de fábrica. No entanto a versão instalada por default, foi compilada especialmente pela Technologic System para este tipo de SBCs. Nesse sentido todas as aplicações de desenvolvimento, e módulos considerados desnecessários foram removidos, estando apenas preparada para correr aplicações previamente compiladas. As aplicações criadas podem ser compiladas num PC anfitrião através de um cross-compiler também fornecido pela Technologic Systems. Se tal for necessário, uma distribuição completa de Debian Linux pode ser carregada, a partir de um directório de rede (NFS root), ou uma flash drive como Compact Flash, Cartão SD ou pen USB. Isto disponibiliza um ambiente de desenvolvimento embebido GNU C/C++, um servidor de web Apache e serviços de Internet como FTP, SSH, Telnet e Samba.

4.1.1 Configuração

Como já referido a placa é enviada de fábrica pronta a ser utilizada, configurada com a versão base TS-Linux. No entanto algumas verificações e configurações iniciais são ainda necessárias antes de a ligar. Estas acções referem-se a um conjunto de jumpers que por hardware controlam algumas das suas funcionalidades. Uma descrição de cada jumper é dada na tabela 4.1.

Tabela 4.1: Descrição dos Jumpers

<i>Jumper</i>	Função
1	Boot to serial Port COM1, insted of Flash Chip
2	Enable serial Console in COM 1, if no Jumper4
3	Write enable Flash
4	Console swaped to COM2 (with Jumper2)
5	Tester Jumper
6	User Jumper
7	Power In to 5V bus. Only with regulated 5.0VDC source
8	Power In to 12V PC/104 bus. Only with regulated 12.0VDC source
9	Power to ethernet led

A saída para LCD de duas linhas, não é suficiente para efectuar qualquer trabalho no dispositivo, tendo como principal objectivo mensagens informativas ou de debug. A principal forma de acesso ao seu ambiente é através de um emulador de consola série executada num computador anfitrião. O software escolhido foi o GtKTerm executado em ambiente Linux. Foi definido que a placa estaria conectada ao PC anfitrião através da sua COM1, sendo a única que se apresenta sobre a forma de ficha DB9, utilizando um cabo null modem e as configurações default listadas na tabela 4.2.

Uma vez configurada a conexão é possível então ligar a placa alimentando-a a partir de uma qualquer fonte de alimentação capaz de fornecer uma tensão entre os 4.5V e os 20V. Isto é possível graças à existência de três conversores comutados que geram todas as tensões necessárias ao funcionamento da placa. No arranque a placa executa um código de boot proprietário da Technologic Systems (TS-BOOTROM), e em seguida o RedBoot. O RedBoot é uma aplicação que permite a manipulação da flash, das imagens JFFS2/YAFFS2, o carregamento e execução de uma *kernel* ou executável a partir de um servidor tftp(trivial ftp), consola série, ou flash. Se não for interrompido

Tabela 4.2: Dados de Configuração da Ligação Série

Port	COM1
Speed	115200
Parity	No
Bits	8
StopBits	1
Flow Control	None

pelo utilizador no espaço de um segundo, um *script* pré existente é executado, fazendo com que o sistema de ficheiros JFFS2/YAFFS2 sejam carregados. Uma vez terminadas as mensagens de arranque da *kernel* é solicitada a autenticação, que por *default* está definida como "*root*" sem *password*.

O passo seguinte será a configuração da rede. Para isso é necessário manipular os ficheiros de configuração adequados. Nos sistemas TS-Linux esses ficheiros estão localizados em `/etc/sysconfig`". Os interfaces de rede são configurados numa base de um ficheiro por cada interface. Assim para configurar o interface "`eth0`" será necessário editar o ficheiro `/etc/sysconfig/ifcfg-eth0`". Um exemplo do conteúdo do ficheiro de configuração para o interface "`eth0`" é dado na figura 4.3. As configurações TCP/IP são editadas no ficheiro `/etc/sysconfig/network-cfg`". Um exemplo de configuração ao pode ser visto na figura 4.3.

```
DEVICE=eth0 #Name of ethernet interface
IPADDR=192.168.0.50 #IP address of this ethernet interface
NETMASK=255.255.255.0 #Used with NETWORK to determine local IPs
NETWORK=192.168.0.0 #Used with NETMASK to determine local IPs
BROADCAST=192.168.0.255 #Broadcast IP for system wide messages
BOOTPROTO=static #Static IP (change "static" to "DHCP")
ENABLE=yes #Load device on boot
```

Figura 4.3: Exemplo de Ficheiro de Configuração da Interface de Rede

4.1.1.1 Debian Linux

Rapidamente se verificou que a versão TS-Linux não correspondia a todas as exigências. Durante o desenvolvimento dos algoritmos, e em particular durante a fase de debug, tornava-se extremamente moroso a utilização do cross-compiler num PC anfitrião sempre que era necessária alguma alteração. Surgiu também a necessidade de compilação e instalação de módulos que simplesmente não era possível nesta distribuição. Tendo isso em mente optou-se pelo uso de uma versão de Debian-Linux, também fornecida pela Technologic Systems, instalada num cartão SD de um GigaByte. De forma a agilizar o arranque da placa, o script de arranque do RedBoot foi editado de forma a montar o sistemas de ficheiros directamente na raiz do cartão SD. Dessa forma passou a dispor-se de um ambiente de desenvolvimento GNU C/C++, como aliás já referido. E tal como em qualquer outra distribuição de Debian, a instalação e remoção de aplicações passa a poder ser feita de forma transparente através do gestor de programas.

Também neste sistema é necessário manipular os ficheiros de configuração adequados para definir os interfaces de rede. Nesta versão é necessário editar o ficheiro `/etc/network/interfaces` para configurar a interface de rede e o ficheiro `/etc/resolv.conf` para definir o servidor de domínios (DNS).

4.2 Periféricos

Este sistema não é contudo, apenas composto pela placa descrita na secção anterior. Ligada a ela existe um conjunto de periféricos que lhe permitem interagir com meio e executar as suas tarefas.

4.2.1 Pen Wi-Fi

Umas das funcionalidades integrada neste sistema será o serviço Wi-Fi, que irá introduzir comunicações de banda larga sem fios entre os elementos da rede e postos de monitorização externos. Para este sistema foi escolhida uma *pen* USB 2.0 (fig 4.4) com suporte para IEEE 802.11b/g, compatível com a placa computacional e o sistema operativo utilizado. Opera em modo Ad-hoc ou de rede. Permite a conexão de uma antena externa, o que é extremamente útil pois poderá ser colocada na caixa de electrónica estanque e ligada a uma antena colocada no topo do módulo de antenas. Apresenta um consumo máximo de 1.5 W, que pode ser considerado elevado quando comparados com restantes sistemas, mas que no entanto é incontornável neste tipo de equipamento.

O equipamento é acompanhado por drivers para os diferentes sistemas operativos, incluindo Linux. No entanto dadas as características específicas do sistema utilizado, estes tiveram que ser editados de forma a serem compatíveis. O que introduziu uma grande complexidade na sua instalação.



Figura 4.4: Pen Wi-Fi

4.2.2 Módulos GPS

Um elemento crucial num sistema de posicionamento subaquático é a localização absoluta dos faróis acústicos. Sem ela a localização relativa efectuada pelo veiculo em relação aos faróis perde qualquer significado. A forma típica de obter uma localização absoluta passa pela utilização de

módulos GPS (Global Positioning System). A tecnologia GPS é amplamente utilizada, devido à sua cobertura global de carácter praticamente instantâneo.

GPS é um sistema de posicionamento baseado em satélites que permite aos utilizadores determinarem a sua posição em três dimensões. O sistema está na posse, e é operado pelo Departamento de Defesa dos Estado Unidos (US DoD), que consegue determinar a disponibilidade e precisão dos seus sinais. Actualmente é composto por 26 satélites, distribuídos por 6 planos orbitais a uma altitude de 20.000 km, realizando uma orbita completa a cada 12 horas. Cada satélite emite um sinal na mesma frequência (1.575 GHz), que é modulado por um código pseudo-aleatório. Cada satélite possui um código alocado, permitindo assim aos dispositivos de recepção distinguir os diferentes sinais. Para que o sistema funcione é necessário que o receptor seja capaz de processar a posição de cada satélite num dado instante, e o tempo de sincronismo do seu relógio atómico. Cada receptor é então capaz de atribuir um carimbo temporal às mensagens recebidas de cada satélite que está a seguir. Isto dá ao receptor um tempo provável de viagem do sinal de cada satélite, chamado de pseudo-distância. Este tempo não representa uma distancia real, uma vez que normalmente os receptores utilizam osciladores de cristal de baixo custo em vez de relógios atómicos sincronizados com o tempo GPS. O tempo de chegada dos sinais é então avaliado comparativamente e não directamente com o tempo GPS. Para resolver este offset temporal e as incógnitas geométricas x , y e z , são então necessárias medições de quatro satélites.

Para este projecto foram utilizados módulos GPS Ublox RCB-LJ (fig 4.5). Este módulos são usados já à alguns anos pelo grupo de investigação em alguns dos seus projectos, estando comprovada a sua fiabilidade. Para além disso, consegue aliar uma óptima performance a consumos extremamente baixos. Com uma frequência de actualização de posição de 4 Hz, consegue facilmente corresponder aos requisitos do sistema. É compatível com diferentes protocolos de comunicação como NMEA, UBX e RTCM e disponibiliza duas portas série totalmente configuráveis. Pode ser definido o envio de mensagens nas duas portas, tendo cada uma atribuído um protocolo diferente, assim como um qualquer conjunto de mensagens.



Figura 4.5: Módulo de GPS Ublox RCB-4H

4.2.3 "Stack" de Hardware do Sistema de Acústica

O funcionamento e características base da "stack" de hardware do sistema de acústica já foram descritos e por várias vezes mencionados ao longo deste documento. No contexto deste capítulo, importa compreender a maneira como é feita a interacção com o sistema computacional de controlo. Como anteriormente descrito a "stack" de hardware é composta por três módulos distintos: módulo de emissão de sinais acústicos, módulo de recepção e o módulo de controlo. Actualmente a única forma de interacção com os módulos de emissão e recepção de sinais acústicos é através do módulo de controlo. Sendo a comunicação com o módulo de controlo, feita através de porta série com um cabo *Null Modem*.

No antigo sistema de bóias, não foi prevista a existência de qualquer sistema computacional a bordo. Razão pela qual, a comunicação com o módulo de controlo é feita via rádio (fig 4.6). Na configuração apresentada neste trabalho, deixará de existir esta comunicação rádio e o módulo estará directamente ligado ao sistema computacional através do referido cabo série *Null Modem* (fig 4.7).

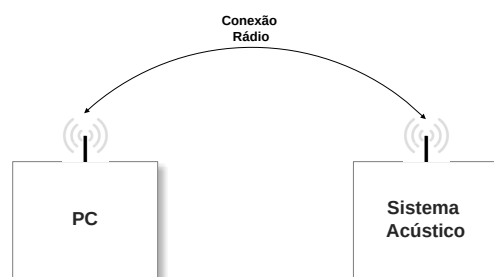


Figura 4.6: Esquema da Conexão Rádio entre o PC e o Módulo de Acústica

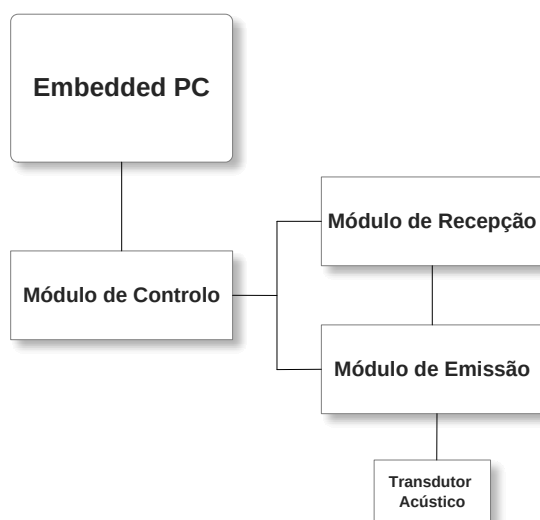


Figura 4.7: Esquema de Conexão do PC ao Módulo de Acústica

No futuro pretende-se a eliminação do módulo de controlo, e a conexão directa dos módulos de emissão e recepção ao sistema computacional (fig 4.8). Porém para este trabalho, a "stack" do sistema de acústica foi considerada como uma caixa preta capaz da emissão e recepção de sinais acústicos, com conexão série. Qualquer modificação encontrava-se fora do âmbito do projecto e foi remetida para proposta de trabalho futuro.

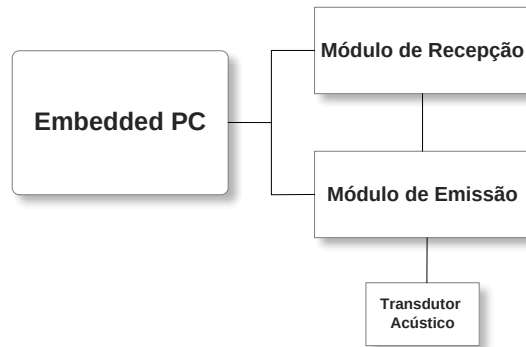


Figura 4.8: Esquema de Conexão Futura Entre o PC e os Módulos de Emissão e Recepção

4.3 Energia

Muitas das vezes o horizonte temporal de operação dos sistemas de monitorização portáteis está limitado pela sua autonomia. Sem uma qualquer fonte de energia externa o seu tempo de funcionamento é ditado pelo tempo de vida da sua bateria. Para missões de monitorização de curta duração, como as realizadas com o sistema anterior, esta questão não é crucial. No entanto, à medida que nos dirigimos para a integração do sistema de sono-bóias na rede monitorização e o tempo de missão se expande, esta questão começa a desempenhar um papel preponderante no dimensionamento do sistema.

Nesse sentido, as questões energéticas tiveram um peso considerável no dimensionamento deste projecto. A primeira grande preocupação foi a utilização de equipamentos que respondendo às nossas necessidades, apresentassem o menor consumo energético possível. Porém o somatório dos vários equipamentos de baixo consumo que se pretende incluir no novo sistema, continuaria a limitar o tempo de vida do sistema se este apenas dependesse de uma bateria.

Durante grande parte do seu tempo de operação este sistema irá ter à sua disposição a maior fonte de energia que nos é conhecida, o Sol. Por que não então, aproveitá-la? E foi exactamente o que se fez, incluindo módulos solares, que permitirão que a bateria do sistema seja carregada, mesmo durante o período de uma missão. Infelizmente a tecnologia solar encontra-se numa fase de desenvolvimento, tendo dado os seus primeiros passos significativos à poucos anos. Pelo que o rendimento de um módulo solar é ainda relativamente baixo. Para além disso, este rendimento está também fortemente dependente de boas condições de incidência dos raios solares. Independentemente destes factores, considerou-se uma boa aposta que permitirá o prolongamento do tempo de funcionamento do sistema.

O módulos solares (fig 4.10) foram especialmente construídos para este projecto, pela empresa Martifer Solar [23]. São compostos por três células solares capazes de gerar até 3,6 Watts. O sistema irá possuir quatro destes módulos, estando conectados numa configuração de paralelo de pares conectados em série (fig 4.9). Os painéis estarão conectados à bateria através de um conversor DC/DC com monitorização do sistema computacional. Em caso de níveis críticos de energia o sistema pode ser programado para desligar sistemas que não sejam vitais ao seu funcionamento.

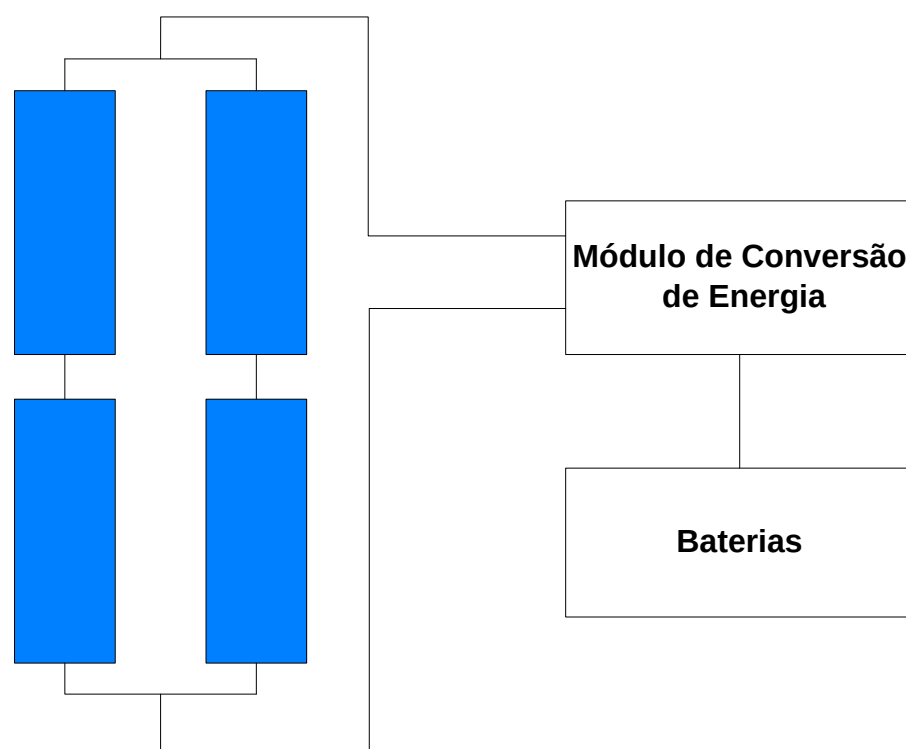


Figura 4.9: Esquema de Ligação dos Módulos Solares



Figura 4.10: Módulo Solar no Módulo da Torre

Capítulo 5

Suporte Físico

Uma das limitações do sistema de sono-bóias já existente é a sua fraca modularidade. O seu projecto só teve em consideração a sua utilização como sistema de posicionamento. Com os crescentes desenvolvimentos na área da monitorização subaquática torna-se cada vez mais importante a sua evolução de simples faróis acústicos, para elementos activos da rede monitorização. Nesse sentido torna-se interessante a existência de uma arquitectura modular, capaz de gerir uma vasta gama de sensores, e de ser facilmente adaptada a diferentes tipos de missões. Além disso com a actual arquitectura, não é possível dar uma resposta satisfatória às questões de autonomia levantadas no capítulo anterior. O esforço de inclusão dos referidos painéis solares na actual solução, acabaria por superar o da construção de uma solução de raiz.

5.1 Projecto

Os principais requisitos do suporte físico do novo sistema de sono-bóias serão então:

- Maior modularidade
- Facilidade de adaptação aos variados cenários de aplicação
- Auto suficiência energética
- Robustez
- Facilidade de transporte

Inicialmente foi efectuada uma análise das ofertas existentes no mercado, capazes de responder às necessidades existentes, ou no mínimo, passíveis de serem adaptadas à arquitectura pretendida. Na sua maioria as ofertas encontradas correspondiam a bóias de sinalização standard, que não permitiriam a instalação de forma fácil de sistemas de monitorização e controlo. Foram também encontradas algumas soluções para monitorização mas que também não respondiam aos requisitos

definidos. Face a esta situação decidiu-se avançar com o projecto e construção de uma nova arquitectura de sono-bóias. A pesquisa efectuada, embora não tendo devolvido os resultados esperados, serviu como base de pesquisa e análise das formas normalmente utilizadas em bóias ancoradas. Na grande maioria das ofertas encontradas, o formato cilíndrico ou ligeiramente ovalado parecia dominar. Optou-se então pelo dimensionamento de uma bóia de formato ovalado discretizado, constituída por cinco módulos distintos: uma torre equipada de painéis solares, com suporte para o módulo de antenas (fig 5.1), um módulo de flutuação principal capaz de suportar a torre e o sistema computacional (fig 5.2), módulos de flutuação secundários (fig 5.3) e por último um módulo subaquático de suporte do transdutor acústico, sensores e ancoragem.

Tendo em mente a quantidade de equipamento que se pretendia colocar acima da zona de água, decidiu-se pelo aumento da área do módulo de flutuação principal com o objectivo de melhorar a estabilidade global do sistema.

Como já referido a robustez do suporte físico é de extrema importância, uma vez que terá de suportar as condições de funcionamento nos meios de operação e constantes transições entre estes. Os materiais utilizados na sua construção não poderão no entanto comprometer a sua capacidade de flutuação. Os módulos flutuação terão ainda de permitir a passagem de cablagem desde o sistema computacional até sensores localizados na zona submersa. Desse modo os materiais usados terão que permitir uma moldagem fácil para a fase de construção, e ao mesmo tempo oferecer a resistência mecânica necessária para as condições de funcionamento. Tais características seriam extremamente difíceis de encontrar num único material, tendo-se assim optado uma solução mista, usando uma espuma de poliuretano facilmente moldável, revestida de material compósito que a irá dotar da robustez necessária. Esta espuma tendo uma densidade de 40 quilogramas por metro cúbico (kg/m^3) e apresentando-se com um arranjo de célula fechada, torna-se ideal para a aplicação em questão. O arranjo em célula fechada é uma característica de extrema importância, uma vez que significa que não existe infiltração de água para o seu núcleo em caso de rompimento do revestimento exterior. O revestimento exterior irá fornecer a rigidez necessária à utilização e manuseamento das bóias. Como já referido irá ser utilizado um material compósito, neste caso um polímero reforçado com fibra de vidro (PRFV), popularmente conhecido por fibra de vidro. Este material é composto por um aglomerado de finíssimos filamentos de vidro, altamente flexíveis, misturados com uma resina de poliéster. O material compósito resultante alia uma elevada resistência à tracção, flexão e impacto com um baixo peso. Apresenta também uma excepcional resistência a ambientes altamente agressivos a materiais convencionais. O módulo da torre para além de servir de apoio aos painéis solares e módulo da antena, terá também que permitir o acesso ao sistema computacional localizado no seu interior.

O projecto desta nova arquitectura foi auxiliado pelo software de desenho 3D SolidWorks. O Solidworks é uma ferramenta de desenho mecânico 3D assistido por computador (3D mechanical CAD (MCAD)), que permite de forma fácil o desenho e montagem de peças individuais de um sistema. Com as ferramentas de simulação disponibilizadas consegue-se efectuar de forma transparente a análise da interacção mecânica das diferentes peças, assim como a análise das características físicas de cada peça, como por exemplo a sua massa ou volume [24].

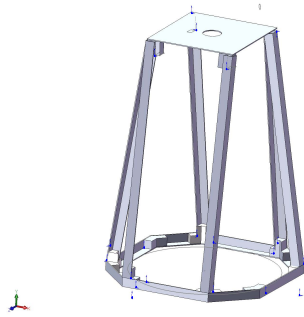


Figura 5.1: Esqueleto da torre

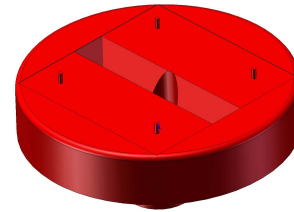


Figura 5.2: Módulo de Flutuação Primário

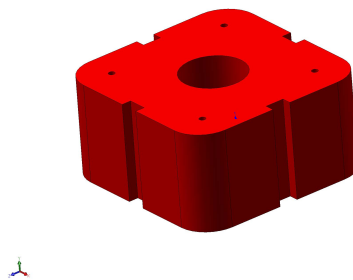


Figura 5.3: Módulo de Flutuação Secundário

5.1.1 Restrições Mecânicas

Os requisitos de modularidade, transporte e de adaptação ao cenário de operação, levantam o problema da conexão entre os vários módulos. Será necessária a existência de um sistema de remoção e colocação de diferentes módulos, que permita efectuar de forma trivial qualquer alteração, sem o recurso a algum tipo de ferramenta especializada. Após análise cuidada do sistema foram identificados quatro pontos chave de conexão entre os diferentes módulos:

- Módulo da antena à torre de suporte
- Torre ao módulo de flutuação principal
- Entre os módulos de flutuação
- Último módulo de flutuação ao suporte de sensores, transdutor e sistema de ancoragem

Foi então necessário encontrar uma solução que se adaptasse a cada destes pontos. Para a fixação da antena foi encontrado um sistema de fixação padrão para mastros. Este sistema é facilmente adaptado a uma estrutura através de 4 pontos de fixação, e efectua o bloqueio da antena por constrição (fig 5.4). A fixação da torre ao módulo de flutuação principal exigiu mais alguma dose de imaginação, pois não tendo sido encontrada qualquer solução comercial, teve que também ser projectada e construída. Para este sistema tirou-se partido dos 4 elementos em "L" de

maior dimensão existentes na base da torre, no centro dos quais se abriram orifícios. Foram então colocados, no módulo de flutuação principal, 4 pinos de retenção projectados 20 milímetros da sua superfície, numa distribuição uniforme pelos seus 4 quadrantes. Para fixar a torre basta então fazer passar os orifícios pelos pinos e colocar uma porca de retenção em cada um deles. A utilização de simples porcas com orelhas possibilita a instalação deste módulo de forma fácil em qualquer situação. Esta solução foi também aplicada à fixação dos suportes de sensores, transdutor e sistema de ancoragem ao ultimo módulo de flutuação. Também aqui foram instalados pinos de retenção, desta na parte inferior do módulo de flutuação. Para garantir a modularidade do sistema todos os módulos de flutuação terão que possuir pinos de retenção na sua parte inferior. No entanto estando prevista a possibilidade de utilização de vários módulos de flutuação torna-se necessário a existência de negativos para possibilitar o seu encaixe no módulo seguinte. Esta característica acaba por se demonstrar vantajosa pois introduz um método natural de alinhamento dos vários módulos. Sendo os pinos de retenção de aço inoxidável roscado, ouve alguma preocupação de que pudessem ocorrer danos no revestimento de fibra de vidro durante a montagem. Por essa razão foram também projectadas protecções cónicas de plástico que roscarão nos pinos quando estes não foram necessários para fixação. Estas protecções foram produzidas em poli-acetal e o seu formato cónico auxilia o alinhamento dos módulos.

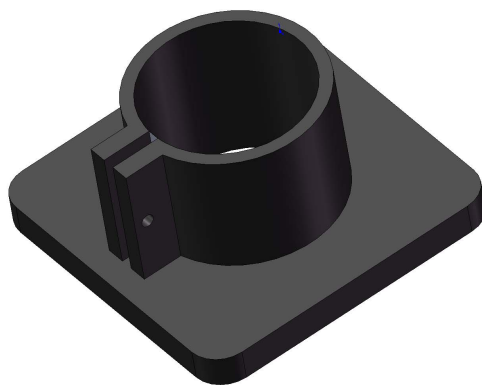


Figura 5.4: Sistema de Fixação da Antena

Para a conexão entre os módulos de flutuação foram encontrados fechos de bloqueio, tipicamente utilizados em aplicações marítimas. Estes são constituídos por dois ganchos, um simples e outro com efeito de bloqueio (fig 5.1.1). Será colocado um gancho em cada uma das faces dos flutuadores. Para prevenir qualquer dano aos fechos provocado por impacto com algum outro corpo, estes serão colocados em canais escavados ao longo da face dos flutuadores. Estes fechos irão ser fixados aos flutuadores recorrendo a rebites de aço inoxidável.



Figura 5.5: Fechos de Bloqueio

5.1.1.1 Resistência Mecânica

Como já foi referido no início deste capítulo a estrutura dos módulos de flutuação irá ser construída em espuma de poliuretano revestida de material compósito. Embora o material compósito apresente uma resistência extraordinária na sua globalidade o mesmo não pode ser afirmado para forças aplicadas em zonas que podem ser consideradas pontuais. Não comprometendo mesmo assim o seu comportamento global este material é facilmente perfurado. Por essa razão pinos de retenção e rebites não podem estar presos a este material. Era necessário encontrar uma solução que permitisse a fixação de forma segura dos elementos referidos. Assim sendo a solução encontrada passou pela inclusão de uma estrutura em forma de carapaça que abraça todo o módulo ainda na fase de espuma e é então revestida de material compósito. Esta estrutura é composta de duas chapas de alumínio de 2 milímetros colocadas nas faces superior e inferior do módulo, e 4 tiras em forma de "C", também elas em alumínio de 2 milímetros para união das placas principais, colocadas nos anteriormente referidos canais. Esta estrutura irá ser unida por meio de parafusos que atravessam o interior do módulo (fig 5.6 e 5.7). Com esta estrutura passamos a ter uma base sólida para a fixação de sistemas de retenção. Numa análise mais cuidada, rapidamente se verifica que nenhum esforço estrutural é exercido no material de flutuação ou no revestimento em material compósito. Todo ele é transmitido de estrutura metálica em estrutura metálica desde o ponto de ancoragem até ao topo da torre da bóia (fig 5.8).

5.2 Construção

Uma vez projectados todos os componentes, e verificada a sua correcta interacção inserida no sistema, prosseguiu-se para a sua construção. Para esta fase foi estabelecida a seguinte ordem de trabalhos:

- Moldagem dos Módulos de Flutuação
- Fabricação dos elementos do módulo da torre

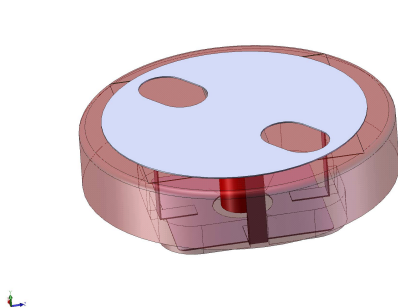


Figura 5.6: Módulo de Flutuação Principal com Reforço Estrutural

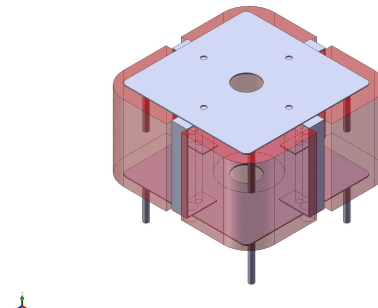


Figura 5.7: Módulo de Flutuação Secundário com Reforço Estrutural

- Fabricação de peças de união dos elementos do módulo da torre
- Assemblagem do módulo da torre
- Reforço estrutural dos módulos de flutuação e instalação de pinos de retenção
- Fabricação de peças de retenção dos módulos solares
- Revestimento dos módulos de flutuação e torre com material compósito
- Instalação dos restantes elementos de conexão e retenção

5.2.1 Módulos de Flutuação

Os módulos de flutuação foram então construídos em espuma de poliuretano expandido. Este material pode ser transformado na peça desejada de duas formas. Injectado num molde da peça pretendida ou então moldado a partir de um bloco em bruto. O processo de injeção implica a criação de um molde com as características da peça pretendida e é extremamente vantajoso numa vertente de produção em massa. No entanto este sistema ainda se encontra na fase de protótipo, podendo vir a sofrer alterações dependentes do seu comportamento em ambiente real. Dessa forma optou-se pela moldagem manual de um bloco em bruto. Para garantir a uniformidade da peça foram no entanto criados moldes básicos para auxílio no processo de construção. Os moldes consistem em peças de chapa metálica cortadas com características chave da peça pretendida (fig 5.9).

Os moldes foram então aplicados aos blocos em bruto e repetido um processo no qual é retirado o grosso do material com uma serra de fita e depois gradualmente afinada a forma com limas e lixa. Este processo demonstrou ser extremamente eficaz, tendo rapidamente se obtido o formato base dos módulos. Em seguida, recorrendo a serras circulares e de fita foram abertos os canais para cabos e para os elementos de fixação e reforço estrutural. O canal para cabos, consiste numa conduta central que atravessa o núcleo de todos os módulos de flutuação. Sendo uma zona de constante passagem de cabos e respectivas fichas, as suas paredes foram devidamente reforçadas

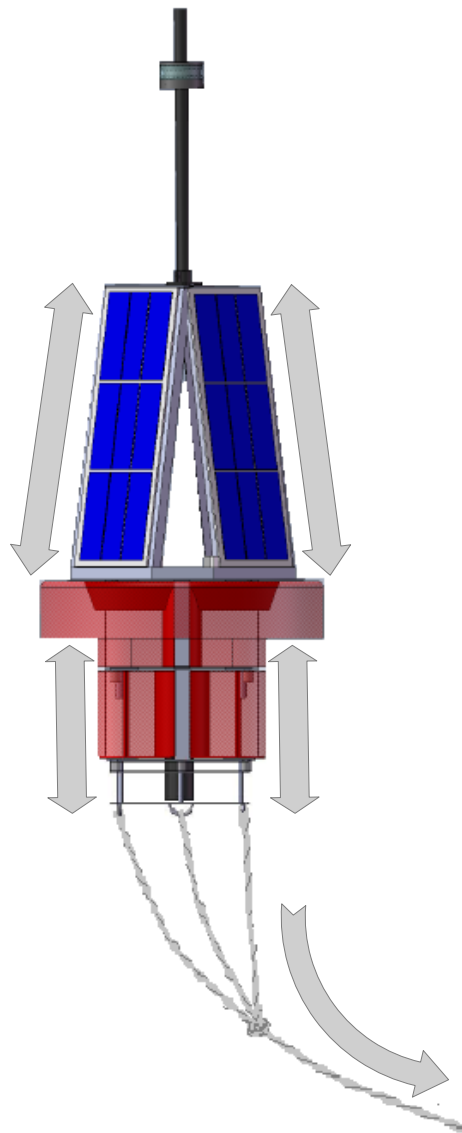


Figura 5.8: Esquema de Transição de Forças ao Longo do Sistema



Figura 5.9: Moldes dos Módulos de Flutuação

com tubo de PVC, embutido sobe alguma pressão e selado nas extremidades com betume de poliéster.

O passo seguinte consistiu na construção das chapas de reforço estrutural e sua instalação. Foram construídas, como referido, em alumínio de 2 milímetros cortado com uma guilhotina industrial. Dada a sua dimensão, os orifícios para passagem de cabos das placas superior e inferior foram abertos iterativamente com um puncionador. As placas com o formato de "C" foram inicialmente cortadas como tiras, e depois quinadas para a forma pretendida. Todas as chapas foram depois fixas, usando um esquema de aparafusamento a tubos de alumínio previamente roscados, que atravessam o núcleo do módulo de flutuação (fig 5.6 e 5.7). Com este sistema de fixação as placas formam uma carapaça em torno da espuma, estando fixas entre elas e não à espuma em si. Simultaneamente com a instalação das placas foram colocados os pinos de retenção na parte inferior e abertos os respectivos orifícios na parte superior (fig 5.10).

Todo o conjunto foi depois revestido de várias camadas material compósito. Nestes módulos foi utilizada uma manta de fibra de vidro composta por uma amalgama de fibras temporariamente fixa por meio de uma goma. Esta foi impregnada de resina de poliéster à qual foi previamente adicionado corante da cor final pretendida.

5.2.2 Módulo da Torre

A construção do módulo da torre demonstrou-se mais desafiante, uma vez que este é composto por um numero maior de peças individuais de relativa complexidade. Além disso este módulo, é

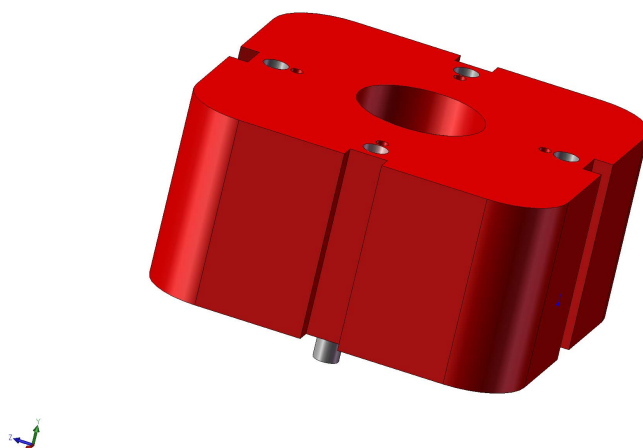


Figura 5.10: Módulo de Flutuação Secundário com Pinos de Retenção e Orifícios

ainda composto por duas portas que permitem o acesso de forma fácil ao sistema computacional localizado no seu núcleo. Estas portas serão depois fixadas à estrutura principal com dobradiças de aço inoxidável. A estrutura principal pode ser decomposta em três componentes, os elementos em "L" de alumínio 20x20, as peças de conexão destes elementos produzidas em poli-acetal e a placa de topo. O elementos em "L" foram produzidos a partir de barras de 2 metros de comprimento cortadas para as dimensões pretendidas. Todas peças de poli-acetal foram produzidas numa máquina CNC (Computed Numerically Controlled), a partir de um bloco maciço. A placa de topo foi inicialmente fabricada no mesmo alumínio de 2 milímetros das placas de reforço dos módulos de flutuação. Futuramente será substituída por uma placa aço inoxidável, que melhor se adequa às condições de funcionamento. Foram então assemblados todos os elementos utilizando parafusos de 5 milímetros em aço inoxidável. O conjunto foi depois envolvido em material compósito, adicionando resistência e protecção contra os elementos. Devido à sua natureza mecânica, não foi possível a aplicação da mesma manta de fibra de vidro utilizada nos módulos de flutuação. Assim foi aplicada fibra de vidro sobre a forma de fita com 40 milímetros de espessura. Esta fita foi enrolada sobre pressão ao longo de toda a estrutura e depois embebida com a mesma resina de poliéster anteriormente utilizada (fig 5.11).

Estruturalmente o módulo da torre pode ser descrito como uma base octogonal, colunas que se elevam dessa base num ângulo de 80 graus com a horizontal, finalizando numa placa de topo onde será fixa a base do módulo da antena. Cada um destes elementos é composto por segmentos em "L" aparafusados entre si com as peças de poli-acetal 5.12.

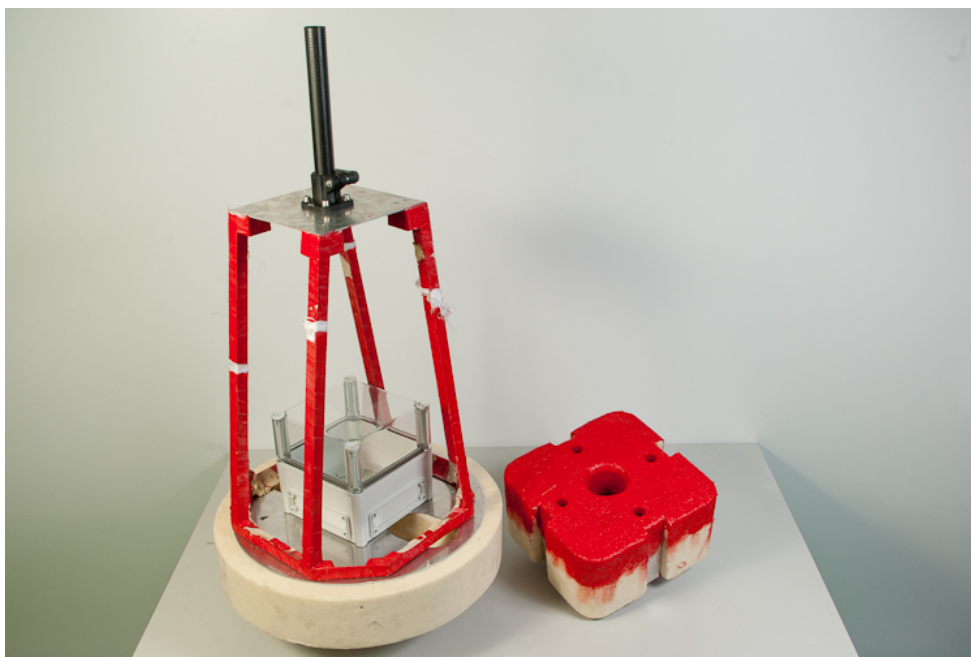


Figura 5.11: Conjunto Durante o Processo de Aplicação da Resina

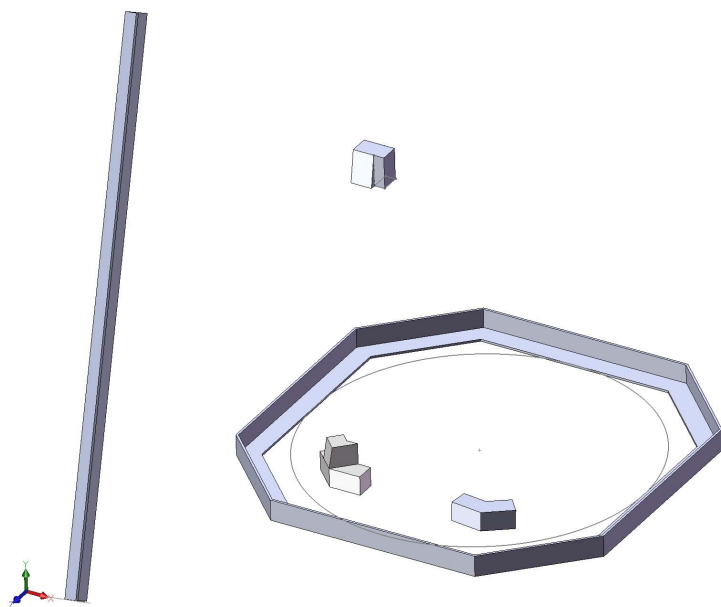


Figura 5.12: Base, Perfis em "L" e Peças de Encaixe do Módulo da Torre

5.2.3 Módulo da Antena

O módulo da antena tem como finalidade o suporte da antena de Wi-Fi, antena de GPS, reflector de radar, da sinalização luminosa e eventuais sensores como por exemplo meteorológicos. É constituído por um mastro principal em material compósito, neste caso uma mistura de fibra de carbono e fibra de vidro de núcleo oco, ao qual irão ser fixados os referidos componentes. O núcleo oco para além de contribuir na poupança de peso, serve de conduta de passagem de cabos até ao sistema computacional.

Para o interface entre o mastro e a antena de Wi-Fi é utilizado o suporte da sinalização luminosa (fig 5.13). Este suporte maquinado de um cilindro maciço de poli-acetal negro, é composto por três peças: uma metade superior e outra inferior, e um anel de acrílico para visionamento dos *leds* de alta potência. O anel de acrílico é trilhado entre as duas metades, que estão fixas uma à outra por parafusos. O espaço destinado aos *leds* é selado em todas as juntas por *o-rings*. Na metade inferior está cravado um mecanismo de bloqueio igual ao usado no topo da torre para fixação do módulo de antenas, que permite a fixação ao mastro. Do lado oposto, na metade superior está cravado um mecanismo de bloqueio por rosca, para retenção da antena Wi-Fi.

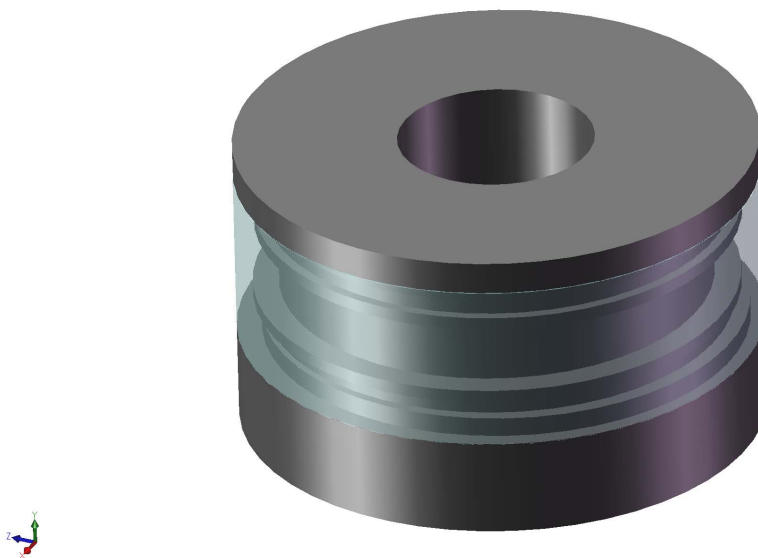


Figura 5.13: Sistema de Sinalização Luminosa

5.2.4 Módulo de Suporte do Transdutor, Sensores e Ancoragem

Este módulo (fig 5.14) está colocado na parte subaquática da bóia. É composto por duas chapas de inox com espaçadores entre elas de forma a acomodarem o transdutor acústico. É fixo

pela chapa superior em pinos roscados na parte inferior do último módulo de flutuação com porcas de retenção. Na chapa inferior então fixos suportes de amarração para a ancora.

Embora neste momento apenas esteja a ser utilizado para as funções acima referidas, foi pensado para ser totalmente reconfigurável, podendo ser adaptado para acomodar novos sensores.

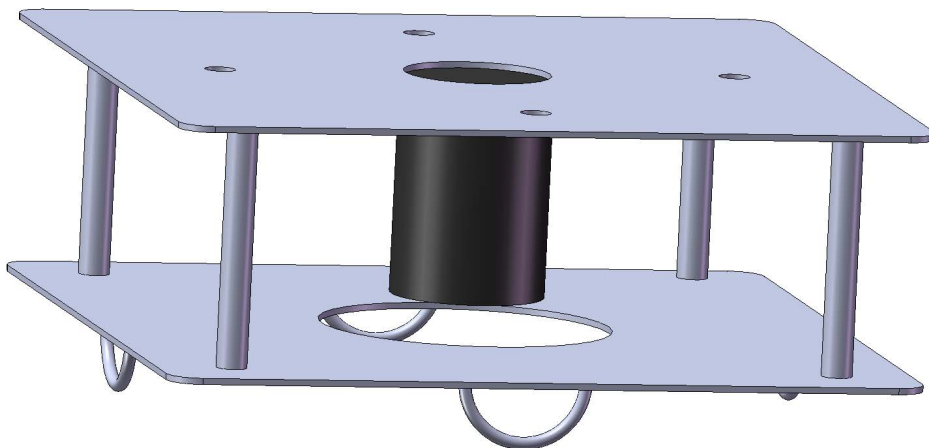


Figura 5.14: Módulo de Suporte do Transdutor, Sensores e Ancoragem

Capítulo 6

Resultados

Para estabelecer o bom funcionamento do algoritmo de calibração automática baseado em sincronismo temporal, foram definidos um conjunto de testes laboratoriais e no terreno. Em ambos os cenários, os testes consistem na calibração de uma *baseline* composta por duas sono-bóias.

6.1 Testes Laboratoriais

Os ensaios laboratoriais foram efectuados no tanque de testes dos laboratórios de robótica subaquática da Faculdade de Engenharia da universidade do Porto, com uma dimensão de 4,4 x 4 x 1,7 metros.

Nestes ensaio foram submergidos dois transdutores acústicos, ligados a sistemas de acústica distintos. Os transdutores foram colocados em paredes opostas do tanque, como se pode verificar pela figura 6.1, a uma distância de 4,4 metros.

Dadas as pequenas dimensões do tanque, foi necessário ter em consideração os ecos causados pela reflexão dos sinais nas suas paredes. Antes de serem efectuados os testes ao algoritmo de calibração automática foram feitos teste à quantidade de ecos passíveis de ocorrer. Para isso foi elaborado um simples ensaio que consistiu no envio de um sinal acústico de um transdutor, e a verificação dos sinais recebidos no segundo transdutor. Este ensaio foi repetido para todas as

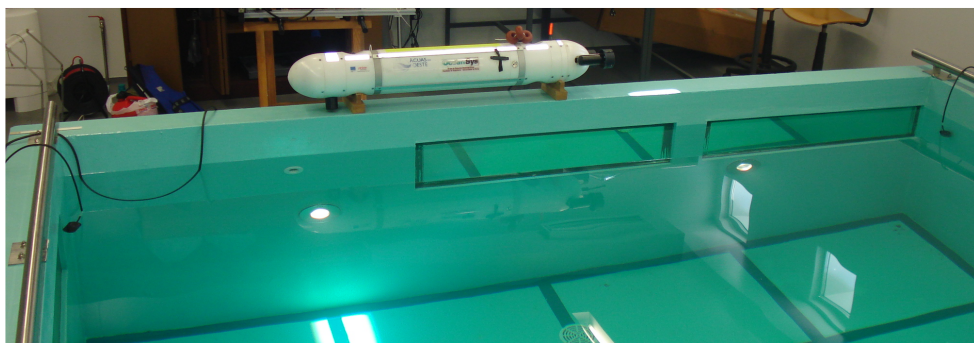


Figura 6.1: Tanque de Ensaio Com Dois Transdutores Submersos

frequências. Em alguns dos ensaios foram detectados 4 a 5 ecos, tendo alguns chegado mais de um segundo depois do envio do sinal.

Por esta razão os ensaios ao algoritmo de calibração foram efectuados com taxas de emissão de sinais acústicos, de 2 segundos. Os resultados foram satisfatórios, embora não tenha sido colocada à prova toda a execução do algoritmo. Isto ocorreu porque dada a curta distância entre o transdutores todos os sinais foram detectados no máximo. Apenas uma frequência exigiu mais uma iteração, sendo descartada por não ter sido detectado qualquer sinal, devido ao mau funcionamento da electrónica de detecção. De qualquer forma, o processo demorou cerca de 3 minutos e 45 segundos a completar.

6.2 Testes no Terreno

Estão neste momento agendados testes no terreno, que por razões de logística não puderam ser ainda realizados. Os resultados serão apresentado brevemente.

Capítulo 7

Conclusões e Trabalho Futuro

7.1 Síntese do Trabalho Realizado

Foi apresentado um algoritmo de calibração de uma rede acústica baseado em sincronismo temporal, e desenvolvidas as equações que regem a sua evolução. Foram demonstradas as técnicas de determinação e validação do nível de pico de um sinal acústico.

A problemática do sincronismo temporal foi endereçada com implementação de um protocolo *standard* de sincronização de relógios ao qual foi aliado um serviço capaz de gerar um servidor local de tempo GPS. Para além disso foi implementado um algoritmo não *standard*, que permite a sincronização de tempo local e global, usando o tempo de GPS. Infelizmente, não foi possível avaliar a sua eficácia.

Conseguiu-se implementar um sistema computacional de baixo consumo energético, com capacidade de conexão de diversos sensores para além do sistema de acústica. A maior dificuldade terá sido na instalação da pen Wi-Fi. Algumas características da placa computacional, que se reflectem no sistema operativo, levaram a que fosse necessário a manipulação dos ficheiros de instalação dos drivers e da própria *kernel*. Para tal foi necessário adquirir conhecimentos de manipulação de ficheiros baixo nível do sistema operativo.

O protótipo da sono-bóia foi concluído, existindo agora uma plataforma modular e robusta capaz de lidar com uma diversidade de sensores e modos de operação.

A soma de todos os sistemas desenvolvidos, oferece-nos uma base sólida para a implementação de um observatório costeiro portátil, capaz de realizar missões de curto prazo que poderão ir de algumas horas a alguns dias. A portabilidade e a rapidez de colocação *online* através do novo algoritmo de calibração da rede acústica, serão preponderantes na análise de fenómenos de curta duração que exijam uma resposta rápida.

No seguimento deste trabalho, foi submetido um artigo intitulado "Synchronized Intelligent Buoy Network for Underwater Positioning", na conferência Oceans 2010 [25] que decorrerá em Seattle durante o mês de Setembro. Neste momento, aguarda-se por confirmação de aceitação.

7.2 Propostas de Trabalho Futuro

A existência de sincronismo temporal entre os diferentes elementos da rede, bem como os conceitos de emissão sincronizada de sinais acústicos, criaram uma base para a alteração da abordagem ao problema do posicionamento acústico. As sono-bóias que até agora desempenhavam um papel passivo, poderão assumir um papel activo, tomando elas a iniciativa de enviar os sinais acústicos. O veículo móvel apenas terá que medir o tempo que decorre desde o tempo programado para a emissão de sinal das bóias, até à detecção de um sinal. Desta forma o veículo não necessita de enviar sinais acústicos de interrogação, o que leva a uma significativa poupança de energia.

A inclusão do sistema Wi-Fi aumentou drasticamente a largura de banda existente para as comunicações. No entanto, isto só é válido para curtas distâncias. O operador de um observatório costeiro nem sempre poderá, ou mesmo terá interesse em estar perto do local da missão. Nesse sentido será importante a inclusão de serviços que permitam comunicações a médias e longas distâncias, como Iridum e GSM.

Os módulos solares foram instalados e estão disponíveis para fornecer energia para o sistema. Contudo, o módulo de conversão e gestão de energia, necessário para adaptação dos níveis de tensão dos painéis não foi implementado. De referir que este módulo não fazia parte dos objectivos deste projecto.

Referências

- [1] <http://www.underwater-gps.com/index.php>.
- [2] *Encyclopedia of Telecommunications*. John Wiley and Sons, 2003.
- [3] J.P. Fabre e S.M. Dennis. Characterization of the variability of the ocean acoustic environment. Em *OCEANS 2007*, páginas 1 –3, sept. 2007.
- [4] Nuno Cruz, Luís Madureira, Aníbal Matos, e F. Lobo Pereira. A versatile acoustic beacon for underwater navigation and remote tracking of underwater vehicles. Em *Proceedings Oceans 2001 MTS/IEEE*.
- [5] Robert J. Urick. *Principles of underwater sound*. Los Altos, CA : Peninsula Publishing, Third edição, 1983.
- [6] M.W. Legg, A. Zaknich, A.J. Duncan, e M.V. Greening. Analysis of impulsive biological noise due to snapping shrimp as a point process in time. Em *OCEANS 2007 - Europe*, páginas 1 –6, 2007.
- [7] A. von der Heydt M. Versluis, B. Schmitz e D. Lohse. How snapping shrimp snap: through cavitating bubbles. *Science*, 2000.
- [8] <http://marine.rutgers.edu/mrs/LEO/LEO15.html>.
- [9] <http://www.neptunecanada.ca/infrastructure/cabled-ocean-observatory/>.
- [10] <http://www.venus.uvic.ca/>.
- [11] <http://www.jamstec.go.jp/jamstec-e/maritec/donet/>.
- [12] H.G. Thomas. Gib buoys: an interface between space and depths of the oceans. Em *Autonomous Underwater Vehicles, 1998. AUV'98. Proceedings Of The 1998 Workshop on*, páginas 181 –184, 1998.
- [13] A. Alcocer, P. Oliveira, , e A. Pascoal. Underwater acoustic positioning systems based on buoys with gps, proceedings of the eighth european conference on underwater acoustics, 8th ecua.
- [14] M. Martini, B. Butman, J. Ware, e D. Frye. Field tests of acoustic telemetry for a portable coastal observatory. Em *OCEANS 2006*, páginas 1 –6, 18-21 2006.
- [15] Nuno Cruz e Aníbal Matos. *The MARES AUV, a Modular Autonomous Robot for Environment Sampling*, Proceedings of the MTS-IEEE Conference Oceans'2008, Quebec, Canada, September 2008.

- [16] Aníbal Matos e Nuno Cruz. *MARES - Navigation, Control and On-board Software*, A. Inzartsev, ISBN 978-953-7619-49-7, In-Tech, Austria, 2009.
- [17] D.L. Mills. Internet time synchronization: the network time protocol. *Communications, IEEE Transactions on*, 39(10):1482 –1493, oct 1991.
- [18] Rui Fan, Indraneel Chakraborty, e Nancy A. Lynch. Clock synchronization for wireless networks. Em *OPODIS*, páginas 400–414, 2004.
- [19] S. Palchaudhuri, A.K. Saha, e D.B. Johns. Adaptive clock synchronization in sensor networks. Em *Information Processing in Sensor Networks, 2004. IPSN 2004. Third International Symposium on*, páginas 340 – 348, 2004.
- [20] A.R. Swain e R.C. Hansdah. An energy efficient and fault-tolerant clock synchronization protocol for wireless sensor networks. Em *Communication Systems and Networks (COM-SNETS), 2010 Second International Conference on*, páginas 1 –10, 2010.
- [21] A.B. Kulakli e K. Erciyes. Time synchronization algorithms based on timing-sync protocol in wireless sensor networks. Em *Computer and Information Sciences, 2008. ISCIS '08. 23rd International Symposium on*, páginas 1 –5, 2008.
- [22] Qun Li e D. Rus. Global clock synchronization in sensor networks. *Computers, IEEE Transactions on*, 55(2):214 – 226, feb. 2006.
- [23] <http://www.martifersolar.com/>.
- [24] <http://www.solidworks.com/>.
- [25] <http://www.oceans10mstieeseattle.org/>.