

SeaNetwork.

Dossiê de Projeto

Relatório e Especificações da Rede de Boias de Recolha de Dados

Ana Reis, Catarina Ji, Leonor Guerra, Miguel Aguiar e Pedro Tojal
30 de maio de 2024

Índice

Introdução	2
O que nos distingue	2
Realização do Projeto.....	3
Planificação	3
Orçamentação.....	4
Execução	6
Sistema	6
Recolha de dados.....	6
Processamento e Tratamento de dados.....	7
Cálculo e Análise da Frequência	7
Filtros aplicados antes e após a FFT	8
Outras informações relevantes	10
Análise da Temperatura.....	11
Análise da Pressão Atmosférica	11
Cálculo e Análise da Altitude	12
Dados GPS	12
Recetor e ThingSpeak	12
MATLAB	13
Alimentação	14
Design da Boia e Ancoragem.....	14
Selagem e Isolamento	16
Ancoragem	16
Divulgação	17
Resultados Experimentais	18
Testes de erro de altura e frequência	18
Teste em condições reais no boião de teste	19
Teste em condições reais no primeiro protótipo.....	21
Discussão de resultados.....	24
Testes laboratoriais	24
Teste no boião de testes	24
Teste no primeiro protótipo	25
Conclusão e Planos Futuros	26
Bibliografia	27

Introdução

A costa portuguesa tem cerca de 2500 quilómetros de comprimento (XXII Governo da República Portuguesa, 2021), no entanto a rede de boias do Instituto Hidrográfico da Marinha (IH) apenas conta com 16 boias em domínio público para a recolha de dados sobre o mar, a nossa maior fronteira. À data do relatório, foi impossível consultar as cinco boias geridas pela Universidade dos Açores na área da Região Autónoma devido a riscos de segurança no acesso ao website da sua divulgação, e outras 5 boias encontravam-se indisponíveis por razões de problemas técnicos ou manutenção (Instituto Hidrográfico, 2024).

Nasceu assim o projeto SeaNetwork a setembro de 2023, com o objetivo de colmatar a falta de informação sobre o mar, dificuldade de aceder a pouca informação disponível, e a incentivar a investigação deste meio desenvolvendo ferramentas para tal acessíveis ao maior número de pessoas possível.

A ferramenta desenvolvida consiste numa rede de boias que usa um complexo sistema de recolha de dados, processamento, transmissão, receção e publicação para fazer chegar às pessoas as informações coletadas. O sistema é constituído pelas boias e um sistema de suporte de terra, *groundstations*. As boias recolhem uma multitude de dados que são processadas nestas, e após isto um sistema de transmissores e recetores integrados encarrega-se de enviar os dados para terra, usando o protocolo de comunicação LoRa. Em terra, a *groundstation* é conectada ao WiFi que permite que os dados que lhe chegam sejam publicados numa página online, sendo que estas têm capacidade para receber e publicar informação de múltiplas boias se em alcance. Este movimento linear de dados permite uma elevada eficiência de uso.

O que nos distingue

É importante referir que o conceito de boias oceanográficas não é de todo novo, tendo estas sido desenvolvidas ao longo de mais de 7 séculos e, por isso, é importante também explicitar como nos distinguimos do resto dos sistemas de recolha de dados marinhos existentes no dia de hoje.

Primeiramente, distinguimo-nos pelo preço praticado, já que, em mercado aberto, o preço de uma boia de pesquisa varia entre milhares e centenas de milhares de euros, criando uma barreira económica que limita a ação investigativa de entidades com fundos limitados. Por exemplo, como empresa de referência no mercado usámos EIVA, uma empresa dinamarquesa com mais de 45 anos de experiência na área de soluções de engenharia em alto mar e águas rasas (EIVA, s.d.). Esta empresa disponibiliza a gama ToughBoy como a sua boia de recolha de dados e pratica um preço mínimo de 51.965,00 euros por unidade.

Segundamente, enquanto o IH divulga apenas dados sobre altura máxima, altura significativa, período médio, período pico, direção da ondulação em graus e temperatura do mar, o nosso sistema tem capacidade para divulgar temperatura ambiente e da água, pressão atmosférica, frequência, altura e potência das ondas, posição GPS e uma simulação de uma onda perfeitamente sinusoidal com as características medidas. Estes dados serão atualizados na plataforma de divulgação de 2 em 2 minutos, contrastando com a periodicidade de hora a hora do IH.

Finalmente, o sistema planeado confere à boia total independência de entidades externas na coleção, processamento e transmissão de dados. Outros benefícios da nossa boia são a flexibilidade de uso, fácil manutenção e mobilidade e autonomia.

Realização do Projeto

Planificação

O desenvolvimento deste projeto foi realizado em 3 fases: planificação, orçamentação e execução. Durante a planificação foram definidos os objetivos para o trabalho, como iríamos concretizar esses objetivos. Foi essencial para esta etapa haver fluidez de diálogo entre os membros, uma partilha de ideias organizada, e um debate de prioridades bem definido. Foi realizado um cronograma para auxiliar a organização de tarefas:

25 de setembro de 2023: Fim da discussão do conceito a desenvolver e começo da pesquisa de materiais, recursos e da orçamentação.

02 de outubro de 2023: Entrega do Orçamento 1 e da planificação base de atividades. Aula extra de suporte com o professor para aprofundar o conceito a ser desenvolvidos e recursos necessários a 4 de outubro. Criação do segundo orçamento e encomenda das peças.

09 de outubro de 2023: Entrega de componentes essenciais ao colégio. Aula de introdução a eletrónica com o professor a 12 de outubro de 2023. Começo da montagem da *BreadBoard*.

16 de outubro de 2023: Começo da discussão sobre o nome e o logotipo da boia. Continuação do desenvolvimento da *BreadBoard* e código em ArduinoIDE. Teste de Física a dia 19 de outubro.

23 de outubro de 2023: Acelerómetro e GPS em funcionamento total. Começo da pesquisa e testes em EasyEDA para PCB. Design dos logotipos para o projeto.

30 de outubro de 2023: Entrega dos módulos LoRa ao colégio. LoRa (*Transmitter & Receiver*) e barómetro funcionais. Começo do planeamento do vídeo para inscrição no Atlântico Júnior da FLAD.

06 de novembro de 2023: Começo do Relatório de Progressão de Projeto. Sensores de temperatura funcionais. Começo do design da boia em Fusion360 e da pesquisa de informação sobre a ferramenta ThingSpeak.

13 de novembro de 2023: Finalização e entrega do Relatório de Progressão de Projeto. Conclusão da preparação do código base de ThingSpeak para implementação no *software* Arduino. Design final da boia projetado.

20 de novembro de 2023: Conclusão da PCB para encomenda e do desenvolvimento do *software* ThingSpeak. Teste de Física a dia 23 de novembro.

27 de novembro de 2023: Encomenda da PCB e impressão da boia. Começo do desenvolvimento da alimentação da boia. Inscrição e submissão de vídeo de apresentação no concurso Atlântico Júnior 2023/24.

4 a 20 de dezembro de 2023: Conclusão do código ArduinoIDE para o sistema da boia. Criação de email para as comunicações com entidades externas, investigadores e criação de redes sociais. Chegada da PCB impressa. Fim do 1º Período.

3 a 26 de janeiro de 2024 Criação de redes sociais: @sea.network_cv no Instagram e planeamento de *posts*. Melhoria de design da boia.

29 de janeiro de 2024: Viagem a Genebra por 4 dos 5 membros do grupo.

5 a 16 de fevereiro de 2024: Impressão da boia em impressão 3D. Reunião com a Presidente da FLAD.

16 a 29 de fevereiro de 2024: Melhorias à boia. Reunião com António Campos do IST e mudança de estratégia de publicação por recomendação. Substituição do acelerómetro por giroscópio.

4 a 22 de março de 2024: Planeamento de estratégia de divulgação científica. Finalização do primeiro protótipo da boia. Fim do 2º Período.

8 a 25 de abril de 2024: Começo da fase de testes em laboratório e ambiente real. Correção de erros na boia.

25 de abril de 2024: Entrega da candidatura do à competição dos jovens cientistas. Finalização do Website, LinkedIn e formatação de redes sociais.

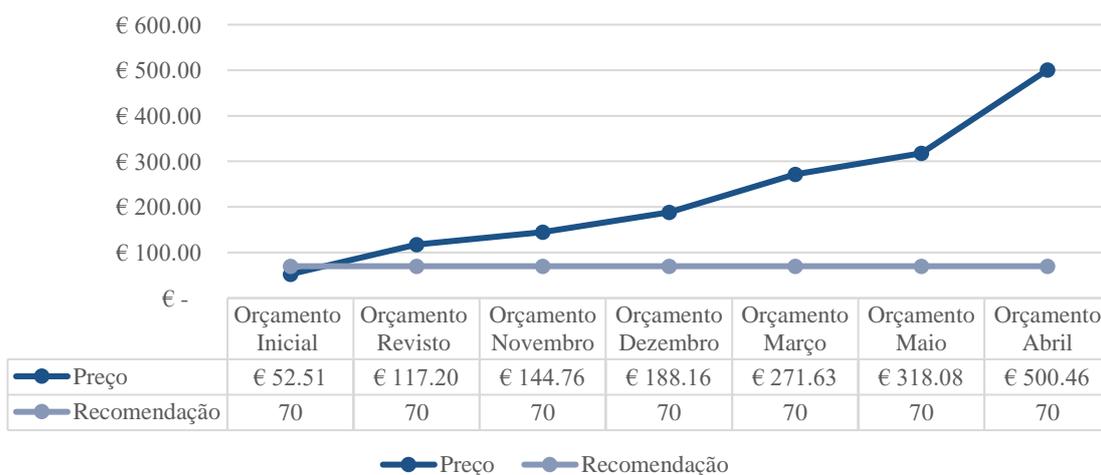
14 de maio de 2024: Impressão do modelo final da boia.

20 a 31 de maio de 2024: Última semana de aulas completa. Finalização de atividades letivas e do projeto. Fase de testes e tratamento final de dados e conclusão total do projeto.

Orçamentação

Para a orçamentação contámos com o apoio financeiro do Colégio Valsassina, chegando a um orçamento atual de 500,46 euros.

Evolução do Orçamento



Componente	Qnt.	Preço (€)
Sensor de Temperatura Shelly DS18B20	2	7,14
Módulo Grove - Acelerômetro Digital - 3 Eixos [$\pm 16g$] (ADXL-345) - Seeed	1	4,94
Módulo ESP32 Wroom NodeMcu WiFi CP2102	2	23,38
Módulo Grove - Barômetro - Sensor de pressão atmosférica (BMP280) - Seeed	1	9,20
Módulo GPS U-Blox NEO-7M compatível com Arduino - Velleman WPI430	1	40,22
Módulo SX1278 LoRa Ra-02 Ai-Thinker 433Mhz	2	27,56
Resistência de filme metálico 4.7kR 0.6W $\pm 1\%$ Ø2.5x6.8mm	3	0,30
O-Ring Nitril (NBR) 90 SHORE	2	8,98
Módulo Grove – Acelerómetro Digital de 6 eixos e giroscópio (LSM6DS3) - Seeed	1	11,80
Ficha macho p/ PCB para conectores Grove (10Pcs.) - Seeed	1	1,00
Conjunto de 5 cabos Grove 4 Pinos - 5cm - Seeed	1	1,60
Placa de ensaio "Bread board" 400 contactos	2	3,30
Conjunto de 40 cabos de ligação Jumper Dupont macho-macho - 300mm	1	7,02
Regulador de tensão LD1117V33 - 3.3V 0.8A	2	1,20
Condensador cerâmico 100nF 50V	1	0,10
Condensador Electrolítico 10uF 400V 105° Ø10x13.5mm	1	0,38
Conversor step up Uin: 2.5..5V Uout: 5V 600mA c/ saída USB - 2 peças - Whadda WPM403	1	6,00
Módulo carregador de bateria Li-Po 470mA - entrada Mini-USB	1	10,07
Painel fotovoltaico MICROSOLAR™ 6V 0.15A 0.9W - 120x82mm - Xunzel MS6V150	1	15,99
Bateria 3.7V 1100mAh Li-Po - 34x50x6mm	1	9,56
Módulo Boost Step Up - 0.9..4.2V para 5V - 40..480mA	1	2,05
PCB	1	3,87
Impressão 1º Protótipo	1	40,00
Cola e veda POLYMAX 300GR CRISTAL - Silicone	3	35,97
Âncora de barco QWORK de 1,5 kg	1	30,96
Borracha Impermeabilizante (Spray)	3	41.17
Impressão 2º Protótipo	1	116.70
Bidon estanque Canoa-Kayak 15L Rotomod	1	40,00

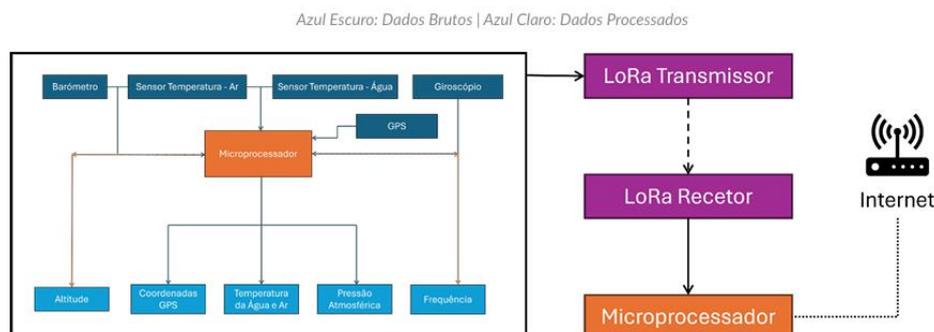
Execução

Sistema

O sistema foi idealizado de forma a que a boia recolhesse dados ao longo do tempo de uso e transmitisse esses dados para terra, onde um computador com maior capacidade de processamento pudesse retirar a maior quantidade de informação destes dados possível.

Depois da compra dos componentes eletrônicos, verificou-se que isto seria impossível, já que o protocolo de comunicação usado pelos transmissores e recetores seria o LoRa, que apresenta pesadas limitações na quantidade de dados a enviar. No entanto, o nosso maior obstáculo para que o processamento de dados não possa ser feito num melhor sistema é o ThingSpeak, a plataforma que utilizamos para expor os nossos dados ao público geral. O ThingSpeak tem em si integrado o MATLAB, ferramenta com maior poder de tratamento de dados do que o ESP32, onde idealmente iria ser feito o tal processamento, no entanto, a versão gratuita do ThingSpeak apenas atualiza dados de 15 em 15 segundos. Na prática, o que isto significa é que, por exemplo, só obteríamos a frequência das ondas num determinado período de tempo 8 horas e 30 minutos após a recolha desses dados.

Deste modo, o sistema foi adaptado para recolher e processar os dados *in loco*, de forma a que fosse possível comprimir os dados num pacote final e enviá-lo para divulgação em terra, otimizando a capacidade de transmissão de dados disponibilizada.



Recolha de dados

O grupo desenvolveu uma PCB personalizada na plataforma EasyEda, que foi usada para montar os sensores necessários para a recolha de dados. Estes foram: 2 sensores de temperatura Shelly DS18B20, 1 acelerómetro digital ADXL-345, substituído depois por um acelerómetro digital de 6 eixos e giroscópio LSM6DS3, 1 barómetro BMP280, 1 módulo GPS U-Blox NEO-7M, 1 *micro controller unit* ESP32, e o transmissor SX1278 LoRa de 433Mhz. Também foram colocadas 3 resistências de 4.7k Ω

Estes componentes permitem obter dados sobre a aceleração, pressão atmosférica, temperatura ambiente e da água e posição GPS. Com estes dados, o grupo procurou tratá-los de forma a obter dados mais úteis aos utilizadores deste sistema, como a frequência das ondas, a sua altura ou a sua potência energética. Para isso foi necessário fazer tratamento dos dados brutos recolhidos e recorrer a diversas fórmulas matemáticas.

Processamento e Tratamento de dados

O processamento dos dados é feito no NODEMCU ESP32 de cada boia, que compila e transmite os dados depois de processados para as *groundstations*. Assim os dados transmitidos consistem em: frequência e altitude das ondas, temperatura da água e do ar, pressão atmosférica e coordenadas GPS, sendo depois usados estes dados para obter um gráfico de representação das ondas, o seu período e a sua potência.

Destes dados, as temperaturas, pressão atmosférica e GPS resultam de medições diretas, a altitude e frequência das ondas de medições indiretas na boia e o gráfico de representação das ondas, o seu período e potência resultam de medições indiretas feitas pelo MATLAB na plataforma de divulgação dos dados, ThingSpeak.

Cálculo e Análise da Frequência

Para o cálculo da frequência das ondas, é utilizada a transformada rápida de Fourier (*Fast Fourier Transform* - FFT), na amostra de dados da aceleração em z – eixo vertical, que permite retirar as frequências predominantes num sinal (no caso, apenas retira-se a frequência principal das ondas). Para complementar estes cálculos, são aplicados diversos filtros, utilizados para serem capazes de retirar a frequência das ondas, quer estas sejam perfeitamente sinusoides, quer estas tenham um comportamento mais parecido ao do mar, já que a superfície fluída da água apresenta muito ruído.

Para cada amostra, são recolhidos 2048 dados da aceleração em z (ac_z) durante um período de 102.40s, ou seja, cada dado é recolhido a cada 50ms. Para se realizar a FFT é necessário que a quantidade de dados brutos de ac_z a ser analisado seja de 2^x , ou seja, o nosso código só trabalha com potências de base 2; foi assim decidido que a quantidade de dados a ser analisada seria de 2048, já que, devido às limitações do ESP32, este apresenta falhas recorrentes quanto tenta trabalhar com 4096 dados. Por outro lado, foi decidido que seria o ideal seria recolher dados de 50ms em 50ms, pois assim seria recolhida uma amostra de 20 dados por segundo, ao mesmo tempo que se alargou o tempo de recolha de dados, ficando assim o nosso módulo mais capacitado a conseguir calcular mais frequências.

No caso de serem recolhido dados numa onda perfeitamente sinusoidal, a amostragem de dados será de certa forma idêntica àquela mostrada na Figura 1 (podendo, obviamente, variar consoante a altitude e a frequência das ondas) (como o gráfico foi apresentado como demonstração, só estão dados recolhidos durante 20s); para conseguir estes resultados, foram realizados testes em que se subia e descia o acelerómetro durante um período e uma altura previamente definidos, que se mantinham constantes ao longo do teste; um exemplo deste teste é possível ver aqui: <https://www.youtube.com/shorts/kcO296FvCrc>.

Exemplo de ondas sinusoidais

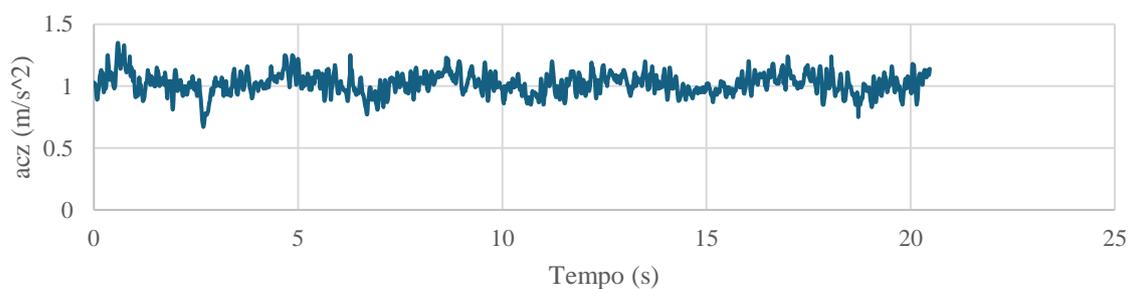


Figura 1: Gráfico da ac_z numa onda perfeitamente sinusoidal simulada.

No caso de recolhermos dados de forma a imitar o comportamento do mar, a amostragem de dados deverá ser idêntica à apresentada na Figura 2 e 3; neste caso, o módulo só subia e descia após um período de tempo predefinido, mantendo sempre este período e a altitude constantes; enquanto o dispositivo não efetuava uma “onda” eram realizados movimentos aleatórios com o módulo, para simular uma situação real, como é possível ver no seguinte vídeo: <https://www.youtube.com/shorts/WH1rZAL2oaM>; estes movimentos poderiam ser menos agressivos(originando gráficos idênticos ao da figura 2) ou mais agressivos (originando gráficos idênticos ao da figura 3), consoante o objetivo do teste .

Exemplo de ondas do mar calmo

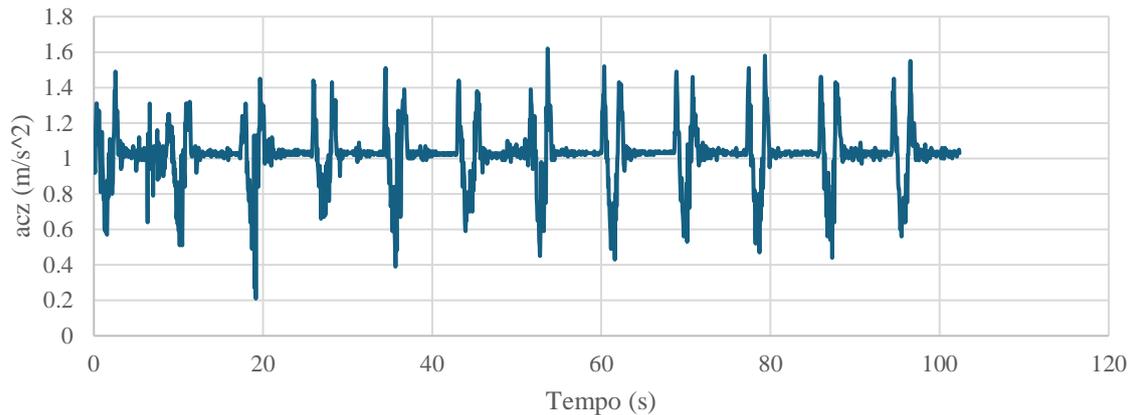


Figura 2: Gráfico da acz numa onda do mar simulada sem perturbações

Exemplo de ondas de mar bravo

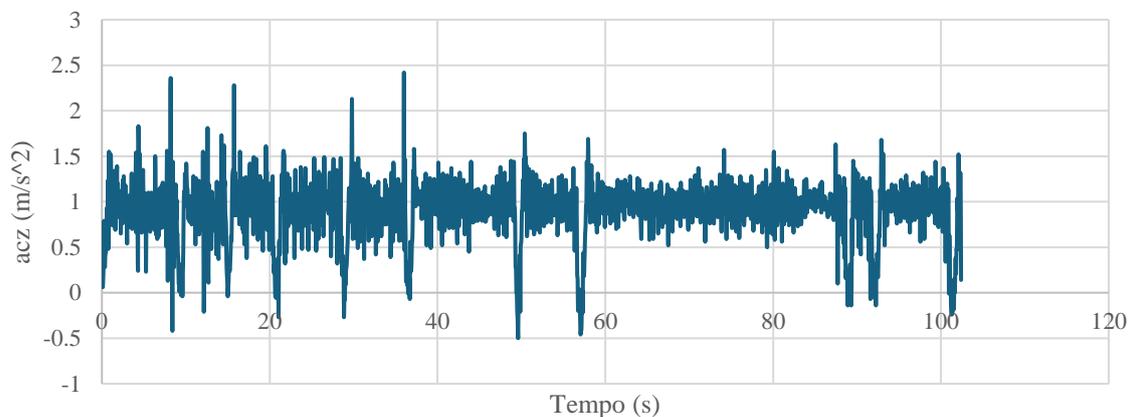


Figura 3: Gráfico de acz numa onda do mar simulada com perturbações

Filtros aplicados antes e após a FFT

Antes de ser aplicada a FFT, são aplicados filtros para garantir que a frequência obtida é relativa à frequência **das ondas** e não de **uma onda**. Para explicar esta crucial diferença, faremos uso do seguinte gráfico (Figura 4), cujos dados foram obtidos realizando testes parecidos ao do vídeo <https://www.youtube.com/shorts/WH1rZAL2oaM>.

Exemplo de 3 ondas do mar

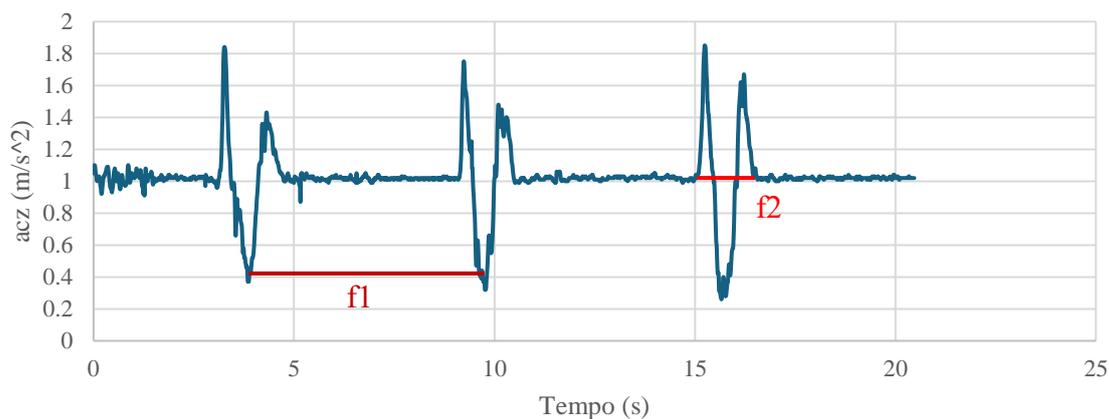


Figura 4: Gráfico de acz de 3 ondas do mar simuladas.

Através da análise de diferentes picos, concluímos que há duas frequências principais neste gráfico: em primeiro lugar, a **frequência das ondas**, ou seja, quanto tempo decorre entre ondas (f1). Como podemos observar no gráfico, este período é de cerca 6 segundos (0,1667Hz). Por outro lado, como podemos observar no gráfico, também temos informação sobre o **período de uma onda**, ou seja, quanto tempo é que decorre entre a onda se iniciar e acabar (cerca de 2s, como é possível observar no gráfico (f2)).

Para garantir que a nossa FFT expunha sempre a frequência das ondas e não a frequência de uma onda, foi utilizado um filtro, o qual transformava todos os valores maiores que 1 m/s² em iguais a 1m/s². Assim, sempre que fazíamos a análise destas ondas, os gráficos mostrar-nos-iam que apenas existia 1 pico (para baixo) para cada onda, ao invés de 3 picos (2 para cima e 1 para baixo), onde, eventualmente, poderíamos obter resultados errados relativamente às ondas. Um exemplo do uso deste filtro está explícito nas Figura 4 (pré-filtro) e 5 (pós- filtro).

Exemplo de 3 ondas no mar com filtros pré-FFT

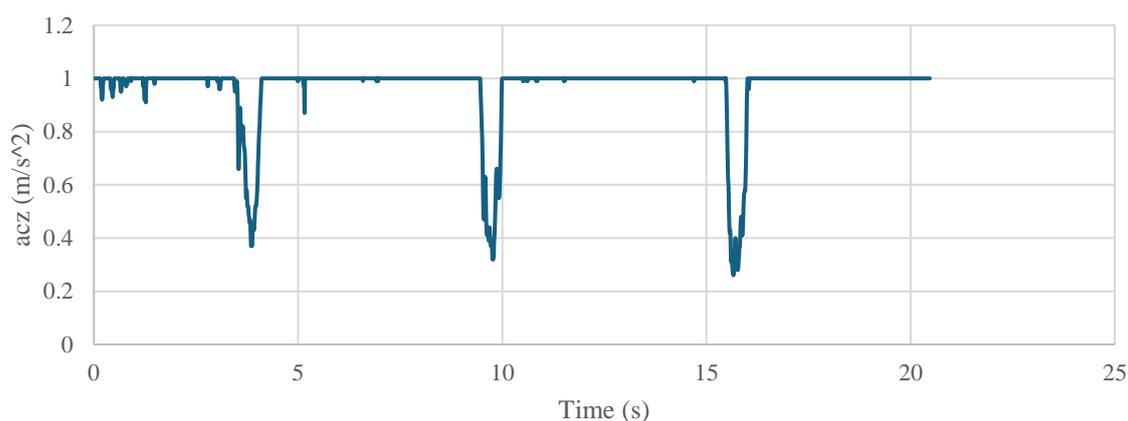


Figura 5: Gráfico da acz de 3 ondas simuladas após aplicação de filtros pré-FFT

Também são utilizados filtros após a transformada de Fourier, de modo a garantir que a frequência extraída seja a desejada. Como é possível ver naquele vídeo, a frequência mais frequente que o nosso giroscópio iria detetar não é, efetivamente, a que se origina pelas ondas do mar, mas sim a causada pelos movimentos aleatórios que a boia terá sempre. Para colmatar

este problema, foi aplicado um filtro no qual só é possível que a frequência mais frequente seja inferior a 0.49Hz, independentemente da magnitude de frequências acima deste valor. Assim sendo, a nossa boia fica somente com a capacidade de identificar corretamente a frequência de ondas dentro do intervalo de 0.02Hz a 0.48Hz.

Outras informações relevantes

Em teoria, o módulo consegue fornecer o período de ondas cujo qual seja de 2.08s a 51.2s. A nossa boia só consegue avaliar corretamente períodos a partir de 2.08s devido ao explicado relativamente a filtros aqui em cima. Por outro lado, como só recolhemos dados durante 102.4s, e como precisamos que passem pelo menos duas ondas para poder averiguar o período entre elas, a nossa boia só consegue dar informações corretas se os períodos entre ondas não excederem os 51.20s. Na prática, a nossa boia apresenta ótimos resultados para períodos entre 4s e 20s, com erros que não excedem os 5%, mesmo quando são realizados testes em que se simula uma grande perturbação no mar, salvo raras exceções¹.

Todo o tratamento de dados é elaborado na boia, devido às limitações referidas sobre o módulo LoRa (incapacidade de mandar muitos dados num só “pacote”), mas especialmente pelo ThingSpeak (só consegue atualizar dados de 15 em 15 segundos). Idealmente estes cálculos iriam ser feitos em melhores sistema, tais como o MATLAB.

Apesar de a nossa boia conseguir apresentar resultados caso o período entre ondas seja de 2.08s a 51.20s, esta é incapaz de apresentar todos os valores existentes dentro desse intervalo (ou seja, desde 0.02 Hz a 0.48Hz). Isto acontece devido à natureza da própria FFT e às limitações do poder de computação que o ESP32 tem. A FFT essencialmente compara um sinal fornecido com diversas frequências, e a partir daí atribui uma magnitude a cada uma delas: esta magnitude indica a prevalência dessa frequência nesse sinal. Idealmente, calcularíamos a magnitude do maior número de frequências possível, para obtermos um resultado o mais exato possível; devido ao poder computacional do Arduino, este carece da habilidade de conseguir correlacionar o nosso sinal com muitas frequências diferentes. Assim sendo, o nosso programa só é capaz de calcular a magnitude de frequências previamente estabelecidas no nosso código, e a partir daí retirar a frequência prevalente; imagine-se por exemplo, que temos um sinal cuja **única** frequência é de 0.139 Hz, mas o nosso programa só consegue calcular a magnitude para as frequências 0.136Hz e 0.140Hz; nesse caso, o resultado final seria de 0,140Hz, apesar de não existirem outras frequências neste sinal, pois é o valor mais próximo do valor real.

Foram realizados testes a rigor para garantir uma boa recolha de dados; assim sendo, foram introduzidos parâmetros para cada teste, ou seja, para cada teste definiu-se sempre qual a frequência e altitude com as quais os dados iriam ser retirados, que formato de teste é que ia ser utilizado (“onda sinusoidal” ou “onda igual ao mar”), a quantidade de dados que ia ser recolhida, a “agressividade” dos erros aleatórios, o tempo entre cada recolha de dados e tempo total que o teste ia ser realizado. Para cada variável eram realizados pelo menos 3 testes idênticos.

Foram realizados mais de 200 testes para a frequência até se chegar à versão final do código. Toda a exportação de dados foi feita utilizando o software Coolterm.

¹ Só no caso do mar sofrer de perturbações especialmente intensas e constantes é que os resultados neste intervalo ficam afetados. Deve-se salientar que o nosso módulo consegue ter resultados tão bons neste intervalo devido à qualidade do código, mas também devido à hidrodinâmica da nossa boia, que permite que a mesma se consiga manter estável.

Em muitas ocasiões, para analisar a qualidade dos resultados que eram conseguidos através do código implementado no ESP32, os dados conseguidos através do giroscópio eram analisados tanto no Arduino como no programa JupyterLab. Essencialmente, o JupyterLab é uma ferramenta que permite analisar profissionalmente dados recolhidos e fazer análises, utilizando Python, uma linguagem de programação simples. Este sistema tem um maior poder de computação do que o Arduino, e, portanto, foi escolhido para fazer a comparação entre os diversos resultados obtidos, procurando sempre então melhorar a qualidade do código no Arduino e entender as suas limitações. É importante salientar que o código utilizado no JupyterLab nos foi disponibilizado pelo investigador António Campos, do IST, cujo contributo foi absolutamente essencial para os bons resultados que a nossa boia atualmente apresenta relativamente ao tratamento de dados para a frequência.

É importante referir que o tempo de medição não é exatamente 102,40s. Isto acontece pois os sistemas eletrónicos não demoram sempre o mesmo tempo a realizar as mesmas tarefas - é uma característica intrínseca dos mesmos, a qual nós não temos qualquer controlo. O valor indicado (102.40s) é o resultado de uma média de várias amostras. Deve-se ter em conta, no entanto, que, no máximo, o tempo real difere da amostra indicada em 1s, ou seja, o tempo de recolha de dados estará sempre entre os 101,40s e 103,40s (estas conclusões têm por base os resultados dos testes que foram realizados).

Análise da Temperatura

Os dados relativos às temperaturas do ar e da água são extraídos diretamente a partir do sensor Shelly DS18B20, que é resistente à água.

É bastante difícil perceber a exatidão dos sensores de temperatura, porque é difícil, em primeiro lugar, saber com confiança os valores que a temperatura apresenta. Não é fiável utilizar outro instrumento de medida (porque não temos à nossa disposição instrumentos os quais conhecemos a exatidão ou a incerteza associada), assim como não foi possível utilizar, por exemplo, a fórmula de arrefecimento de líquidos de Newton: $T(t) = Ts + (T_0 - Ts) \cdot e^{-kt}$, onde $T(t)$ é a temperatura em função do tempo, T_0 é a temperatura inicial, Ts é a temperatura ambiente, t é o tempo e k é uma constante - já que k varia, por exemplo, consoante o material em que o líquido está inserido, a área de superfície que o líquido tem com o material, entre outros. O grupo limitou-se então a fazer testes em que se deixou o sensor num local que se manteria sempre à mesma temperatura, de modo a averiguar a sua incerteza, tendo em conta que disponibilizamos 20 bites para a recolha da temperatura (quanto mais bites mais precisa será a medição, até um certo *threshold*).

No que toca à incerteza medida, esta é de 0.06°C, enquanto que a precisão pode variar em até 0.13°C relativamente à média. Para chegar a estas conclusões, foram realizados 3 testes, em que cada um deles se calculou 500 amostras do valor da temperatura num local em que essa mesma temperatura era uniforme.

Análise da Pressão Atmosférica

Tal como o ocorrido com a temperatura, não temos barómetros certificados com os quais possamos retirar boas conclusões à cerca a sua exatidão: no entanto, após alguns testes, chegamos à conclusão de que a sua incerteza de medida é $\pm 1\text{Pa}$, e que relativamente à sua precisão, pode apresentar valores que variam até $\pm 16\text{Pa}$ relativamente à média. Para chegar a estas conclusões, foram realizados 3 testes, em que cada um deles se calculou 500 amostras do valor da pressão atmosférica num local em que essa mesma pressão atmosférica era uniforme.

Para medir a pressão, foi utilizado o sensor BMP280.

Cálculo e Análise da Altitude

Durante o projeto foram tentados diversos métodos para calcular a altitude e tentar melhorar sempre a sua exatidão. Assim, utilizamos a fórmula hipsométrica ($h = \frac{\left(\left(\frac{P_0}{P}\right)^{\frac{1}{5,257}} - 1\right) \times (T + 273,15)}{0,0065}$), em que P_0 é a pressão média calculada, P é a pressão atmosférica e T é a temperatura.

Para utilizar esta fórmula, começamos por calcular uma vez a temperatura do ar e seguidamente 500 valores de pressão, em intervalos de 50ms, durante 25s, e depois fazemos a média dos mesmos. Seguidamente, calculamos 500 valores de altitude, e definimos o nosso maior valor como sendo a altitude máxima da onda.

Houve várias abordagens para tentar apresentar os valores da altitude. Tentamos que o P_0 fosse 101325Pa (valor da pressão média da atmosfera ao nível da costa portuguesa), tentamos também integrar os valores da aceleração duas vezes e ainda fazer uso da fórmula de ondas harmónicas, mas este método é aquele que oferece melhores resultados.

Dados GPS

Para os dados GPS, a recolha será feita pelo Módulo U-BLOX NEO-7N. Com este módulo saber-se-á com alta precisão a latitude e a longitude onde se encontra a nossa boia. Esta informação ficará disponível somente para os responsáveis do projeto (não irá ser divulgada online), devido a razões de segurança.

Recetor e ThingSpeak

Neste momento o nosso recetor tem capacidade testada de receber 2 transmissores diferentes, para isto temos dois canais operacionais na plataforma do projeto: <https://thingspeak.com/channels/2383813> e <https://thingspeak.com/channels/2534703>.

Um dos maiores defeitos da boia projetada é que os módulos que esta tem não estão certificados, comprometendo assim a fiabilidade dos dados. Para colmatar este problema, pode-se aumentar a amostragem de dados recolhidos colocando mais que uma boia na mesma área de estudo, daí optarmos pela estratégia de um mesmo recetor receber os dados de múltiplas boias. Para distinguir os dados das boias, são colocados indicadores no final dos pacotes LoRa, criando uma verdadeira rede de dados (SeaNetwork).



Figura 6: Representação do Sistema

MATLAB

Após explorar-se os diversos recursos que o ThingSpeak disponibiliza, começou-se a utilizar o MATLAB, uma ferramenta que permite construir novos gráficos através de dados fornecidos. Deste modo, foram, até ao momento, criados três gráficos diferentes que fornecem mais informação sobre as condições do mar.

O primeiro gráfico essencialmente recria uma onda perfeitamente sinusoidal, através do uso do últimos valores da frequência e da amplitude máxima. O gráfico é criado usando a fórmula $y(t) = A * \cos(2\pi t f)$ onde A é a amplitude máxima, t é o tempo e f é a frequência predominante. Um exemplo deste gráfico é visível na Figura 7.

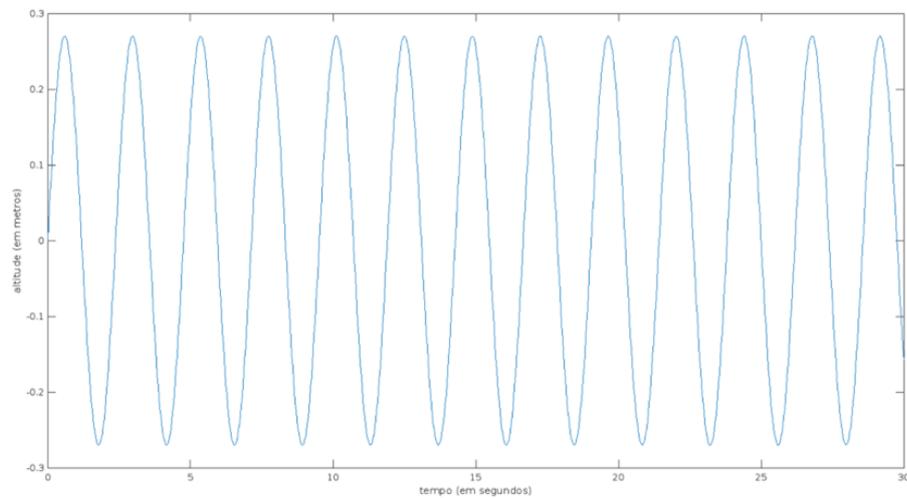


Figura 7: Gráfico de uma onda sinusoidal em que $f \approx 0,4$ e $A = 0,27$

O segundo gráfico (Figura 8) simplesmente apresenta o período das ondas. Este valor é igual ao inverso da frequência.

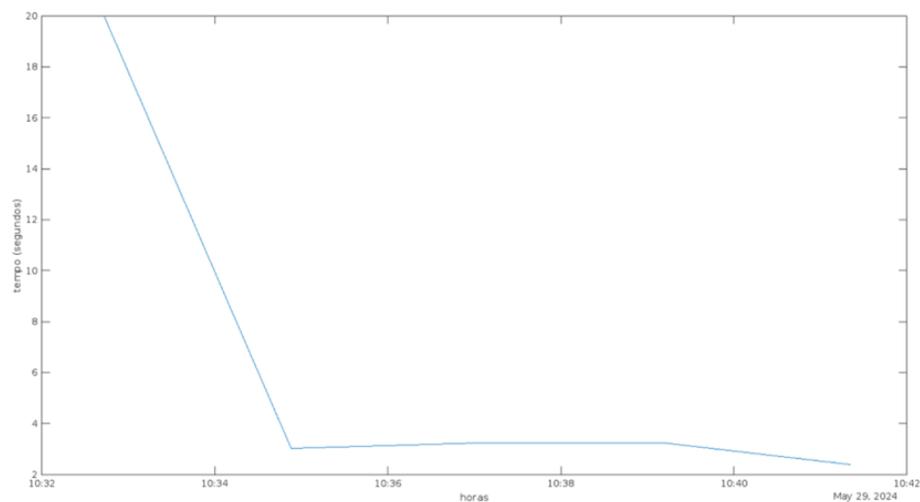


Figura 8: Gráfico do período das ondas

Finalmente, o nosso último gráfico (Figura 9) apresenta o valor da potência das ondas, calculado a partir da fórmula $P = \frac{1}{16} \times \rho g H^2 T$, onde ρ é a densidade, g é a aceleração gravítica, H é a altura e T é o período.

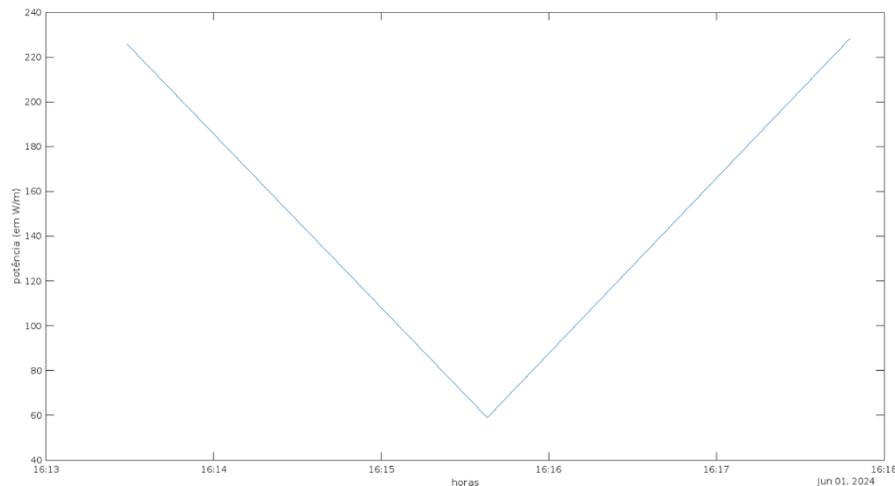


Figura 9: Gráfico da potência das ondas

Alimentação

O nosso sistema é alimentado por um painel solar de 6.6V que integra no seu circuito um sistema de *step-up/step-down* que permite garantir que a tensão criada pelo painel solar é adaptada à tensão que os componentes usam para o seu funcionamento. De maneira a garantir maior autonomia do nosso sistema, foi também adicionada uma bateria de lítio de 4200mAh que, devido à economia energética do sistema, consegue ser carregada pelo excesso de energia produzido pelo painel solar, permitindo diminuir a dependência da boia de agentes climatéricos.

Design da Boia e Ancoragem

O design da boia foi feito com recurso ao Fusion 360. Após várias versões, foi impressa a nossa primeira boia em PLA. Esta versão da boia tem 310.8 mm de altura e 280.0 mm de largura, tendo uma forma esférica achatada no topo, à qual foi adicionado um suporte para o painel solar, na parte de cima, e uma quilha, na parte de baixo.

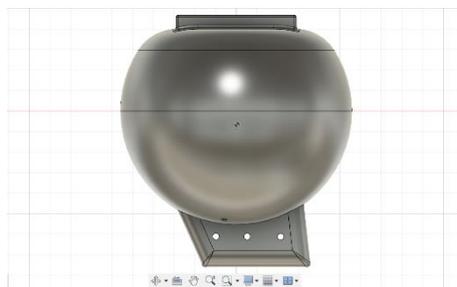


Figura 10: Design do primeiro protótipo da boia

O corpo central da boia tem um diâmetro exterior de 280.0 mm e um diâmetro interior de 240 mm. Esta diferença deve-se à parede interna da boia (40.0 mm) que garante a proteção do material no interior. A meio da parede temos uma calha com 19.8 mm de largura que permite o encaixe de um O-ring feito à medida para a selagem da boia.

No interior da boia, existem quatro cilindros cujo propósito é a criação de um suporte no qual conseguimos colocar a caixa onde será colocada a PCB, permitindo a estabilidade da mesma e uma maior fiabilidade dos resultados, uma vez que a PCB apenas irá oscilar devido a movimentos da boia causados pelo mar, não havendo qualquer movimento do sistema relativamente à boia. Na metade superior, existe uma pequena caixa que serve para o armazenamento e proteção do sistema de produção energética, que permite o funcionamento de todo o nosso sistema. Existem também dois buracos, um na parte superior e outro na parte inferior da boia, onde iremos colocar os sensores de temperatura pertencentes ao sistema.

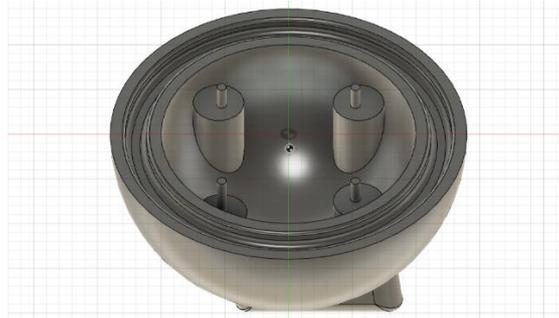


Figura 11: Projeção da parte interior da boia (metade inferior)

No seu exterior, na parte inferior, a boia tem uma quilha, com a forma de um paralelepípedo com 131 mm de base menor, 160 mm de base maior, 77 mm de altura e 40 mm de espessura. Esta peça, em conjunto com o sistema de ancoragem, permitem uma maior estabilidade da boia e garantem o retorno desta à posição inicial, após as múltiplas oscilações a que estará sujeito. Esta quilha possui também três orifícios que servem para prender a âncora à boia. Na parte superior, possui um suporte para a colocação do painel solar com uma abertura que permite a conexão do mesmo ao sistema que permite que este funcione.

Após a impressão foram encontrados dois problemas principais que teriam de ser corrigidos para a impressão da versão final. Primeiro, os orifícios para os sensores de temperatura necessitavam de ser alargados cerca de 1 mm, que foi facilmente alterado. Adicionalmente, a selagem da boia necessitava de maior segurança, que seria conferida caso existisse um fecho entre as duas metades da boia. Para isto, foram criados quatro suportes em cada metade da boia (oito no total), distribuídos igualmente em redor do diâmetro externo da boia. Estes suportes estão alinhados aos pares, um em cada metade, que serão unidos por dois parafusos, garantindo uma maior resistência do sistema de selagem aos movimentos mais bruscos do mar.

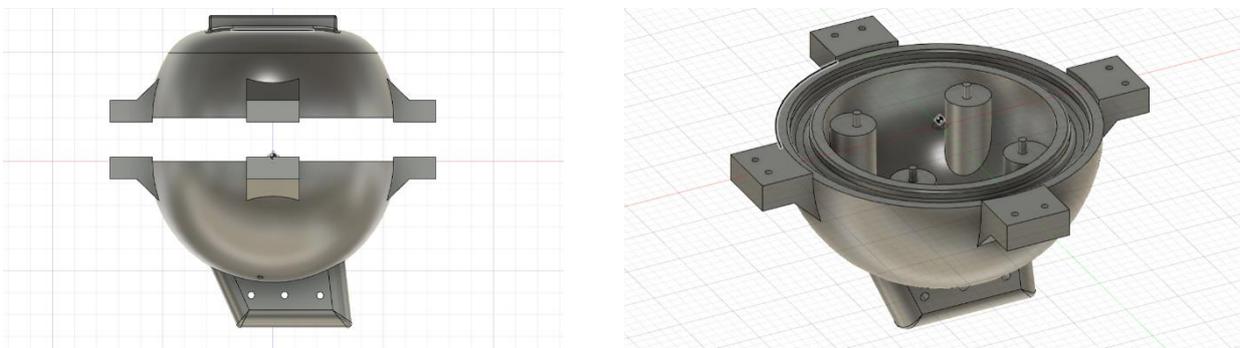


Figura 12: Projeção do segundo protótipo.

Com estas mudanças realizadas, foi possível imprimir a boia no FabLab de Lisboa com o auxílio da Beatriz e do Afonso, que formataram as características da impressão com o software Cura. O protótipo final da boia tem paredes com uma espessura de cerca de 3.2 mm (quatro

paredes internas de 0.8 mm) que conferem um aumento substancial à resistência da boia, face à primeira versão.

Adicionalmente, a grossura das paredes permitiu que se diminuísse a densidade do *infill* da boia, tornando-a mais leve. Este ficou num valor de 10%. Alterámos também a forma do *infill* da boia para uma de giroide (Figura 13). Graças à sua forma similar à de uma onda, em várias direções, esta opção confere uma grande resistência, em diversas direções, a toda a estrutura da boia, algo bastante vantajoso, uma vez que os impactos que serão sofridos pela boia, irão atingi-la de vários ângulos e direções.

Está impresso em PLA, porém, uma versão comercial da boia teria de ser impressa em ABS ou ASA. Este material, em comparação com o do protótipo, apresenta uma resistência e durabilidade substancialmente superiores, ideais para períodos prolongados de exposição às condições marítimas.

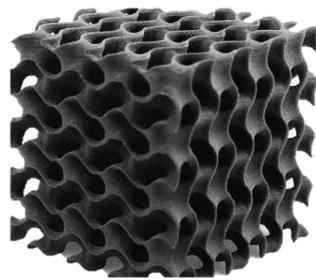


Figura 13: Representação de uma estrutura giroide.

Selagem e Isolamento

É crucial neste trabalho a garantia da integridade do sistema que o compõe, por isso, a resistência da boia à água foi um dos pontos mais importantes a avaliar.

Para que não exista risco de entrada de água no interior da boia, foi criado um O-ring feito à medida, devido à dificuldade em encontrar um com as dimensões necessárias. Este foi feito com recurso a silicone. Inicialmente, moldou-se o silicone nas calhas da boia e, após a solidificação do mesmo, as duas metades foram retiradas e retocadas nas falhas existentes. Depois disto, foi necessário unir as duas partes, e, para não correr o risco de, ao tocarem, as duas metades da boia criarem uma força de atrito que as danificaria com o passar do tempo, criou-se, também com silicone, uma superfície, com cerca de 5 mm de altura, que cobre toda a parede interior da boia na zona do encaixe das peças. Esta peça, em junção com os encaixes embutidos na boia, vai permitir a selagem desta, garantindo o bom funcionamento de todo o sistema.

Para reforçar a resistência ao ambiente em que se iria encontrar, cobrimos, também, a boia com spray impermeabilizante de PLA e borracha líquida.

Ancoragem

A boia projetada foi idealizada como uma boia geoestacionária e não de deriva, o que requer que haja maneira de a ancorar a um local definido ou equipá-la com um sistema mecânico de bombas de água que corrigisse a sua posição ao longo do tempo. Isto iria ser bastante complexo e requereria um aumento do tamanho e peso da boia, por isso o grupo pesquisou sobre opções de ancoragem sem sistemas mecânicos complexos através de cabos e cordas.

Uma grande desvantagem de sistemas de ancoragens convencionais é que o movimento da boia seria limitado verticalmente pela máxima extensão da corda, já que mesmo criando folga entre a profundidade do mar e comprimento de corda, a boia seria puxada para o ponto mais distante possível por correntes marinhas. Após chegar à sua extensão total, se ocorresse ondulação, a corda faria com que a boia não conseguisse acompanhar a subida de nível da água e fosse submersa e, portanto, significaria a perda de dados sobre a altura da onda.

O modelo que foi selecionado pela sua flexibilidade e baixo custo foi o modelo de catenária inversa, que usa um sistema de peso e contrapeso intermédio que permite a ancora agir como uma mola, limitando movimentações horizontais, mas admitindo movimentações verticais.

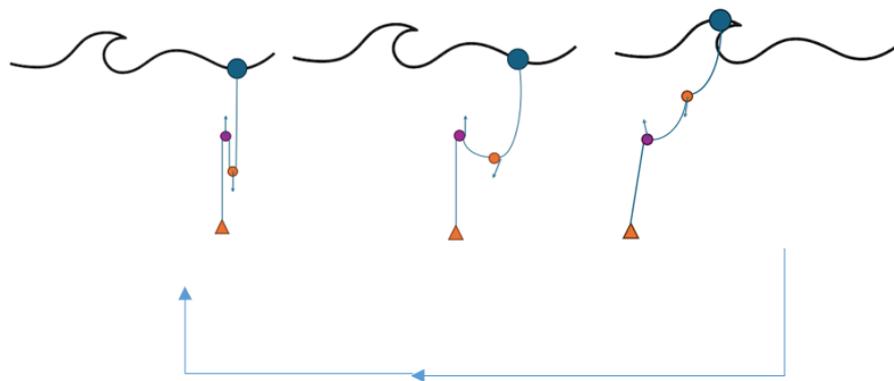


Figura 14: Modelo de funcionamento da ancora projetada

Divulgação

Para divulgação do projeto, o grupo criou contas nas redes sociais Instagram, YouTube e LinkedIn, onde promovemos os objetivos do projeto e o seu progresso. Foi também desenvolvido um *website* com recurso à plataforma Webflow, e comprado o domínio www.seanetwork.eu.

Resultados Experimentais

Testes de erro de altura e frequência

Devido à grande quantidade de testes laboratoriais feitos para estudo dos erros de altitude e frequência, iremos apenas expor as tabelas finais associadas a cada grandeza.

Frequência do teste (Hz)		0,25		0,11(6)		0,0(6)		0,05		0,04	
Altura testada (cm)		80	120	80	120	80	120	80	120	80	120
Erro Relativo (%)	Exp. 1	31,25	8,3	65	12,5	52,5	25	12,5	2,5	6,25	55,83
	Exp. 2	28,75	12	31	25,83	35	20,83	17,5	20,83	41,25	30
	Exp. 3	30,83	11,6	45	31,6	71,26	6,6	13,75	6,6	10	10
	Média	30,28	10,63	47	23,31	52,92	17,48	14,58	9,98	19,17	31,94

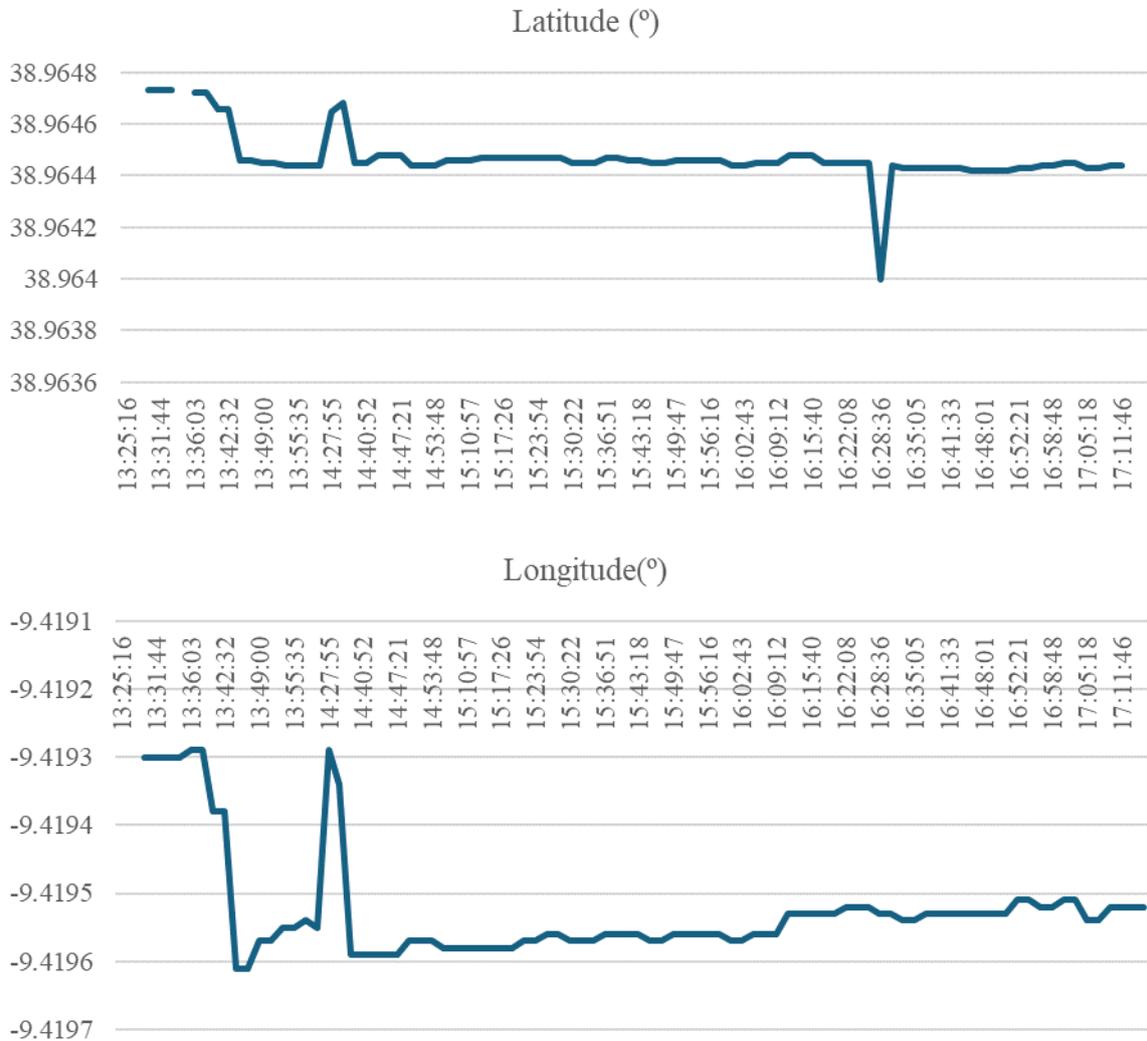
Cenário: Varia-se a altura em x centímetros, numa frequência definida, em que o erro das experiências é a variação relativa ao valor real da variação da altura.

Altura do teste (cm)		80					120				
Frequência testada (Hz)		0,25	0,11(6)	0,0(6)	0,05	0,04	0,25	0,11(6)	0,0(6)	0,05	0,04
Erro Relativo (%)	Exp. 1	0	2,81	4,76	0	0	0	2,81	4,99	0	25
	Exp. 2	0	2,81	4,76	0	0	0	2,81	4,99	0	0
	Exp. 3	0	2,81	4,76	0	50	96	2,81	4,99	0	0
	Média	0	2,81	4,76	0	16,(6)	32	2,81	4,99	0	8,(3)

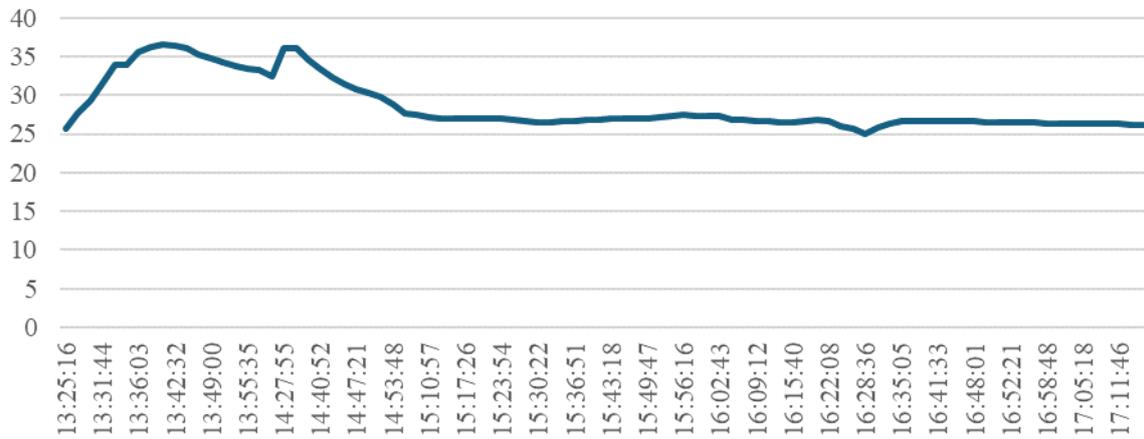
Cenário: Varia-se a altura em x centímetros, numa frequência definida, em que o erro das experiências é a variação relativa ao valor real da frequência.

Teste em condições reais no boião de teste

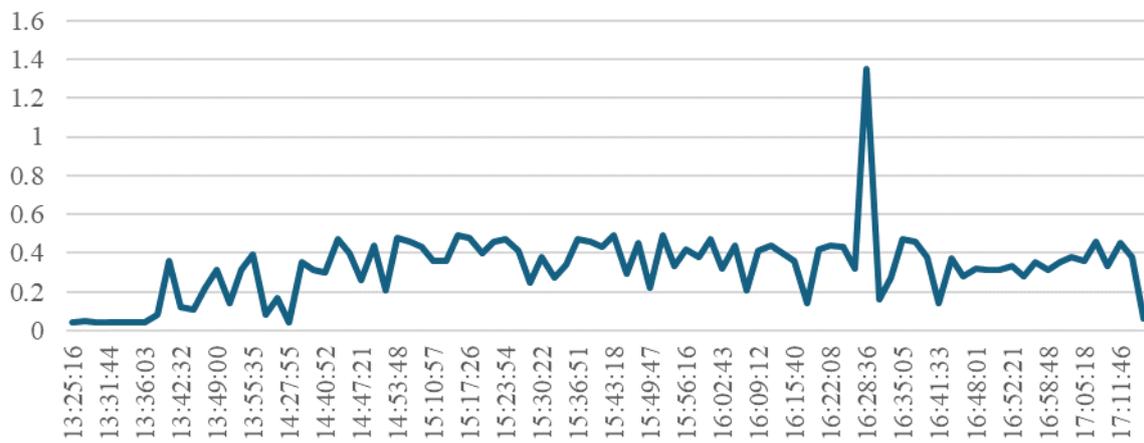
Para testarmos a capacidade do sistema desenvolvido recolher e transmitir informação durante longos períodos de tempo, sem arriscar danificar o dito sistema, este foi colocado num boião estanque que simularia a nossa boia e ancorado a uma zona costeira na Praia dos Pescadores da Ericeira, em Mafra. Este teste teve uma duração de 4 horas.



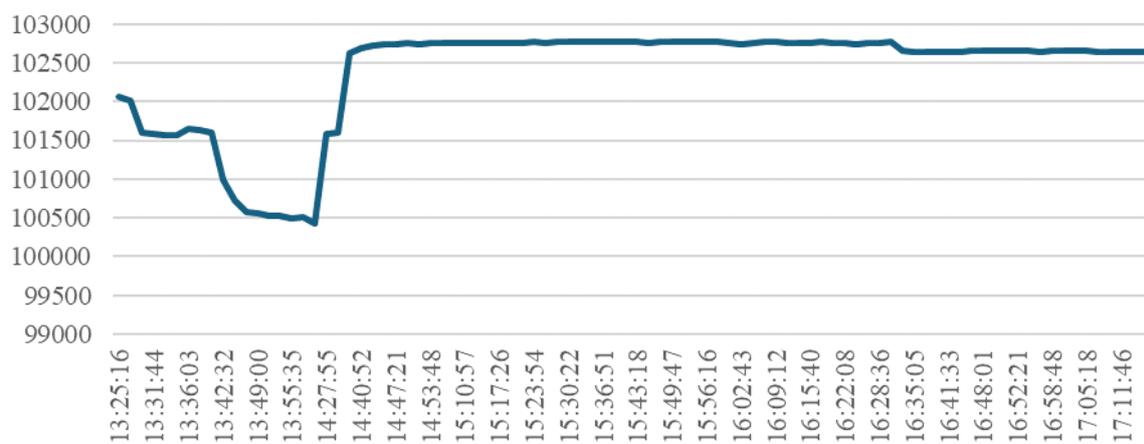
Temperatura do sistema (°C)



Frequência (Hz)



Pressão (Pa)

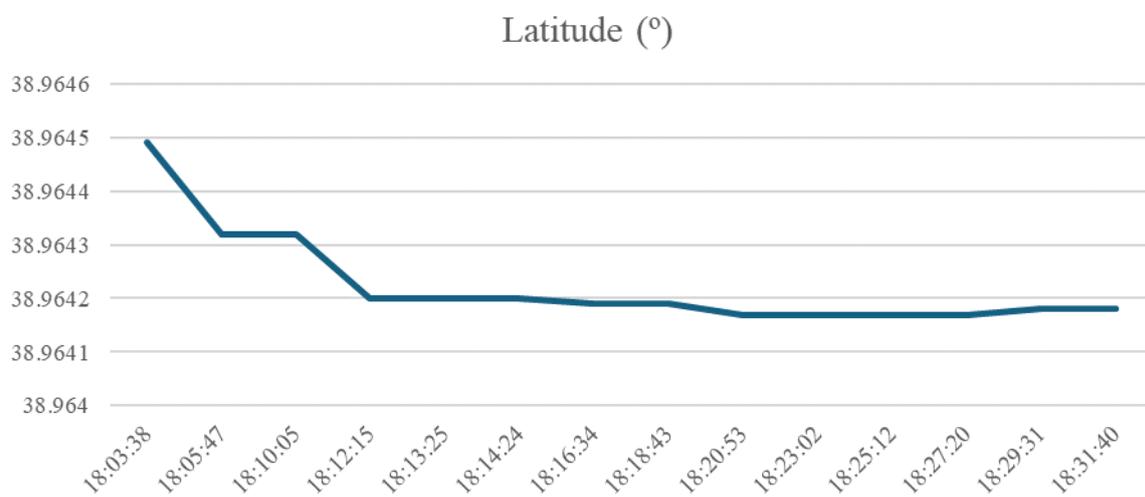


Teste em condições reais no primeiro protótipo

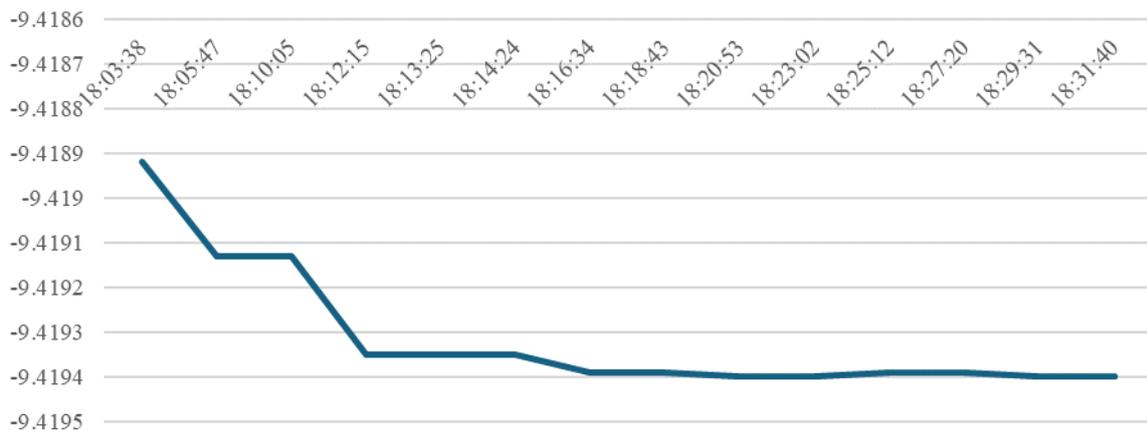
Para testar a capacidade do sistema desenvolvido recolher e transmitir informação na boia projetada, esta foi colocada na zona costeira da Praia dos Pescadores da Ericeira, em Maфра. Este teste teve uma duração de 30 minutos.



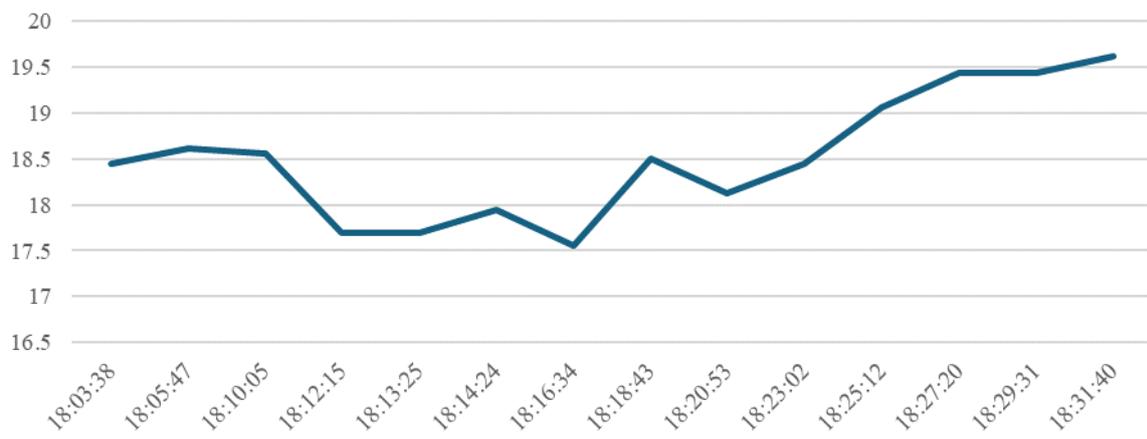
Figura 15: Protótipo 1 em fase de testes.



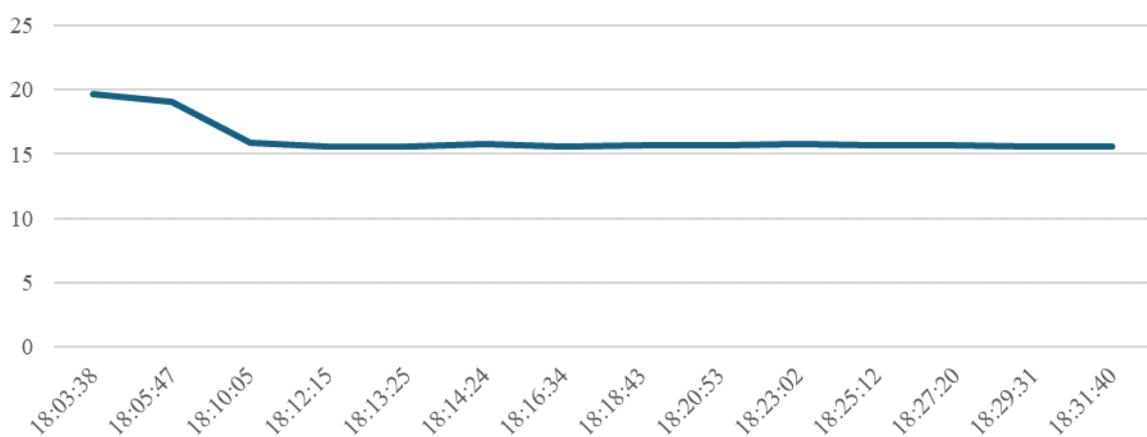
Longitude (°)

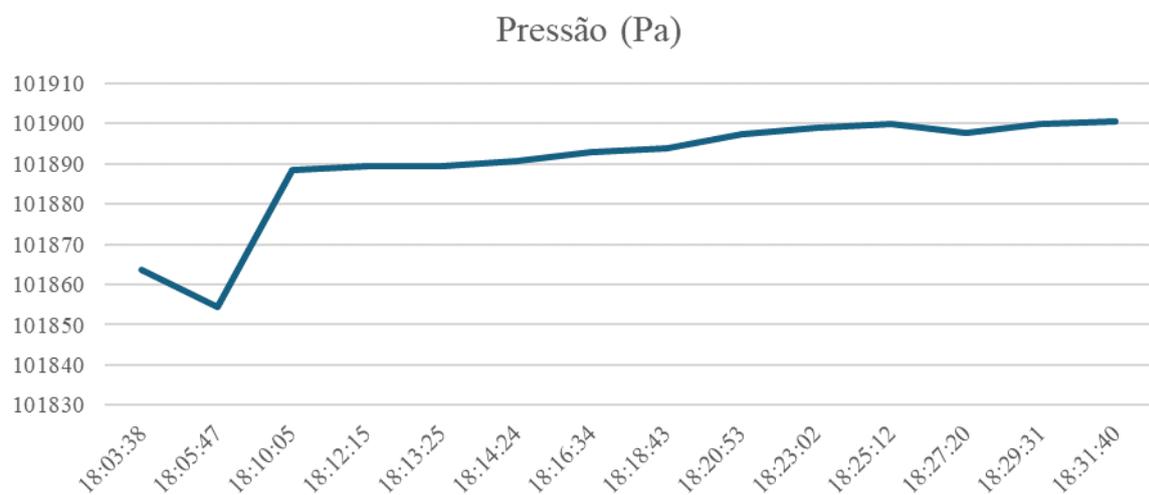
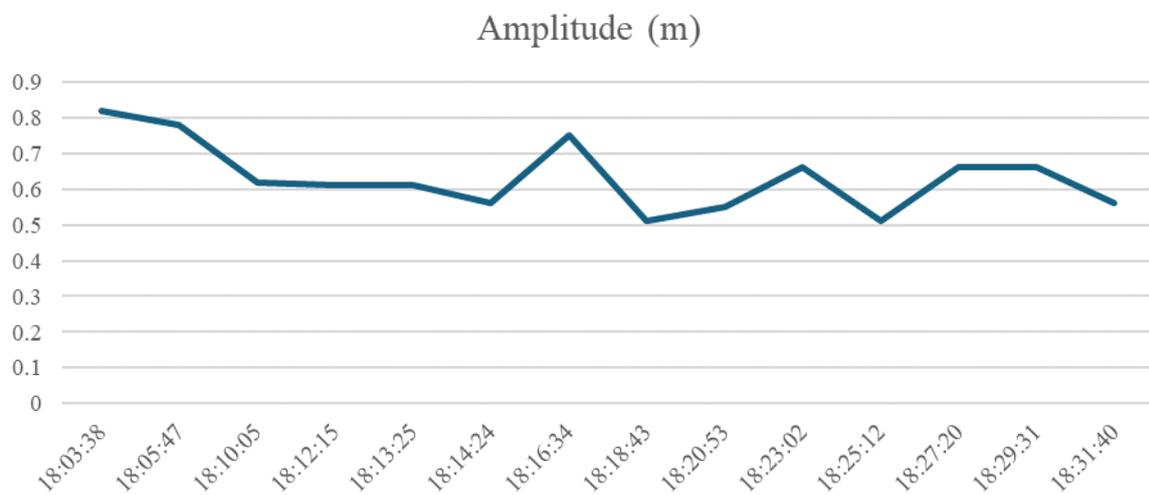
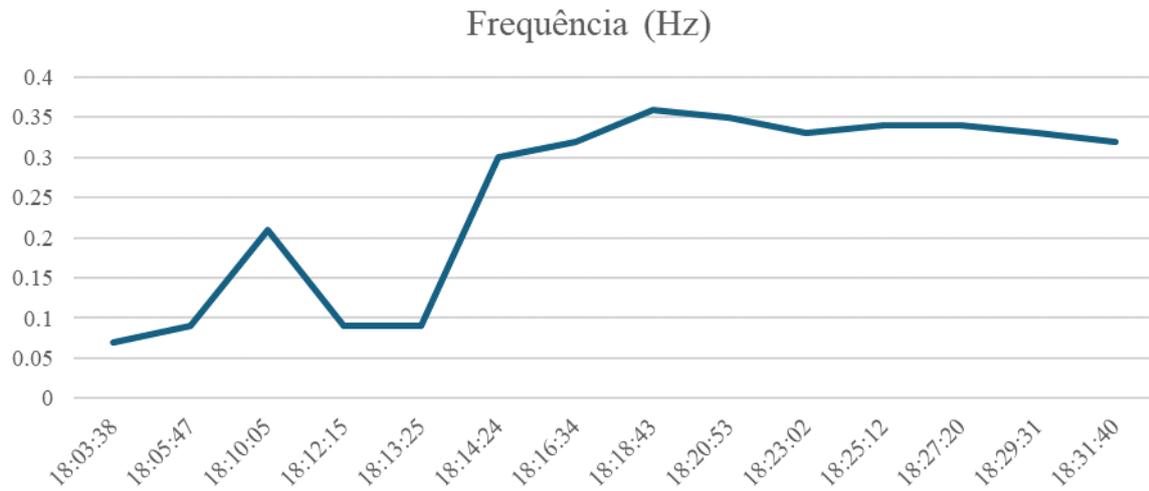


Temperatura do Ar (°C)



Temperatura da Água (°C)





Discussão de resultados

Testes laboratoriais

No teste da altitude foi possível verificar que, de modo geral, quanto maior a variação de altitude, menor o erro relativo associado a este, com exceção para frequências de recolha de dados de 0,04 Hertz, que se deve ao facto dos valores conseguidos com esta frequência (ou seja, simulação de ondas a cada 25s) podem ter sido gravemente afetados devido à limitação do tempo da recolha de dados que é em si 25 segundos, já que pode não ter conseguido “captar bem” a onda nesse intervalo de tempo. Também se conclui que 0,05Hz é a frequência em que o erro relativo dos valores da altura recolhidos é menor, não sendo possível indicar uma correlação linear entre frequência e a exatidão do cálculo da altitude.

Já no teste da frequência foi possível verificar que, de modo geral, a frequência tem erros relativamente pequenos, assegurando a qualidade dos dados, à exceção do erro na Experiência 3 com 120 centímetros de altura em que, possivelmente devido a uma anomalia, a frequência registou um valor próximo do dobro do valor real. O erro registado de 96% ocorreu devido a uma falha de procedimento laboratorial.

Também é possível ver que, no caso da frequência ser 0,04Hz (ou seja, fugindo às condições ideais que o nosso módulo tem para calcular a frequência, pois não pertence ao intervalo de 0,25Hz a 0,05Hz) apresenta já erros mais frequentes, e 25% e 50%, deixando-se afetar mais facilmente por erros aleatórios.

Teste no boião de testes

Devido a limitações do próprio boião usado para os testes, este limitou a quantidade de informação recolhida: a informação dos sensores de temperatura foi redundante e refletia a temperatura do sistema dentro da boia ao invés da temperatura da água ou ar e a amplitude das ondas, que utiliza a temperatura no seu cálculo foi por isso também invalidada. Devido ao formato pouco hidrodinâmico do boião, como é possível ver em <https://youtube.com/shorts/IFWWpWER54g?feature=share>, os dados da frequência lidaram com especial ruído o que levou a resultados mais irregulares. Também os valores da pressão foram afetados pelo sensor se encontrar num ambiente estanque, dependendo maioritariamente da temperatura dentro do boião (BBC, n.d.).

Os dados da temperatura no interior no boião indicam que o ESP32 está num ambiente ótimo para funcionar normalmente, ou seja, as condições ambientais não irão afetar a fidelidade dos dados. Como é possível ver, a máxima temperatura registada por volta dos 36°C, logo, esta é um ambiente onde o módulo pode trabalhar corretamente (as temperaturas ideais para o ESP32 são entre os 0°C e 50°C) (Espressif Systems, 2019). Como os protótipos (que serão pintados de cores claras, como branco, amarelo ou laranja) irão encontrar-se em condições semelhantes às que este boião presenciou, temos a garantia de que este irá elaborar os cálculos corretamente.

É importante notar que o teste foi realizado durante as horas de maior calor (13-17h), e por isso este teste confirma a capacidade do sistema aguentar perlongados períodos de tempo de exposição solar.

É importante notar que à hora 16:28 ocorre um pico tanto nos dados da frequência como da latitude: no que toca à frequência, esta apresenta um valor de cerca de 1,35Hz, e tal deveria ser

impossível devido aos filtros aplicados; por outro lado, existe um pico neste mesmo tempo que indica uma latitude de 38.9640, bastante diferente da média, que ronda os 38.9644; esta “pequena” diferença traduz-se numa distância de 40 metros, a qual não se verificou tendo em conta os valores de temperatura do sistema, podendo então se concluir que ocorreu devido a um erro do sistema.

Também houve um “pico” nos dados GPS na por volta das 14:27 horas, na qual a boia foi retirada da água para verificação das condições.

Teste no primeiro protótipo

Por precaução devido à original permeabilidade da boia, este teste foi mais curto. Nos primeiros minutos, é possível observar dados irregulares e inconsistentes, isto deveu-se ao facto da boia ter sido colocada a nado, daí sofrendo bastante turbulência no início do registo de dados.

Os gráficos da longitude e da latitude estabilizaram ao longo do tempo, indicando que a boia estabilizou no seu local.

Quanto à temperatura da água e do ar estes apresentam valores realistas. A temperatura da água manteve-se estável, correlacionando com a sua maior capacidade térmica mássica (BBC, n.d.); no que toca aos dados da temperatura do ar, estes têm uma tendência de crescimento, possivelmente devido ao perlongar da sua exposição solar, no entanto também apresenta irregularidades, espaços de tempo em que a temperatura baixou. Isto pode ser devido a vários fatores entre eles contacto com a água devido a rebentações próximas ou exposição a vento devido a mudança da posição da boia (Júnior, n.d.).

Como é possível ver no gráfico da pressão atmosférica, esta vai aumentando gradualmente ao longo do tempo. Existe uma correlação entre a temperatura e a pressão de um sistema, sendo que quanta mais baixa a temperatura, mais alta a pressão, já que, devido ao frio, as partículas mexem-se menos e criam aglomerados, aumentando assim a pressão (BBC, n.d.). Apesar de não termos um sensor de temperatura dentro da boia, é possível afirmar que a temperatura no seu interior ao longo do tempo: a temperatura ambiente (do ar) nunca foi menor do que 17,5°C, enquanto que a temperatura da água sempre rondou os 15°C. Sabendo que a boia iniciou a recolha de dados estando à temperatura ambiente, podemos afirmar que, de acordo com a 1ª lei da Termodinâmica, a temperatura da boia desceu, já que a mesma entrou em contacto com um material a uma temperatura inferior à sua inicial (a água do mar). Como a transferência de energia faz-se de uma forma gradual, é natural que o aumento da pressão atmosférica seja também gradual (Júnior, n.d.).

A frequência, o dado mais delicado e que sofreu uma maior atenção, apresentou também muito bons resultados. Inicialmente, apresenta resultados inconsistentes, mas, tal como foi dito anteriormente, isto foi causado devido a uma turbulência inicial na colocação da boia. Após o marco dos 10 minutos, a frequência começa a estabilizar, a rondar sempre os 0,33Hz, o que nos comprova que efetivamente esta é a frequência predominante no mar, ou seja, estes resultados não foram significativamente influenciados por erros aleatórios, ao contrário dos dados antes do marco do 10 minutos. Para além do mais, os resultados da frequência a partir do marco dos 10 minutos corroboram o registo ocular do responsável do projeto que estava presente no local.

Os dados da altitude, por sua vez, são os dados que mais melhoria necessitam e demonstram uma clara falha no nosso sistema, já que este tem muita dificuldade em calcular a altura máxima

de ondas pequenas. Estes dados não corroboram o registo ocular do responsável no local, que neste caso registou um tamanho de cerca metade do divulgado.

O cálculo da altitude depende da pressão atmosférica e da temperatura do ar. Como podemos ver nos gráficos, a pressão atmosférica média foi aumentando ao longo do tempo, e a temperatura do ar variou bastante, provavelmente devido ao contacto entre o sensor de temperatura do ar com a água. Para além do mais, como já discutido anteriormente, mesmo parado, o nosso sensor apresenta resultados de altitude que chegam aos 50cm, e, num local em que a pressão atmosférica se mantém a mesma, o nosso sensor pode apresentar valores que diferem em até 16Pa.

Conclusão e Planos Futuros

No cenário geral do projeto, este concretiza os objetivos base planeados, conseguindo, com algum grau de precisão publicitar os diversos dados sobre o oceano, no entanto o grupo prevê planos de melhoria e testagem futura.

Claramente, o maior obstáculo que o nosso sistema enfrenta é o cálculo da altura máxima das ondas, devido à grande imprecisão do nosso sensor para este projeto. Assim sendo, o grupo acredita que a melhor forma para calcular mais corretamente a altura máxima seria através da aplicação de princípios de álgebra linear, utilizando um novo componente que integrasse as propriedades de um magnetómetro, giroscópio e acelerómetro para conseguir, com precisão, averiguar a distância vertical. Numa fase inicial, poder-se-ia trabalhar ainda com o sensor atual (LSM6DS3) para aprender a trabalhar corretamente com a unidade de medida inercial (IMU), e então, se necessário, poder-se-ia então comprar um componente que contivesse também um magnetómetro, tal como o MPU6050. Devido à complexidade técnica deste problema encontramos-nos em contacto com investigadores para auxiliarem a sua resolução.

Sendo bem-sucedidos a calcular a posição linear do sistema, podíamos então efetuar a FFT nos dados obtidos pela mesma, e poderíamos também retirar resultados calculando a densidade espectral de potência (PSD) dos dados retirados, conseguindo também aumentar em muito a qualidade dos dados que apresentamos relativamente à potência das ondas. Além do mais, grande parte da problemática dos erros aleatórios que comprometem atualmente a eficácia da FFT aplicada nos dados da aceleração iria diminuir, já que, enquanto não está numa onda, a distância vertical da boia varia apenas residualmente.

Para além disto, o grupo gostaria de dialogar com empresas de certificação de qualidade de produtos, como a Bureau Veritas, para certificar o sistema, ou registar patente para o projeto desenvolvido.

Bibliografia

- BBC. (n.d.). *Energy and heating - AQA*. Retrieved from BBC Bitesize: <https://www.bbc.co.uk/bitesize/guides/z2gjt4/revision/5>
- BBC. (n.d.). *Particles in gases - AQA*. Retrieved from BBC Bitesize: <https://www.bbc.co.uk/bitesize/guides/z2xcfcw/revision/2>
- EIVA. (s.d.). *About EIVA*. Obtido de EIVA - Maritime Survey and Construction Solutions: <https://www.eiva.com/about>
- Espressif Systems. (2019). *ESP32-WROOM-32*.
- Instituto Hidrográfico. (2024). *Rede de Boias*. Retrieved from Instituto Hidrográfico da Marinha: <https://www.hidrografico.pt/boias>
- Júnior, J. d. (n.d.). *Transformação e variação de temperatura*. Retrieved from Mundo Educação: <https://mundoeducacao.uol.com.br/fisica/transformacao-variacao-temperatura.htm>
- XXII Governo da República Portuguesa. (2021). *Estratégia Nacional para o Mar 2021-2030*. Retrieved from Governo da República Portuguesa: <https://www.portugal.gov.pt/pt/gc22/comunicacao/documento?i=estrategia-nacional-para-o-mar-2021-2030>