



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Gil Mauro Cruz Figueiro

Desenvolvimento de sensor acústico para medição de corrente marítima

Dissertação de Mestrado
Mestrado em Engenharia Eletrónica Industrial e
Computadores

Trabalho efetuado sob a orientação do
Professor Doutor Marcos Silva Martins

Outubro de 2019

DIREITOS DE AUTOR E CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DO TRABALHO POR TERCEIROS

Este é um trabalho académico que pode ser utilizado por terceiros desde que respeitadas as regras e boas práticas internacionalmente aceites, no que concerne aos direitos de autor e direitos conexos.

Assim, o presente trabalho pode ser utilizado nos termos previstos na licença abaixo indicada.

Caso o utilizador necessite de permissão para poder fazer um uso do trabalho em condições não previstas no licenciamento indicado, deverá contactar o autor, através do RepositóriUM da Universidade do Minho.

Licença concedida aos utilizadores deste trabalho



Atribuição-Compartilha
CC BY-SA

<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>

Agradecimentos

Gostaria de agradecer ao meu orientador Professor Doutor Marcos Martins toda a atenção e apoio ao longo da realização desta dissertação, bem como ao orientador do grupo NEXTSEA Professor Doutor Luís Gonçalves que me lançou este desafio e me acompanhou durante toda a sua evolução. Aos meus parceiros de projeto Carlos Faria, João Baptista e Tiago Matos pela companhia, apoio e boa disposição.

Agradecer aos meus pais o enorme apoio e compreensão em todo o meu percurso académico.

Por ultimo, à minha namorada, Diana Trocado pela paciência em me ouvir a desabafar sobre os vários obstáculos encontrados na realização deste projeto.

A todos, muito obrigado!

DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE

Declaro ter atuado com integridade na elaboração do presente trabalho académico e confirmo que não recorri à prática de plágio nem a qualquer forma de utilização indevida ou falsificação de informações ou resultados em nenhuma das etapas conducente à sua elaboração.

Mais declaro que conheço e que respeitei o Código de Conduta Ética da Universidade do Minho.

Resumo

O objetivo deste trabalho é desenvolver um sensor acústico capaz de medir correntes marítimas.

Este projeto surge da necessidade de recolher alguns dados de interesse marítimo com o objetivo de criar modelos de funcionamento dos ecossistemas. Neste projeto pretende-se colocar vários sensores georreferenciados, a diferentes profundidades, a fazer medições e a armazenar os dados respetivos. Este sensor será responsável por medir a velocidade da água que flui num determinado nó do sistema. Este deverá ser capaz de medir a intensidade da corrente e a direção independentemente da sua posição no espaço, necessitando por isso de um magnetómetro (bússola digital) para utilizar o norte geográfico como referência.

O sensor de corrente marítima que é apresentado utiliza transdutores piezoelétricos ultrassónicos pretendendo com isso tornar o sistema mais fiável e com maior robustez devido à ausência de partes móveis. A propriedade dos ultrassons explorada neste trabalho para obtenção da velocidade da corrente é o tempo de voo. O tempo de voo é o tempo que um determinado sinal demora a propagar-se num determinado meio entre dois pontos.

No desenvolvimento do sensor será estudado o formato da estrutura, a posição e a orientação dos transdutores, de forma a melhorar a qualidade das medições em diferentes condições. Tal deverá ter em conta a robustez, dimensões razoáveis e evitar fenómenos de turbulência no volume de água a ser medido.

O processamento dos sinais enviados e recebidos pelos transdutores será executado por um circuito integrado capaz de executar rotinas de medição de tempo de voo e de temperatura. Esse circuito integrado irá comunicar com um microcontrolador que irá interpretar os tempos de voo e converter na velocidade do fluido. Para além da comunicação com este circuito integrado, o microcontrolador, terá que comunicar com um relógio de tempo real, para obtenção de uma referência temporal, com um cartão de memória, para armazenamento de dados num ficheiro e com um magnetómetro, para obter uma referência de orientação ao norte geográfico já que o sensor não estará fixo.

Com vários sensores destes é possível entender fenómenos de transporte à escala costeira, graças aos dados que é possível obter com um instrumento de medição desta escala.

Palavras-Chave: Sensor de corrente marítima, ultrassons, tempo de voo, ADCP (*Acoustic Doppler Current Profiler*), transdutores piezoelétricos.

Abstract

The objective of this work is to develop an acoustic sensor capable of measuring sea currents.

This project arises from the need to collect some data of maritime interest with the aim of creating models for the functioning of ecosystems. In this project, we intend to place several georeferenced sensors at different depths to make measurements and store the respective data. This sensor will be responsible for measuring the velocity of the water flowing in a particular node of the system. It should be able to measure the intensity of the current and direction independently of its position in space, thus necessitating a magnetometer (digital compass) to establish geographic north as a reference.

The marine current sensor which is shown utilizes ultrasonic piezoelectric transducers in order to make the system more reliable and more robust due to the absence of moving parts.

The property of the ultrasound explored in this work to obtain the velocity of the current is the flight time. Flight time is the time that a given signal takes to propagate in a certain medium between two points.

In the development of the sensor will be studied the structure format, the position and the orientation of the transducers, in order to improve the quality of the measurements under different conditions. This should take into account the robustness, reasonable dimensions and avoid phenomena of turbulence in the volume of water to be measured.

The processing of the signals sent and received by the transducers will be performed by an integrated circuit capable of performing flight time and temperature measurement routines. This integrated circuit will communicate with a microcontroller that will interpret flight times and convert to fluid velocity. In addition to communicating with this integrated circuit, the microcontroller must communicate with a real-time clock, to obtain a time reference, with a memory card, to store data in a file and with a magnetometer, to obtain a reference geographic north since the sensor will not be static.

With several sensors of these it is possible to understand transport phenomena to the scale of the coast, thanks to the data that can be obtained with a measurement instrument of this scale.

Keywords: Maritime current sensor, ultrasound, time of flight, ADCP (*Acoustic Doppler Current Profile*), piezoelectric transducers.

Índice

1.	Introdução.....	1
1.1	Motivação.....	1
1.2	Enquadramento.....	1
1.3	Objetivos	3
1.4	Aplicações.....	3
1.5	Especificação dos requisitos do sistema.....	3
1.6	Organização da dissertação	5
2.	Estado da arte	6
2.1	Sensor de corrente por inclinação	7
2.2	Perfilador de corrente acústico por efeito de Doppler.....	7
2.3	Medidor de corrente 3D por efeito de Doppler / variação de frequência.....	8
2.4	Medidor de corrente 3D por tempo de trânsito / variação de fase	9
3.	Fundamentos teóricos	10
3.1	Efeito Piezoelétrico e transdutores de ultrassom.....	10
3.2	Transdutores de ultrassom	11
3.3	Propagação do som em meio aquático	11
3.3.1.	Atraso de propagação.....	11
3.3.2.	Atenuação.....	12
3.3.3.	Ruido ambiente.....	12
3.3.4.	Efeito de doppler	13
3.3.5.	Multi-percurso	13
3.4	Funcionamento de medição da velocidade de fluidos por variação do tempo de voo	13
4.	Desenvolvimento do sensor	18

4.1 Escolha dos componentes do sistema.....	18
4.2 Análise do funcionamento dos transdutores	20
4.3 Análise do funcionamento da placa de desenvolvimento.....	21
4.4 Desenvolvimento do primeiro protótipo	23
4.5 Desenvolvimento do segundo protótipo	27
4.6 Desenvolvimento e implementação dos circuitos eletrônicos	31
4.7 Desenvolvimento do Software	36
5. Testes e Resultados.....	43
5.1 Desenvolvimento de plataforma de testes	43
5.2 Testes no tanque.....	45
5.3 Simulações dos fluidos	47
6. Conclusões e trabalho futuro	51
6.1 Conclusão	51
6.2 Trabalho Futuro.....	52
7. Bibliografia	53

Lista de figuras

Figura 1 - Esquema de sistema Next-Sea.....	2
Figura 2 - Esquema de funcionamento do sensor de corrente por inclinação.....	7
Figura 3 - Esquema de funcionamento de um sistema ADCP.....	8
Figura 4 - Sensor de corrente 3D por efeito de Doppler e seu princípio de funcionamento [6].	8
Figura 5 - Sensor de corrente 3D por tempo de voo [9].....	9
Figura 6 - TOF com comunicação direta entre transdutores.	13
Figura 7 - TOF com superfície de reflexão entre transdutores.	15
Figura 8 - TOF com superfície de reflexão entre transdutores simplificado.	16
Figura 9 - TOF com superfície de reflexão entre transdutores a duas dimensões.	17
Figura 10 - Esquema de funcionamento do sistema da <i>Texas Instruments</i> [15].....	18
Figura 11 - Diagrama de blocos do MAX35103.....	19
Figura 12 - Aspeto dos transdutores de ultrassom utilizados.	19
Figura 13 - Suporte para análise de funcionamento dos transdutores de ultrassom.	20
Figura 14 - Placa de desenvolvimento MAX35103.	21
Figura 15 - Diagrama de funcionamento geral da placa de desenvolvimento MAX35103 EVALUATION KIT.	22
Figura 16 - Interface do <i>software</i> da placa de desenvolvimento.	22
Figura 17 - Estrutura do primeiro protótipo.	23
Figura 18 - Testes de reflexão acústica aos suportes dos transdutores.	24
Figura 19 - Visão geral da eletrónica a utilizar no primeiro protótipo.....	24
Figura 20 - Protótipo pronto para testes de submersão.	25
Figura 21 - Sinais elétricos nos transdutores. Emissor em cima e recetor em baixo.....	26
Figura 22 - Testes em tanque no laboratório do primeiro protótipo.....	26
Figura 23 - Estrutura do segundo protótipo.....	27
Figura 24 - Junta de silicone.	28
Figura 25 - Produção da caixa estanque do último protótipo.	29
Figura 26 - Protótipo final do sensor de correntes marítimas.....	29
Figura 27 - Esquemático do circuito do MAX35103.	31
Figura 28 - Esquemático do circuito de comutação de pares de transdutores.	32

Figura 29 - Esquemático de ligação do cartão SD, barramento I2C e barramento SPI....	33
Figura 30 - Imagem 3D da PCI.....	33
Figura 31 - PCI do primeiro protótipo.	34
Figura 32 - Esquemático do circuito de alimentação periódica do datalogger.....	35
Figura 33 - Ligações da placa de desenvolvimento ao Arduino.	36
Figura 34 - Diagrama temporal de comunicação SPI.....	37
Figura 35 - Fluxograma de medição de velocidade com base no tempo de voo.	40
Figura 36 - Fluxograma geral do <i>software</i>	41
Figura 37 - Fluxograma de medição de velocidade a duas. dimensões.....	42
Figura 38 - Carruagem da plataforma de testes.	43
Figura 39 - Visão geral da plataforma de testes.	44
Figura 40 - Execução dos testes.	45
Figura 41 - Gráficos de medição da velocidade a 10, 25, 50 e 100 mm/s.	46
Figura 42 - Calibração e testes de funcionamento da IMU.....	47
Figura 43 - Cenários de teste em ferramenta de simulação de elementos finitos.	48
Figura 44 - Resultados da simulação a 1 m/s no cenário 1. A primeira imagem apresenta as linhas de sentido do fluxo. A segunda imagem mostra os valores da velocidade no plano de incidência do fluido. Na última imagem o fluido corre da esquerda para a direita, onde é possível ver a turbulência a sotacorrente do sensor.	49
Figura 45 - Resultados da simulação a 1 m/s no cenário 2. A primeira imagem apresenta as linhas de sentido do fluxo. A segunda imagem mostra os valores da velocidade no plano de incidência do fluido. Na última imagem o fluido corre da esquerda para a direita, onde é possível ver a turbulência a sotacorrente do sensor.	50

Lista de tabelas

Tabela 1 - Características dos transdutores.	19
Tabela 2 - Custo de produção de cada sensor.	30
Tabela 3 - Registo de estado de interrupções do MAX35103.	38
Tabela 4 - Tabela de conversão de valores.	39

Lista de acrónimos

ADCP - Acoustic Doppler Current Profiler
BNC - Bayonet Neill Concelman
CI - Circuito Integrado
CMEMS - Center for Microelectromechanical Systems
CNC - Computer Numerical Control
DIP - Dual In-line Package
FDM - Fused Filament Fabrication
FTDI - Future Technology Devices International
I2C - Inter-Integrated Circuit
IMU - Inertial Measurement Unit
LDO - Low-Dropout
NEMA - National Electrical Manufacturers Association
PC - Personal Computer
PCI - Placa de Circuito Impresso
RTC - Real Time Clock
SD - Secure Digital
SPI - Serial Peripheral Interface
TOF - Time of Flight
USB - Universal Serial Bus

1. Introdução

Neste capítulo será abordado o âmbito de todo o trabalho. Será referida a motivação, o enquadramento e os objetivos da sua realização e possíveis aplicações do tópico desenvolvido. Visto que se trata do desenvolvimento de um sistema com características definidas, são também estabelecidos os requisitos do sistema. Por fim, é apresentada a forma como foi organizado este documento.

1.1 Motivação

A motivação para a realização deste trabalho surgiu da necessidade de recolher dados concretos de diversas variáveis que caracterizam o ambiente marinho. Estas variáveis são importantes para compreender o funcionamento dos ecossistemas e relativizar a variação destas mesmas variáveis com os fenómenos que ocorrem ao nível morfológico ao longo da zona costeira.

Pretende-se que o sistema criado seja capaz de criar um modelo de funcionamento dos ecossistemas em que se inserir e por conseguinte prever fenómenos morfológicos indesejáveis. Com vários sensores de corrente é possível prever de onde e para onde vão os sedimentos que a água é capaz de transportar. Assoreamentos e desassoreamentos são fenómenos com grande impacto ao nível económico e qualquer sistema capaz de prever antecipadamente o seu impacto permite otimizar os recursos que solucionam o problema tais como, planos de dragagem melhor estruturados e com maior fundamento em relação à origem dos sedimentos [1].

Apesar deste trabalho se centrar no desenvolvimento de um sensor capaz de medir a velocidade da água do mar que por ele passa, este tipo de sensor poderá medir vários tipos de fluidos, bem como ser utilizado noutras áreas de estudo, o que torna a criação deste tipo de sensores aliciante não só para a aplicação acima descrita. Uma das vantagens deste tipo de sensores é a sua robustez graças à ausência de partes móveis. Estas características poderão ter interesse para vários estudos com fluidos, não se restringindo o seu funcionamento à água do mar.

1.2 Enquadramento

A seguinte dissertação de mestrado surge no âmbito do projeto Next-Sea do grupo de trabalho Center for Microelectromechanical Systems (CMEMS) da Universidade do Minho que visa apresentar uma solução para a aquisição de dados de funcionamento de sistemas marítimos costeiros. [2]

O tipo de estudo que Biólogos e Geólogos pretendem executar em áreas marítimas costeiras, torna pouco apelativa a utilização dos sistemas de monitorização de correntes marítimas existentes

no mercado devido ao custo, dificuldade de implementação e dimensões.

O sistema pretendido consiste num vasto conjunto de sensores a diferentes profundidades, semelhante ao sistema ilustrado na Figura 1, dispersos numa determinada área geográfica, capazes de caracterizar o funcionamento do local. Dado o número de sensores torna-se essencial que o custo individual de cada um seja baixo. Devido ao longo período que deverá durar o estudo, o consumo energético também deverá ser o mais reduzido possível.

Esta dissertação centra-se no desenvolvimento de um sensor acústico capaz de caracterizar a velocidade da água que passa no local da sua colocação, a fim de caracterizar o funcionamento das correntes marítimas a uma escala maior.

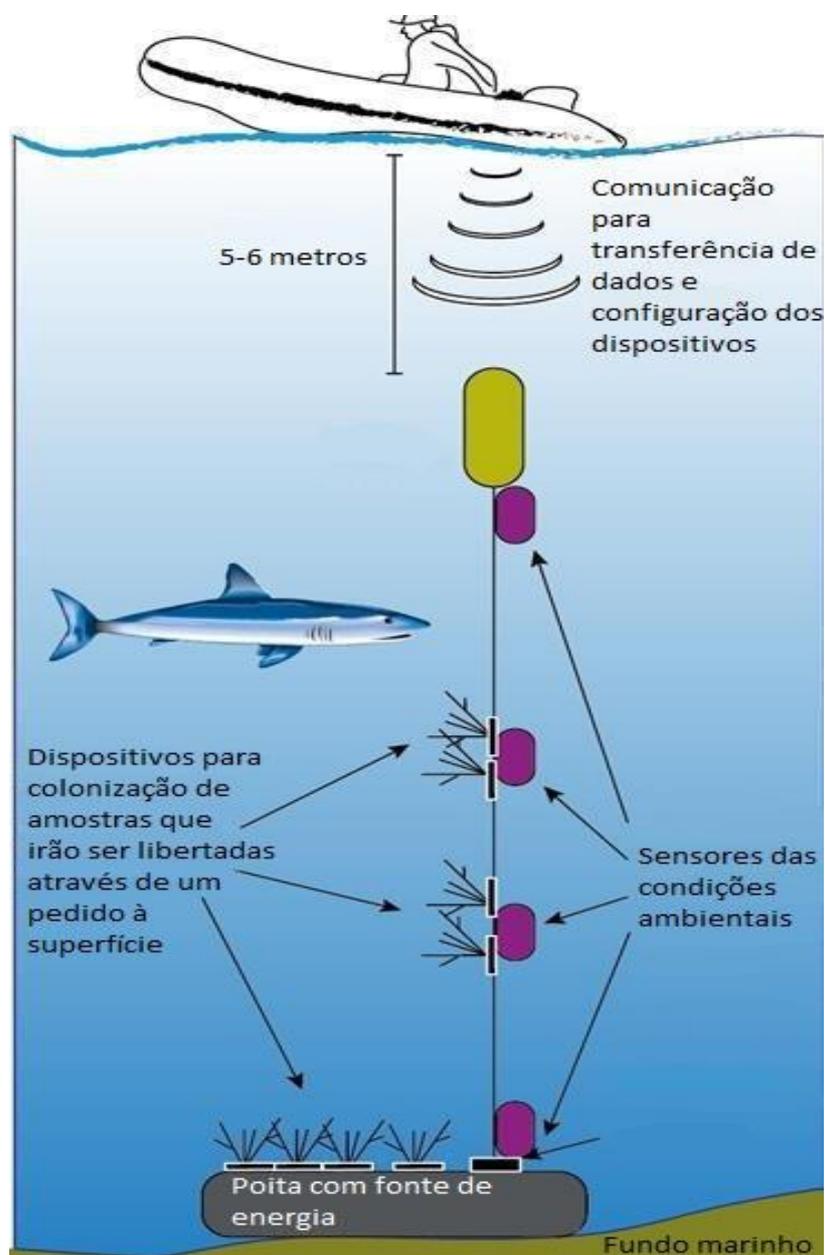


Figura 1 - Esquema de sistema Next-Sea.

Os sensores deverão ser capazes de permanecer submersos em ambiente marítimo durante aproximadamente 6 meses, que corresponderá ao período de análise do estudo pretendido.

1.3 Objetivos

Pretende-se com esta dissertação desenvolver um sensor de correntes marítimas capaz de estar submerso e medir a velocidade da água num determinado ponto. O sensor deverá ser capaz de retornar a intensidade da corrente (m/s) e o ângulo face a um referencial interno ao sensor. Este ângulo poderá ser recalculado face ao norte geográfico utilizando um magnetómetro dado que este não tenha uma posição fixa na sua aplicação final. Durante o seu desenvolvimento pretende-se estudar alguns fenómenos acústicos inerentes ao funcionamento do sistema de medição, e se possível entender o interesse que poderá ter para outras áreas de estudo marítimo, por via de análise do tempo de propagação do som e da temperatura.

Apesar do objetivo deste trabalho se centrar no desenvolvimento de um único sensor, este deverá ser capaz de ser integrado com outros tipos de sensores sem influenciar as suas medições. Dada a natureza do sistema em que será integrado deverá ser capaz de comunicar com um microcontrolador com *data logger* e ser eficiente do ponto de vista energético.

1.4 Aplicações

Ignorando o facto deste sensor possuir algumas características otimizadas para a sua aplicação final como sensor de corrente marítima, e centrando apenas nas propriedades acústicas que lhe conferem a possibilidade de medir a velocidade de fluidos, esta tecnologia poderá ser utilizada em várias aplicações, tais como:

- Medição de alta precisão do consumo de água doméstico em tubagem;
- Deteção de fugas de água em rede de abastecimento;
- Medição da velocidade da água a duas dimensões;
- Medição da velocidade do vento a duas dimensões (requer transdutores com características diferentes dos utilizados na água);
- Medição de energia térmica produzida em máquina de calor ou dissipada em radiador, através do caudal e diferencial de temperatura.

1.5 Especificação dos requisitos do sistema

Analisando o contexto do problema definiu-se alguns dos requisitos a considerar no desenvolvimento do sensor, sendo eles:

- Funcionamento completamente submerso;
- Resistência a impactos;
- Robustez suficiente para suportar tração do cabo de fixação;
- Imunidade ao desenvolvimento vegetativo;
- Resistência à corrosão;
- Baixo consumo;
- Autossuficiência energética para período de estudo;
- Capacidade de armazenamento de dados;
- Associar hora e data aos dados recolhidos;
- Capacidade de recolher dados num período definido;
- Facilidade de instalação;
- Possibilidade de instalação em estrutura móvel;
- Peso reduzido;
- Tamanho reduzido;
- Baixo custo;
- Modularidade.

O estabelecimento dos requisitos do sistema permitiu restringir as opções disponíveis para resolução de cada problema.

Devido à ausência de partes móveis, os sistemas acústicos por ultrassom revelaram algumas vantagens em termos de robustez, imunidade ao desenvolvimento vegetativo e estanquicidade da eletrônica. Não menos importante foi a escolha da tecnologia de leitura a adotar pelo sistema de ultrassons. Devido à oferta de componentes eletrônicos capazes de executar uma rotina de medição de tempo de voo e temperatura com baixo consumo energético, a escolha recaiu sobre um sistema baseado no tempo de voo (Time of Flight na literatura inglesa e com o acrónimo TOF) em vez de uma leitura baseada no efeito de Doppler. Apesar do sistema baseado no efeito de Doppler ser menos evasivo para o meio, pois não requer uma superfície de reflexão dos ultrassons, porque reflete nas partículas em suspensão no meio a analisar, este tipo de funcionamento exige a existência de partículas em suspensão, sejam elas, partículas de ar ou de outro tipo de material que provoquem a reflexão do som nas suas superfícies. Sendo que o comprimento de onda do som dos transdutores está relacionado com as dimensões das partículas refletoras, em ambiente marítimo seria difícil garantir que essas condições permitiriam medir a velocidade do fluido [3].

Apesar do sistema TOF exigir algum volume para recolha de dados com boa resolução e sensibilidade (depende do tempo que o som vai do emissor para o recetor e conseqüentemente da distancia entre os dois), é possível que o peso e dimensões sejam bastante inferiores às soluções existentes no mercado.

Para conferir robustez será essencial usar aço com alta resistência à corrosão na estrutura do sensor. Para que o peso não aumente demasiado, será utilizada resina epóxi em algumas estruturas o que também permitirá conferir estanquicidade à eletrónica.

Para que seja possível permanecer submerso a recolher amostras durante longos períodos de tempo será necessário ter em consideração um baixo consumo energético durante todo esse período e assim não exigir uma bateria de dimensões exageradas. Uma das técnicas para diminuir o consumo consiste em ligar o sistema periodicamente para recolher amostras de dados. Visto que para além do microcontrolador, vários sensores deverão ser alimentados todos no mesmo barramento, o modo “*sleep*” do microcontrolador não será suficientemente eficiente nos períodos de inoperação. Assim deverá ser usado um LDO (Low-Dropout) capaz de ser ativo por um RTC (Real Time Clock) com alimentação própria e assim baixar drasticamente o consumo de corrente.

1.6 Organização da dissertação

Esta dissertação encontra-se dividida em 6 capítulos.

No capítulo 1 é descrita a motivação para a realização desta dissertação.

No capítulo 2 foram pesquisadas as atuais soluções para o problema descrito no primeiro capítulo e suas limitações, obtendo uma visão geral de qual o estado da arte.

Nos fundamentos teóricos, 3º capítulo, são abordados conceitos essenciais à compreensão dos temas abordados ao longo da dissertação.

Sendo o objetivo principal desta dissertação desenvolver um sensor de corrente marítima, o capítulo 4 é onde são descritas as etapas de desenvolvimento de dois protótipos. Este capítulo possui subcapítulos que descrevem como foi desenvolvida a eletrónica, o *software* e a estrutura. No 5º capítulo, são apresentados os testes realizados ao protótipo desenvolvido e conseqüentes resultados. No último capítulo apresentam-se as conclusões a este estudo e melhorias a executar no futuro desenvolvimento.

2. Estado da arte

No estudo do estado da arte analisou-se apenas os sistemas que não dependiam de partes móveis. Sendo assim, sistemas com rotores ou pás para orientação na corrente foram descartados. Atualmente, na medição da velocidade de fluidos no interior de condutas são utilizados 3 tipos de princípio de transdução que não só não possuem partes móveis como também não induzem perturbações nos fluidos a analisar. Sendo esses princípios de transdução, acústicos, térmicos e por efeito de vortex. Este último, apesar de ter as vantagens supracitadas, não seria viável para a aplicação a desenvolver porque exige fluidos a grande velocidade e obriga à utilização de estruturas que não permitiriam medir a mais do que uma dimensão. O princípio de transdução térmico não permite obter consumos tão baixos quanto a transdução acústica. Por fim, os sensores acústicos despertaram maior interesse, tendo estes as seguintes vantagens e desvantagens.

Vantagens:

- Técnicas ultrassónicas são não invasivas;
- Medição em linha;
- Resposta rápida;
- Baixo consumo energético;
- Ótima estabilidade a longo prazo;
- Alta resolução e precisão.

Desvantagens:

- Maior exigência na precisão dos componentes eletrónicos;
- Caminho livre entre emissor e recetor acústico;
- Conhecimento prévio das propriedades acústicas do meio em que o som se irá propagar;
- Aumento da atenuação do sinal acústico com a sua frequência.

Os sistemas abaixo apresentados são aqueles que causam maior influência no desenvolvimento deste projeto, sendo eles:

- Sensor de corrente por inclinação;
- Perfilador de corrente Doppler acústico;
- Medidor de corrente 3D por efeito de Doppler / variação de frequência;
- Medidor de corrente 3D por tempo de trânsito.

2.1 Sensor de corrente por inclinação

Este sensor baseia-se na inclinação de todo o sistema de medição para aferir a velocidade da corrente.

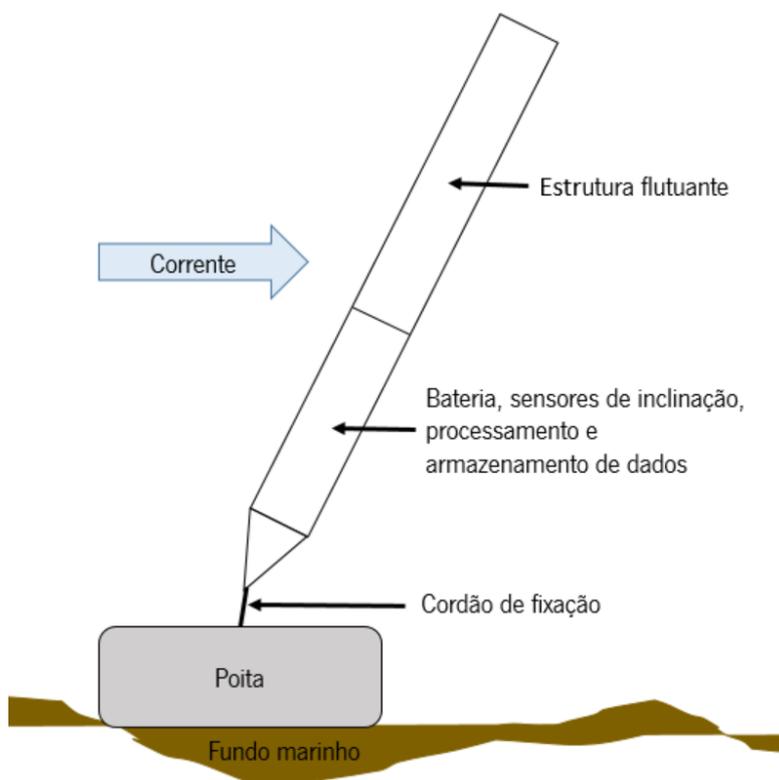


Figura 2 - Esquema de funcionamento do sensor de corrente por inclinação.

Os vários sensores colocados ao longo da estrutura vertical utilizam acelerômetros e magnetômetros para calcular a sua inclinação e relacioná-la com a intensidade da corrente. O conceito de medição da inclinação é simples, porém a relação com o valor da velocidade da corrente é complexo, devido à presença de turbulência e ondulação [4].

2.2 Perfilador de corrente acústico por efeito de Doppler

O perfilador de corrente acústico (ADCP - Acoustic Doppler Current Profiler) tem como base de funcionamento dois fenômenos acústicos, tempo de trânsito e efeito de doppler.

Os feixes acústicos são enviados desde o fundo da coluna de água que se pretende analisar na direção da superfície. Os ecos recebidos em tempos diferentes identificam a distância a que estavam as partículas que o refletiram e a frequência caracteriza a sua velocidade.

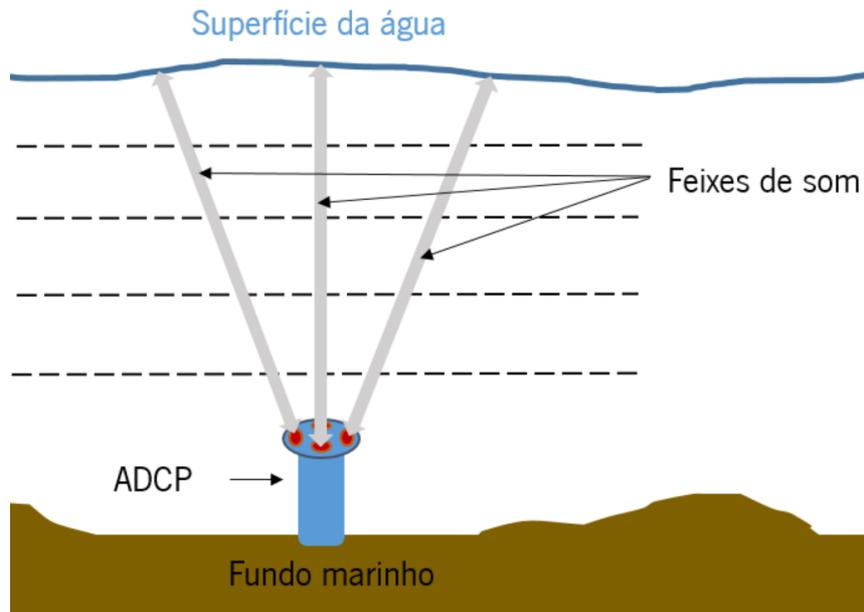


Figura 3 - Esquema de funcionamento de um sistema ADCP.

Devido ao facto do feixe acústico ter de percorrer toda a coluna de água, este sistema torna-se dispendioso de produzir e o seu consumo energético é elevado. Para além disso, os transdutores piezoelétricos funcionam como emissores e recetores, o que torna o seu design mais complicado, bem como a eletrónica necessária associada a cada um deles [5].

2.3 Medidor de corrente 3D por efeito de Doppler / variação de frequência

O medidor de corrente 3D caracteriza-se por ser composto por um emissor e 3 recetores. A Figura 4 [6] ilustra o seu aspeto e identifica a localização de cada transdutor.

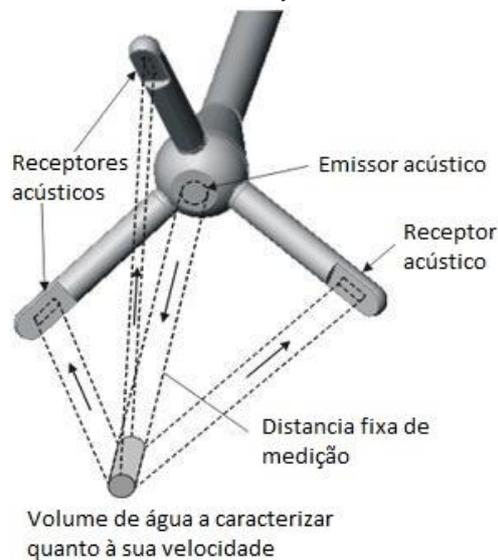


Figura 4 - Sensor de corrente 3D por efeito de Doppler e seu princípio de funcionamento [6].

O emissor envia um feixe acústico numa direção remota ao sensor e os recetores recebem o sinal acústico refletido pelas partículas refletoras nessa mesma localização. Na figura é possível ver que a amostra de água analisada tem uma representação volumétrica diminuta e situa-se a distância suficiente para não ser influenciada pela presença do sensor [7].

2.4 Medidor de corrente 3D por tempo de trânsito / variação de fase

Este tipo de sensor baseia-se no tempo de trânsito do som de um emissor para um recetor para uma distância fixa. Se o tempo de trânsito entre um ponto A e B é igual ao de B para A, então querera dizer que o meio onde a onda acústica se propaga encontra-se imóvel no eixo entre esses dois pontos [8]. Desta forma poderemos aferir a velocidade de propagação no meio, já que a distância entre A e B é conhecida. Se o fluido correr no sentido de A para B, então o tempo de trânsito diminuirá de A para B e aumentará de B para A. Com essa diferença é possível calcular a velocidade da água nessa direção.

Com um arranjo de transdutores não colinear mais complexo teremos um instrumento semelhante ao da Figura 5 [9], o que permitirá obter dados a 3 dimensões.



Figura 5 - Sensor de corrente 3D por tempo de voo [9].

No caso do sensor presente na Figura 5, são utilizados 8 transdutores de ultrassom, 4 em cima e 4 em baixo.

3. Fundamentos teóricos

Neste capítulo abordamos alguns conceitos importantes para a compreensão do funcionamento do sensor acústico para medir a velocidade de fluidos. Começamos por entender o efeito piezoelétrico e quão importante foi para o desenvolvimento de transdutores acústicos de ultrassom, descrevemos alguns fenômenos que ocorrem com o som na água e analisamos como relacionar o tempo de voo entre transdutores e a velocidade do meio em que esse som se propaga.

3.1 Efeito Piezoelétrico e transdutores de ultrassom

A piezoelectricidade, do grego *piezein*, que significa apertar/pressionar, foi descoberta pelos irmãos Pierre e Jacques Currie em França, a 1880. Este fenômeno consiste na capacidade que alguns cristais têm em transformar energia mecânica, exercida sob a forma de pressão, em energia elétrica, e vice-versa.

A piezoelectricidade pode apresentar-se em duas formas: efeito piezoelétrico direto, em que é gerada uma carga elétrica interna resultante da aplicação de uma força mecânica ao corpo, e o efeito piezoelétrico reverso, em que a aplicação de um campo elétrico resulta na deformação mecânica no corpo.

Assim, quando um material piezoelétrico está sob a influência de um campo elétrico é esperado que este se deforme, em que a direção desta deformação irá depender da simetria do cristal e da direção na qual o estímulo é aplicado, enquanto que a sua magnitude dependerá da constante de piezoelectricidade do próprio material.

A maioria dos cristais não possui propriedades piezoelétricas. No entanto, o cristal natural mais importante que possui esta propriedade é o quartzo, que devido à sua grande abundância é amplamente usado em aplicações piezoelétricas. Além deste, devido à facilidade de síntese, são também bastante usados cristais cerâmicos à base de titanato de bário ou zirconato de chumbo (PZT) [10].

De seguida abordaremos as propriedades piezoelétricas aplicadas à produção de transdutores de ultrassom.

3.2 Transdutores de ultrassom

Os humanos não são capazes de ouvir ultrassons, sendo o limite do ouvido humano cerca de 20 kHz, no entanto existem outros membros do reino animal capazes de o fazer. Estes animais usam ultrassons para ecolocalização devido às exigências do seu habitat, tornando-os capazes de distinguir objetos que de outra forma não seria possível. Assim, desde o início ficou claro que para que os ultrassons evidenciassem a sua importância para os humanos, seria necessário criar uma tecnologia que fosse capaz de gerar e detetar vibrações a frequências ultrassónicas. As primeiras tentativas de exploração dessas tecnologias envolviam jatos de ar a alta pressão através de fendas estreitas e arestas de metal afiadas e outras estruturas semelhantes para produzir os primeiros geradores de ultrassom. Mais tarde, a tecnologia evoluiu para estruturas eletromecânicas baseadas em piezoelectricidade e magnetostricção.[11]

Atualmente os materiais piezoelétricos são bastante comuns no fabrico de transdutores de ultrassom devido à sua ótima resposta a sinais de alta frequência com alguns materiais polímeros a permitem frequências até 160 MHz.[12]

Os transdutores utilizados têm como características uma frequência de ressonância de 1 MHz, uma impedância de 220Ω e uma capacidade aproximada de 900 pF. Estas características dependem das propriedades do elemento piezoelétrico do transdutor, no entanto essas características não são especificadas no manual do fabricante.

3.3 Propagação do som em meio aquático

A propagação do som em meio aquático é caracterizada por ser influenciada pelos seguintes fenómenos [12]:

- Atraso de propagação;
- Atenuação;
- Ruído ambiente;
- Efeito de doppler;
- Multi-percurso.

De seguida iremos fazer uma descrição sucinta ao que se refere cada um dos termos.

3.3.1. Atraso de propagação

O facto do som ter uma velocidade de propagação de cerca de 1500 m/s dentro de água, faz com que este não se propague instantaneamente entre dois pontos, sendo que a esta velocidade o som demora cerca de 0,66 segundos a percorrer um quilometro. Em termos de comparação, por ser

um meio com o qual estamos mais familiarizados, no ar, essa velocidade é quase 5 vezes inferior, ou seja, propagando-se um pouco mais rápido que 300 m/s.

A velocidade de propagação do som na água, é fortemente influenciado por outros fatores como, temperatura, salinidade e profundidade, sendo que com o aumento de cada um destes fatores essa velocidade aumenta.

3.3.2. Atenuação

Entre um emissor e um recetor existe perda de energia no sinal transmitido já que as ondas de som perdem e dispersam essa energia à medida que se propagam no meio de transmissão. Essa perda de energia deve-se essencialmente ao fenómeno de atenuação. A atenuação é tanto maior quanto maior for a distância a percorrer pelo som bem como quanto maior for a frequência do som transmitido.

Importa referir que a atenuação é composta por 3 componentes: perda por absorção, perda por espalhamento do feixe sonoro e dispersão.

A perda por absorção é a componente com maior peso na atenuação e a que mais é influenciada pela frequência do sinal, esta perda de energia acústica deve-se à absorção das ondas de pressão sonora sob a forma de calor.

A perda por espalhamento do feixe de som deve-se ao facto do som expandir a sua área de impacto à medida que se propaga no meio, havendo som que se “perde” no meio de transmissão não atingindo o recetor. Quanto maior for a distancia ao emissor, maior é a área da frente de pressão do feixe de som.

A perda por dispersão deve-se ao facto das partículas em suspensão nesse meio redireccionarem a propagação do som numa determinada direção para direções indefinidas assim que o som atinge cada uma dessas partículas. Se as partículas em suspensão são grandes em comparação com o comprimento de onda do som, a reflexão é especular (refletida apenas numa direção), se as partículas forem inferiores ao comprimento de onda, o som acaba por “contornar” o objeto através do fenómeno de difração [13].

3.3.3. Ruído ambiente

O ruído num determinado canal acústico pode ser caracterizado em função da sua origem. Este pode ter origem humana, ser específico a um local e gerado por fenómenos naturais.

Em ambiente oceânico, as principais fontes de ruído são:

- Turbulência;

- Navios em atividade;
- Ondas à superfície;
- Ruído térmico.

3.3.4. Efeito de doppler

É possível apreciar o efeito de Doppler sempre que uma ambulância passa por nós na beira de uma estrada com a sirene ligada. Aquilo que nos é perceptível é que a frequência do som da sirene é maior quando a ambulância se aproxima e menor quando a ambulância se afasta de nós e isso é precisamente o efeito de Doppler. Assim sendo, o efeito de Doppler é a variação da frequência do som emitido por um objeto em movimento percebida por um receptor externo.

O ADCP e o medidor de corrente 3D por efeito de Doppler descritos no capítulo 2, tiram proveito deste fenómeno, e da dispersão (*Scattering*), já que o meio por si só não emite som, mas as partículas em suspensão são capazes de refletir o som que sobre elas incidir.

3.3.5. Multi-percurso

Este fenómeno de propagação ocorre quando um sinal acústico atinge o transdutor receptor vindo de mais do que um percurso, o que leva a que os sinais se sobreponham no receptor. Este fenómeno deve-se essencialmente a superfícies que reflitam o sinal acústico no seu caminho de propagação natural causando ecos que podem gerar erros de interpretação por parte do sensor de corrente.

3.4 Funcionamento de medição da velocidade de fluidos por variação do tempo de voo

Num fluido estático é espetável que o tempo que um som demora a ir de um ponto para o outro seja igual em ambos os sentidos. Na Figura 6 vemos o caso em que o meio em que o som se propaga entre os dois pontos se move num desses sentidos, estando representado pela seta “Corrente” e as setas entre os transdutores representam o caminho percorrido pelo som em instantes de tempo diferentes, ou seja, os transdutores comutam entre o modo receptor e emissor.

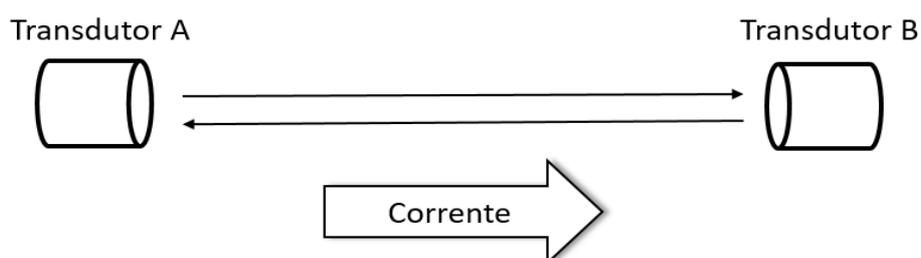


Figura 6 - TOF com comunicação direta entre transdutores.

Neste cenário o tempo que o som demora a percorrer o caminho entre o transdutor A e o Transdutor B será menor do que no sentido contrário. Para além disso, entende-se que, conhecendo a distância entre os transdutores e o tempo de propagação do som em ambos os sentidos, contra corrente e a favor da corrente, é possível extrapolar a velocidade a que se move essa mesma corrente.

Considerando:

$$c = \frac{d}{t} \quad (1)$$

Em que c é a velocidade de propagação do som no meio, d a distância entre os transdutores e t o tempo de propagação do som entre os dois transdutores, seguindo o raciocínio do parágrafo anterior poderemos escrever as seguintes fórmulas:

$$t_{AB} = \frac{d}{c+v} \text{ e } t_{BA} = \frac{d}{c-v} \quad (2)$$

v é a velocidade a que se move o fluido, a variável que pretendemos conhecer. Desenvolvendo as equações:

$$c + v = \frac{d}{t_{AB}} \text{ e } c - v = \frac{d}{t_{BA}} \quad (3)$$

$$c = \frac{d}{t_{AB}} - v \text{ e } c = \frac{d}{t_{BA}} + v \quad (4)$$

Partindo do princípio que não existe alteração das propriedades do meio entre a medição de A para B e de B para A, c deverá ser uma constante, podendo por isso ser anulado em ambas as equações. Assim sendo,

$$\frac{d}{t_{AB}} - v = \frac{d}{t_{BA}} + v \quad (5)$$

$$2v = \frac{d}{t_{AB}} - \frac{d}{t_{BA}} \quad (6)$$

$$v = \frac{d}{2} \left(\frac{1}{t_{AB}} - \frac{1}{t_{BA}} \right) \quad (7)$$

Com esta equação será possível aferir a velocidade do meio recorrendo ao tempo de voo entre os dois transdutores fixos à distância d comunicando de forma direta.

Devido ao facto deste processo exigir que os transdutores comuniquem frente a frente de forma direta, a sua simples presença pode provocar perturbações na velocidade do fluido a analisar e por

esse motivo foi necessário encontrar um arranjo de transdutores diferente.

Para contornar este problema a colocação dos transdutores deverá depender de uma superfície de reflexão com os transdutores a incidirem sobre esta superfície com um ângulo fixo. Tal configuração é descrita na Figura 7.

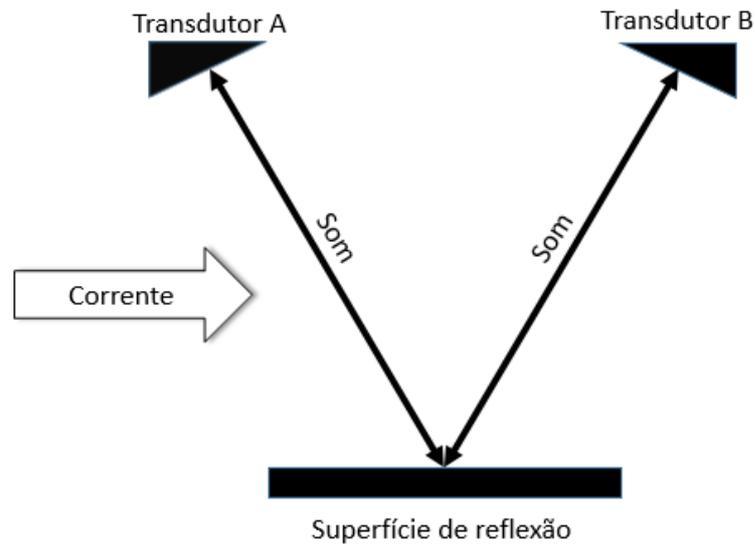


Figura 7 - TOF com superfície de reflexão entre transdutores.

Nesta configuração, tanto os transdutores como a superfície de reflexão causam menos perturbações no volume de fluido a ser analisado, do que na abordagem anterior. Para além disso, para uma distância entre os transdutores semelhante à anterior, o caminho que o som percorre deverá ser maior e conseqüentemente a diferença de tempo de comunicação entre os transdutores também aumenta, o que permite aumentar a resolução das medições utilizando um temporizador com as mesmas características de resolução temporal.

Para ser mais simples formular as equações que caracterizam este modelo de medição, o modelo com superfície de reflexão pode ser descrito como na Figura 8.

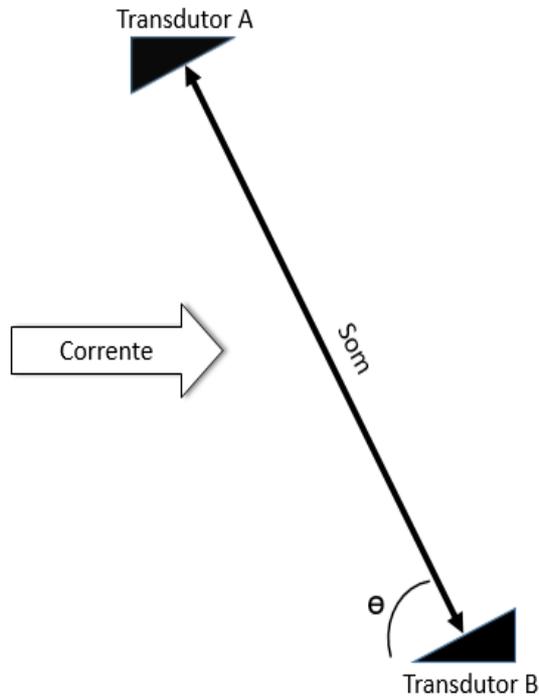


Figura 8 - TOF com superfície de reflexão entre transdutores simplificado.

Nesta forma, a distância percorrida pelo som entre os dois transdutores é a mesma que no formato anterior, para além disso, o ângulo que o som faz com o sentido da corrente mantém-se o mesmo e é representado por θ na Figura 8. θ é o ângulo complementar de inclinação dos transdutores. No caso dos transdutores frente a frente, anteriormente analisado θ era igual a 0.

Passando para a dedução das fórmulas do modelo:

$$T_{AB} = \frac{d}{c + \cos \theta \cdot v} \quad \text{e} \quad T_{BA} = \frac{d}{c - \cos \theta \cdot v} \quad (8)$$

$$c = \frac{d}{T_{AB}} - \cos \theta \cdot v \quad \text{e} \quad c = \frac{d}{T_{BA}} + \cos \theta \cdot v \quad (9)$$

$$\frac{d}{T_{AB}} - \cos \theta \cdot v = \frac{d}{T_{BA}} + \cos \theta \cdot v \quad (10)$$

$$2 \cdot \cos \theta \cdot v = \frac{d}{T_{AB}} - \frac{d}{T_{BA}} \quad (11)$$

$$v = \frac{d}{2 \cdot \cos \theta} \cdot \left(\frac{1}{T_{AB}} - \frac{1}{T_{BA}} \right) \quad (12)$$

A equação (12) será utilizada no sensor para cálculo da velocidade do fluido, com base nos tempos de propagação medidos, distância e ângulo de orientação dos transdutores. Contudo, o tempo de propagação do som é afetado pela corrente apenas na componente a que diz respeito o eixo de propagação do som. Se quisermos medir um fluido com características de movimento a 2 dimensões, será necessário outro par de transdutores, capaz de criar outro eixo perpendicular ao primeiro e assim aferir as duas componentes de velocidade do fluido num plano de 2 dimensões. Na Figura 9 é possível ver a forma devem ser colocados os transdutores, de forma a conseguir medir o fluido. Para além dos transdutores A e B da Figura 7, forma adicionados os transdutores C e B de forma a criar um caminho acústico a 90° do eixo formado por A e B.



Figura 9 - TOF com superfície de reflexão entre transdutores a duas dimensões.

4. Desenvolvimento do sensor

Neste capítulo serão descritos os passos de desenvolvimento de dois protótipos funcionais do sensor acústico de corrente marítima. Será descrita a escolha dos componentes, os circuitos utilizados e as estruturas de suporte dos transdutores e da eletrônica.

4.1 Escolha dos componentes do sistema

Estando definido que o sensor teria como princípio de funcionamento o tempo de voo, importava saber que ofertas existiam no mercado capazes de resolver da melhor forma os desafios apresentados neste problema. Depois de algum trabalho de pesquisa, surgiam duas hipóteses viáveis, uma da *Texas Instruments* e outra da *Maxim Integrated* [14].

- Texas Instruments:

TDC1000PWR + TDC7200PW

- Maxim Integrated:

MAX35103

O sistema da *Texas Instruments* requer a utilização de dois circuitos integrados (CI) para fazer a medição do tempo de voo. Um TDC1000 que funciona como *front-end* analógico para sensores de ultrassons e um TDC7200 com a função de temporizador. Para além destes CI é sugerido pelo fabricante a utilização de um MSP430 como microcontrolador. Utilizando esta configuração o esquemático resultante seria o descrito na Figura 10 [15].

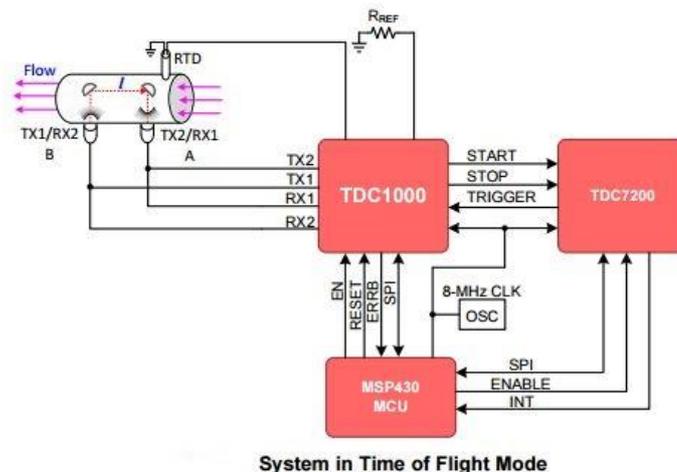


Figura 10 - Esquema de funcionamento do sistema da *Texas Instruments* [15].

Alternativamente temos o sistema da *Maxim Integrated* que tem a vantagem de ser um sistema *all-in-one* mais orientado à aplicação desejada e foi por isso escolhido. Na Figura 11 é possível ver que o MAX35103 é capaz de gerar e receber os sinais dos transdutores e medir os tempos utilizando um temporizador interno, não sendo necessário implementar dois CI como na solução da *Texas Instruments*.

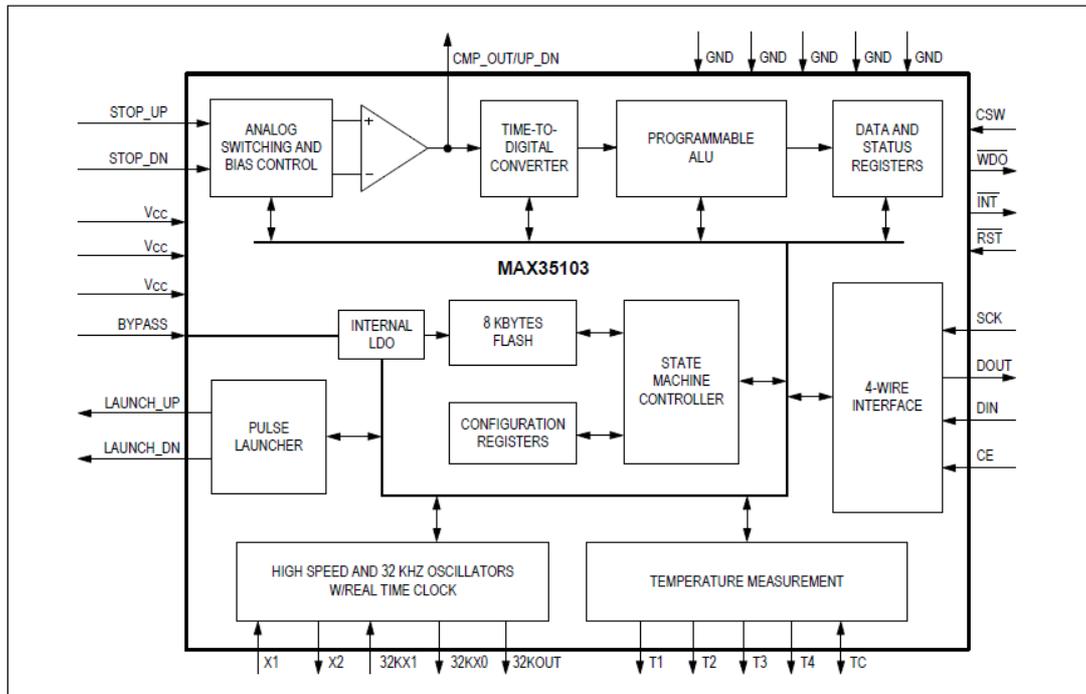


Figura 11 - Diagrama de blocos do MAX35103.

Os 4 transdutores de ultrassom escolhidos foram os transdutores da *Audiowell* sugeridos no *datasheet* da *evaluation board* da *Maxim* [14] e possuem o aspeto da Figura 12:



Figura 12 - Aspeto dos transdutores de ultrassom utilizados.

Na Tabela 1 são apresentadas as características disponibilizadas pelo fabricante.

Tabela 1 - Características dos transdutores.

Impedância à frequência de ressonância	$\leq 220\Omega$
Frequência de ressonância	$965 \pm 30\text{kHz}$
Capacidade	$900 \pm 20\% \text{pF}$
Pressão máxima admitida	2,5Mpa

Com a escolha destes componentes é possível medir a velocidade apenas numa direção, pois não existe forma de comutar o integrado da *Maxim* entre os dois pares de transdutores. Para executar essa função foram escolhidos 2 comutadores do tipo *Single-Pole Double-Throw* com a referência 742G3157DCKR. São utilizados dois componentes e não apenas um que execute a mesma função, para evitar problemas de ruído gerados por *cross talk* entre emissor e receptor. Como principais características destacam-se as reduzidas dimensões, a tensão de alimentação entre 1,65 V e 5,5 V e a velocidade de comutação de 0,5 ns [9].

Como a estação de medição não ficará fixa, é necessário saber a sua orientação após execução de cada medição. Um magnetómetro poderia ser suficiente para executar essa tarefa, no entanto uma *Inertial Measurement Unit* (IMU) poderá dar-nos mais informações em relação à dinâmica do sensor e por esse motivo foi escolhido um MPU9255 devido à sua acessibilidade, baixo custo e bibliotecas disponíveis [16].

Para associação das medições a um instante de tempo foi utilizado um RTC da *Maxim*, o DS3231, pelas mesmas razões que o IMU, acessibilidade, baixo custo e bibliotecas disponíveis.

Finalmente, para armazenamento de dados será usado um cartão de memória do tipo micro SD (Secure Digital).

4.2 Análise do funcionamento dos transdutores

Para analisar o funcionamento dos transdutores, foi desenvolvido um suporte com a capacidade de poder variar o ângulo e a distância entre transdutores, sendo visível na Figura 13.

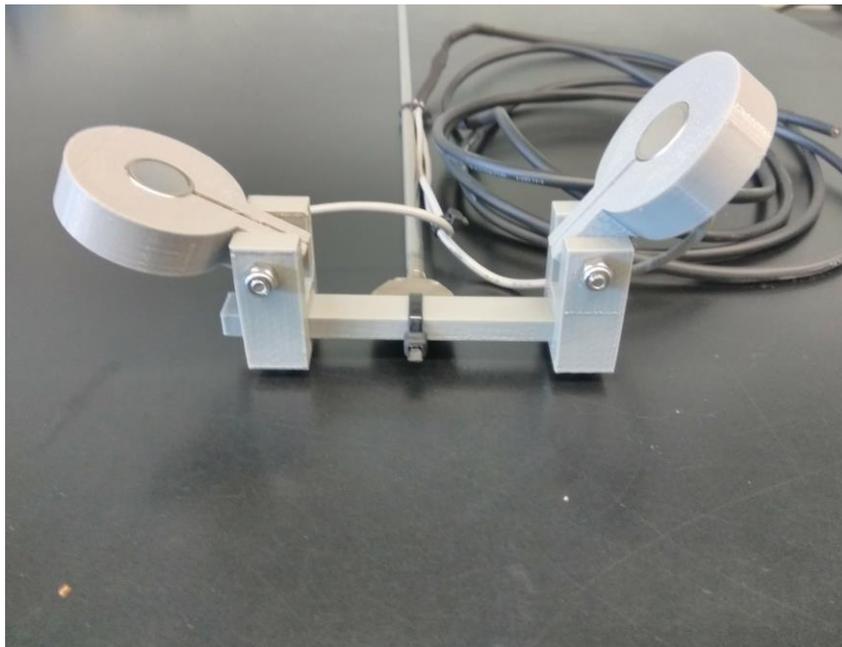


Figura 13 - Suporte para análise de funcionamento dos transdutores de ultrassom.

Este suporte permitiu fazer uma análise superficial do funcionamento dos sensores utilizando um osciloscópio e um gerador de sinais. Foi possível ganhar sensibilidade em relação à amplitude do sinal no recetor utilizando uma comunicação direta entre emissor e recetor e utilizando diferentes materiais para refletir os sinais acústicos de forma indireta.

4.3 Análise do funcionamento da placa de desenvolvimento

Para facilitar o desenvolvimento de um protótipo com base no circuito integrado MAX35103 foi adquirida uma placa de desenvolvimento, MAX35103 EVALUATION KIT. Apesar do circuito integrado principal ser de dimensões reduzidas, a placa apresenta dimensões consideravelmente grandes (174mm x 79mm x 21mm) e apresenta-se na Figura 14.

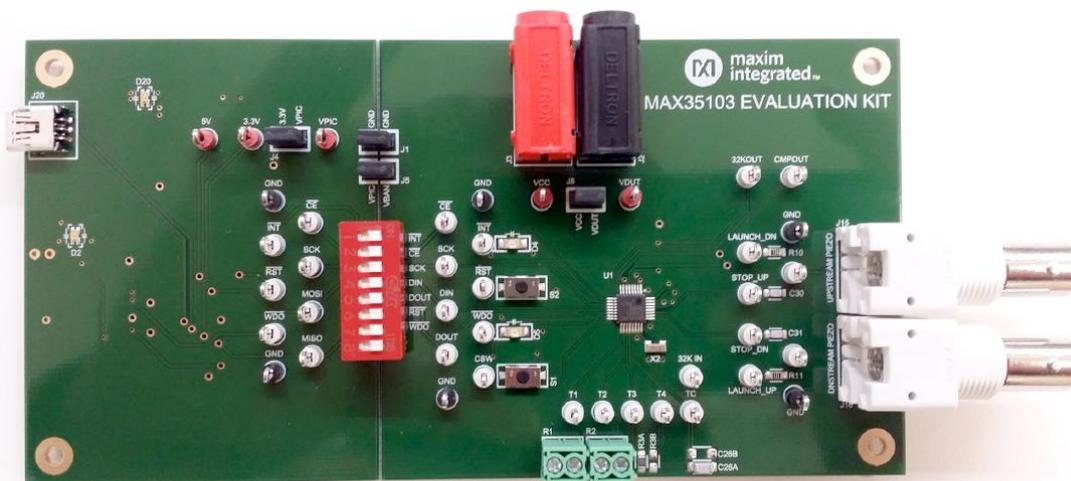


Figura 14 - Placa de desenvolvimento MAX35103.

No topo da placa é possível ver os conectores disponíveis para as diferentes funções. Do lado esquerdo existe um conector mini USB (Universal Serial Bus) para conectar a um computador, do lado direito dois conectores BNC (Bayonet Neill Concelman) para conexão dos transdutores piezoelétricos, em baixo 2 conectores para os transdutores térmicos PT1000 e em cima dois conectores para alimentação da placa no caso desta não receber a alimentação por USB.

Esta placa, na verdade, são duas placas separadas, à esquerda temos uma placa com um microcontrolador, e à direita o MAX35103. O que faz a ponte entre as duas placas é um interruptor do tipo DIP (Dual In-line Package) para comunicação lógica, e dois *jumpers* para alimentação. Na imagem seguinte, disponibilizada no *datasheet* do fabricante, podemos ver essas características [14].

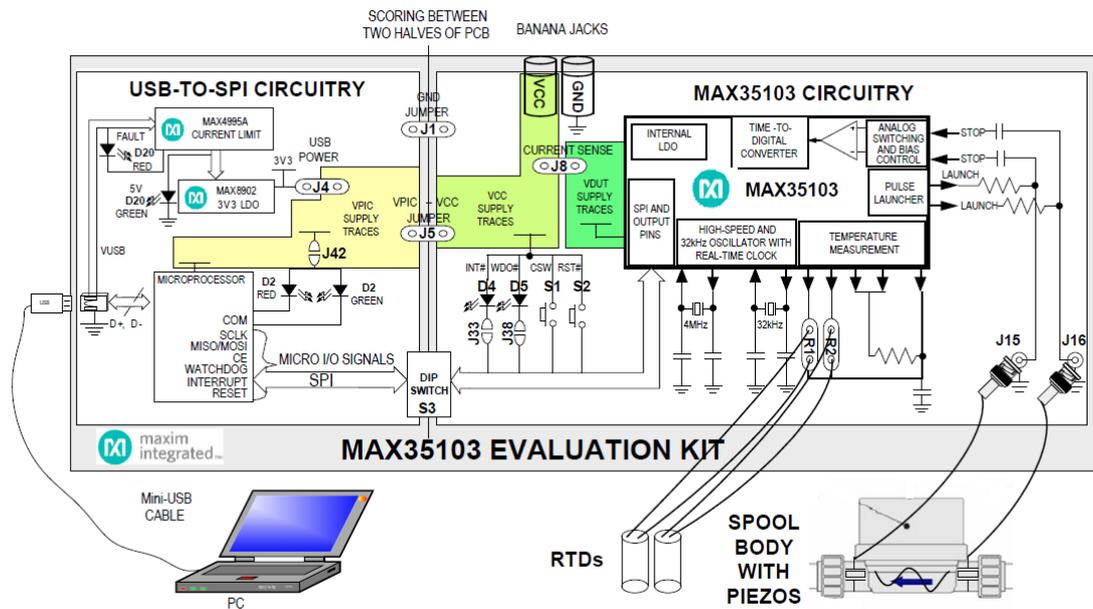


Figura 15 - Diagrama de funcionamento geral da placa de desenvolvimento MAX35103 EVALUATION KIT.

A placa de desenvolvimento é disponibilizada com uma aplicação para executar num computador e assim poder comunicar com o MAX35103. Na aplicação é possível configurar todos os registos do integrado de forma simples e intuitiva e através de uma janela de texto é possível ver todos os *opcodes* enviados para a placa. Em baixo podemos ver o aspeto do *software* na Figura 16.

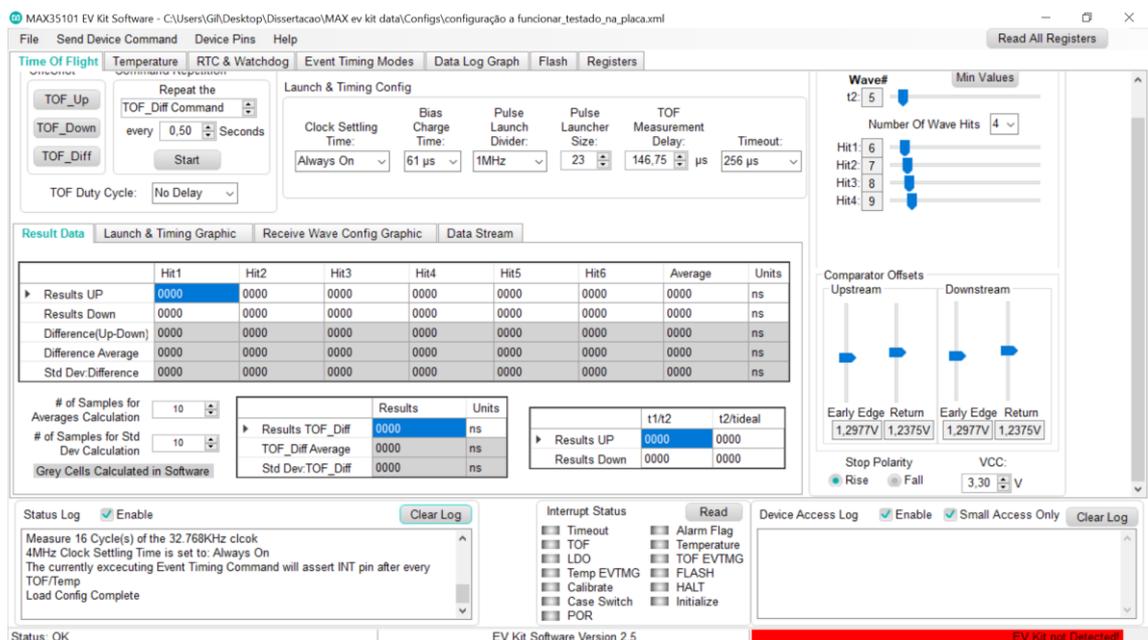


Figura 16 - Interface do *software* da placa de desenvolvimento.

4.4 Desenvolvimento do primeiro protótipo

Depois de analisar o funcionamento dos transdutores com recurso ao gerador de sinais e osciloscópio, e posteriormente com a placa de desenvolvimento, foi feita uma estrutura capaz de armazenar a eletrónica no seu interior e orientar os transdutores de ultrassons para uma superfície refletora que fará parte da própria estrutura.

Medidor de corrente marítima

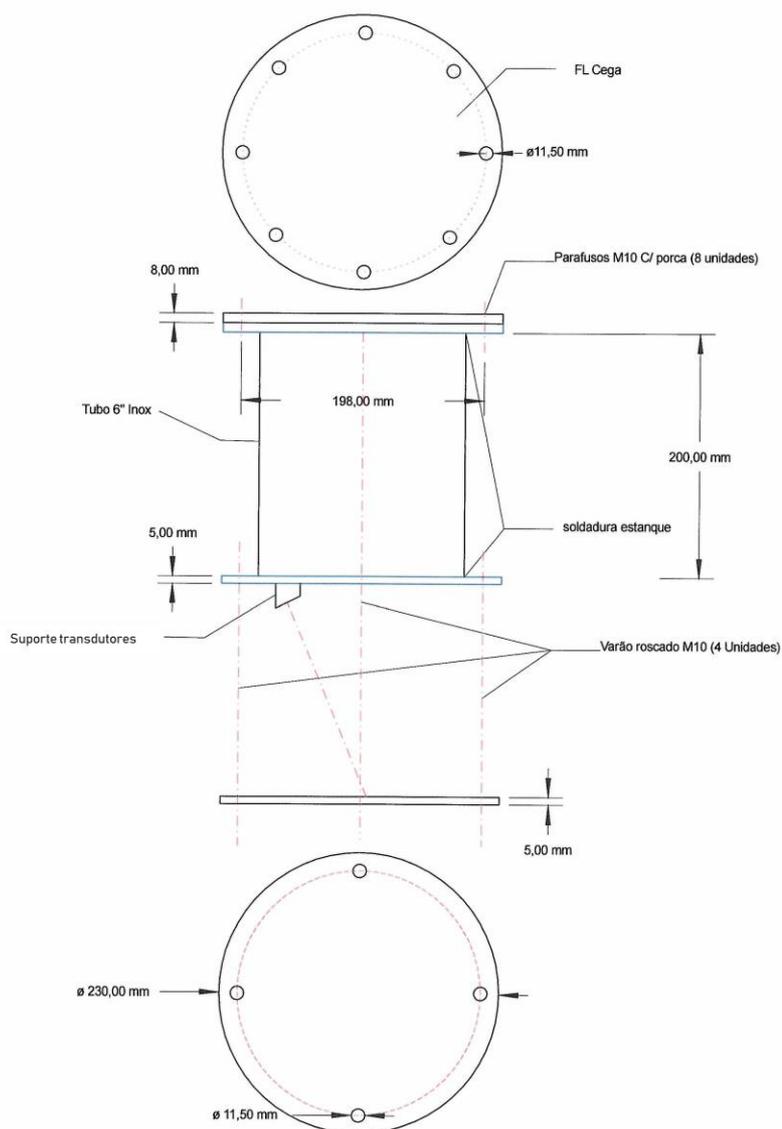


Figura 17 - Estrutura do primeiro protótipo.

Após construir esta estrutura foi necessário modelar um suporte para os transdutores. Este suporte deveria ser minimalista para não perturbar a passagem do fluido e garantir que os transdutores estão à distância pretendida bem como com o ângulo correto.

Antes do suporte ser fixado à estrutura, foram feitos testes do seu desempenho com a placa de desenvolvimento. Demonstrados na Figura 18.

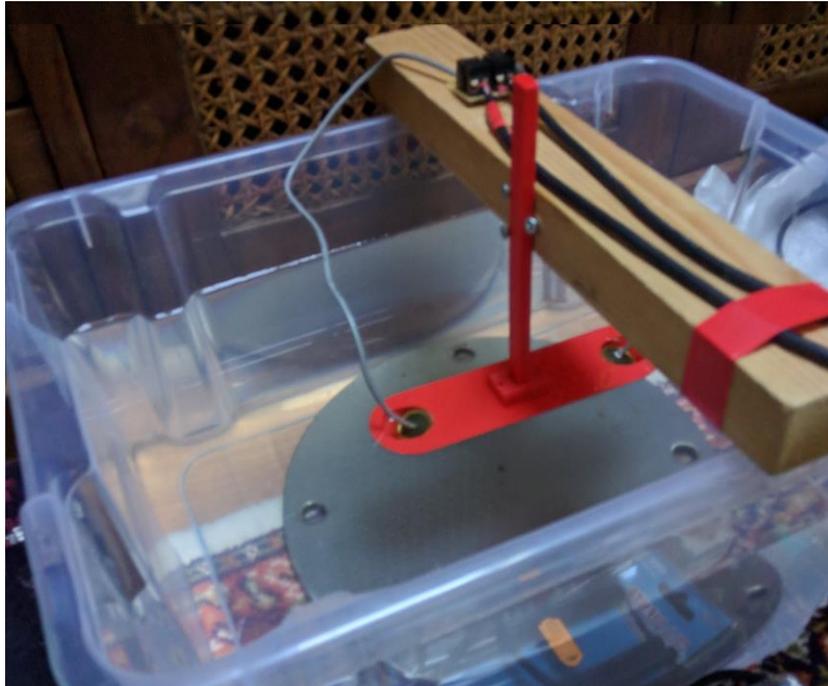


Figura 18 - Testes de reflexão acústica aos suportes dos transdutores.

Este suporte permitia fazer variar a distância dos transdutores à placa de reflexão, distância essa que se revelou bastante sensível para a obtenção de leituras consistentes. Para realizar essas leituras foi utilizada a placa de desenvolvimento em comunicação com um Arduino Mini, que comunica com o PC (Personal Computer) através de um driver FTDI (Future Technology Devices International) como mostra a Figura 19.

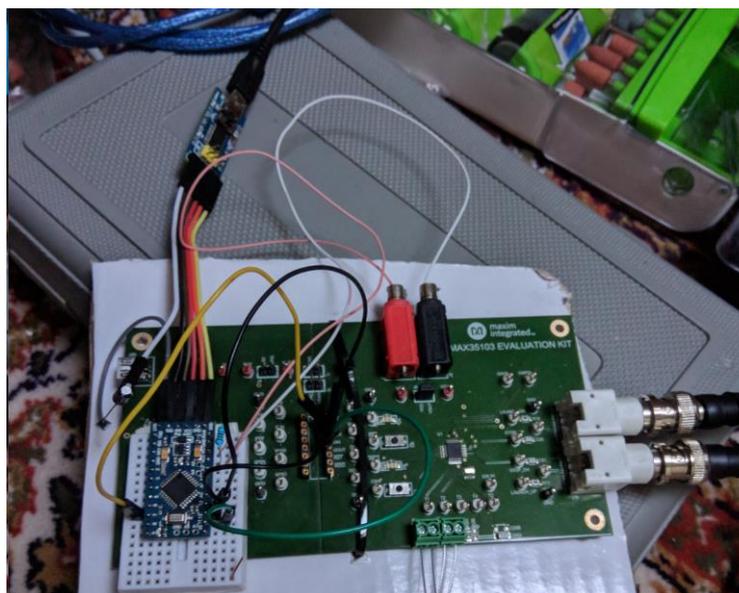


Figura 19 - Visão geral da eletrônica a utilizar no primeiro protótipo.

Com uma estrutura estanque capaz de armazenar a eletrónica no seu interior sem que esta entre em contacto com a água, um suporte de transdutores que garante consistência na posição dos transdutores e a eletrónica necessária para medir tempos de voo, procedeu-se à montagem do primeiro protótipo visível na Figura 20.



Figura 20 - Protótipo pronto para testes de submersão.

Com este protótipo foi possível realizar testes de leitura apenas numa direção devido ao facto de neste não existir nenhum circuito de comutação entre pares de transdutores, só admitindo um par. Nestes testes foi possível identificar problemas na medição da velocidade por erros nos tempos de propagação medidos. Este erro era provocado por um erro múltiplo de $1\mu\text{s}$ nas medições do tempo de voo, que estaria relacionado com a deteção da primeira onda acústica recebida e foi posteriormente corrigido por *software*. Para além disso foi possível ver a diferença entre os tempos de voo absolutos reportados pelo MAX35103 e os tempos analisados com o osciloscópio nos transdutores. Tendo sido identificado um atraso na deteção dos pulos de cerca de $8\mu\text{s}$ e que será compensado na fórmula do cálculo do tempo de voo. Na Figura 21 vemos os sinais dos transdutores

numa escala temporal de 10 μ s. O sinal a amarelo (em cima), representa o sinal no emissor e o sinal a azul (em baixo) representa o sinal no recetor.

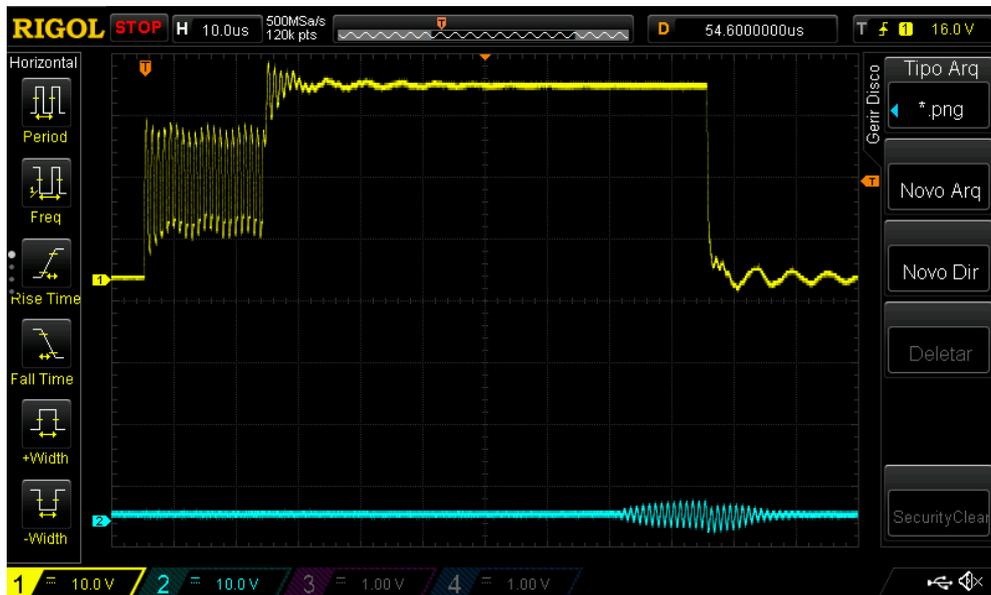


Figura 21 - Sinais elétricos nos transdutores. Emissor em cima e recetor em baixo.

Na Figura 22 é possível ver os testes realizados em laboratório utilizando um tanque e uma turbina capaz de gerar fluxos de corrente pulsada no volume de medição do primeiro protótipo do sensor.

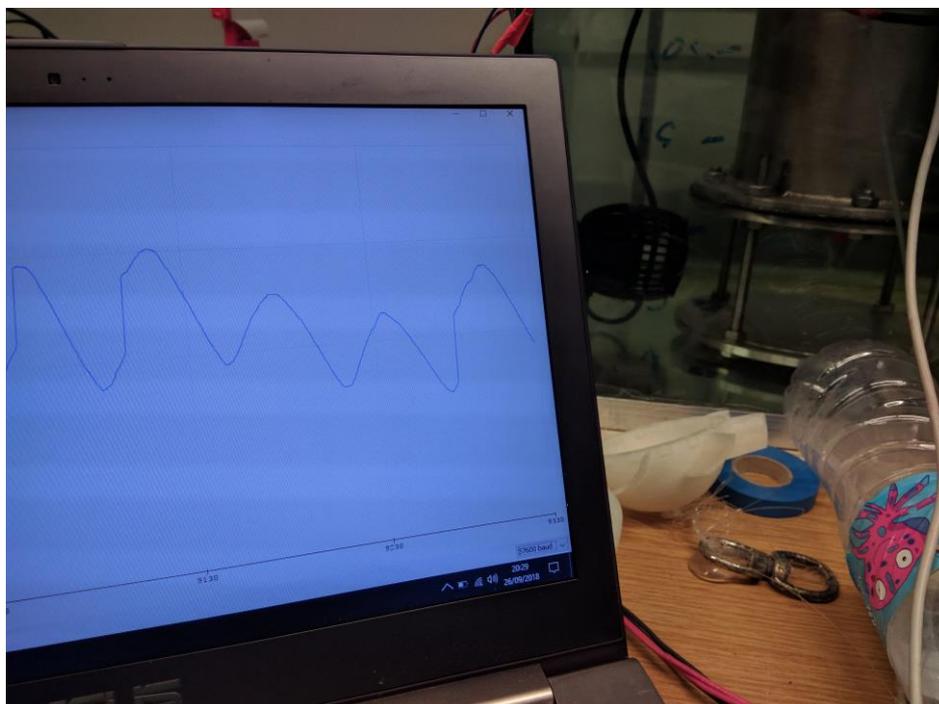


Figura 22 - Testes em tanque no laboratório do primeiro protótipo.

Desta forma foi possível testar a ocorrência de erros na medição dos tempos de voo, frequência máxima de aquisição de leituras de velocidade e testar a aplicação de filtros ao sinal adquirido.

4.5 Desenvolvimento do segundo protótipo

Devido ao peso e dimensões do primeiro protótipo, foi necessário desenhar uma nova estrutura. Esta nova estrutura foi desenhada de forma a ser impressa em impressora 3D à semelhança dos suportes dos transdutores desenvolvidos para o primeiro protótipo. Porém, a tecnologia de impressão FDM (Fused Filament Fabrication) deixa porosidades no material depositado o que obriga à realização de um tratamento superficial com epóxi para evitar infiltração de água. Depois de montada, a estrutura apresentava o aspeto da Figura 23. A caixa azul é onde é colocada a eletrónica, possuindo uma flange

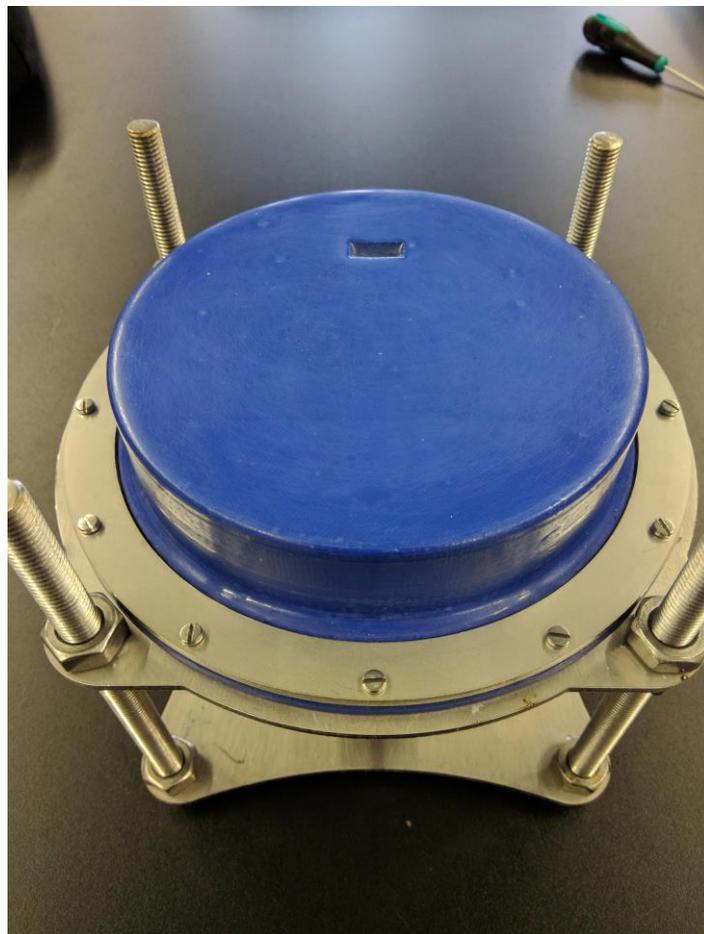


Figura 23 - Estrutura do segundo protótipo.

exterior para ser possível o acesso ao interior. É possível ver os 4 varões roscados que permitem variar a distância da placa de reflexão dos transdutores posicionados na parte inferior da eletrónica (visíveis na Figura 9).

Como um dos requisitos era poder aceder à eletrónica para eventuais alterações, torna-se necessário produzir uma junta para colocar na flange que encapsula a eletrónica no seu interior. A junta foi produzida com silicone de dois componentes e utilizando um molde produzido na impressora 3D.



Figura 24 - Junta de silicone.

Realizado um teste de estanquicidade a cerca de 2m de profundidade, apesar do cuidado em cobrir a superfície das peças impressas com resina epóxi, a caixa não se revelou suficientemente eficiente o que nos levou a uma segunda iteração do protótipo corrigindo os erros da primeira versão. Um dos pontos fracos da primeira estrutura é o facto de a peça ser oca, o que permite que a água se propague pelo seu interior até que encontre outro ponto de passagem para o interior da caixa. No interior da caixa existem pontos de fixação para a eletrónica que revelaram ser pontos de infiltração de água.

Nesta última versão foi decidido que a impressão serviria essencialmente como um molde que seria preenchido por epóxi e assim diminuir a hipótese de infiltrações. O desenho 3D da peça manteve-se muito semelhante ao anterior, mas as configurações de impressão permitiram criar uma peça oca e sem topo o que permitiria baixar os tempos de impressão e obter uma peça com as características desejadas.

Depois de impressa, a peça foi colada a uma placa de acrílico e o seu interior preenchido de epóxi. Na Figura 25 é possível ver esse processo.



Figura 25 - Produção da caixa estanque do último protótipo.

Na Figura 26 é apresentado o segundo protótipo finalizado, já com a eletrónica no seu interior.



Figura 26 - Protótipo final do sensor de correntes marítimas.

Neste protótipo final, o facto de o topo ser transparente, permite ver se existe alguma infiltração no interior e corrigir possíveis problemas maiores. A eletrónica é mantida numa caixa no seu interior o que dá alguma proteção extra no caso de infiltração.

Foi feito uma análise do custo aproximado de produção para 1000, 100 e uma única unidade deste sensor, com os seguintes valores aproximados:

Tabela 2 - Custo de produção de cada sensor.

Custo unitário	Custo 100 unidades	Custo 1000 unidades
91,66€	73,16€	66,30€

Este custo foi calculado para a produção das PCI's com qualidade industrial, tendo sido considerado o serviço de *pick-and-place* dos componentes na produção de 100 e 1000 unidades. No custo de produção das estruturas em impressão 3D foi considerado apenas o custo do material impresso e o consumo energético. O tempo de impressão das peças de cada sensor foi de cerca de 12 horas, numa impressora com dimensões de impressão de 220x220x250 mm.

Estes valores permitem analisar a viabilidade destes sensores para aplicação em projetos de monitorização requisitados.

4.6 Desenvolvimento e implementação dos circuitos eletrónicos

Devido ao facto do MAX35103 ser um componente de montagem superficial torna-se obrigatória a criação de uma placa de circuito impresso (PCI) para testar o componente.

Depois de analisar o esquemático disponibilizado no *datasheet* do componente, bem como da placa de desenvolvimento, foi desenhado o esquemático da Figura 27.

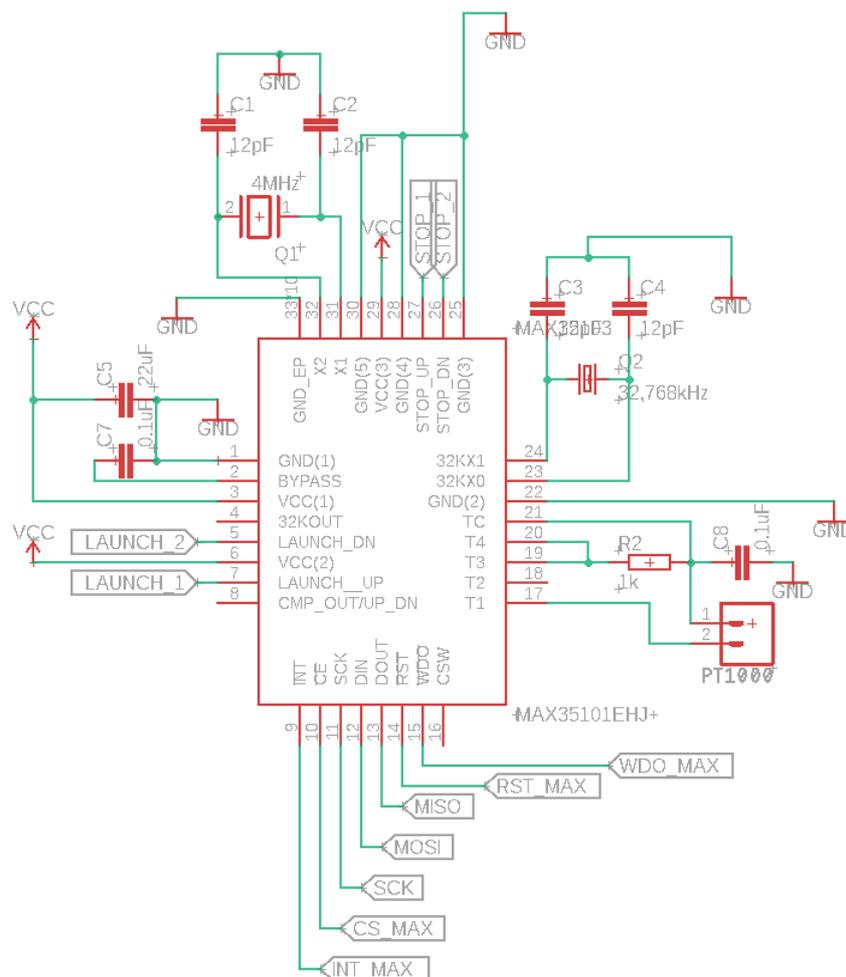


Figura 27 - Esquemático do circuito do MAX35103.

Neste esquemático (Figura 27) podemos ver, em baixo, os pinos que estarão ligados ao microcontrolador para comunicação SPI (Serial Peripheral Interface) (MISO, MOSI, SCK, CS_MAX) e INT_MAX para aviso de interrupção por parte do MAX35103. Do lado esquerdo e em cima é possível ver os pinos que estarão ligados aos transdutores. Do lado esquerdo, LAUNCH_1 e LAUNCH_2 são responsáveis por gerar os sinais elétricos a serem enviados pelos transdutores e em cima, STOP_1 e STOP_2 são responsáveis pela receção dos sinais recebidos pelos transdutores acústicos.

Do lado direito, existe o circuito responsável pela medição de temperatura. Visto que o transdutor de temperatura será um PT1000, R2 terá a resistência de 1000 ohms com uma tolerância de 1% de forma a garantir uma referência para 0 °C o mais precisa possível.

Finalmente, os terminais dos cristais de 4 MHz e 32,768 kHz foram ligados a condensadores de 12 pF de forma a funcionarem como osciladores.

Como é possível ver no esquemático anterior (Figura 27), o integrado escolhido apenas permite a conexão de 1 par de transdutores, o que só nos permitiria medir a velocidade do fluido a uma dimensão. Sendo que o pretendido é medir a duas dimensões, é necessário um circuito que faça a comutação entre um par de transdutores para um segundo par. Para executar essa função foram escolhidos dois 742G3157DCKR que por ser um *switch* do tipo *Single-Pole Double-Throw* obriga a utilização de dois CI mas diminui a possibilidade de *crosstalk* entre uma pista com um sinal do tipo LAUNCH com um sinal do tipo STOP. Na Figura 28 é possível ver o esquemático com os 4 conectores para os 4 transdutores, correspondendo cada um a um dos 4 pontos cardeais (N – Norte, E – Este, S – Sul, O – Oeste). A malha PAIR_SELECT estará ligada ao microcontrolador e será responsável por ativar os transdutores colineares ao eixo de medição, Norte – Sul e Este – Oeste.

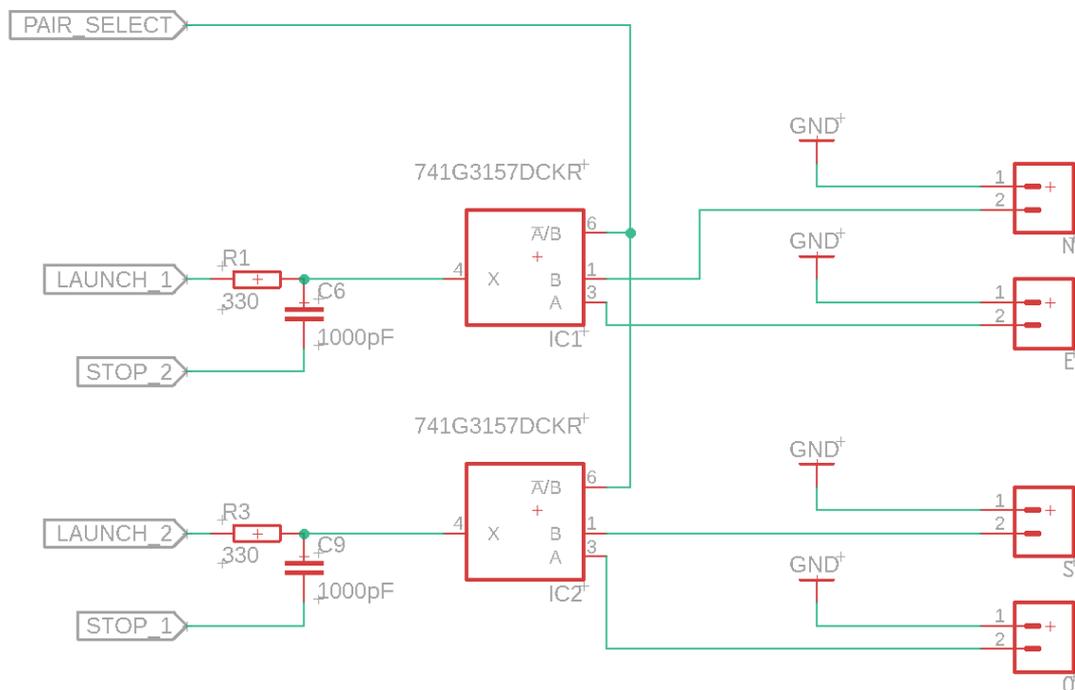


Figura 28 - Esquemático do circuito de comutação de pares de transdutores.

Finalmente, na Figura 29 é possível ver de que forma foram ligadas as malhas de comunicação com o MAX35103, a malha de seleção do eixo a medir (PAIR_SELECT), o cartão de memória que

também utiliza comunicação SPI e dois conectores para um barramento I2C (Inter-Integrated Circuit) que será responsável pela comunicação com o RTC e com a IMU.

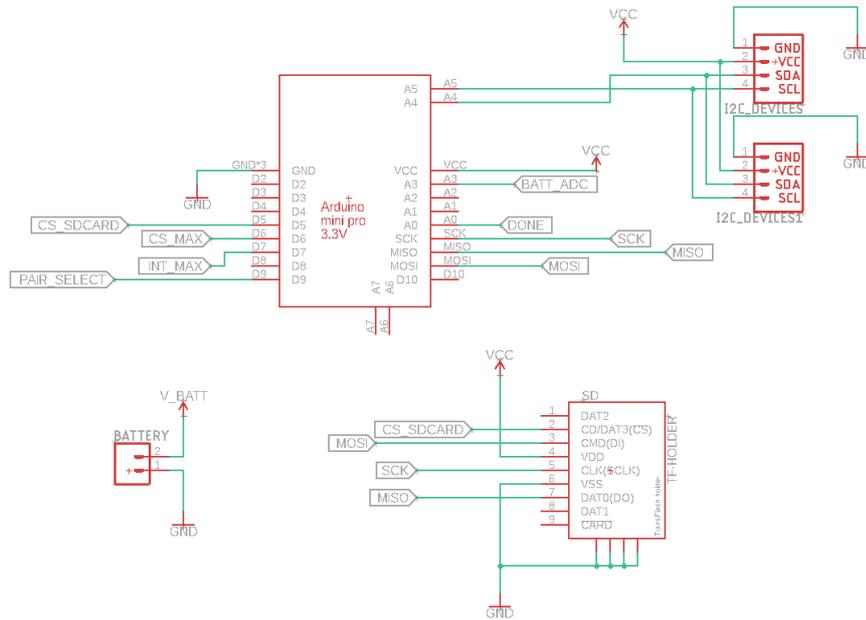


Figura 29 - Esquema de ligação do cartão SD, barramento I2C e barramento SPI.

Depois de desenvolvida a placa, o aspeto final foi o seguinte:

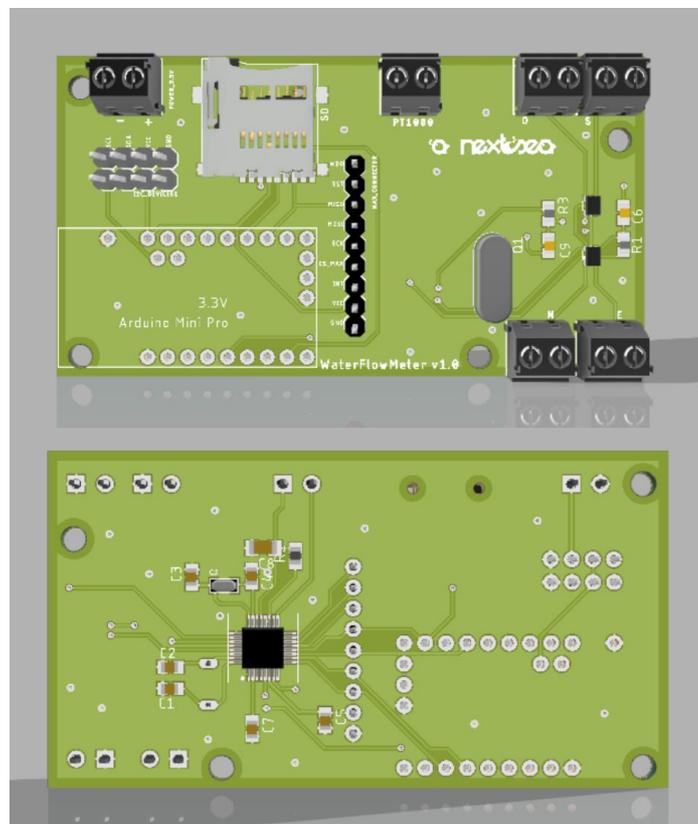


Figura 30 - Imagem 3D da PCI.

Depois de produzidas as placas e soldados os componentes, o aspeto da placa era o seguinte:

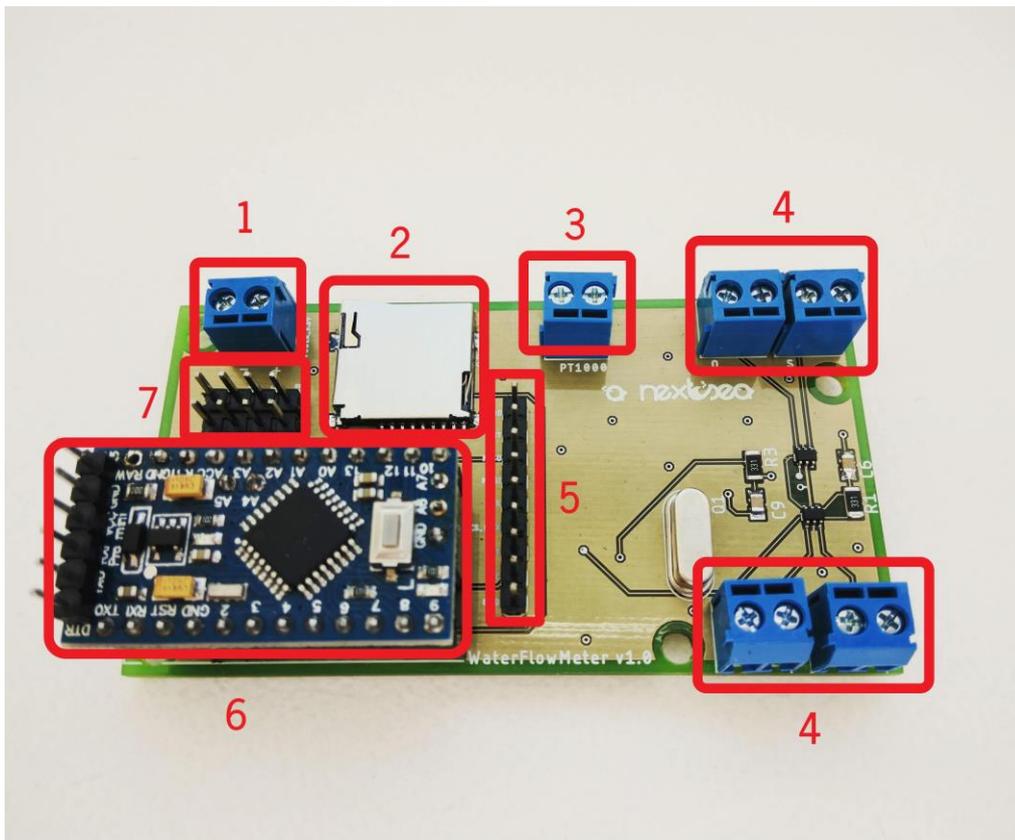


Figura 31 - PCI do primeiro protótipo.

Na Figura 31 é possível ver a face da placa com as principais conexões, sendo que cada uma das conexões numeradas, corresponde a seguinte legenda:

1. Conector para fonte de alimentação de 3,3 V;
2. Entrada para cartão SD;
3. Conector sensor de temperatura PT1000;
4. Conectores transdutores de ultrassom;
5. Pinos de conexão do MAX35103 à placa de desenvolvimento ou para *debug*,
6. Arduino Pro Mini;
7. 2 conexões para dispositivos I2C;

Nesta primeira versão a principal preocupação era testar o desempenho dos sensores de forma contínua, porém, devido ao facto do sistema ter que apresentar um consumo energético baixo, foi necessário desenvolver uma estratégia para os períodos de recolha de dados. Uma das abordagens utilizada com microcontroladores é a utilização da funcionalidade “*sleep mode*” onde se consegue diminuir drasticamente o seu consumo e acordar o microcontrolador apenas para recolher e armazenar os dados dos sensores. Apesar de ser uma funcionalidade disponível no microcontrolador

escolhido, configurá-lo para obter o consumo o mais baixo possível torna-se um desafio, para além disso, colocar o microcontrolador no modo de poupança mais extremo não retira a alimentação aos seus periféricos, que apesar de não estabelecerem comunicação com o microcontrolador, continuam a consumir energia de forma semelhante à de quando o sistema se encontra ativo.

Sendo que não seria possível cortar a alimentação dos sensores exclusivamente por *software* foi necessário estabelecer uma estratégia ao nível do hardware. A este nível a estratégia pensada dirigiu-se para o regulador de tensão que iria alimentar toda a placa a 3,3 V, este regulador deveria ter a capacidade de ser ativo por um sinal externo e esse sinal externo deveria ser gerado por um RTC de baixo consumo. Sendo que a tensão nominal das baterias que alimentam o sistema é da ordem dos 3,7 V e a tensão de alimentação do circuito é 3,3 V, é imperativo utilizar um regulador LDO para cumprir o requisito de baixar apenas 0,4 V. Somando-se a este requisito a necessidade do integrado ter um pino de *enable* a escolha recaiu sobre o integrado TPS737. Este integrado apresenta um consumo de 20 nA na entrada quando desativado e uma corrente de saída máxima de 1 A tornando-o aceitável para esta aplicação. Para gerar o sinal que ativa o LDO TPS737 a uma determinada frequência, foi utilizado um RTC de muito baixo consumo e passível de ser alimentado à tensão da bateria escolhida, sem que seja necessário utilizar um outro regulador dedicado somente à sua alimentação, aumentando a simplicidade do circuito e diminuindo as fontes de perda de energia. O RTC utilizado é um TPL5110 [17] que apresenta um consumo de 35 nA e é possível configurar os intervalos de tempo entre 100 ms e 7200 s através da ligação de uma resistência ao pino DELAY. Para que o regulador deixe de alimentar toda a placa no fim da execução da rotina de medição dos diferentes sensores, o microcontrolador deverá ativar o pino DONE do TPL5110. O circuito de alimentação periódico da placa foi desenhado da forma seguinte:

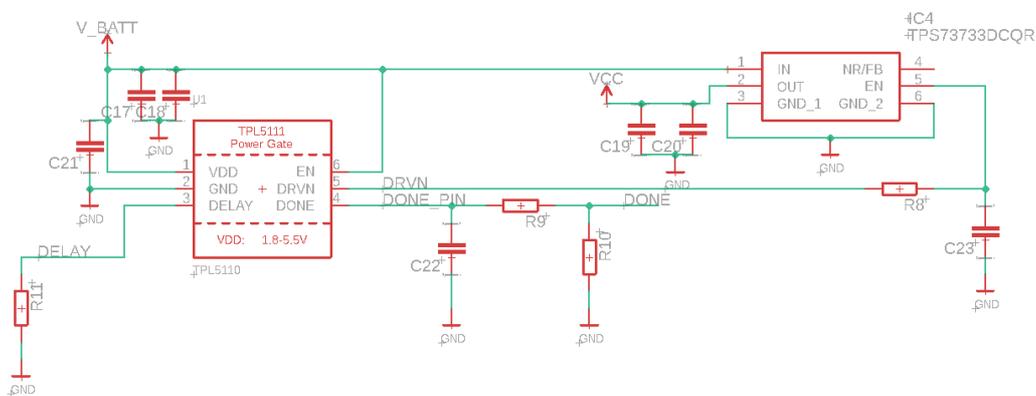


Figura 32 - Esquemático do circuito de alimentação periódica do datalogger.

4.7 Desenvolvimento do Software

Para o desenvolvimento de software, torna-se imperativo ter o hardware definido e as ligações bem estabelecidas. No momento inicial de desenvolvimento de software foi utilizada a placa de testes, sendo feito um bypass do microcontrolador existente na placa para o Arduino onde iremos desenvolver uma biblioteca para o MAX35103. Como este circuito integrado foi anteriormente utilizado com o microcontrolador da placa de desenvolvimento, bem como com o software de configuração no PC, este deverá manter as configurações anteriormente definidas a cada reset, simplificando assim os primeiros passos de desenvolvimento de software.

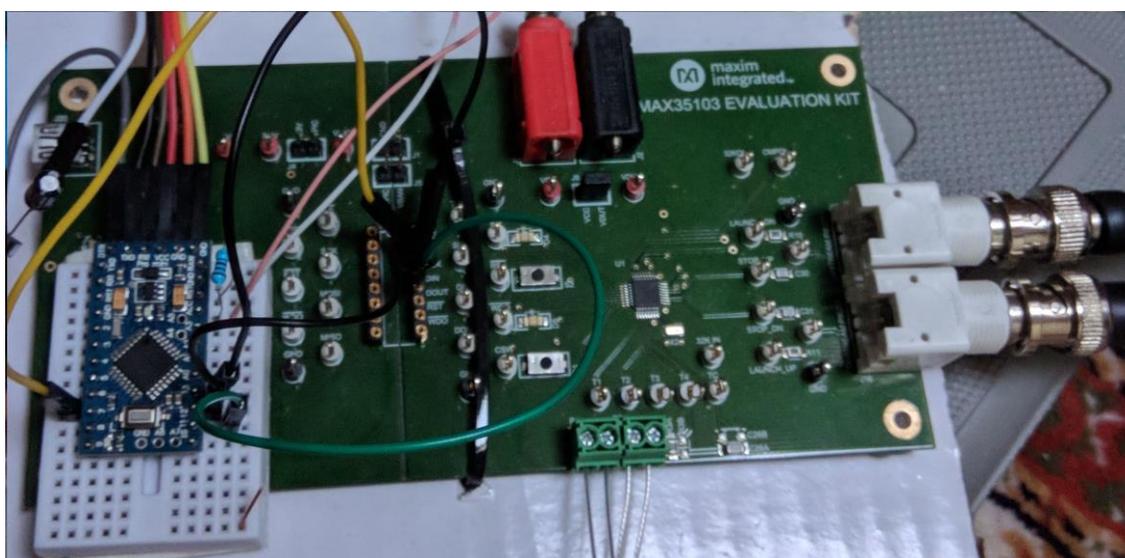


Figura 33 - Ligações da placa de desenvolvimento ao Arduino.

O primeiro objetivo a alcançar nesta fase de desenvolvimento, foi o estabelecimento da comunicação entre o MAX35103 e o Arduino. Tratando-se de uma comunicação SPI, esta pode estabelecer-se de diferentes formas. No caso do MAX35103 a comunicação SPI, segundo o *datasheet* (página 23) deverá ter as seguintes características: O SCK, que é gerado pelo microcontrolador, só está ativo quando CE está a 0 e durante a transferência de dados ou de um *opcode* no barramento SPI. A polaridade da inatividade do relógio ocorre com nível lógico baixo. DIN é guardado na descida do sinal SCK. Há um ciclo de relógio para cada bit transferido. Bits de *opcode* são transferidos em grupos de 8, com o bit mais significativo primeiro. Bits de dados são transferidos em grupos de 16, sendo o bit mais significativo enviado primeiro. A Figura 34 ilustra o diagrama temporal da comunicação SPI.

Tabela 3 - Registo de estado de interrupções do MAX35103.

WRITE OPCODE Read Only		READ OPCODE FEh		FLASH STORED No		DEFAULT VALUE 0000h		
Bit	15	14	13	12	11	10	9	8
Name	TO	AF	X	TOF	TE	LDO	TOF_ EVTMG	TEMP_ EVTMG
Bit	7	6	5	4	3	2	1	0
Name	FLASH	CAL	HALT	CSWI	INIT	POR	X	X

- TO: indica que o tempo para leitura expirou (*timeout*);
- AF: indica ativação pelo alarme do relógio de tempo real;
- X: não utilizado;
- TOF: indica que a medição de tempo de voo foi concluída com sucesso;
- TE: indica que a medição de temperatura foi concluída com sucesso;
- LDO: indica que o LDO externo para alimentação da memória *flash* estabilizou e é possível iniciar leituras;
- TOF_EVTMG: Indica que o EVTMG1 e EVTMG2 concluíram a medição de tempo de voo com sucesso;
- TEMP_EVTMG: Indica que o EVTMG1 e EVTMG3 concluíram a medição de temperatura com sucesso;
- FLASH: Indica que a comunicação SPI pode ser novamente estabelecida após conclusão de operação na memória flash;
- CAL: Indica que finalizou a rotina de calibração quando expressamente definido pelo microcontrolador;
- HALT: indica que o comando HALT foi definido;
- CSWI: indica que o pino CSW do dispositivo foi colocado ao nível lógico positivo;
- INIT: indica que a rotina de inicialização do dispositivo foi concluída com sucesso;
- POR: indica que o dispositivo foi inicializado com sucesso após aplicação de VCC.

Após garantir que o bit 12 (TOF) foi ativo e a interrupção não ocorreu por expirar o tempo máximo para executar a rotina, poder-se-á proceder à leitura dos registos que armazenam os valores de tempo de voo. A diferença de tempo de voo é armazenada em dois registos, sendo eles o E2h para TOF_DIFFInt e o E3h para TOF_DIFFFrac. TOF_DIFFInt representa o numero de períodos

ocorridos no cristal de 4MHz sendo que no máximo toma o valor de 7FFFh ou $(215 - 1) \times t_{4MHz}$ e o valor mínimo de 8000h ou $-215 \times t_{4MHz}$. O tempo no registo TOF_DIFFFrac representa a parte fracionária do numero, sendo que o período do cristal de 4MHz é dividido pela resolução de 16 bit sendo o valor máximo da fração FFFFh ou $(216 - 1)/216 \times t_{4MHz}$. A Tabela 4 presente no *datasheet* dá alguns exemplos de conversões.

Tabela 4 - Tabela de conversão de valores.

REGISTER VALUE		CONVERTER VALUE
TOF_DIFFInt (hex)	TOF_DIFFFrac (hex)	TOF DIFF VALUE (ns)
7FFF	FFFF	8,191,999.9962
001C	0403	7,003.9177
0001	00A1	250.6142
0000	0089	0.5226
0000	0001	0.0038
0000	0000	0.0000
FFFF	FFFF	-0.0038
FFFF	FFC0	-0.2441
FFFE	1432	-480.2780
FF1C	8001	-56,874.9962
8000	0000	-8,192,000.0000

Para o cálculo da velocidade não é suficiente saber a diferença do tempo de voo, necessitamos de aceder a cada um dos registos (upstream e downstream). No caso da conversão do tempo de voo downstream a fórmula é a seguinte:

$$\text{DOWN_TOF} = ((\text{double}) \text{DOWNInt} * 250 + (\text{double}) \text{DOWNFrac} * 0.0038) - 8000;$$

Podemos ver na fórmula acima que é subtraído 8000 ao tempo de voo medido, isso deve-se ao facto dos tempos de voo medidos pelo dispositivo (MAX35103) não serem absolutos e terem de ser compensados por *software*. A forma como se chegou a este valor é explicada no capítulo 4.4 nos testes realizados ao primeiro protótipo.

Devido a erros de leitura de tempos na ordem do período da frequência fundamental dos transdutores, foi necessário fazer uma deteção e correção desse tipo de erros para que não adulterasse os tempos de voo medidos e não fosse necessário executar nova rotina de leitura.

Com os valores de tempo de voo em ambos os sentidos podemos proceder ao cálculo da velocidade da água nesse sentido. A fórmula utilizada é explicada em maior detalhe no capítulo 3.4 que explica o funcionamento acústico do sensor, aqui podemos ver como foi utilizada ao nível do *software*.

$$\text{Velocity} = 230 * ((1000000000 / \text{getDOWN_TOF}()) - (1000000000 / \text{getUP_TOF}()));$$

As funções `getDOWN_TOF()` e `getUP_TOF()` retornam o valor de tempo de voo, em nanosegundos, em ambos os sentidos, por isso, o numerador na fração está multiplicado por 10^9 .

Desta forma estava desenvolvido o código capaz de medir a velocidade da água num sentido. De uma forma geral o fluxograma que descreve o funcionamento do código capaz de executar esta função é o seguinte:

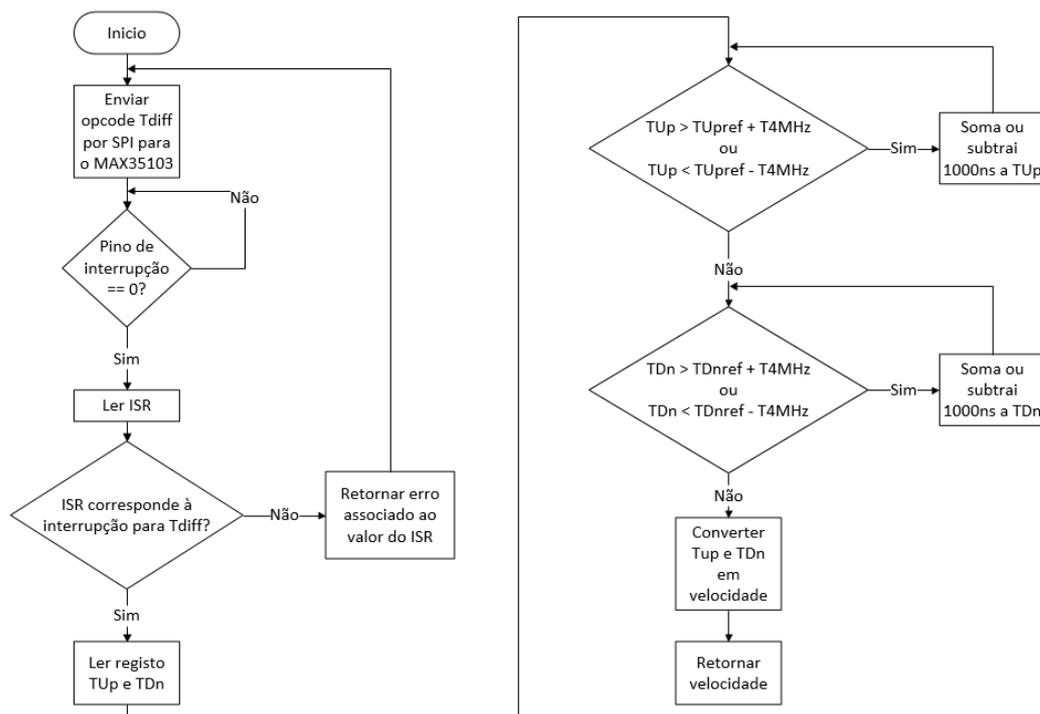


Figura 35 - Fluxograma de medição de velocidade com base no tempo de voo.

Este foi o Software que se usou no primeiro protótipo em que apenas tínhamos dois transdutores de ultrassom e onde foi utilizada a placa de desenvolvimento com as configurações pré-carregadas pelo software disponibilizado com a placa.

Para um segundo protótipo, em que já tínhamos desenvolvido uma placa com dois pares de transdutores, cartão de memória, RTC e IMU, o fluxograma era o seguinte:

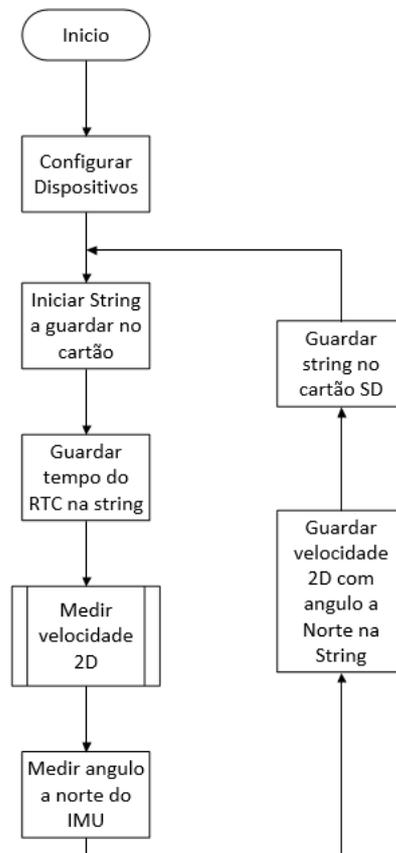


Figura 36 - Fluxograma geral do *software*.

Para medir a velocidade do fluido a duas dimensões é necessário fazer duas leituras de velocidade consecutivas comutando o par de transdutores correspondente a cada um dos eixos. Para fazer essa comutação é usado o pino 5 do Arduino que está conectado aos dois *switches* na placa de circuito impressa desenvolvida. No código a função que faz essa comutação é a função `setVector(bool)` e é chamada antes de executar um ciclo de medição de velocidade.

```
setVector(LOW); //definir sentido Este/Oeste  
velocidadeEO = getVelocity(); //Medir a velocidade no eixo Este/Oeste  
setVector(HIGH); //definir sentido Norte/Sul  
velocidadeNS = getVelocity(); //Medir a velocidade no eixo Norte/Sul
```

Após ter os dados relativos à velocidade nos dois eixos podemos aplicar duas fórmulas para obter a velocidade a duas dimensões na forma polar atribuindo uma norma e uma fase ao vetor velocidade. No código, as fórmulas foram aplicadas da seguinte forma.

```
//Cálculo do módulo da velocidade  
pPolarCoordinates[0]=sqrt((velocidadeEO*velocidadeEO)+(velocidadeNS*velocidadeNS));  
//Cálculo da fase da velocidade  
pPolarCoordinates[1] = atan2 (velocidadeNS,velocidadeEO);
```

O fluxograma que descreve o funcionamento do código supracitado pode ser descrito da seguinte forma:

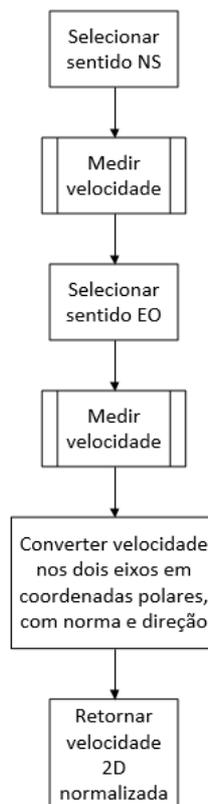


Figura 37 - Fluxograma de medição de velocidade a duas.

5. Testes e Resultados

Neste capítulo são apresentados os resultados de desempenho do segundo protótipo aos testes realizados. Estes testes foram realizados no laboratório em plataformas especialmente desenvolvidas para o efeito e também em ferramentas de simulação de elementos finitos. Não foram realizados testes em ambiente real.

5.1 Desenvolvimento de plataforma de testes

Para que fosse possível analisar o desempenho do sensor, foi desenvolvida uma plataforma de testes. Esta plataforma pretende simular a passagem da água pelo sensor ao movimentar o sensor pela água a uma velocidade conhecida. Tal sistema consiste numa carruagem, à qual é possível fixar o sensor, que se movimenta sobre um perfil quadrangular utilizando uns rolamentos, semelhante ao que podemos ver Figura 38.

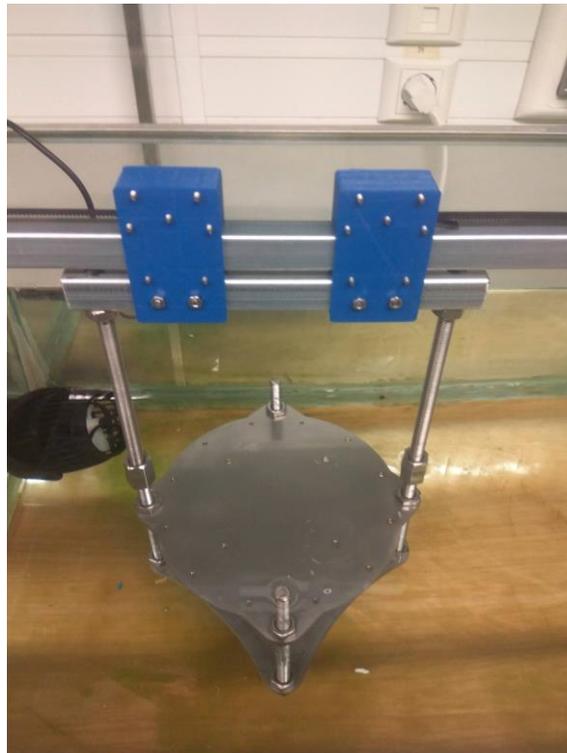


Figura 38 - Carruagem da plataforma de testes.

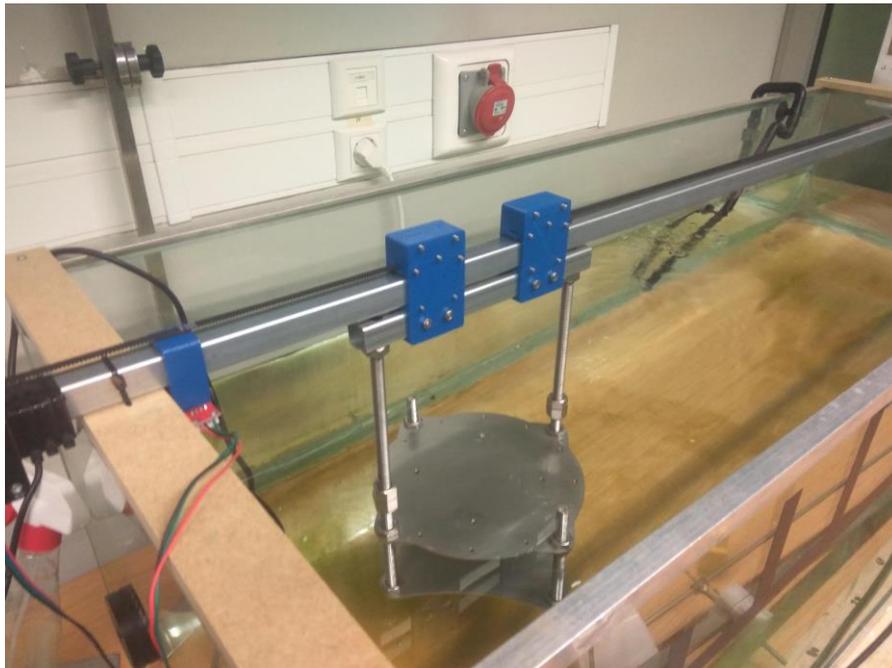


Figura 39 - Visão geral da plataforma de testes.

Sendo que o objetivo é movimentar a carruagem a uma velocidade conhecida, foi utilizada uma placa controladora de CNC (Computer Numerical Control) e um motor NEMA 17 (National Electrical Manufacturers Association) acoplado à carruagem para movimentar o sensor dentro de água. A placa CNC tem um microcontrolador Arduino carregado com o *firmware* GRBL que receberá código G genérico para simular a velocidade do fluido. Devido à simplicidade da carruagem, existe algum movimento no eixo perpendicular ao movimento pretendido que influenciará os resultados, mas para prova de conceito, não se considerou aumentar a complexidade do sistema para eliminar esse movimento.

5.2 Testes no tanque

Para proceder aos testes no tanque, o sensor e a plataforma de testes foram conectados a um PC como é possível ver na Figura 40.

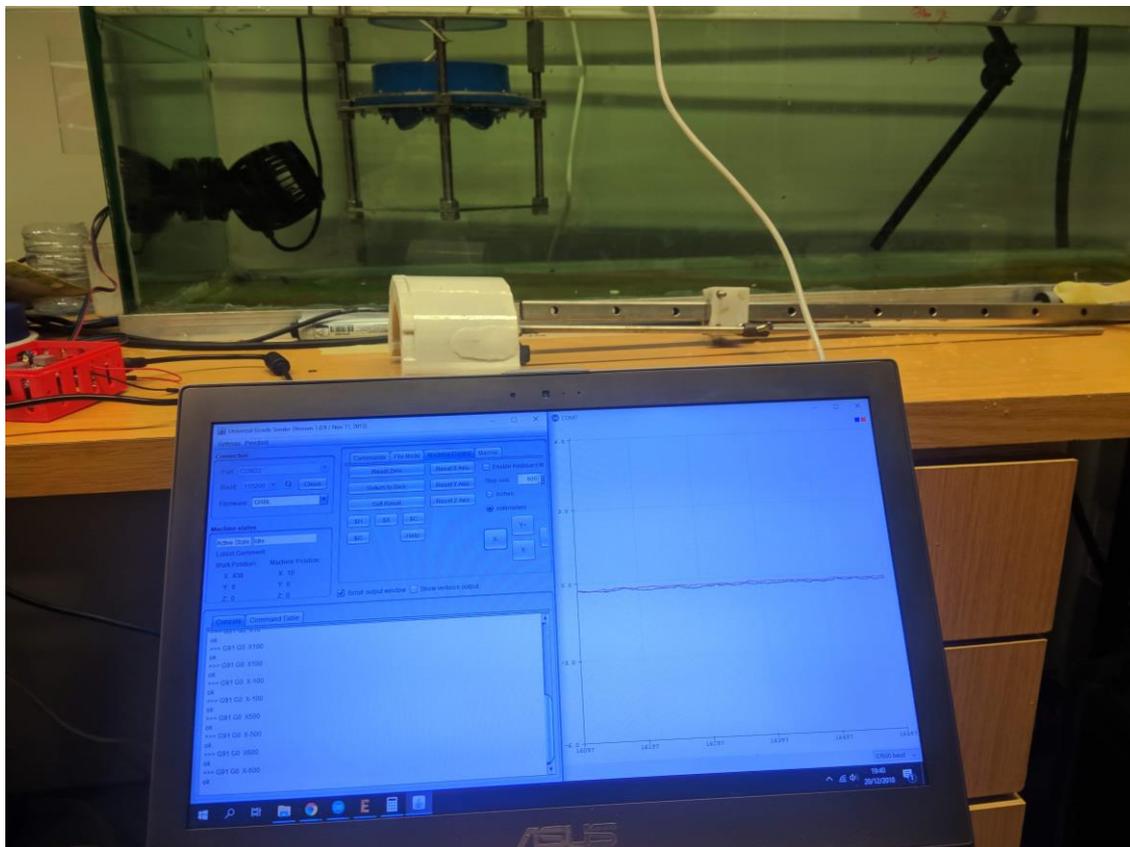


Figura 40 - Execução dos testes.

Durante os testes o sensor foi colocado na diagonal de forma a testar o desempenho da leitura em dois eixos sob as mesmas condições.

Cada teste foi executado sempre que a água estabilizou e a leitura de velocidade do sensor se aproximou de 0 m/s. A cada teste, o sensor deslocou-se 830 mm e variou-se a velocidade de deslocamento. Os códigos G utilizados foram o G91 para definir o sistema posicional como relativo, o G1 para definir o movimento como linear e o F para definir o feed rate da máquina CNC e consequentemente a velocidade a que foi testado o sensor. Para testar o sensor numa corrente de 100 mm/s as linhas de código G deverão ser:

F6000;

G91 G1 X830;

A função F define-se em mm/min e por essa razão deverá ser multiplicada por 60.

Ao analisar os resultados na Figura 41, podemos ver que as leituras permanecem coerentes com o aumento de velocidade. Contudo, com o aumento da velocidade, o sinal que deveria ser próximo de constante torna-se mais oscilatório. Tal deve-se ao facto da carruagem de testes possuir algum movimento no eixo perpendicular ao do eixo em que o sensor se desloca, o que se torna mais evidente com o aumento da velocidade. Ainda assim, sabendo que os valores medidos representam o módulo da velocidade, o seu valor médio apresenta-se acima do valor de velocidade a que foi movida a carruagem em todos os testes, o que é expectável considerando que o movimento indesejado da carruagem é perpendicular ao movimento simulado.

Os gráficos apresentam dados referentes à recolha de 500 amostras, à frequência de amostragem de 70 Hz.

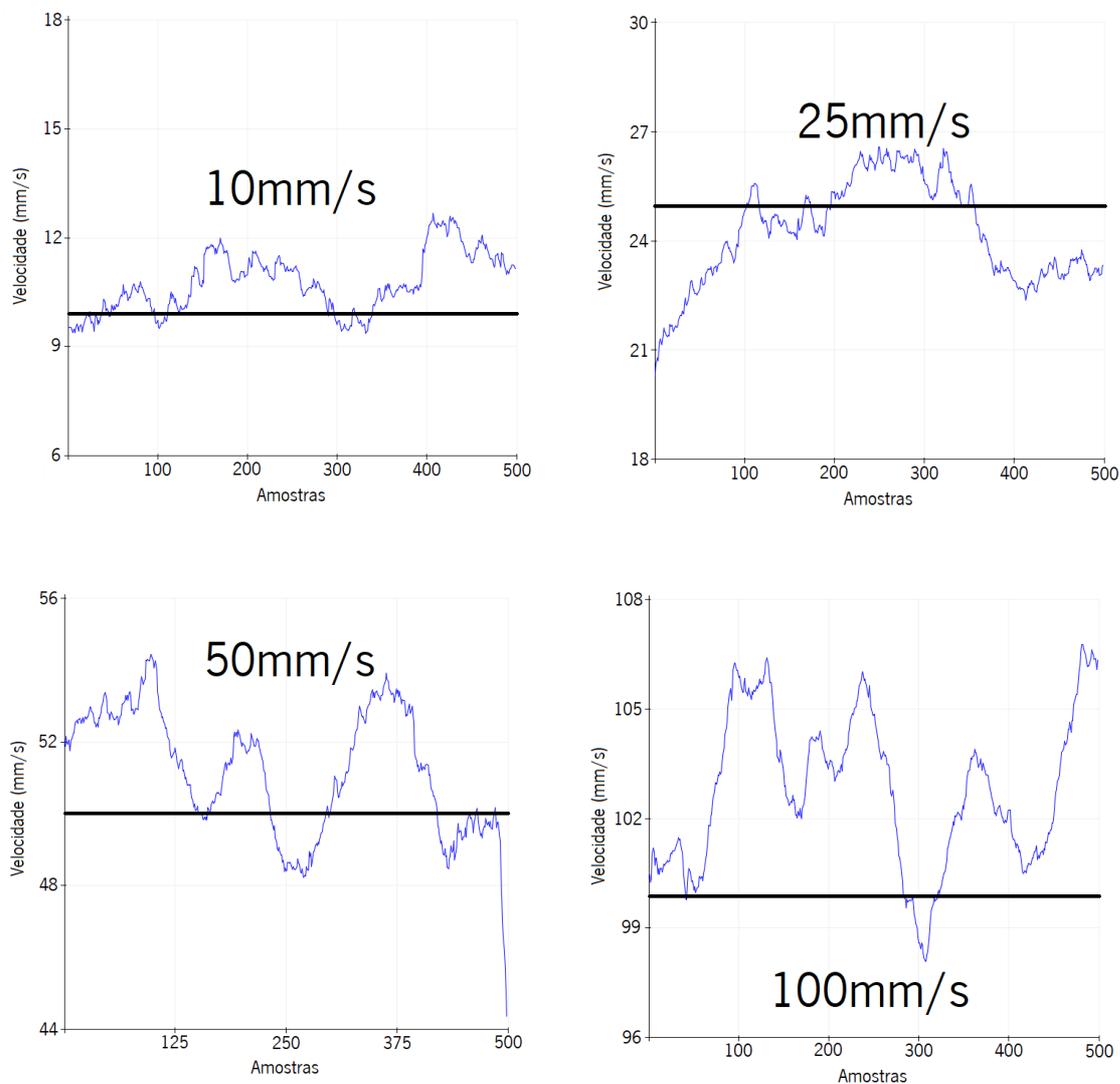


Figura 41 - Gráficos de medição da velocidade a 10, 25, 50 e 100 mm/s.

A temperatura medida foi comparada com a de um termómetro digital, apresentando valores idênticos. Estes testes foram executados fora de água para se poder comparar os valores com um termómetro comum.

Para testar o IMU, foi utilizado uma plataforma (Figura 42) à qual era possível fixar a placa de testes de várias formas, para que fosse possível girar a placa em torno de cada um dos eixos sem movimento nos restantes. Desta forma foi possível calibrar o IMU, fazendo ajustes nos valores de *offset* do zero medido em relação ao zero real [18].

Depois de calibrado, o IMU apresentou leituras bastantes consistentes por parte do magnetómetro mesmo quando o eixo do Z não se apresentava totalmente na vertical.

Depois de colocar o IMU no protótipo, procedeu-se a nova calibração para que se pudesse anular o efeito provocado pelas partes metálicas da sua estrutura.

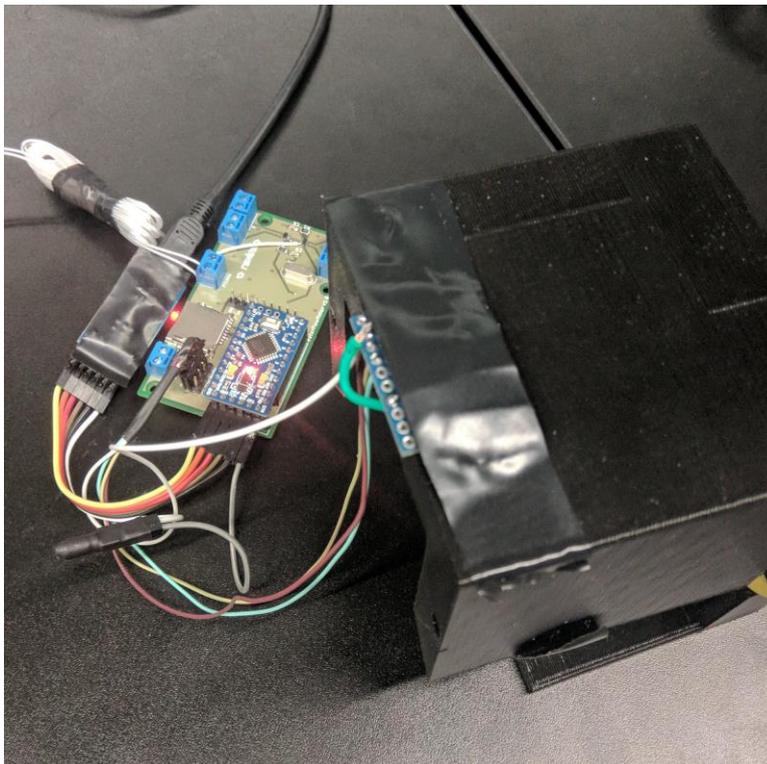


Figura 42 - Calibração e testes de funcionamento da IMU.

5.3 Simulações dos fluidos

Com a estrutura do sensor finalizada, surge a necessidade de compreender o efeito que a própria estrutura tem sobre a passagem do fluido. O que procuramos é compreender se a estrutura altera a velocidade do fluido, a sua direção, ou provoca turbulência e até que ponto isso influencia nas medições.

Para fazer esse estudo recorreremos a uma ferramenta de cálculo por elementos finitos. Depois de fazer algumas simulações em ferramentas como o *Ansys* [19] e o *Comsol* [20], a escolha recaiu sobre o *CFD* da *Autodesk* [21]. Ao contrário do *Ansys* e do *Comsol*, que são ferramentas de análise de modelos multidisciplinares, o *CFD* centra-se no estudo da análise de fluidos. Por ser uma ferramenta da *Autodesk*, a integração com os programas de modelação, também da *Autodesk*, torna-se mais simples, já que é possível exportar diretamente do *Fusion 360* para o *CFD*. Tal revela-se uma grande vantagem, pois é possível simplificar o modelo no *Fusion 360* e consequentemente simplificar a malha criada. Ao simplificar a malha, diminuímos o número de elementos a serem processados aquando do processamento da solução do estudo a resolver, diminuindo o tempo de processamento e aumentando a probabilidade da simulação convergir para um resultado.

Visto que a estrutura tem 4 varões roscados, é previsível que surjam perturbações a sotacorrente de cada um dos varões. Assim sendo serão analisados dois cenários possíveis. Num deles o fluido incide sobre um lado em que não existe varões (cenário nº1 da Figura 43), no outro será analisado o pior dos cenários em que a corrente incide sobre um dos varões (cenário nº2 da Figura 43).

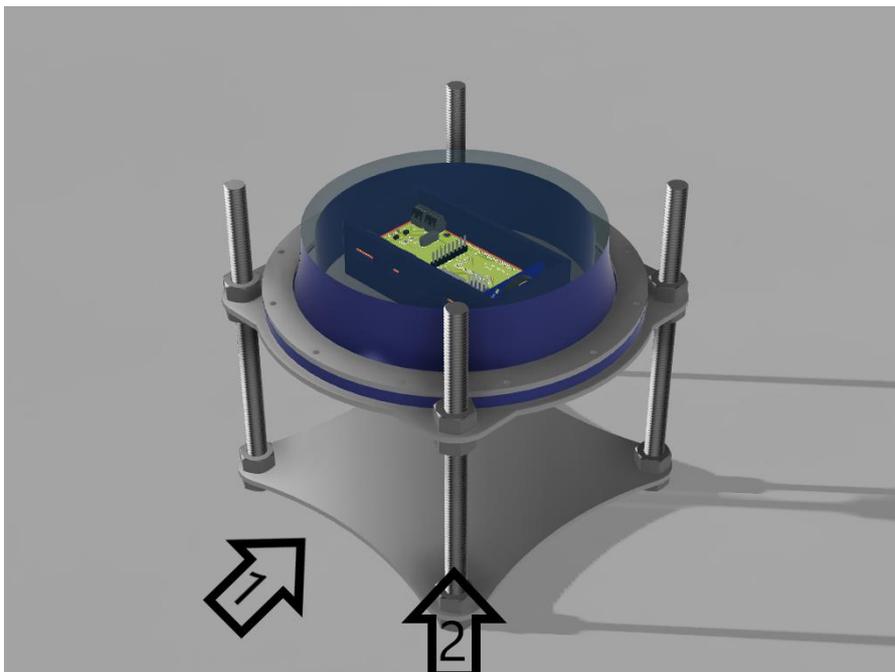


Figura 43 - Cenários de teste em ferramenta de simulação de elementos finitos.

Foram feitas simulações a várias velocidades nos dois cenários supracitados não se verificando grandes perturbações no fluido que fossem causar impacto na precisão das medições.

Na Figura 44, é possível vermos os resultados dessa simulação à velocidade de 1 m/s onde não se verificou turbulência ou variação significativa da velocidade no volume de água onde ocorre a medição por fenômeno acústico, apresentando uma variação de mais ou menos 10%.

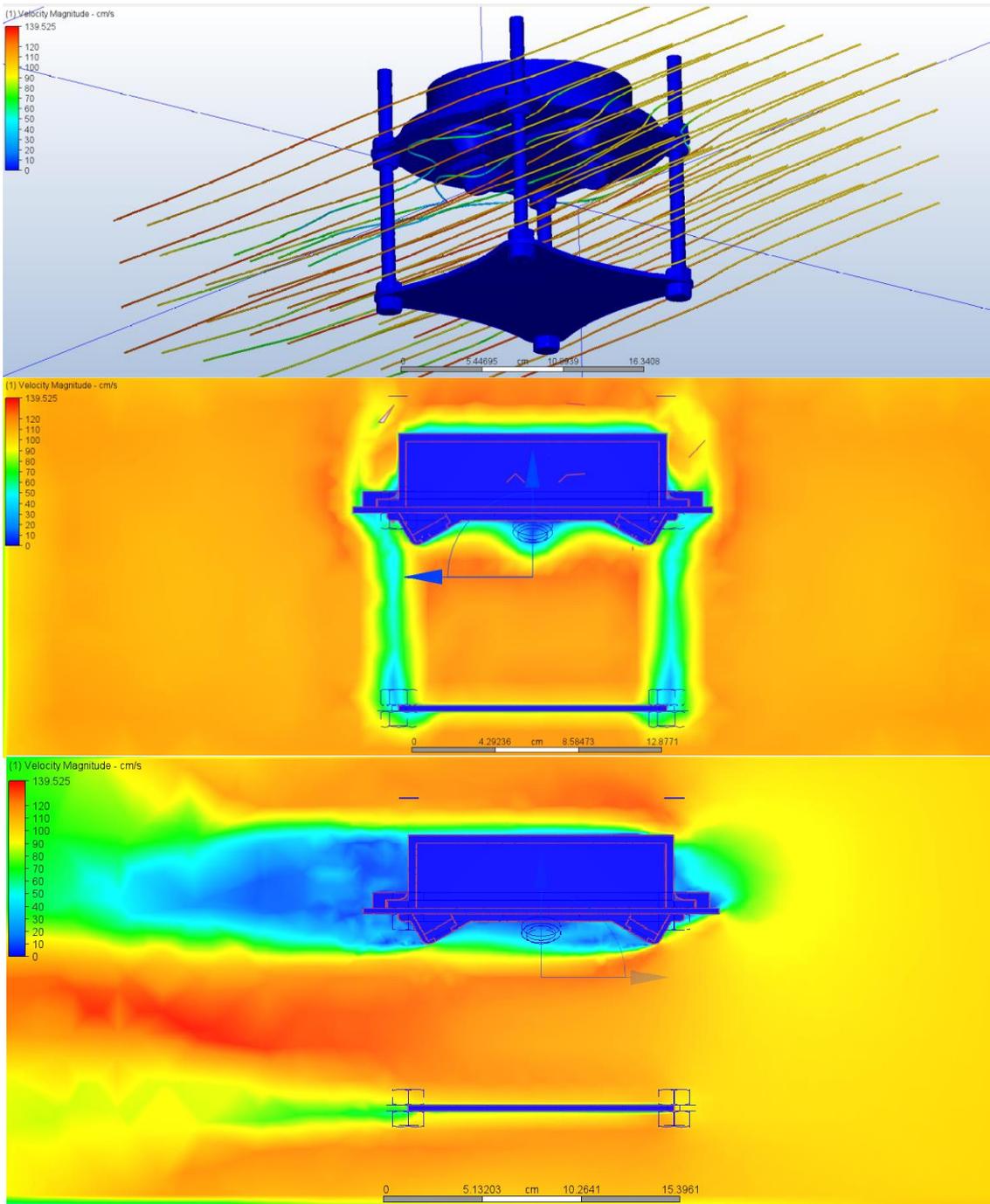


Figura 44 - Resultados da simulação a 1 m/s no cenário 1. A primeira imagem apresenta as linhas de sentido do fluxo. A segunda imagem mostra os valores da velocidade no plano de incidência do fluido. Na última imagem o fluido corre da esquerda para a direita, onde é possível ver a turbulência a sotacorrente do sensor.

De forma análoga, a 1 m/s no ângulo mais fechado, não se verificou turbulência que possa afetar as medições. Na verdade, existe maior perturbação no volume de água na zona central do sensor do que no cenário anterior, no entanto, a turbulência situa-se em torno do plano vertical que fica a sotacorrente do veio roscado sobre o qual a corrente incide. Desta forma, pouco interfere com o plano onde se propagam as ondas de ultrassom, que estão desfasadas desse plano 45°, e por conseguinte, pouco interfere nos tempos de voo medidos.

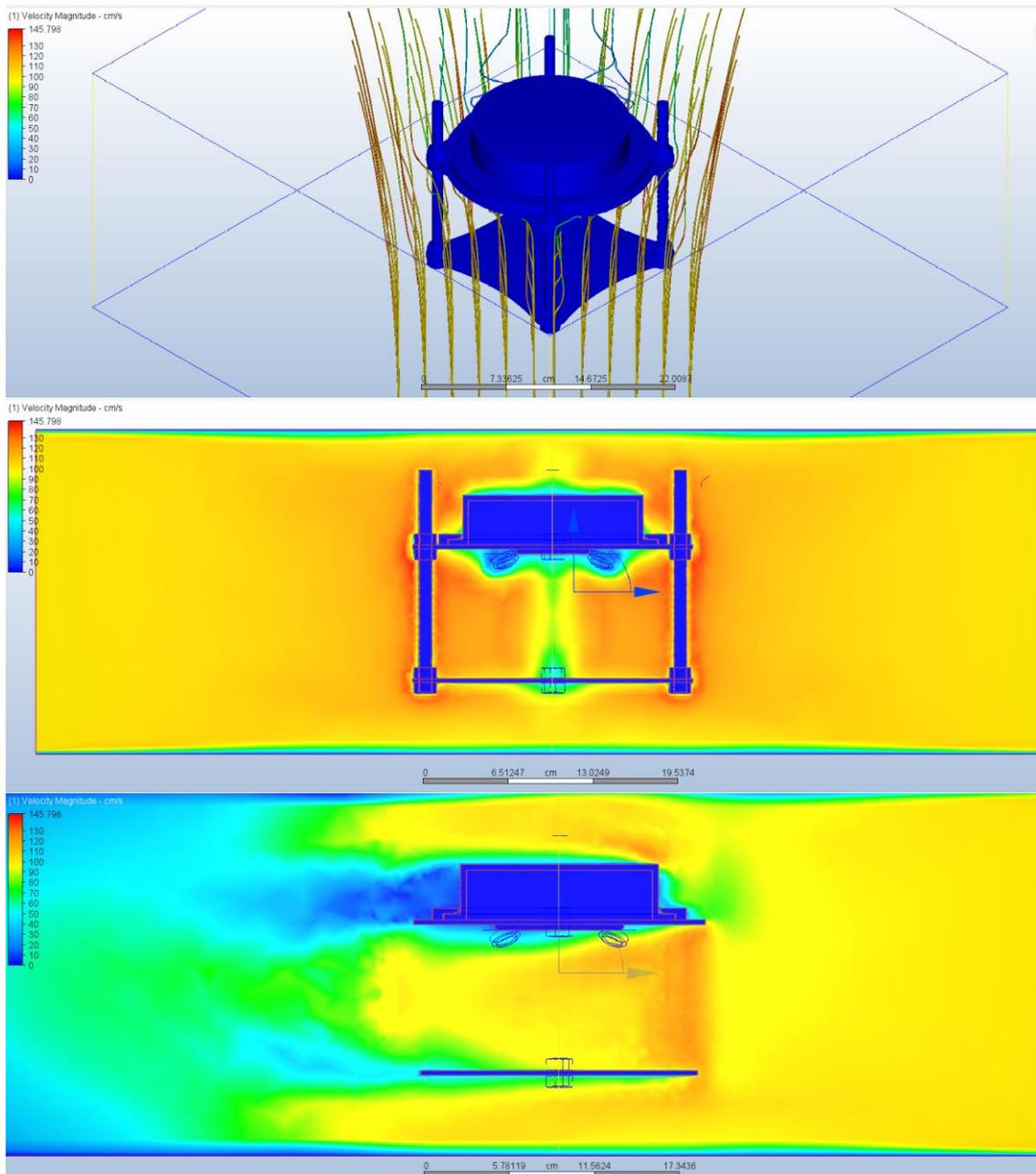


Figura 45 - Resultados da simulação a 1 m/s no cenário 2. A primeira imagem apresenta as linhas de sentido do fluxo. A segunda imagem mostra os valores da velocidade no plano de incidência do fluido. Na última imagem o fluido corre da esquerda para a direita, onde é possível ver a turbulência a sotacorrente do sensor.

6. Conclusões e trabalho futuro

Neste capítulo é apresentado o que se realizou com sucesso e o que ficou por testar ou desenvolver.

6.1 Conclusão

Este trabalho permitiu realizar um protótipo capaz de medir a velocidade da água, tendo-se cumprido o objetivo principal.

Foi desenvolvida uma biblioteca para o Max35103 tornando mais simples futuros desenvolvimentos na área de medição de fluidos utilizando este CI.

Um dos grandes desafios no desenvolvimento deste projeto foi criar uma capsula fiável para conter a eletrónica e assim realizar testes ao sensor sem a preocupação da água entrar em contacto com a eletrónica.

Os testes no tanque do primeiro protótipo permitiram obter leituras da velocidade da água apenas numa direção, pois apenas foram usados dois transdutores. Os testes realizados consistiram na aplicação de fluxos de água pulsados por uma turbina na zona de medição. Este sistema não permitia apurar se o valor absoluto medido era correto pois não havia forma de comparar os valores medidos com valores de referência. No entanto, as leituras mostraram-se bastante promissoras para implementação do sistema com dois eixos de medição.

O segundo protótipo, capaz de medir a duas dimensões, realizou testes mais complexos no tanque do laboratório. O sensor foi movido em água estática a velocidades controladas por uma plataforma de testes com base numa CNC e assim quantificar o erro de medição entre o *feedrate* da plataforma e o valor de velocidade do fluido reportado pelo sensor. O sensor foi testado a 10, 25, 50 e 100 mm/s, partindo de um fluido estático, apresentando bom desempenho nas leituras. Quando em repouso dentro de água, o sensor apresentava leituras muito perto de 0 mm/s, nunca superiores a 1 mm/s.

Com um consumo de corrente de 6mA o sistema demonstra a potencialidade do sensor executar medições durante longos períodos de tempo, quando alimentado por uma bateria, quer em regime de medição contínua, quer durante curtos períodos intervalados no tempo. Em regime de medição contínua é possível obter leituras a duas dimensões à frequência de 70 Hz. Importa também referir que, quando o circuito não for alimentado o RTC e o LDO em conjunto consomem cerca de 55 nA. Se considerarmos uma bateria com uma capacidade de 1250 mAh, e um período de medição de 3 segundos a cada 5 minutos, conseguimos cerca de 19 meses e meio de operação. Nestes

cálculos foi considerado um fator de 0,7 para fatores externos que afetam a capacidade da bateria e/ou o consumo energético do sistema.

6.2 Trabalho Futuro

Apesar de provada a viabilidade da utilização deste sensor para medir a velocidade da água que por este passa, as condições em ambiente marinho ou fluvial apresentam várias exigências. Não foi possível verificar a influência da acumulação vegetativa no sensor nos períodos de teste em ambiente real, sendo necessário submeter o sensor a períodos de teste mais extenso. Para o fazer deverá ser utilizada uma 3ª placa protótipo em que o sistema de alimentação periódica estará integrado nessa mesma placa fazendo com que o sistema seja capaz de funcionar de forma totalmente independente, recorrendo ao uso de uma bateria como alimentação, e armazenando os dados num cartão de memória. Ao contrário do último protótipo não será possível comunicar em tempo real por cabo para efetuar a recolha de dados ou carregar novo *software*.

Algo que ficou por desenvolver, e as condições marinhas assim o exigem, é a correção dos valores de velocidade do fluido por oscilação da estrutura dentro de água. Tendo sido contemplado nos requisitos do sistema, foi considerada a utilização de um IMU para fazer tal correção, no entanto não foi desenvolvido código capaz de fazer correção por movimento de inercia, sendo apenas utilizado o magnetómetro para aferir a orientação do sensor em relação ao norte geográfico.

7. Bibliografia

- [1] C. Swanson and H. Kim, "Dredged Material Transport Modeling Analysis in New Bedford Harbor," 2003.
- [2] "About the Project – NEXTSEA." [Online]. Available: <http://nextsea.org/about/>. [Accessed: 21-Oct-2019].
- [3] J. L. WHELLOCK, "AN ACOUSTIC DOPPLER CURRENT METER."
- [4] N. S. Lowell, D. R. Walsh, and J. W. Pohlman, "A comparison of tilt current meters and an acoustic doppler current meter in vineyard sound, Massachusetts," *2015 IEEE/OES 11th Curr. Waves Turbul. Meas. CWTM 2015*, 2015.
- [5] M. R. Simpson, "Discharge Measurements using a broad-band acoustic Doppler current profiler," *United States Geol. Surv. OPEN-FILE Rep. 01-1*, p. 134, 2001.
- [6] "SonTek - Argonaut-ADV for shallow water flow monitoring, 3D Doppler Technology." [Online]. Available: <https://www.sontek.com/productsdetail.php?Argonaut-ADV-6>. [Accessed: 31-Oct-2019].
- [7] SonTek/YSI, "Acoustical Doppler Velocimeter (Adv): Sampling Volume Size and Velocity Accuracy," vol. i, no. February, pp. 2–4, 1998.
- [8] W. B. Hess, R. C. Swengel, and S. K. Waldorf, "Measuring Water Velocity by an Ultrasonic Method," *Electr. Eng.*, vol. 69, p. 983, 1950.
- [9] "Falmouth Scientific, Inc." [Online]. Available: <http://www.falmouth.com/>. [Accessed: 31-Oct-2019].
- [10] M. Martins, V. Correia, J. M. Cabral, S. Lanceros-Mendez, and J. G. Rocha, "Optimization of piezoelectric ultrasound emitter transducers for underwater communications," *Sensors Actuators, A Phys.*, vol. 184, pp. 141–148, 2012.
- [11] G. Wade, "Human uses of ultrasound: Ancient and modern," *Ultrasonics*, vol. 38, no. 1, pp. 1–5, 2000.
- [12] M. S. Martins, "Ultrasonic wireless broadband communication system for underwater applications," 2013.
- [13] "Understanding acoustical scattering." [Online]. Available: <https://www.prosoundtraining.com/2015/04/03/acoustical-scattering/>. [Accessed: 22-Oct-2019].
- [14] Maxim Integrated, "MAX35103 datasheet," pp. 1–67, 2015.

- [15] Texas Instruments, “TDC7200 Time-to-Digital Converter for Time-of-Flight Applications in LIDAR, Magnetostrictive and Flow Meters,” no. 1, p. 50, 2016.
- [16] InvenSense, “MPU9250 Product Specification Revision 1.1,” *Prod. Specif.*, vol. 1, no. 408, pp. 1–4, 2016.
- [17] Texas Instruments, “TPL5110 Nano-power System Timer for Power Gating,” 2015.
- [18] N. O. T. Under and R. Control, “MPU Hardware Offset Registers Application Note,” vol. 1, no. 408, pp. 1–8, 2014.
- [19] “Engineering Simulation & 3D Design Software | ANSYS.” [Online]. Available: <https://www.ansys.com/>. [Accessed: 23-Oct-2019].
- [20] “Software COMSOL Multiphysics® - Entenda, preveja e otimize.” [Online]. Available: <https://www.comsol.pt/comsol-multiphysics>. [Accessed: 23-Oct-2019].
- [21] “Autodesk CFD | Computational fluid dynamics simulation software.” [Online]. Available: <https://www.autodesk.com/products/cfd/overview>. [Accessed: 23-Oct-2019].