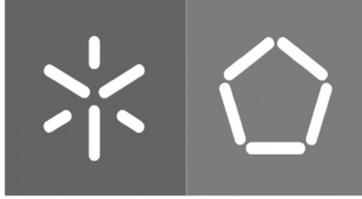




**Desenvolvimento e Implementação de  
Sistema de Monitorização de Estuários**





**Universidade do Minho**  
Escola de Engenharia

João Luís Lopes e Rocha

## **Desenvolvimento e Implementação de Sistema de Monitorização de Estuários**

Dissertação de Mestrado

Mestrado em Engenharia Eletrónica Industrial e  
Computadores

Trabalho efetuado sob a orientação de

Professor Doutor Luís Miguel Valente Gonçalves

Professor Doutor Sérgio Adriano Fernando Lopes

Julho de 2021

## **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-NãoComercial-SemDerivações**

**CC BY-NC-ND**

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

Universidade do Minho, 1 de julho de 2021

Assinatura:

*João Rocha*

Este trabalho foi cofinanciado por fundos nacionais através da FCT - Fundação para a Ciência e Tecnologia, I.P. pelo Programa Operacional Regional do Norte (NORTE2020), por meio do Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER), Projeto NORTE-01-0145-FEDER-000040 – ATLÂNTIDA - Plataforma para a Monitorização do Oceano Atlântico Norte e Ferramentas para a Exploração Sustentável dos Recursos Marinhos.

The logo for ATLANTIDA is displayed in a bold, blue, sans-serif font. The letters 'A' at the beginning and end of the word are stylized, each featuring a white wave-like graphic element that curves under the letter.

## **AGRADECIMENTOS**

A presente dissertação de Mestrado, embora feita de forma individual, contou sempre com o apoio e presença de outrem, aos quais devo o meu reconhecimento.

Ao orientador e coordenador de projeto Luís Miguel Gonçalves e ao coorientador Sérgio Lopes, por todo o aconselhamento, orientação e condições disponibilizadas.

Aos meus colegas de laboratório, por todo o companheirismo, suporte e entajuda. Em especial ao Tiago Matos pela grande ajuda, em especial por todas as horas juntos em trabalho de campo.

Às oficinas do departamento de eletrónica, em especial ao Carlos Torres, por todo o conhecimento e material disponibilizado.

De forma mais sentimental, à minha companheira de vida Camila Maria Penso, por estar presente em todo e qualquer momento deste percurso, aos meus pais e irmã, por todo o suporte e paciência para me aturar durante estes logos anos de aprendizagem e à minha família.

A estes, e a todos os outros que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho,

O meu 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.

Universidade do Minho, 15 de julho de 2021

Assinatura:

João Rocha

## RESUMO

Os estuários dos rios têm a particularidade de estar em constante alteração no que toca à salinidade da água, visto que o rio conduz água doce para a foz, enquanto a força da maré empurra água salgada rio acima, chegando a percorrer vários quilómetros a montante dadas as condições certas. Estas massas de água não se misturam instantaneamente, permitindo o aparecimento de uma fronteira distinta entre as duas, conhecida como frente. Neste documento é apresentado um sistema de monitorização composto por sensores de salinidade a quatro eléctrodos, que adquirem dados de condutividade, temperatura e pressão para o cálculo da salinidade, disposto de maneira a fazer medições ao longo da coluna de água, com o objetivo de detetar o formato da frente, bem como monitorizar o estuário. O sensor, e o sistema de monitorização em geral, é de baixo custo, baixo consumo energético e preciso a longo prazo, mesmo quando instalado em condições adversas como no mar. Os sensores consomem apenas 26  $\mu\text{A}$  em modo *sleep* e 10 mA durante a leitura, sendo que o tempo de leitura é menor que 100 ms. A escolha da configuração a quatro eléctrodos permite contornar o inevitável envelhecimento dos eléctrodos e possíveis erros de leitura, contribuindo para um funcionamento autónomo de longa duração.

Palavras-Chave: Monitorização, Estuário, Salinidade, Baixo-consumo

## **ABSTRACT**

Estuaries have the particularity of being in constant change concerning the water salinity, since the river carries fresh water to the mouth, while the force of the tide pushes salty water upstream, possibly reaching several kilometers upstream given the right conditions. These bodies of water do not mix instantly, allowing the appearance of a distinct border between the two, known as the front. This document presents a monitoring system composed of four-probe salinity sensors, which acquire conductivity, temperature, and pressure data to calculate salinity, arranged in such a way as to make measurements along the water column, to detect the shape of the front, as well as monitoring the estuary. The sensors, and the monitoring system in general, are cost-effective, low-power, and accurate in long-term deployment, even when installed in adverse conditions such as at sea. The sensors current consumption is 26  $\mu\text{A}$  in sleep mode and 10 mA during reading, and the reading time is less than 100 ms. The choice of the four-point configuration allows overcoming the inevitable decay of the electrodes and possible reading errors, contributing to autonomous long-term operation.

Keywords: Monitoring, Estuary, Salinity, Low-Power

## Índice

Agradecimentos.....	iv
Resumo.....	vi
Abstract.....	vii
Índice de Equações .....	xiii
Lista de Figuras.....	xv
Lista de Tabelas .....	xxi
Lista de Abreviaturas, Siglas e Acrónimos .....	xxiii
1. Introdução .....	1
1.1 Motivação .....	2
1.2 Objetivos.....	2
1.3 Organização da Tese .....	3
2. Estado da Arte .....	5
2.1 Técnicas de medição de Salinidade .....	5
2.1.1 Sensor de condutividade indutivo.....	6
2.1.2 Sensor de condutividade com elétrodos .....	6
2.1.3 Sensor por refração .....	8
2.1.4 Medição laboratorial .....	9
2.1.5 Medição por satélite .....	9
2.1.6 Conclusão .....	10
2.2 Sensor de salinidade baseado em elétrodos.....	11
2.2.1 Condutividade .....	11
2.2.2 Efeito de polarização.....	12
2.2.3 Frequência .....	12
2.2.4 Geometria .....	13
2.2.5 Temperatura e Pressão.....	13
2.2.6 Cálculo da Salinidade .....	14
2.3 Sistemas de monitorização marítima .....	16
2.3.1 Medição Laboratorial .....	16
2.3.2 Monitorização remota .....	17

2.3.3	Sistemas de aquisição de dados em tempo real .....	17
2.4	Sistemas de Atracção .....	19
2.5	Abordagem desta dissertação.....	20
3.	Trabalho Previamente Desenvolvido .....	22
3.1	Sensor de Salinidade.....	22
3.2	Hardware .....	23
3.3	Eléctrodos.....	24
3.4	Sistema de Monitorização Marítimo .....	25
3.5	Resumo e melhorias .....	27
4.	Sensor de Salinidade .....	28
4.1	Microcontrolador .....	28
4.2	Circuito electrónico de leitura da condutividade .....	29
4.3	PCB.....	29
4.3.1	Otimização a nível energético.....	30
4.3.2	Ligação directa dos eléctrodos à PCB.....	31
4.3.3	Comunicações RS-485 .....	31
4.4	Estabilização do Amplificador de Instrumentação.....	32
4.5	Encapsulamento .....	36
4.6	Protocolo de comunicação.....	36
4.7	Software.....	38
4.8	Testes e Calibração .....	39
4.8.1	Sensor de marés .....	39
4.8.2	Definição das escalas de medição.....	43
4.8.3	Testes de Laboratório .....	44
4.8.4	Calibração .....	49
5.	Sistema de Monitorização .....	51
5.1	Datalogger .....	51
5.2	Suporte dos Sensores na Coluna de Água.....	54
5.3	Sistema dos cabos de alimentação e comunicação.....	56
5.3.1	Sistema de cabos e conectores.....	57

5.4	Montagem dos sensores no suporte .....	58
6.	Testes e Resultados .....	59
6.1	Robustez mecânica do sensor .....	59
6.2	Sistema de Monitorização.....	60
6.3	Sensor de Salinidade.....	61
6.4	Sensor de ondulação.....	63
7.	Conclusões e Trabalho Futuro.....	65
7.1	Conclusões .....	65
7.2	Trabalho Futuro .....	66
7.2.1	Sensor de salinidade a quatro pontas.....	66
7.2.2	Sensor de salinidade indutivo.....	67
7.2.3	Sistema de monitorização.....	67
	Bibliografia .....	69

## ÍNDICE DE EQUAÇÕES

Equação 2-1 .....	14
Equação 2-2 .....	14
Equação 2-3 .....	14
Equação 2-4 .....	14
Equação 2-5 .....	14
Equação 2-6 .....	14
Equação 2-7 .....	14
Equação 2-8 .....	15
Equação 2-9 .....	15
Equação 3-1 .....	23
Equação 3-2 .....	23
Equação 3-3 .....	23
Equação 3-4 .....	23
Equação 3-5 .....	23
Equação 4-1 .....	49
Equação 4-2 .....	49

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Salinidade média de várias zonas do estuário ao longo do ano [9].	5
Figura 2.2 - InPro7250ST da Mettler Toledo [11].	6
Figura 2.3 - SE 604 (dois elétrodos) e SE 600 (quatro elétrodos) da KNICK [14] [15].	7
Figura 2.4 - Representação das resistências dos elétrodos e da solução numa medição a quatro pontas.	7
Figura 2.5 - Tipologias de sensores de condutividade e o seu alcance [13].	8
Figura 2.6 – Sensor de salinidade pro refração: Shr-10atc da SOMA [16].	8
Figura 2.7 - Medição da salinidade de uma amostra por evaporação e destilação [17].	9
Figura 2.8 - Primeiro mapa global da salinidade à superfície dos oceanos, publicado em setembro de 2011 [18].	10
Figura 2.9 - Medição da condutividade com dois elétrodos [20].	11
Figura 2.10 - Representação do efeito de polarização.	12
Figura 2.11 - Representação das linhas de campo.	13
Figura 2.12 - Analisador de mercúrio de laboratório do Instituto Hidrográfico [25].	16
Figura 2.13 - SEASAT, o primeiro satélite de monitorização dos oceanos [26].	17
Figura 2.14 - Esquema do MarinEye [27].	18
Figura 2.15 – Boia de monitorização do Instituto Hidrográfico [28].	18
Figura 2.16 - Sistemas de monitorização oceânica [4].	19
Figura 2.17 - Mapa da foz do Rio Lima, Viana do Castelo. Mapa base e dados de OpenStreetMap e Fundação OpenStreetMap [32].	20
Figura 2.18 - Representação de uma possível fronteira entre água salgada e água doce.	21
Figura 3.1 – Elétrodos de aço inoxidável do sensor de salinidade, com molde em resina epóxi [23].	22
Figura 3.2 - Sensor MS5837-30BA da TE Connectivity [33].	24
Figura 3.3 - Elétrodos do protótipo do sensor de salinidade ao fim de três meses de uso [1].	24
Figura 3.4 - Gráficos da impedância dos elétrodos (à esquerda) e da impedância da água do mar medida (à direita) ao longo de três meses.	25
Figura 3.5 - Esquema dos elétrodos, do sensor de temperatura e pressão, dos circuitos eletrónicos e do datalogger [23].	26

Figura 3.6 - Protótipo do Sistema de Monitorização Marítimo. O modulo amarelo é o sensor de condutividade e a verde o sensor de pressão e temperatura. Os módulos e a eletrónica estão isolados e protegidos por resina epóxi. ....	26
Figura 4.1 – Esquemático da configuração do microcontrolador em Altium. ....	28
Figura 4.2 - Diagrama do circuito de leitura da condutividade. Os eléctodos são representados pelos círculos cruzados cinzentos. O circuito de tensão de referência está a laranja, a conversão de tensão para corrente a vermelho e o de leitura da tensão dos eléctodos a azul.....	29
Figura 4.3 - Circuito de alimentação à esquerda e circuito de leitura do sensor à direita. ....	30
Figura 4.4 - Modelo 3D da PCB em Altium. ....	31
Figura 4.5 – Representação das ligações da bateria e do datalogger aos sensores.....	31
Figura 4.6 - Representação da resistência e capacidade do contacto dos eléctodos com a solução, neste caso água. Dentro dos retângulos está representado o equivalente eléctrico do eléctrodo, enquanto as resistências de baixo representam a resistividade da água.....	32
Figura 4.7 - Circuito de leitura do sensor de salinidade simulado no software TINA. ....	33
Figura 4.8 - Resultado da simulação do circuito de leitura, com resistência de 150 $\Omega$ entre os eléctodos. ....	33
Figura 4.9 - Resultado da simulação do circuito de leitura, com resistência de 100 k $\Omega$ entre os eléctodos. ....	34
Figura 4.10 - Diagrama do circuito de leitura da condutividade com as novas resistências de estabilização. Os eléctodos são representados pelos círculos cruzados cinzentos. As resistências novas ou alteradas aparecem assinaladas a vermelho. ....	35
Figura 4.11 - Leituras consecutivas da salinidade, período de instabilidade do sensor e respetiva estabilização. O tempo de estabilização, neste caso em específico foi de 1,48 segundos. Azul-escuro indica quando o sensor é ligado, azul-claro é a tensão de saída do amplificador de instrumentação, amarelo a tensão do DAC e roxo a tensão do eléctrodo que injeta corrente. ....	35
Figura 4.12 - Dimensões do encapsulamento. A azul está a parte preenchida com resina, onde a eletrónica é protegida. ....	36
Figura 4.13 – Fluxograma das comunicações por RS-485 para o caso de pedido do datalogger e resposta dos sensores. ....	37
Figura 4.14 - Fluxograma das comunicações por RS-485 para o caso de os sensores enviarem os dados desfasados no tempo, sem haja dois sensores a tentar comunicar ao mesmo tempo com o datalogger. ....	38

Figura 4.15 - Fluxograma do software do sensor de salinidade. ....	38
Figura 4.16 - Sensor com os componentes necessários para fazer a medição da pressão e temperatura, antes de ser envolvido pela resina epóxi. ....	39
Figura 4.17 - Sensor instalado num suporte metálico preso ao leito do rio Cávado, em Esposende. Mapa base e dados de OpenStreetMap e Fundação OpenStreetMap [32]. ....	40
Figura 4.18 - Exemplo de uma trama enviada do sensor para o datalogger. ....	40
Figura 4.19 - Gráfico da evolução da profundidade (a azul) e da temperatura (vermelho) de 19/jan a 31/jan. ....	41
Figura 4.20 - Altura da maré no dia 31 de janeiro no mar e no local de instalação do sensor (Esposende). ....	42
Figura 4.21 - Altura da maré no dia 3 de fevereiro no mar e no local de instalação do sensor (Esposende). ....	42
Figura 4.22 - Representação do teste de leitura da condutividade com resistências. É aplicada corrente elétrica pelos elétrodos exteriores e lida a tenção resultante pelos elétrodos interiores. ....	43
Figura 4.23 - Gráfico que relaciona o valor de ADC com a resistência entre os elétrodos para as diferentes escalas. ....	43
Figura 4.24 - Gráfico dos valores de ADC lidos pelo microcontrolador do sensor em função da salinidade para várias correntes diferentes. ....	44
Figura 4.25 - Gráfico da salinidade calculada pelo sensor em função da salinidade real da água. São representadas várias correntes diferentes. ....	46
Figura 4.26 - Gráfico da leitura da salinidade acompanhada pelo erro, para o caso da escala mais alta. ....	47
Figura 4.27 - Gráfico da medição da salinidade da água de teste nas quatro escalas escolhidas, desde 0,4 PSU a 47PSU. É ainda apresentado o erro ao longo do espectro de leitura, segundo a escala com menor erro. ....	48
Figura 4.28 - Leitura das escalas com o osciloscópio. A amarelo está a tensão do DAC e a azul a tensão do elétrodo que injeta corrente na água. ....	48
Figura 5.1 - Esquemático da PCB do datalogger, desenvolvido em Altium. ....	51
Figura 5.2 - Modelo 3D da PCB do datalogger, em Altium. ....	52
Figura 5.3 - Datalogger usado nos testes submersos em Esposende. Nesta fase, a eletrónica já está envolvida em resina epóxi. ....	53

Figura 5.4 – Ligações disponíveis no datalogger. Em a) a ligação à bateria, em b) o conector para ligar os sensores (energia e comunicações) e em c) o conector de programação do micro e o conector do cartão SD. ....	53
Figura 5.5 - Corrente de tubos de PPR, representada em maré baixa à esquerda. ....	54
Figura 5.6 – Ilustração da corrente de tubos de PPR submersa à esquerda. À direita, o primeiro protótipo da estrutura, com o objetivo de se usada na instalação do rio Cávado. Neste caso, o lastro é um bloco de aço com 9,5 kg e a boia tem flutuabilidade de 950 g. ....	55
Figura 5.7 - Conectores em PVC usados para isolar as ligações entre sensores e o datalogger. Foram usados conectores de 3/4 de polegada para as comunicações, alimentação e reprogramação e de 1 polegada para o cartão SD do datalogger. ....	56
Figura 5.8 - Cabo de comunicação e energia com conectores USB-B isolados por ligações de PVC à esquerda. Conector USB fêmea do datalogger para comunicação e alimentação com os sensores à direita.....	57
Figura 5.9 – Datalogger e sensor de salinidade ligados pelo cabo de energia e comunicações, com os conectores de PVC. ....	57
Figura 5.10 – O sistema do datalogger (acima) e do sensor de salinidade (abaixo) montados na estrutura. Quando instalado no rio, o peso de aço e a boia foram suficientes para manter o sistema esticado verticalmente sem se mover de lugar, mesmo com alguma corrente causada pela descida da maré. ....	58
Figura 6.1 – Sensor de salinidade com rosca de PVC que veda os cabos de reprogramação. O sensor apresenta marcas de sujidade e corrosão do período de 3 meses em que esteve a fazer leituras no rio Cávado, mas continua funcional. ....	59
Figura 6.2 - Gráfico dos dados de profundidade e temperatura da água no rio Cávado, em Esposende, entre os dias 19 de janeiro a 3 de maio de 2021. ....	59
Figura 6.3 - Sistema de monitorização depois de três dias de teste de campo. A acumulação de algas é visível principalmente no lastro e ligeiramente no datalogger. O sensor manteve-se relativamente limpo. ....	60
Figura 6.4 - Sensor de salinidade montado num tubo PPR antes de ser instalado no rio Cávado, em Esposende. O Sensor é preso ao tubo por uma manilha de aço inox pela traseira do sensor, para não perturbar a medida da salinidade.....	61
Figura 6.5 - Gráfico dos resultados do teste de campo em Esposende, entre os dias 27 de maio e 8 de junho. A azul está a pressão, a vermelho a salinidade e a verde a temperatura.....	61

Figura 6.6 - Gráfico dos resultados do teste de campo em Esposende, entre os dias 3 e 7 de junho. A azul está a pressão, a vermelho a salinidade e a verde a temperatura. As perturbações nos picos da salinidade acontecem durante a noite, geralmente entre as 21:00 e as 7:00.....	62
Figura 6.7 - Sensor de salinidade instalado em Esposende ao fim de duas semanas a adquirir dados de salinidade, temperatura e pressão. À esquerda a perspetiva de cima do sensor, onde as algas que se depositam na estrutura de suporte são visíveis. À direita a perspetiva de frente. ....	62
Figura 6.8 - Fotografia de uma onda resultante da passagem de um barco a motor no rio Douro, em Melres.....	63
Figura 6.9 - Gráfico dos dados do teste de ondulação, em que o sensor deteta a perturbação causada por um barco a passar. ....	63
Figura 6.10 - Gráfico dos dados do teste de ondulação, em que é visível a diminuição da amplitude das ondas.....	64

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Vantagens e desvantagens dos métodos de medição de salinidade. ....	11
Tabela 2 - Constantes das equações para o cálculo da salinidade.....	15
Tabela 3 - Resultados experimentais de medições do ADC com várias correntes diferentes.....	45
Tabela 4 – Resultados experimentais de medições de salinidade da água com várias correntes diferentes. A verde estão os intervalos de valores a ser medidos pelas quatro escalas escolhidas. ....	46
Tabela 5 - Erro das leituras nas escalas escolhidas. A verde estão os intervalos medidos por cada escala. ....	47
Tabela 6 - Constantes de calibração para cada escala usada no sensor.....	49

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÓNIMOS

ADC	<i>Analog to Digital Converter</i>
AmpOp	Amplificador Operacional
CTD	<i>Conductivity Temperature and Depth</i>
DAC	<i>Digital to Analog Converter</i>
LED	<i>Light Emitting Diode</i>
MOSFET	<i>Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor</i>
PCB	<i>Printed Circuit Board</i>
RTC	<i>Real Time Clock</i>
UART	<i>Universal asynchronous receiver-transmitter</i>

# 1. INTRODUÇÃO

Apesar dos esforços em automatizar a monitorização dos meios aquáticos, esta continua principalmente nas mãos dos cientistas e investigadores, que fazem todo o trabalho de aquisição de dados manualmente. Isto torna extremamente difícil e dispendiosa a investigação destes meios, pois na maior parte das vezes os fenómenos e as amostras em estudo estão em locais remotos, como o leito marítimo ou fluvial. O mergulho é obrigatório em muitos dos casos, o que leva a mais despesas, imprescindibilidade de formação e tempo de permanência no local limitado pelas garrafas de ar comprimido[1].

Para evitar toda a logística e risco relacionados com a investigação de ambientes subaquáticos, foram criados sistemas autónomos ou semiautónomos para monitorizar as variáveis em estudo, reduzindo a intervenção humana na maior parte do processo. Outra importante vantagem destes sistemas é a quantidade de dados que são gerados, uma vez que os estudos exigem não só precisão, mas também uma elevada resolução espacial e temporal.

Os sistemas de aquisição em tempo real são uma das soluções possíveis para este problema, como por exemplo as boias de monitorização. Consistem num conjunto de sensores ligados a um *datalogger* que armazena os dados em memória interna ou envia para um servidor ou computador à distância. Esses dados são posteriormente analisados e integrados em estudos que nos ajudam a compreender melhor os ambientes monitorizados. De momento, a maioria desses sistemas são de grandes dimensões, elevado consumo energético e elevados custos, o que dificulta a instalação de vários para abranger uma maior área de estudo. Assim, esta tese visa desenvolver um sistema de dimensões reduzidas, baixo consumo energético e baixo custo, permitindo uma instalação que compreende uma maior área[2]–[4].

## 1.1 Motivação

Com o aumento da população humana, a falta de recursos naturais levou a sociedade a procurar alternativas nas massas de água do nosso planeta. As atividades resultantes deste consumo e a poluição proveniente da costa provocam distúrbios nos ecossistemas dos mares e rios, podendo levar ao seu desequilíbrio e até colapso. A falta de conhecimento e dados destes ecossistemas dificultam o desenvolvimento de soluções capazes de proporcionar uma relação sustentável com estes meios [5].

Assim, um dos passos mais importantes a dar é recolher dados precisos destes sistemas, em larga escala temporal e espacial, monitorizando as variáveis mais importantes de forma contínua, ajudado a tornar o combate à decadência do nosso planeta mais informado e eficaz.

## 1.2 Objetivos

O objetivo desta dissertação é desenvolver e implementar um sistema de baixo custo, baixo consumo energético e pequenas dimensões para possibilitar a sua implementação em escala. Deverá ser capaz de adquirir dados da salinidade, temperatura e pressão da água para ajudar a determinar de que forma as marés e a corrente do rio influenciam a entrada da água do mar pela foz do Rio Lima, que pode ser encontrada a vários quilómetros a montante. O estudo cairá mais especificamente sobre a coluna de água, ou seja, a linha vertical desde o leito até à superfície, permitindo caracterizar o perfil de transição de água salgada para água doce e vice-versa. Para cumprir as especificações do estudo, os sensores terão de ser montados em coluna vertical, interconectados por cabo, viabilizando o fornecimento de energia e a comunicação com o *datalogger*. A correta posição dos sensores será garantida por uma estrutura mecânica composta por um lastro no solo marítimo/fluvial (impede que o sistema ande à deriva), um flutuador (mantém o sistema esticado desde o leito até à tona da água) e uma corrente a ligar os dois (onde os sensores são posicionados).

### 1.3 Organização da Tese

Nesta tese está documentado o trabalho realizado no âmbito de instalar uma coluna de sensores na foz do rio Lima, assim a grande o corpo principal está dividido da seguinte forma:

- Capítulo 1: Introdução
- Capítulo 2: Estado da Arte
- Capítulo 3: Trabalho Previamente Desenvolvido
- Capítulo 4: Sensor de Salinidade
- Capítulo 5: Datalogger e Sistema de Monitorização
- Capítulo 6: Resultados
- Capítulo 7: Conclusão

O Capítulos 2 aborda o estudo da tecnologia que foi usada no desenvolvimento da tese, enquanto o Capítulo 3 resume o trabalho desenvolvido previamente neste projeto. Os Capítulos 4 e 5 contêm o desenvolvimento do sensor de salinidade, do *datalogger* e do sistema de monitorização. No Capítulo 6 são exibidos resultados da aplicação do sistema em ambiente real. Finalmente o Capítulo 7 apresenta as conclusões da dissertação.

## 2. ESTADO DA ARTE

O Estado da Arte é uma visão geral de conhecimento e tecnologias relevantes para os temas da tese, abordando conceitos teóricos e equipamento já desenvolvido ou em desenvolvimento. Neste capítulo também é exposto um resumo do histórico do desenvolvimento deste projeto, já que esta dissertação é uma continuação do trabalho de outrem.

### 2.1 Técnicas de medição de Salinidade

A salinidade é a medida da concentração de sais na água ou no solo. É de extrema importância que os níveis de sais estejam dentro de determinados valores para a sobrevivência da fauna e flora. Esta grandeza pode ajudar a perceber não só a saúde dos habitats como também alguns fenômenos físicos e químicos presentes no nosso planeta [6] [7]. A aquisição dos valores de salinidade é a base deste projeto, para a determinação da coluna de água salgada na foz do rio Lima. Existem diferentes métodos para adquirir esta grandeza, como medir as propriedades elétricas, magnéticas ou óticas, ou simplesmente determinar o peso de sal dissolvido [8].

No caso de um estuário, a salinidade varia abruptamente entre a água do mar e do rio. Por isso é conveniente um sensor capaz de medir tanto a salinidade de água do mar (por volta dos 34 PSU) como do rio (que pode ser inferior a 1 PSU). A Figura 2.1 representa a salinidade média da água ao longo do estuário.

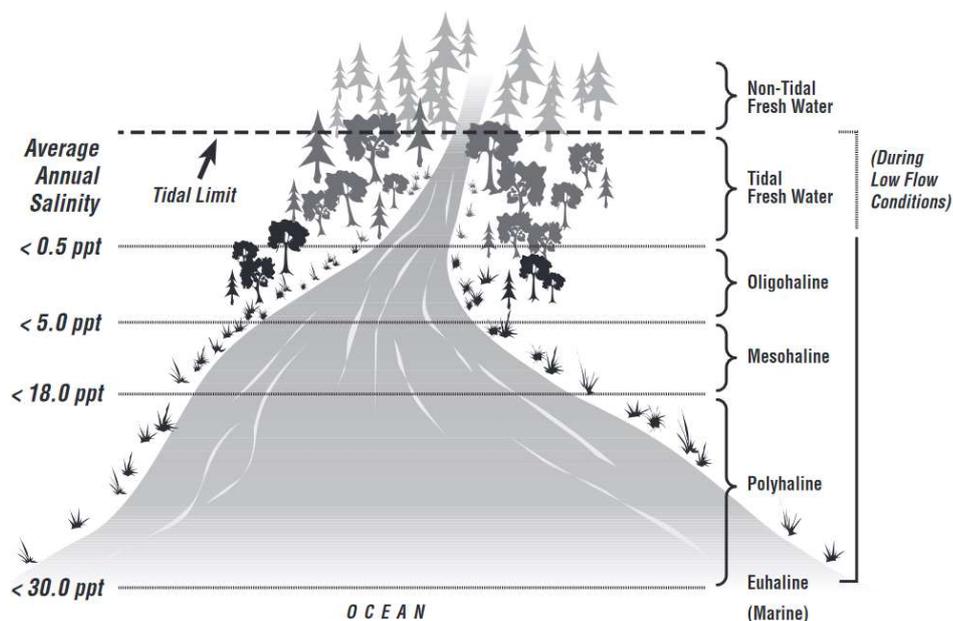


Figura 2.1 – Salinidade média de várias zonas do estuário ao longo do ano [9].

### 2.1.1 Sensor de condutividade indutivo

Baseia-se num transformador que, conforme a concentração de sal na água, deteta a sua condutividade. Como não necessita de elétrodos, este sensor tem a vantagem de estar mais protegido a perturbações e ao próprio ambiente, que muitas vezes pode ser corrosivo e propício à colonização de espécies subaquáticas, como algas. Como é obrigado a funcionar com corrente alternada, tipicamente sinusoidal, é imune a problemas de polarização, que podem interferir com as medições. Por se tratar de um transformador, a sua grande desvantagem é precisar de compensação relativamente à temperatura e à pressão, visto que o núcleo é extremamente suscetível a estes parâmetros [10]. Pode-se encontrar no mercado sensores de núcleo simples ou composto, como na Figura 2.2.



*Figura 2.2 - InPro7250ST da Mettler Toledo [11].*

### 2.1.2 Sensor de condutividade com elétrodos

O princípio básico deste sensor é medir diretamente a condutividade da água, através de elétrodos que aplicam uma corrente que atravessa o líquido e medem a tensão aos seus terminais. Quanto maior for a concentração de sal maior será a condutividade. Existem três tipologias de sensores usados, de dois, três e quatro polos [12] [13]. Na Figura 2.3 estão representados dois exemplos de sensores comercializados.

A tipologia de dois polos, a mais simples e tradicional, aplica a corrente e mede a tensão pelos mesmos terminais, o que traz o problema de se medir involuntariamente a resistência dos próprios elétrodos.

Na tentativa de melhorar a performance do sensor foi adicionado um elétrodo, fazendo assim a tipologia de três polos, que ajudava a encaminhar a corrente de forma mais otimizada, mas prevalecia o erro associado à resistência dos terminais. Esta solução é raramente usada por não ter grande vantagem em relação à tipologia anterior e apresentar maior complexidade.

Para resolver este problema foi desenvolvida a tipologia de quatro polos, que aplica a corrente nos elétrodos exteriores e mede a tensão nos interiores. Assim os elétrodos de medida são menos danificados, pois a corrente necessária à medição não é considerável. Isto aumenta o tempo de vida do sensor (devido à sua maior resistência ao envelhecimento) e diminui erros de medição [1].



Figura 2.3 - SE 604 (dois elétrodos) e SE 600 (quatro elétrodos) da KNICK [14] [15].

Outra vantagem de ter corrente quase nula nos elétrodos de medida é a sua insensibilidade à resistência entre os elétrodos e o meio, já que a tensão que se perde nessa interface é proporcional à corrente, ou seja, quase nula. Como está representado na Figura 2.4, como as correntes  $I_2$  e  $I_3$  são aproximadamente zero, não há perda de tensão nos elétrodos 2 e 3, ou seja, a tensão medida é praticamente igual à tensão da solução.

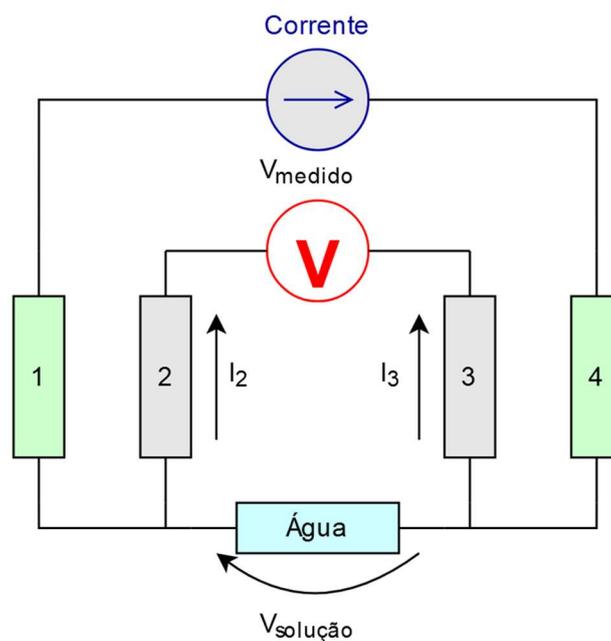


Figura 2.4 - Representação das resistências dos elétrodos e da solução numa medição a quatro pontas.

É possível aumentar a gama de medida do sensor utilizando um revestimento dos elétrodos com platina, como se pode verificar na Figura 2.5. Para resolver o problema da polarização (descrito abaixo na secção 2.2.2), pode ser usada uma corrente alternada na solução, evitando assim a acumulação de cargas elétricas nos polos.

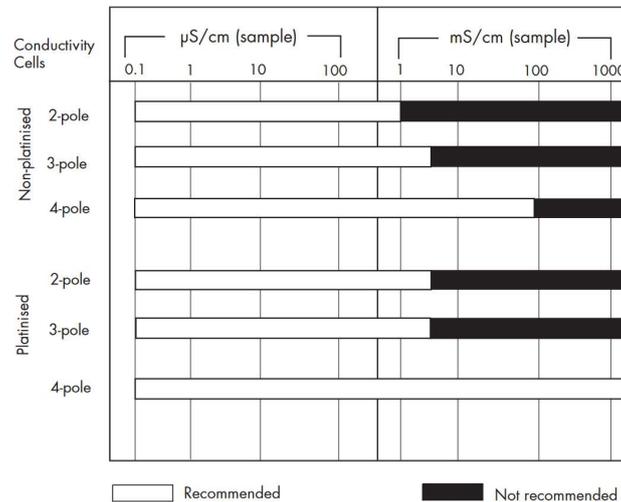


Figura 2.5 - Tipologias de sensores de condutividade e o seu alcance [13].

### 2.1.3 Sensor por refração

Este sensor usa o índice de refração para calcular a salinidade da água. Quando um raio luminoso incide no líquido, este sofre uma refração, e assim o sensor compara o ângulo de incidência com o ângulo de refração. Como é usado preferencialmente em líquidos translúcidos, à superfície, e pretende-se implementar os sensores submersos, não é uma solução relevante para esta aplicação [1]. Este método não viável a ser usado neste projeto por ter sido desenhado para ser usado apenas à superfície, o que impossibilita o seu uso para medir a coluna de água. Na Figura 2.6 é representado um exemplo deste sensor.



Figura 2.6 – Sensor de salinidade pro refração: Shr-10atc da SOMA [16].

#### 2.1.4 Medição laboratorial

Este método tradicional representado na Figura 2.7 consiste na evaporação de uma massa de água salgada conhecida e posterior comparação com a massa de sal restante no recipiente. Apesar da sua alta fiabilidade e precisão, este método tem as suas contrapartidas, visto que é recomendado que o recipiente seja apenas preenchido com a amostra, expelindo todo o ar, e deve ser processado o mais rápido possível, contando que atrasos ou a exposição a temperaturas elevadas podem comprometer a viabilidade da amostra. É um método laboratorial, não adequado para a monitorização por meios automáticos e imediatos, tais como os sensores acima referidos [8] [17].

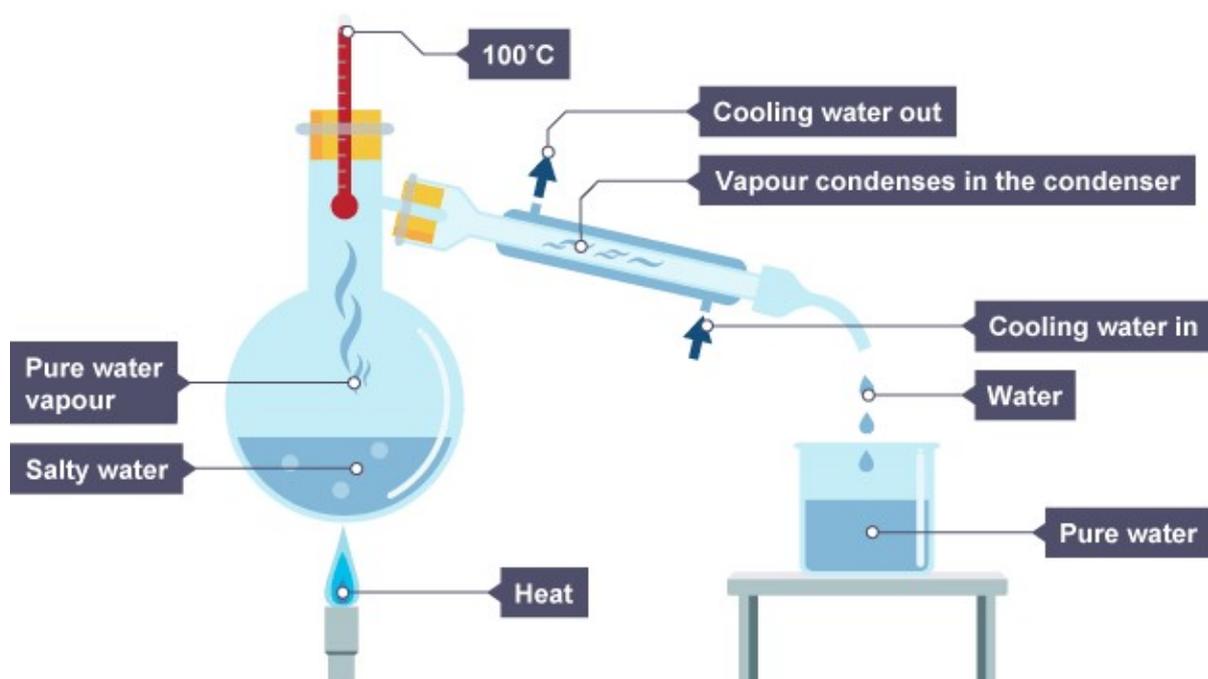


Figura 2.7 - Medição da salinidade de uma amostra por evaporação e destilação [17].

#### 2.1.5 Medição por satélite

No caso de alguns satélites como o SMOS e o Aquarius é possível medir a salinidade da superfície do oceano. Esta medição é conhecida como SSS, *Sea Surface Salinity* (Salinidade da Superfície do Mar), e tal como no caso da medição com elétrodos, a variável física medida é a condutividade. Para diferentes salinidades há uma variação na intensidade de radiação de micro-ondas, que é possível detetar com um radiómetro sensível o suficiente para as detetar. Na Figura 2.8 está representado o mapa mundial com a salinidade superficial do mar, medida por satélite. Tal como no caso da medição a elétrodos, também é feita uma correção com a temperatura, mas como só é feita a medida à superfície a pressão não varia consideravelmente e por isso pode ser desprezada [18].

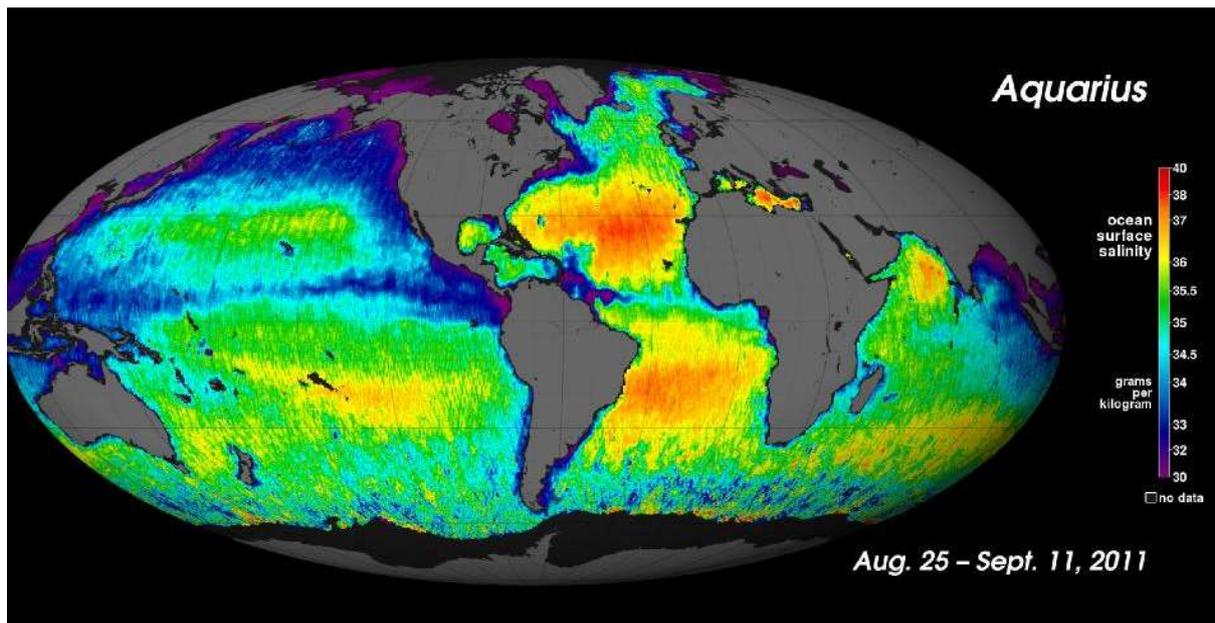


Figura 2.8 - Primeiro mapa global da salinidade à superfície dos oceanos, publicado em setembro de 2011 [18].

#### 2.1.6 Conclusão

Neste trabalho, é necessário escolher um método fiável, de baixo consumo, para efetuar medições de salinidade em ambiente marítimo a várias profundidades. Na tabela estão enumeradas vantagens e desvantagens dos métodos acima referidos. Ao ter em conta os requerimentos para este trabalho, é possível concluir que a tecnologia mais viável de ser implementada é de medir a condutividade por elétrodos, com tipologia de quatro polo.

<b>Método</b>	<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
Sensor de condutividade indutivo	Fácil de implementar; Indicado para grandes profundidades; Eletricamente isolado da água; Capaz de fazer medições autónomas.	Mais adaptado a salinidades altas; Se houver mais que um sensor instalado, pode interferir entre eles; É uma estimativa, não medição real.
Sensor de condutividade com elétrodos	Fácil de implementar; Eletricamente isolado da água; Capaz de fazer medições autónomas; Capaz de medir salinidades em toda a gama pretendida.	Contactos elétricos com a água; Se houver mais que um sensor instalado, dependendo da proximidade, podem interferir entre eles; Se estiverem ligados ao mesmo sistema, têm de ser isolado eletricamente; É uma estimativa, não medição real.
Sensor por refração	Não precisa de energia; Fácil de usar.	Operador necessário; Apenas à superfície; É uma estimativa, não medição real.

Medição laboratorial	Medição real, em que o conteúdo de sal é separado de possíveis poluentes que afetam a amostra; Preciso.	É necessário recolher a amostra para ser levado para laboratório; Não é implementável em sensores autónomos.
Medição por satélite	Leitura em grande área, a nível global; Capaz de fazer medições autónomas; Preparado para monitorização por longos períodos de tempo.	Apenas mede a salinidade superficial da água; Sistema de muito maior custo e complexidade; É uma estimativa, não medição real.

Tabela 1 - Vantagens e desvantagens dos métodos de medição de salinidade.

## 2.2 Sensor de salinidade baseado em eléttodos

O sensor de salinidade deve ser capaz de medir a salinidade de mares e rios, sendo que a salinidade do mar está tipicamente entre 30 e 40 gramas por litro e a dos rios pode variar de aproximadamente 0 gramas por litro nas zonas de água doce a 30 gramas por litro, por exemplo nos estuários [1] [19]. Optou-se pelo uso da condutividade para calcular a salinidade, utilizando eléttodos, que apesar de mais simples implementação ao nível eletrónico, requer atenção a outras variáveis que podem interferir com as medições.

### 2.2.1 Condutividade

A condutividade elétrica de um material ou solução é a sua facilidade de conduzir corrente elétrica. Esta grandeza depende da quantidade de iões e eletrões livres existentes no material/solução e da capacidade destes se moverem pelo meio condutor.

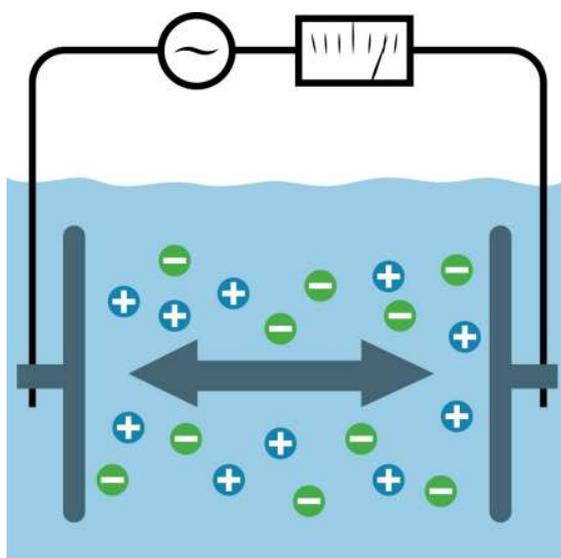


Figura 2.9 - Medição da condutividade com dois eléttodos [20].

No caso de uma solução em específico, a medição é normalmente executada usando dois elétrodos paralelos emergidos na solução, como representado na Figura 2.9. Para evitar o efeito de polarização, é aplicada uma corrente alternada conhecida e medida a tensão entre os elétrodos ou vice-versa.

### 2.2.2 Efeito de polarização

Quando uma corrente elétrica é aplicada nos elétrodos, os íons têm tendência a acumular-se nos elétrodos (como representado na Figura 2.10), criando uma capacidade parasita entre o dito eletrodo e o meio. Para evitar este efeito, é aplicada uma corrente alternada, que a cada inversão de sentido despolariza o eletrodo afetado. Outra maneira de contornar este problema é usar uma configuração a quatro elétrodos.

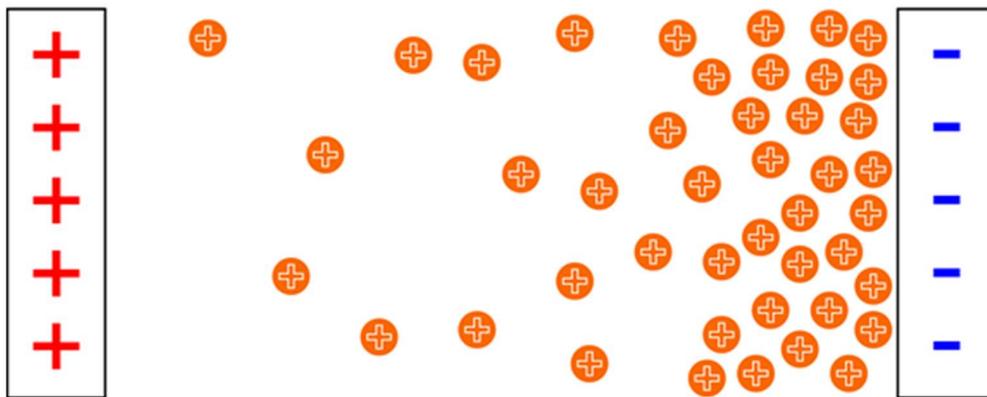


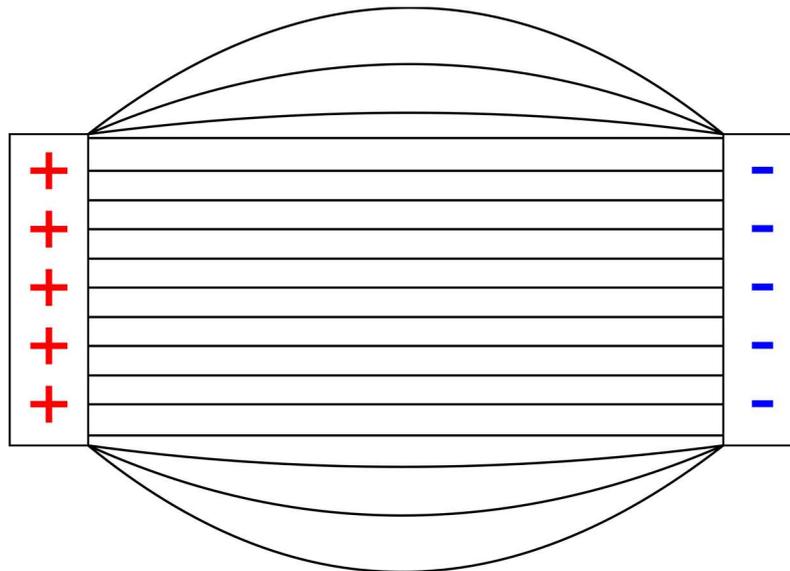
Figura 2.10 - Representação do efeito de polarização.

### 2.2.3 Frequência

Por causa do efeito de polarização anteriormente descrito, a frequência é um fator que pode interferir com a aquisição da condutividade. Por norma são usadas baixas frequências para baixas condutividades (de 100 Hz a 10 kHz), visto que a resistência de polarização é menor que a resistência da água. Entretanto, como em soluções de alta condutividade a resistência de polarização pode ter um maior efeito na medição, por isso são usadas altas frequências (de 1 kHz a 100 kHz), minimizando a impedância resultante das capacidades parasitas. Este ajuste de frequência é importante para evitar problemas de polarização. No caso de medições a quatro pontas, como o efeito de polarização é reduzido, a gama de frequências aceitáveis é mais alargada.

#### 2.2.4 Geometria

Em termos geométricos, podem ser induzidos erros relacionados com o efeito de campo elétrico, em que algumas das linhas de campo se desviam do espaço geométrico entre os dois elétrodos, como na Figura 2.11, por exemplo no caso de algum objeto ou animal que as atravesse. As configurações de 3 e 4 polos evitam este problema, medindo apenas o campo elétrico compreendido entre os elétrodos exteriores.



*Figura 2.11 - Representação das linhas de campo.*

#### 2.2.5 Temperatura e Pressão

A salinidade é obtida com a medição da condutividade. No entanto, a temperatura é das variáveis que mais afeta o valor de condutividade, para a mesma salinidade. Quanto maior a temperatura, menor a viscosidade da água, conseqüentemente tornado a movimentação dos iões mais fácil e a condutividade maior. Apesar de não alterar tanto como a temperatura, a pressão também tem de ser considerada, já o sensor deve ser capaz de medir a várias profundidades, pelo que o aumento da pressão aumenta levemente a condutividade da amostra [21]. Estes erros são tidos em conta e corrigidos nas fórmulas matemáticas do cálculo da salinidade, que considera a temperatura e pressão do meio onde é medida a condutividade.

Num sistema de monitorização, esta variáveis também são importantes por elas mesmas, para aferir condições do mar, como a temperatura, a ondulação e a amplitude da maré, sendo que um sensor de salinidade é frequentemente designado de CTD, iniciais de *Conductivity, Temperature e Depth* (Condutividade, Temperatura e Profundidade).

## 2.2.6 Cálculo da Salinidade

O cálculo da salinidade é efetuado através da condutividade e é realizada a correção tendo em conta vários fatores, como a pressão e a temperatura. Em 1978 foi desenvolvida a *Practical Salinity Scale* (PSS-78), em que é usada a equação termodinâmica para estimar a Salinidade Prática, medida em *Practical Salinity Units* ( $S_p$  - PSU), através da condutividade com correção de temperatura e pressão. Em 2010 foi adotado o TEOS-10, em que é introduzida a Salinidade Absoluta ( $S_A$  - g/kg) como sendo a verdadeira medida de salinidade, substituindo a PSS-78. No entanto a salinidade continua a ser medida usando a equação da PSS-78 por instrumentos de medida da salinidade, por ser boa aproximação ao standard do TEOS-10 [22], e pelo método ser passível de ser implementado em instrumentos eletrônicos, contrariamente ao TEOS-10.

Sabendo que a condutância ( $G$ ), em Siemens (S), é o inverso da resistência e que a resistência obtém-se dividindo a tensão pela corrente.

$$G = \frac{1}{R} \quad \text{Equação 2-1}$$

$$R = \frac{V}{I} \quad \text{Equação 2-2}$$

A condutância por sua vez, não depende só da condutividade ( $\sigma$ ), mas também da distância entre os elétrodos ( $d$ ) e da área de secção equivalente ( $A$ ). O quociente da área pela distância pode ser representado por  $K_c$ .

$$K_c = \frac{d}{A} \quad \text{Equação 2-3}$$

$$\sigma = K_c G \quad \text{Equação 2-4}$$

Por fim, de forma a corrigir o erro relacionado com a temperatura e a pressão, são usadas as seguintes formulas matemáticas, em que  $S_p$  é a salinidade medida (PSU),  $T$  a temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $p$  a pressão (dbar),  $r_t$  e  $r_p$  os coeficientes de correção de temperatura e pressão,  $R_S(T)$  a condutividade medida à temperatura  $T$  e  $R_{KCl}(15)$  a constante da condutividade da água do mar de Copenhaga [23] [24]. Os coeficientes e constantes são apresentados na Tabela 2.

$$S_p = \sum_{j=0}^5 a_j R_T^{j/2} + \frac{T - 15}{1 + k(T - 15)} \sum_{j=0}^5 b_j R_T^{j/2} \quad \text{Equação 2-5}$$

$$R_T = \frac{R}{r_t r_p} \quad \text{Equação 2-6}$$

$$R = \frac{R_S(T)}{R_{KCl}(15)} \quad \text{Equação 2-7}$$

$$r_t = \sum_{j=0}^4 c_j T^j \quad \text{Equação 2-8}$$

$$r_p = 1 + \frac{e_1 p + e_2 p^2 + e_3 p^3}{1 + d_1 T + d_2 T^2 + (d_3 + d_4 T) R} \quad \text{Equação 2-9}$$

<b>a0</b>	0,0080	<b>a1</b>	-0,1692	<b>a2</b>	25,3851
<b>a3</b>	14,0941	<b>a4</b>	-7,0261	<b>a5</b>	2,7081
<b>b0</b>	0,0005	<b>b1</b>	-0,0056	<b>b2</b>	-0,0066
<b>b3</b>	-0,0375	<b>b4</b>	0,0636	<b>b5</b>	0,0144
<b>c0</b>	0,6766097	<b>c1</b>	2,00564 x10 <sup>-2</sup>	<b>c2</b>	1,104259 x10 <sup>-4</sup>
<b>c3</b>	-6,9698 x10 <sup>-7</sup>	<b>c4</b>	1,0031 x10 <sup>-9</sup>	<b>d1</b>	3,426 x10 <sup>-2</sup>
<b>d2</b>	4,464 x10 <sup>-4</sup>	<b>d3</b>	4,215 x10 <sup>-1</sup>	<b>d4</b>	-3,107 x10 <sup>-3</sup>
<b>e1</b>	2,070 x10 <sup>-4</sup>	<b>e2</b>	-6,370 x10 <sup>-8</sup>	<b>e3</b>	3,989 x10 <sup>-12</sup>
<b>R<sub>KCl(15)</sub></b>	42,914	<b>k</b>	0,0162		

Tabela 2 - Constantes das equações para o cálculo da salinidade.

$S_p$  tipicamente apresenta um erro não superior a 0.47% numa gama de medição de 2 PSU a 42 PSU [22].

Exemplificando, uma medição segue o seguinte algoritmo:

-É aplicada a corrente alternada ao meio condutor (neste caso  $I=201 \mu A$ ) e adquirido um valor analógico de ADC, que é convertido em tensão de forma a calcular a condutividade (Equação 2-1 a Equação 2-4);

$$ADC = 1731$$

$$V_{medido} = \frac{ADC}{4096} * 3,3 = 1,395 V$$

$$G = \frac{V_{medido}}{I} = 0,133393267 S$$

$$K_c = 0,306994 \text{ (constante geométrica do sensor Equação 2-3)}$$

$$\sigma = K_c * G = 40,95 mS/cm$$

-É medida a temperatura e a pressão;

$$T = 15,05 \text{ } ^\circ C$$

$$P = 1020 \text{ mbar}$$

-Aplica-se a constante da condutividade da água do mar de Copenhaga  $R_{KCl(15)}$  (Equação 2-7);

$$R = \frac{\sigma}{R_{KCl(15)}} = 0,9542$$

-Calcula-se os fatores de correção a partir da temperatura e da pressão (Equação 2-8 e Equação 2-9);

$$r_t = 1,001145816$$

$$r_p = 1,008839071$$

-Os fatores de correção são aplicados (Equação 2-6);

$$R_T = \frac{R}{r_t r_p} = 0,9448$$

-A salinidade é finalmente calculada (Equação 2-5).

$$S_p = 32,85 \text{ PSU}$$

## 2.3 Sistemas de monitorização marítima

A monitorização de variáveis marítimas é o objetivo principal do sensor e do sistema a desenvolver nesta dissertação. Neste subcapítulo, vão ser abordadas diferentes abordagens à monitorização.

### 2.3.1 Medição Laboratorial

Esta ainda continua a ser uma prática amplamente usada na monitorização dos mares. Mas a sua logística é complexa, como consequência de ser necessário alguém levantar a amostra e transportá-la até ao laboratório, ou ainda deslocar o laboratório até ao local da recolha. Apesar das desvantagens, o uso de equipamento como o da Figura 2.12 continua a ser amplamente usado pela pequena incerteza associada [1].

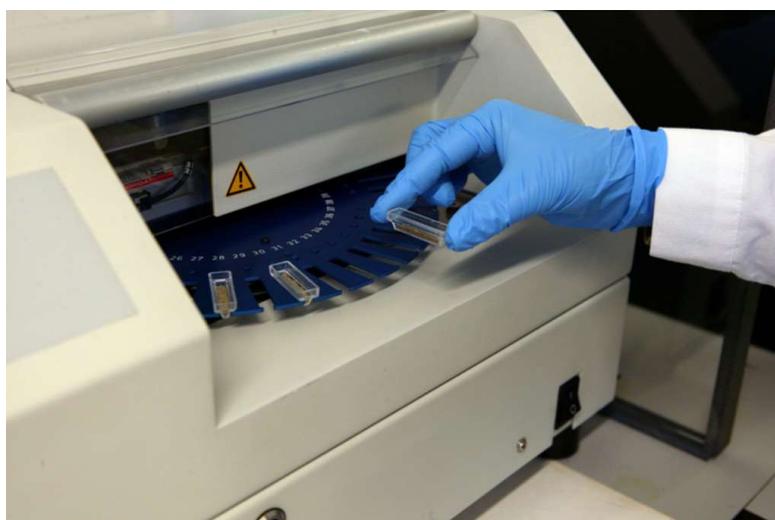


Figura 2.12 - Analisador de mercúrio de laboratório do Instituto Hidrográfico [25].

### 2.3.2 Monitorização remota

Este método começou a despertar interesse na comunidade científica com o uso de imagem tiradas por aeronaves e satélites, que permitia fazer um varrimento muito mais acelerado das regiões de estudo. No final dos anos 70, a NASA e a JPL lançaram para a órbita da Terra o primeiro satélite dedicado à monitorização dos oceanos, o SEASAT, representado na Figura 2.13. Teve como principal objetivo validar o uso de satélites para a deteção de fenómenos e características oceanográficas e provou ser um recurso poderoso na busca do conhecimento nesta área. Desde então foram lançados mais satélites com ainda mais recursos e mais desenvolvidos que o seu precursor, no entanto encontraram algumas limitações, tais como ser dedicado à pesquisa da superfície marítima e os elevados custos associados à montagem, lançamento, operação e recolha no fim de vida [1] [26]. A precisão da medição também é afetada por vários fatores ambientais.



*Figura 2.13 - SEASAT, o primeiro satélite de monitorização dos oceanos [26].*

### 2.3.3 Sistemas de aquisição de dados em tempo real

Uma das medidas mais inovadoras, e objetivo principal desta tese, são os sistemas de aquisição em tempo real, que consistem num conjunto de sensores ligados a um *datalogger* que armazena em memória interna ou envia os dados para um servidor ou computador à distância. Nos últimos anos tem se verificado uma evolução cada vez maior destes sistemas, sendo que os seus principais objetivos são a autonomia e a facilidade de aquisição de dados [4] [25].

A nível nacional, são exemplos a nível de investigação, sistemas como o MarinEye, na Figura 2.14, desenhado para recolher dados em quatro módulos tecnológicos: sensores físico-químicos, análise de ADN e RDN, imagem de alta resolução e acústica e a rede de boias do Instituto Hidrográfico da Figura 2.15, que monitoriza zonas pelo território nacional [27] [28].

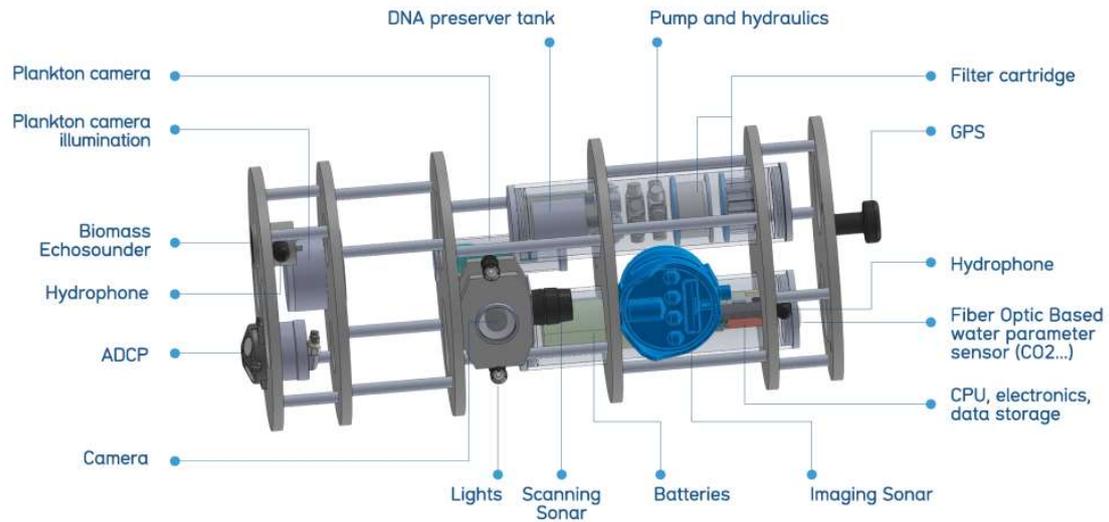


Figura 2.14 - Esquema do MarinEye [27].



Figura 2.15 – Boia de monitorização do Instituto Hidrográfico [28].

Há também empresas dedicadas a este tipo de tecnologias, tais como a OSIL e a Nortek, que fornece soluções de monitorização ambiental, tanto na costa como em alto-mar. Estas soluções são interessantes para monitorização em alto mar, mas em águas menos profundas, como na foz de um rio, podem não ser as mais adequadas, principalmente pelas suas dimensões e custo [2].

## 2.4 Sistemas de Atracção

A necessidade de monitorizar parâmetros das colunas de água e da superfície em diversos ambientes aquáticos proporcionou um grande desenvolvimento de sistemas de atracção. Estes sistemas têm, por norma, três componentes base: um lastro, um cabo ou corrente e um flutuador. Existem várias configurações possíveis, sendo que, no caso de instalações de sistemas de monitorização, a maior parte delas são feitas por empresas especializadas, com orçamentos bem avultados. Isto deve-se às condições a que os sistemas estão sujeitos, tal como águas muito profundas (na ordem das centenas de metros), comunicações sem fios (tipicamente acústicas) ou potências elevadas [29]–[31], como exemplificado na Figura 2.16.

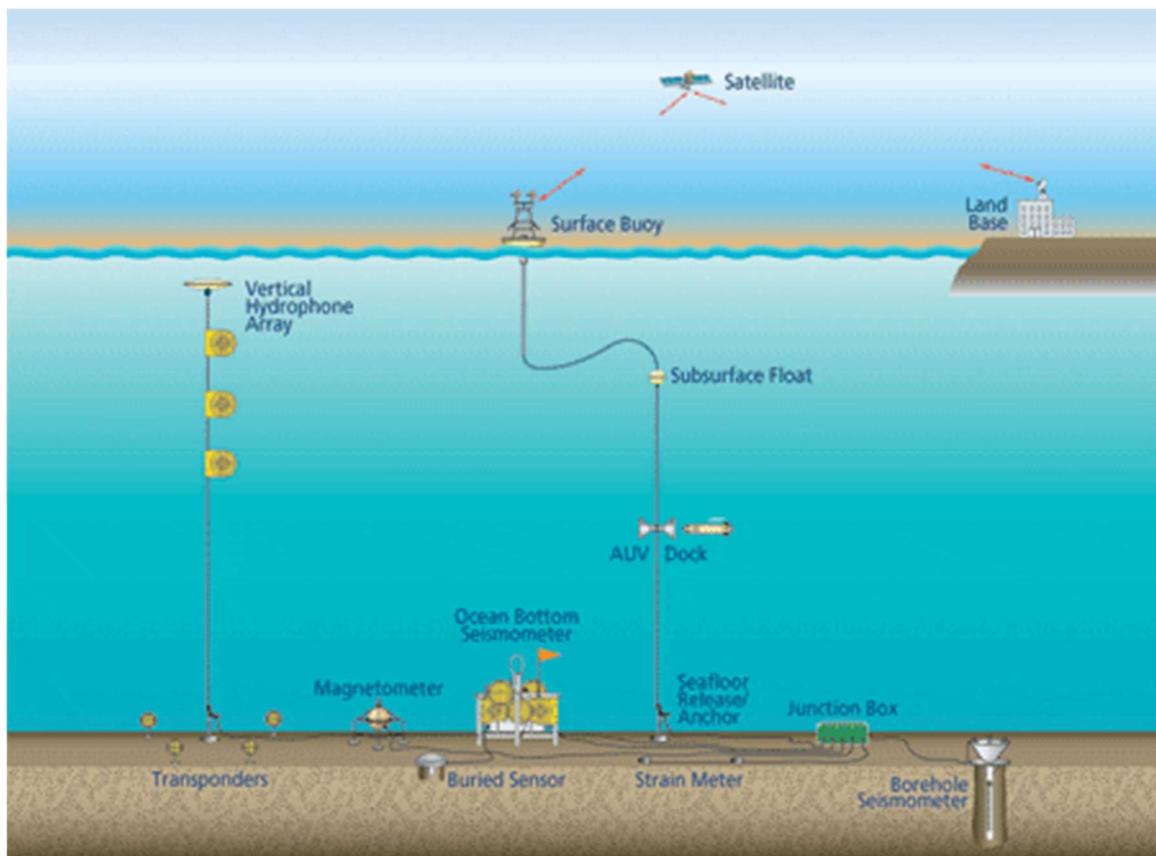


Figura 2.16 - Sistemas de monitorização oceânica [4].

Todas estas características são inadequadas para o sistema a ser desenvolvido, que será usado em profundidades baixas (no máximo doze metros), baixo consumo e baixo custo. Quanto a sistemas similares, é difícil encontrar referências, visto que se trata de soluções customizadas, normalmente não documentadas pela sua singularidade e invulgaridade. Para além disso, na sua maioria, são usados sensores de custo, dimensões e consumo energético elevado.

## 2.5 Abordagem desta dissertação

Nesta dissertação o objetivo é a implementação de uma rede de sensores de salinidade, com base no sensor já desenvolvido previamente (descrito abaixo no Capítulo 3), para monitorização da foz do rio Lima (mapa na Figura 2.17).



Figura 2.17 - Mapa da foz do Rio Lima, Viana do Castelo. Mapa base e dados de OpenStreetMap e Fundação OpenStreetMap [32].

Mais especificamente, as variáveis físicas de interesse a medir são a salinidade, a temperatura e a pressão da coluna de água, de modo a ser possível identificar as flutuações de salinidade na foz, bem como de que maneira a frente de água salgada e doce se desloca no estuário (Figura 2.18).

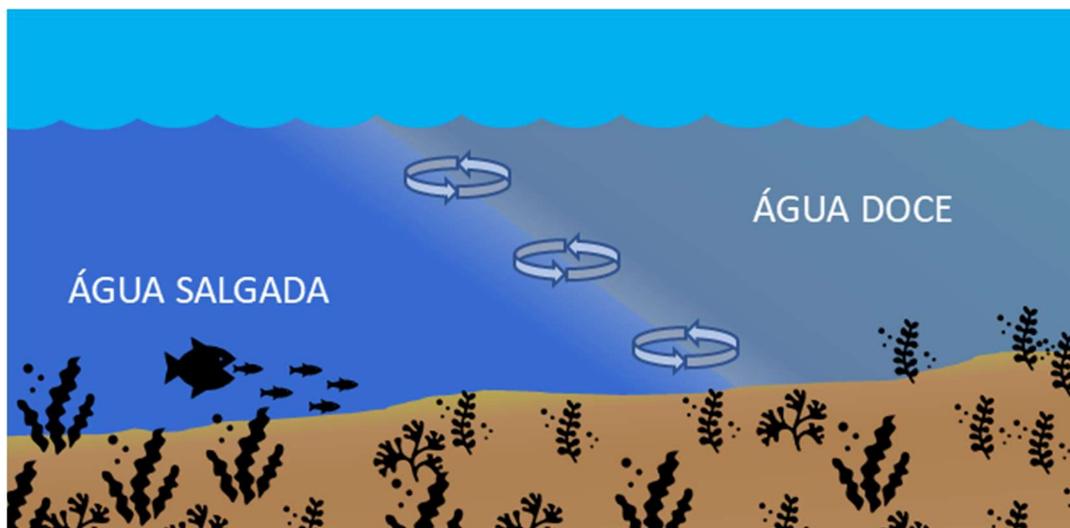


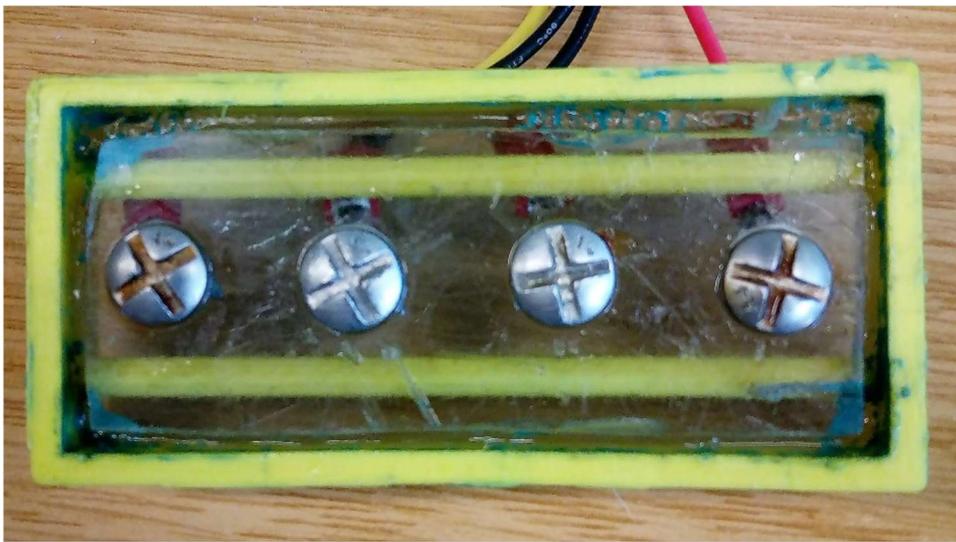
Figura 2.18 - Representação de uma possível fronteira entre água salgada e água doce.

Para adaptar este sistema ao caso do estudo de estuários, foi necessário fazer alterações ao sensor previamente desenhado. Pretende-se um sistema de monitorização de baixo custo e consumo reduzido, fácil de instalar e de recolher dados. Ao usar apenas uma bateria para cada sistema de monitorização (que é composto por um *datalogger* e vários sensores), o custo por sensor é reduzido e torna o carregamento do sistema mais simples. No entanto, por partilhar uma única bateria por vários sensores diferentes, perde-se autonomia do sistema e, caso haja um problema com a bateria, todo o sistema deixa de funcionar. Inicialmente o sistema será instalado apenas durante um dia, durante uma maré representativa, mas eventualmente deverá ter autonomia suficiente para no mínimo um mês. É tido em conta que a autonomia é menor para um maior número de sensores por sistema, podendo ser necessário usar baterias com maior capacidade para cumprir este requisito. O sensor de salinidade vai ser desenvolvido com a tipologia a quatro pontas, que já se mostrou uma mais-valia ao contornar problemas de geometria, frequência e do envelhecimento dos elétrodos. O microcontrolador deve ser capaz de criar o sinal de controlo da corrente dos elétrodos exteriores à frequência de 1 kHz, fazer a aquisição do ADC à mesma frequência, comunicar com o *datalogger* por porta série/RS-485 e entrar em modo sleep entre cada medição.

No final, o sistema completo (sensores de salinidade, *datalogger* e estrutura mecânica) devem ser fáceis de instalar no local e fáceis de recolher. O lastro será um peso de betão ou ferro (ou uma combinação dos dois), mantendo o sistema no sítio de teste, sem ter de se mergulhar para o instalar. A recolha fica assim também facilitada por só ser necessário puxar o sistema para fora de água. O *datalogger* terá um compartimento estanque onde serão deixados expostos os terminais de carregamento da bateria e o cartão SD, para a recolha dos dados.

### 3. TRABALHO PREVIAMENTE DESENVOLVIDO

Neste capítulo vai ser resumido o ponto de partida deste trabalho, explicando o trabalho realizado por investigadores anteriores neste projeto. O sensor de salinidade da Figura 3.1 já começou o seu desenvolvimento numa tese anterior, assim pretende-se fazer melhoramentos a nível de design, alimentação, consumo e assim como efetuar uma implementação em rede para efetuar medições ao longo da coluna de água a várias profundidades. A matéria exposta neste subcapítulo está pormenorizadamente publicada em [1] [23].



*Figura 3.1 – Eléttodos de aço inoxidável do sensor de salinidade, com molde em resina epóxi [23].*

#### 3.1 Sensor de Salinidade

O sensor de salinidade já desenvolvido tem as seguintes características:

- Gama de medição de 2-47 g/L;
- Custo reduzido e consumo energético de 5mW;
- Dados de pressão e temperatura.

Apesar de já serem adquiridos os valores da pressão, estes não eram usados no cálculo da salinidade. A princípio o sensor só seria usado perto da superfície, onde a pressão é muito aproximada à pressão atmosférica, e não afetaria consideravelmente a condutividade.

Inicialmente é aplicada uma corrente conhecida ( $I_{eletrodos}$ ), obtendo uma tensão entre os eléctrodos ( $V_{eletrodos}$ ) para calcular a resistência ( $R_{eletrodos}$ )/condutância ( $G$ ).

$$G = \frac{1}{R_{\text{eletrodos}}} = \frac{I}{V} \quad \text{Equação 3-1}$$

A condutividade à temperatura  $T$  ( $\sigma_t$ ) é calculada através da condutância e da geometria, em que  $d$  é a distância entre os eletrodos e  $A$  é a área secção equivalente.

$$\sigma = G * \frac{A}{d} \quad \text{Equação 3-2}$$

Por fim a salinidade era calculada pela seguinte expressão:

$$\begin{aligned} \text{Salinidade} \left( \frac{g}{L} \right) \\ = -0.08996 + 28.2929729R + 12.80832R^2 \\ - 10.67869R^3 + 5.98624R^4 - 1.32311R^5 \end{aligned} \quad \text{Equação 3-3}$$

Em que  $R$  é calculado na pela Equação 3-4 com a temperatura  $T$ :

$$\begin{aligned} R = R_t + 10^{-5}R_t(R_t - 1)(T - 15)(96.7 - 72.0R_t \\ + 37.3R_t^2 - (0.63 + 0.21R_t^2)(T - 15)) \end{aligned} \quad \text{Equação 3-4}$$

$$R_t = \sigma / K \quad \text{Equação 3-5}$$

Em que  $K = 42.914$  mS/cm é a constante da condutividade da água do mar de Copenhaga.

Entretanto foi considerado e testado o cálculo da Salinidade Prática usando a equação PSS-78, descrita em 2.2.6, sem o fator de correção da pressão. Os resultados foram os desejados, pelo que foi possível distinguir a salinidade numa gama de 10 g/L a 47 g/L com um erro inferior a 0.5% [23]. Abaixo de 10g/L não se verificou a precisão indicada no trabalho anterior.

## 3.2 Hardware

Para fazer o acondicionamento do sinal para o ADC (*Analog to Digital Converter*) do microcontrolador, foi usado um amplificador de instrumentação com um ganho de 1000 (INA327) e para a excitação dos eletrodos foram usados amplificadores operacionais montados como circuito fornecedor de corrente (AD8657), controlado pelo microcontrolador usando um DAC (*Digital to Analog Converter*). Ambos os componentes são adequados a aplicações de baixo consumo com alimentação por baterias. O microcontrolador usado foi o STM32L496ZG, que faz parte de uma linha de baixa potencia da STMicroelectronics e foi escolhido principalmente pelo seu baixo consumo e por satisfazer as necessidades do desenvolvimento do sensor.

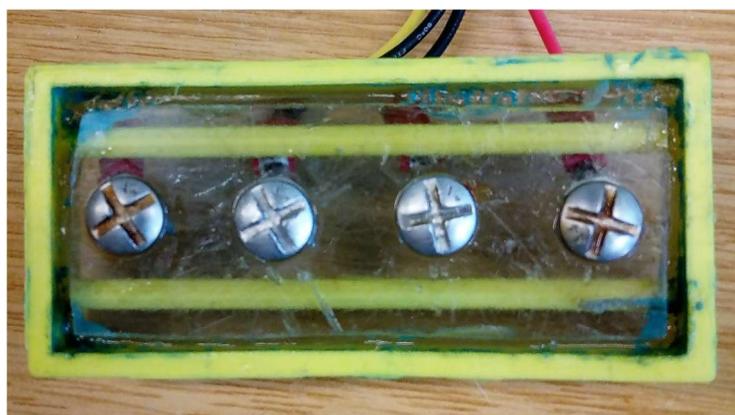
Foi integrado um sensor de temperatura e pressão MS5837-30BA (Figura 3.2), que é capaz de medir a temperatura numa gama entre  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  e  $85\text{ }^{\circ}\text{C}$  com resolução de  $0,0022\text{ }^{\circ}\text{C}$  e pressão numa gama até 30 bar com resolução de 0,2 mbar. O sensor comunica com o microcontrolador com o protocolo I2C, tem um tempo de leitura inferior a 0,5 ms e um consumo (em modo sleep) de  $0,6\text{ }\mu\text{A}$ . Com a precisão do sensor de pressão é possível distinguir as marés e até a ondulação marítima, já que há uma relação direta entre a profundidade da água e a pressão ( $1\text{ mbar} = 1\text{ cm}$ ).



*Figura 3.2 - Sensor MS5837-30BA da TE Connectivity [33].*

### **3.3 Eléttodos**

Os eléctrodos usados são parafusos de aço inoxidável, como os da Figura 3.3, uma solução muito mais acessível economicamente do que materiais como a platina ou o titânio. Ao fazer as medições a quatro pontas a qualidade inferior dos eléctrodos é contornada, reduzindo custo final do sensor sem comprometer o seu funcionamento. Este material foi testado (em condições mais exigentes que o normal esperado) e, apesar de ao fim de quatro meses ser possível notar algum desgaste nos eléctrodos exteriores, as medições da salinidade da solução continuaram consistentes, conforme apresentado na Figura 3.4 e em [1].



*Figura 3.3 - Eléttodos do protótipo do sensor de salinidade ao fim de três meses de uso [1].*

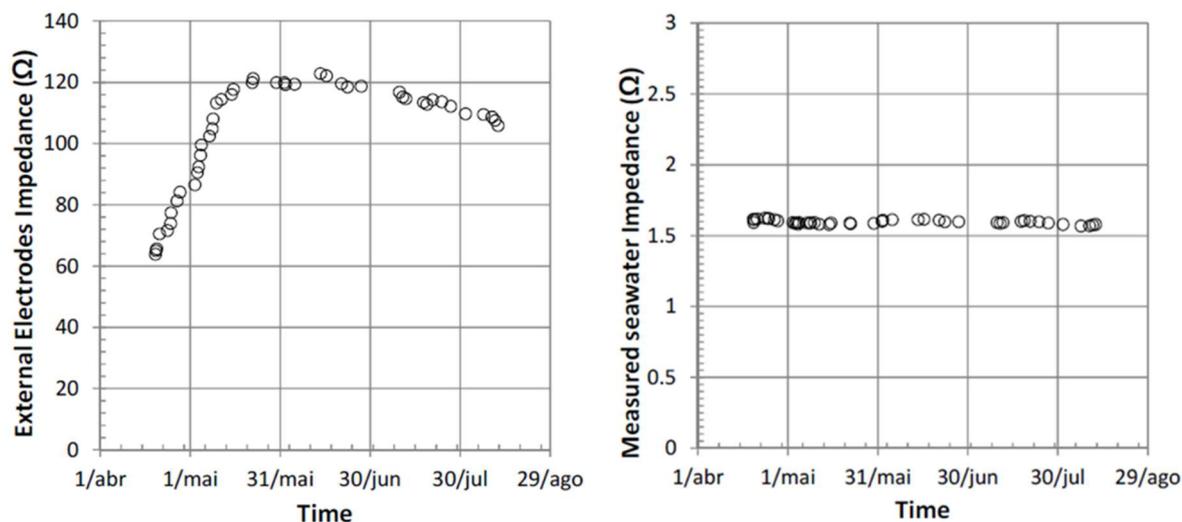


Figura 3.4 - Gráficos da impedância dos elétrodos (à esquerda) e da impedância da água do mar medida (à direita) ao longo de três meses.

### 3.4 Sistema de Monitorização Marítimo

O sistema de monitorização marítimo foi concebido para possibilitar a medição de variáveis marítimas, incorporando o sensor desenvolvido. Este é fisicamente composto por 3 módulos: o circuito eletrónico, que inclui o microcontrolador, alimentação, acondicionamento de sinal, memórias e interfaces; os sensores de pressão e temperatura, implementados com o componente MS5837-30BA; e os elétrodos de salinidade.

O microcontrolador é responsável por comunicar com os sensores, recolher os dados das variáveis e armazená-los na memória externa. Os sensores fazem leituras das variáveis a comando do microcontrolador, para onde depois transferem os dados por protocolos de comunicação como o I2C. A memória apenas guarda os dados até que estes sejam recolhidos. Foram incluídos LEDs para permitir uma interface simples com o utilizador, dando informação de condições do equipamento, como o ocorrer de um erro ou falta de bateria.

O sistema de aquisição da condutividade é por sua vez constituído pelos elétrodos e pelo sensor de temperatura e pressão, que fazem o contacto com a água para aquisição das variáveis; a eletrónica de instrumentação, nomeadamente o circuito de conversão de tensão para corrente, o amplificador de instrumentação e a referência de tensão; e o microcontrolador, responsável pelos ADC's, pelo DAC e por comunicar com o *datalogger* a fim de transmitir os dados. A Figura 3.5 apresenta a totalidade do sistema previamente desenvolvido.

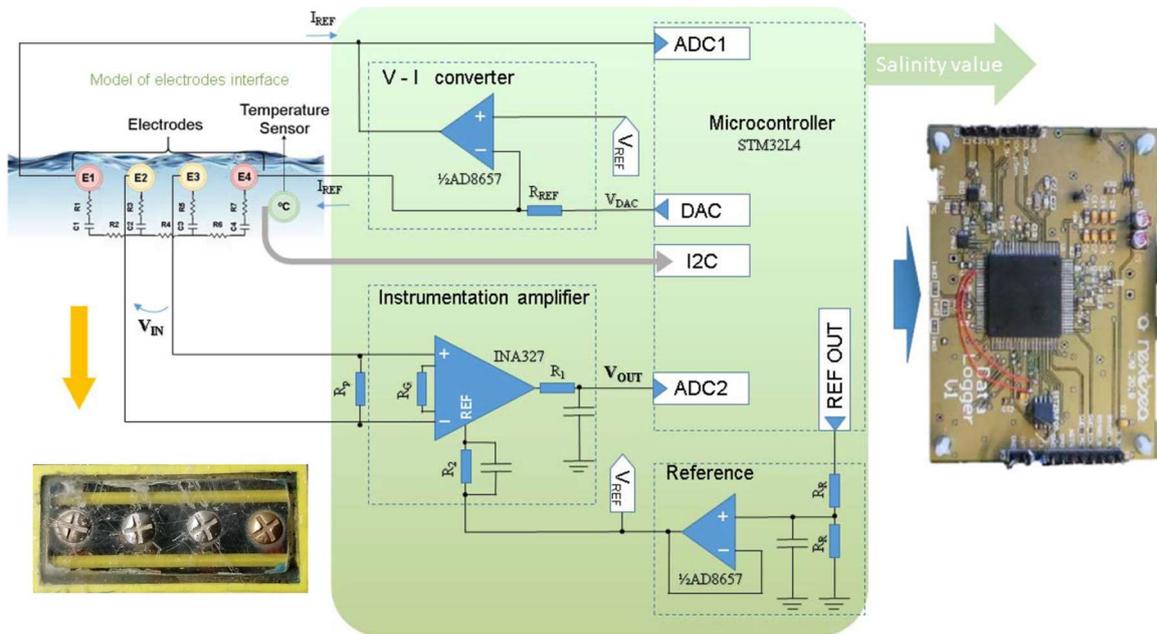


Figura 3.5 - Esquema dos elétrodos, do sensor de temperatura e pressão, dos circuitos eletrônicos e do datalogger [23].

Depois de ser testado em laboratório, o consumo de energia foi medido, pelo que em modo de espera o sensor consome 1,2 mA e durante a leitura 12 mA. O tempo de mínimo de leitura de todas as variáveis é de 42 ms, e com um período de amostragem de 5 minutos, usando uma bateria de 2400 mAh, o sensor funciona até 80 dias antes de ficar sem energia. O sistema da Figura 3.6 mostrou-se capaz de medir as variáveis pretendidas com baixo consumo energético e ainda com possibilidade de reduzir mais o consumo e as dimensões.



Figura 3.6 - Protótipo do Sistema de Monitorização Marítimo. O módulo amarelo é o sensor de condutividade e a verde o sensor de pressão e temperatura. Os módulos e a eletrônica estão isolados e protegidos por resina epóxi.

### 3.5 Resumo e melhorias

Antes de integrar o sensor no sistema de monitorização do estuário, foi necessário fazer-lhe melhorias e adaptações para servir esse mesmo propósito. O sensor deixou espaço para reduzir o consumo de energia e o tamanho, e foram feitas alterações nas gamas de medição e na aplicação de corrente elétrica nos elétrodos.

O consumo de aproximadamente 12 mA durante a leitura e de 1,2 mA em modo sleep (no artigo [1]) deve-se principalmente aos seguintes periféricos: a memória flash externa, o regulador de tensão e a eletrónica do sensor de condutividade. A memória *flash* (SST25VF080B), responsável por grande parte do consumo durante a leitura, deixa de ser necessária já que o sensor vai ser instalado numa rede em que o *datalogger* é responsável pela gestão de memória. O microcontrolador é munido de uma memória de baixo consumo, para o caso de ser conveniente armazenar dados no próprio sensor. O regulador de tensão tem um consumo em vazio elevado, na ordem dos 400  $\mu$ A, que é agora substituído por outro regulador com consumo em vazio de 60 nA. Para evitar gastos de energia durante o modo *sleep*, e tendo em conta que o regulador tem um consumo tão baixo, é usado mais um regulador que alimenta a eletrónica do sensor de salinidade, ligando-o apenas durante as leituras e reduzindo o consumo em modo *sleep*. Ao usar uma única bateria para todo o sistema de monitorização (composto pelos vários sensores e *datalogger*) o sensor diminui de tamanho e facilita o recarregamento do sistema. O microcontrolador STM32L496ZG foi substituído por uma versão mais adequada, a STM32L082KZT6, desenhada para projetos de baixo consumo, visto que a anteriormente usada tinha mais recursos que os necessários e consumia mais energia.

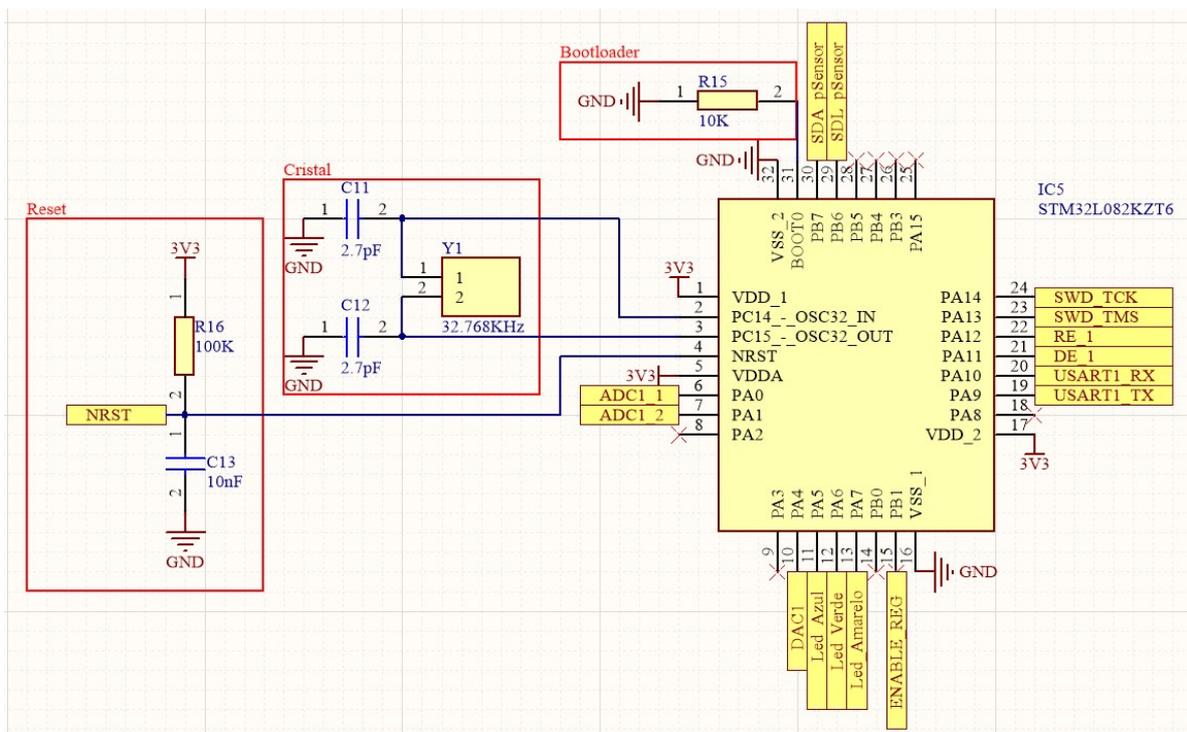
O design estava ainda numa fase inicial, pelo que desenhando uma PCB nova com os elétrodos montados na mesma, é possível reduzir o tamanho do sensor para pelo menos metade. Para além disso é tida em conta uma forma fácil e segura de montar os sensores na estrutura mecânica. As gamas de medição foram ajustadas para o novo design, visto que estas dependem da geometria do sensor, e a gama de correntes aplicada aos elétrodos também sofreu alterações, permitindo haver um ajuste mais fino da corrente de medição da salinidade.

## 4. SENSOR DE SALINIDADE

Como referido anteriormente, foram feitas alterações ao sensor de salinidade de maneira a reduzir o consumo, o tamanho, e adaptá-lo aos objetivos da tese. Neste capítulo vão ser expostas as alterações a nível do microcontrolador, da PCB (*Printed Circuit Board*), do encapsulamento e do software.

### 4.1 Microcontrolador

Para reduzir o consumo, as dimensões e o custo de fabrico, o microcontrolador stm32L496ZG foi substituído pelo stm32L082KZT6, com um tamanho muito menor, de uma família de microcontroladores de baixo consumo, com menos pinos (de 144 para 32 pinos) e velocidade de processamento adequadas à aplicação do sensor. O microcontrolador é responsável por adquirir variáveis de condutividade, temperatura e pressão, converter para salinidade e profundidade e transmitir os dados para um *datalogger*, onde são armazenados. A configuração do microcontrolador na PCB está representada na Figura 4.1.



## 4.2 Circuito eletrônico de leitura da condutividade

O circuito de leitura da condutividade, representado na Figura 4.2, é composto por três módulos: o circuito de tensão de referência (laranja), de conversão de tensão para corrente (vermelho) e o de leitura da tensão dos elétrodos (azul). Foram feitas algumas alterações, principalmente ajustes de resistências e na tensão de referência. As resistências de acoplamento do amplificador de instrumentação foram adicionadas de acordo com o *datasheet* do componente. Foi adicionada uma resistência de acoplamento ao circuito de conversão de tensão para corrente e a resistência que determina a corrente foi aumentada, dando origem a um ajuste mais fino da corrente por parte do DAC1. O circuito que gera a tensão de referência é agora controlado pelo DAC2, tornando possível o ajuste da tensão de referência. O esquema do circuito representado na Figura 4.2 está explicado mais detalhadamente em [1].

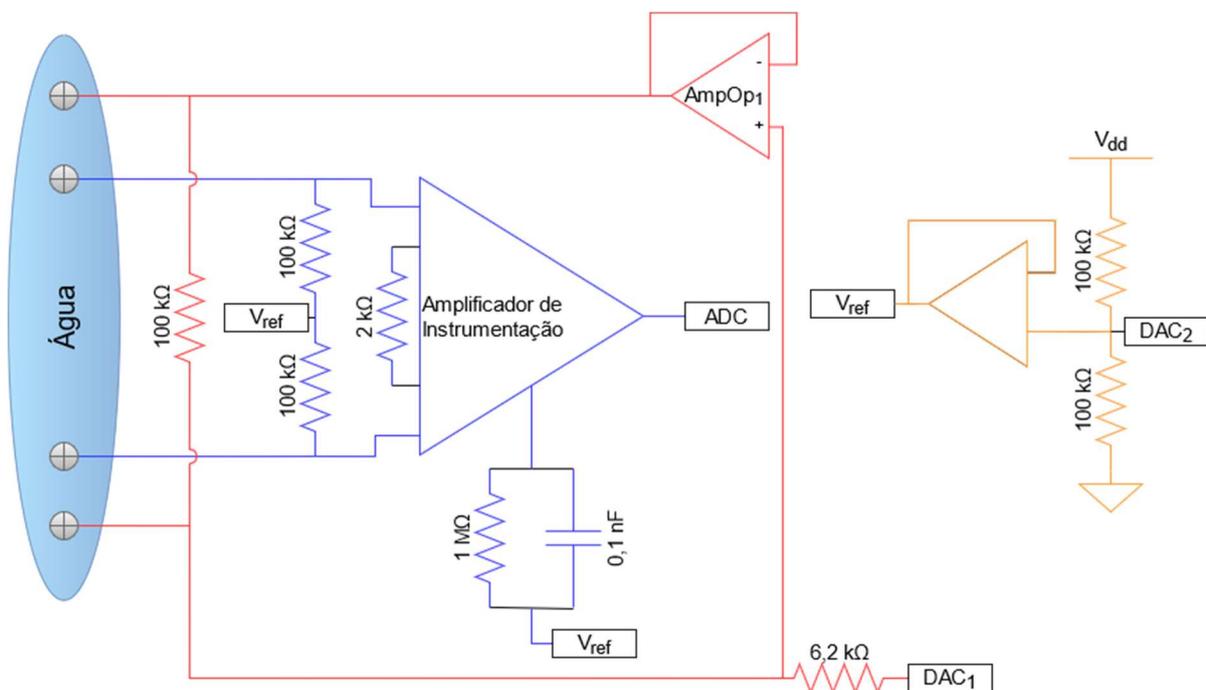


Figura 4.2 - Diagrama do circuito de leitura da condutividade. Os elétrodos são representados pelos círculos cruzados cinzentos. O circuito de tensão de referência está a laranja, a conversão de tensão para corrente a vermelho e o de leitura da tensão dos elétrodos a azul.

## 4.3 PCB

Foi na PCB que foram feitas as maiores alterações, reduzindo o seu tamanho, otimizando-a a nível energético, criando pinos para ligar diretamente os elétrodos (parafusos de aço) e substituindo o regulador de tensão.

### 4.3.1 Otimização a nível energético

Uma das maiores perdas no circuito anterior era o consumo do regulador de tensão, que chegava a gastar pelo menos 400  $\mu\text{A}$  só para estar em funcionamento. Em alternativa, usou-se o TPS62842DGRR, que para além de ter a opção de ser desligado e tensão de saída regulável, tem um consumo próprio de apenas 60 nA, tornando-se um excelente candidato para aplicações de baixo consumo energético.

Com o objetivo de aumentar a eficiência energética do circuito e aproveitando para minimizar possíveis ruídos nas leituras, foi acrescentado mais um regulador de tensão, separando a alimentação dos amplificadores (especialmente o amplificador de instrumentação, que pode ser mais sensível a inconsistências na alimentação), e permitindo o seu acionamento apenas quando necessário. Assim, como se vê na Figura 4.3, só os amplificadores são alimentados pelo regulador de tensão IC6 (3V3\_INST), que por sua vez é controlado pelo micro, desligando-o sempre que não estiver a decorrer uma leitura (ENABLE\_REG).

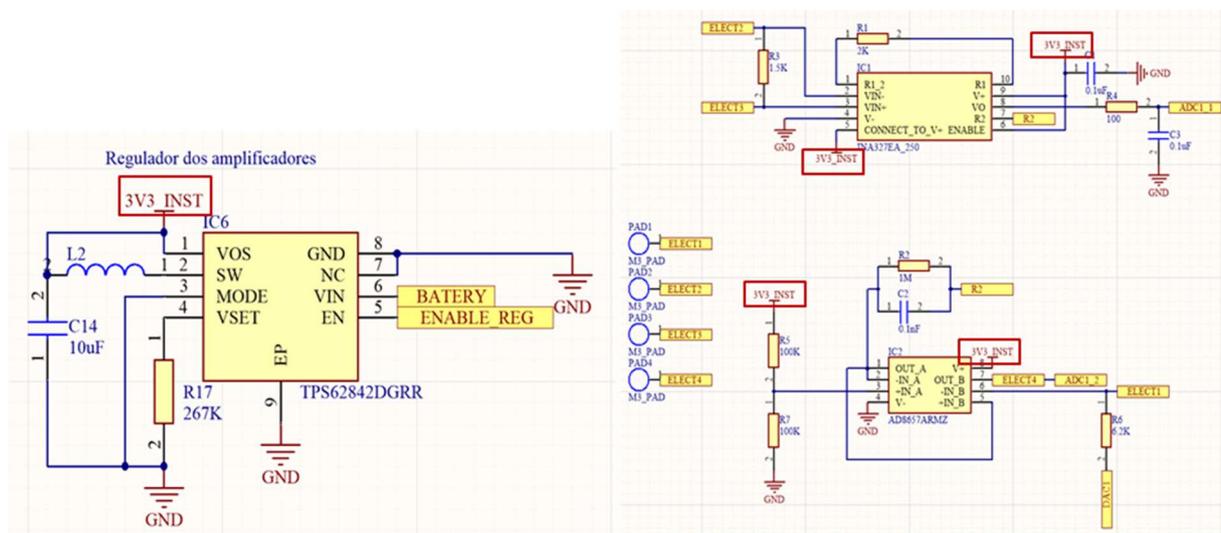


Figura 4.3 - Circuito de alimentação à esquerda e circuito de leitura do sensor à direita.

Esta alteração só faz sentido uma vez que o regulador de tensão tem consumo próprio extremamente reduzido, viabilizando o uso deste componente não só como alimentação exclusiva de parte do circuito, mas também como interruptor.

Para reduzir o custo de cada sensor, tendo em conta que serão usados vários cada coluna, vai ser apenas usada uma bateria maior para alimentar todos os sensores e o *datalogger* ao mesmo tempo, tornando o custo de fabrico mais baixo.

#### 4.3.2 Ligação direta dos elétrodos à PCB

Foram criados pinos de dimensões suficientes possibilitando a instalação dos elétrodos diretamente à placa, de maneira a não usar o uso de fios e ligações desnecessárias, por sua vez evitando possíveis perturbações nos sinais que por eles são conduzidos. Como se pode ver na Figura 4.4, os pinos são rodeados de solda com um diâmetro de 11 mm, permitindo fazer o contacto dos elétrodos sem comprometer o resto da placa e mantendo o correto espaçamento entre eles.

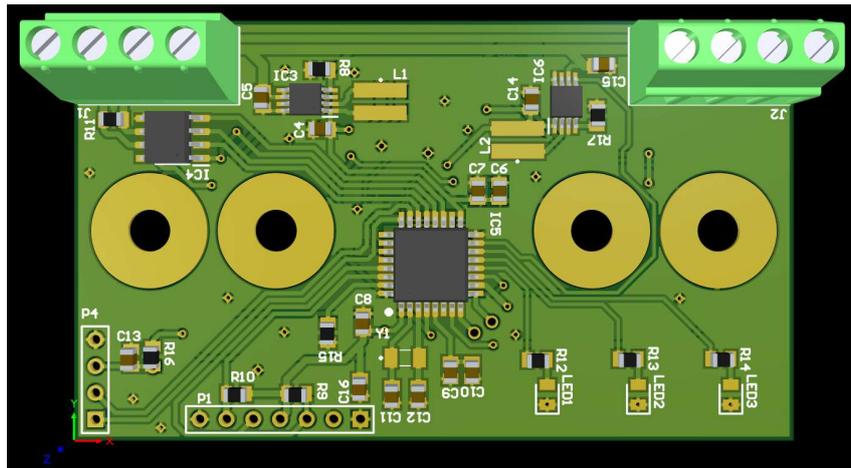


Figura 4.4 - Modelo 3D da PCB em Altium.

#### 4.3.3 Comunicações RS-485

Aproveitando a ideia original, o protocolo de comunicação RS-485 foi implementado pelo circuito integrado LTC1480CS8PBF, que comunica com o microcontrolador via UART, de maneira a haver um meio de passagem de dados de cada sensor para o *datalogger*. Foram também implementados dois conectores de quatro pinos, um de cada lado da PCB com dois pinos dedicados às comunicações, um de alimentação e um de massa. Esta disposição (representada na Figura 4.5) permite a ligação de cada sensor em paralelo com o *datalogger*, passando ainda os cabos de sinal e energia para o sensor seguinte. A montagem modular do sistema, facilita a inserção ou remoção de sensores com o mínimo de alterações.

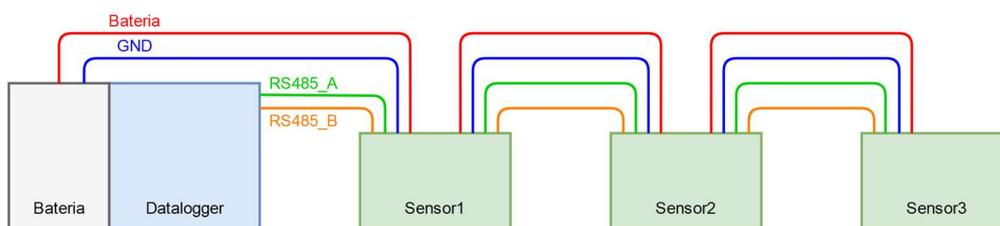


Figura 4.5 - Representação das ligações da bateria e do datalogger aos sensores.

## 4.4 Estabilização do Amplificador de Instrumentação

Os elétrodos podem ser modelados por equivalente elétrico, em que cada um é substituído por uma resistência e um condensador em série, como representado na Figura 4.6 ( $C_E$  e  $R_E$ ). As resistências  $R_{\text{solução}}$  representam a resistência do meio condutor, a água. O valor das capacidades foi medido experimentalmente, utilizando um potenciômetro Gamry, e fazendo um varrimento a várias frequências, obtendo-se uma capacidade  $C_E$  de aproximadamente  $1.1 \mu\text{F}$  e uma resistência  $R_E$  de aproximadamente  $30 \Omega$ . A resistência de solução varia entre centenas de  $\text{m}\Omega$  a dezenas de  $\Omega$ , conforme a salinidade do meio. Devido às capacidades entre os elétrodos e a água (*double layer capacitor*), a saída do amplificador de instrumentação pode estar saturada, mesmo que não esteja a ser injetada corrente pelos elétrodos exteriores. Devido às capacidades, pequenas assimetrias entre o ciclo positivo e negativo da corrente (ou seja, uma componente contínua na corrente) proporcionam a carga das capacidades nos elétrodos. No trabalho anterior, foi colocada uma resistência de  $150 \Omega$  entre os elétrodos interiores que ajuda a descarregar as capacidades dos elétrodos, tornando a saída do amplificador de instrumentação automaticamente estável. Esta solução diminuiu a resistência de entrada do sensor, perdendo também em parte a imunidade ao envelhecimento dos elétrodos.

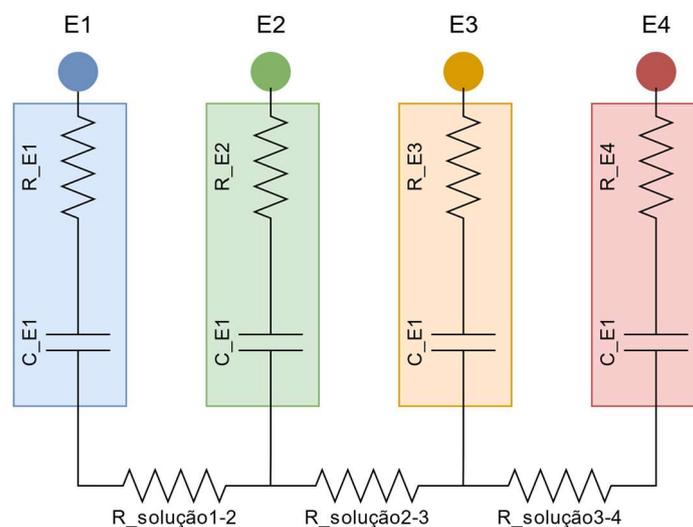


Figura 4.6 - Representação da resistência e capacidade do contacto dos elétrodos com a solução, neste caso água. Dentro dos retângulos está representado o equivalente elétrico do eletrodo, enquanto as resistências de baixo representam a resistividade da água.

Ao simular eletricamente este modelo no software TINA, como na Figura 4.7, é possível ver a diferença entre ter uma resistência de  $150 \Omega$  ou de  $100 \text{k}\Omega$ . As fontes de corrente IG1 e IG2 representam a corrente controlada pelo DAC e o seu respetivo erro. IG1 é o sinal de alternado de  $100 \mu\text{A}$  de pico a  $1 \text{kHz}$  e IG2 é um sinal contínuo de  $5 \mu\text{A}$  durante a primeira metade da simulação e de  $-5 \mu\text{A}$  durante a segunda metade. IG3 representa a corrente de polarização do amplificador de

instrumentação. VM1 e VM2 representam a tensão dos elétrodos interiores, VM3 a tensão de saída do amplificador e VM4 o sinal de entrada do elétrodo polarizado.

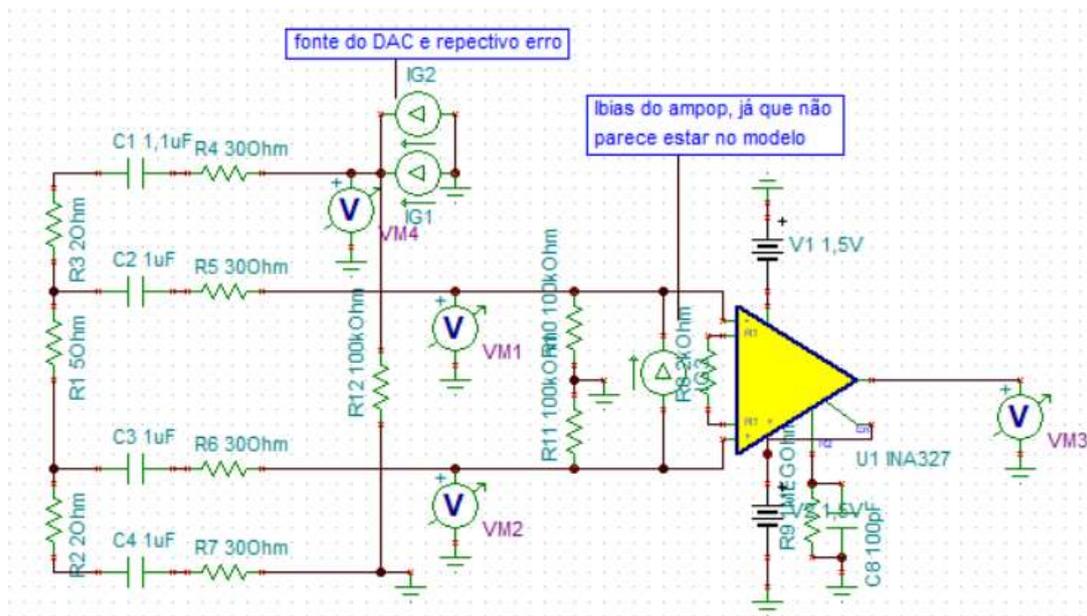


Figura 4.7 - Circuito de leitura do sensor de salinidade simulado no software TINA.

A Figura 4.8 apresenta os resultados de uma resistência de  $150\ \Omega$  entre os elétrodos interiores. Como esperado, o erro da saída do amplificador causado por IG2 não é muito acentuado, por dar um caminho de baixa resistência para descarregar as capacidades. Mas como referido acima, ao usar uma resistência baixa, é introduzido um erro nas medições que aumenta o limite de deteção e perde a imunidade ao envelhecimento dos elétrodos.

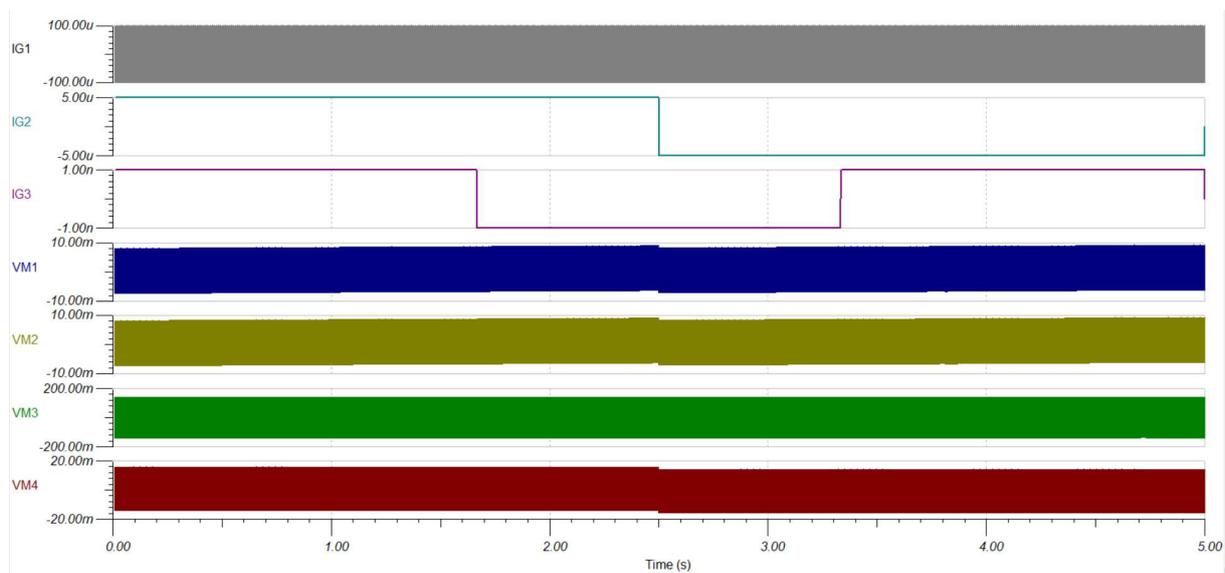


Figura 4.8 - Resultado da simulação do circuito de leitura, com resistência de  $150\ \Omega$  entre os elétrodos.

Na Figura 4.9, foi simulada a resistência de 100 k $\Omega$ , onde é possível ver que o pequeno erro na corrente DAC introduz um erro considerável na tensão de saída do INA327, em comparação com o caso anterior.

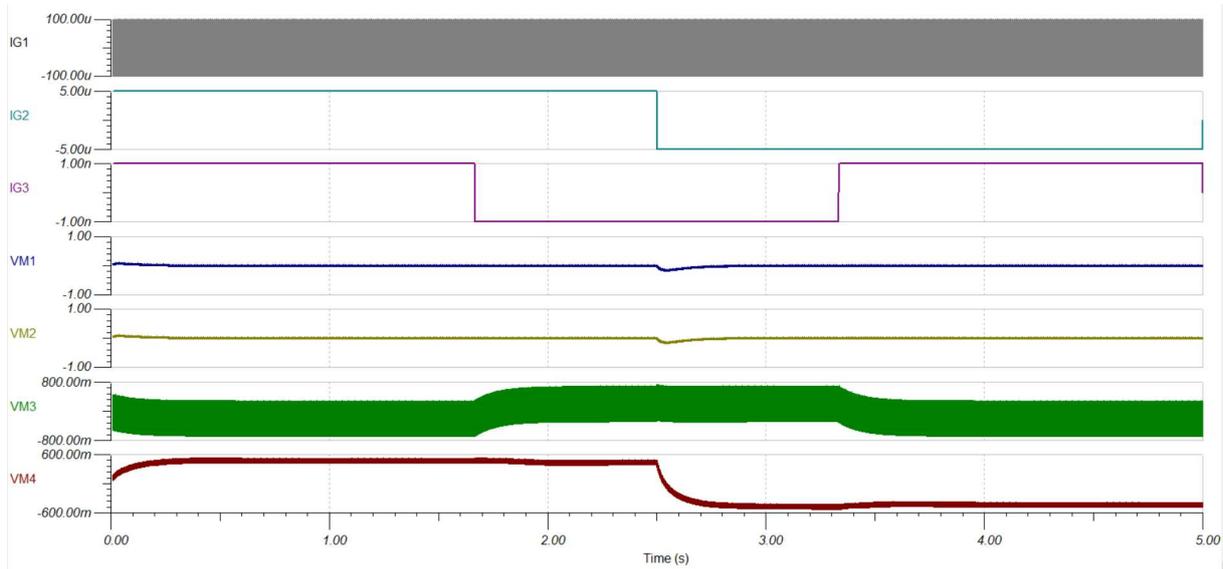


Figura 4.9 - Resultado da simulação do circuito de leitura, com resistência de 100 k $\Omega$  entre os elétrodos.

Para resolver este problema, inicialmente a resistência foi simplesmente aumentada para 1500  $\Omega$ , o que já aumenta bastante a resistência de entrada e verificou-se que o amplificador de instrumentação já apresentava problemas em estabilizar a saída. Foi então implementada uma rotina por software responsável por aplicar corrente elétrica pelos elétrodos exteriores de modo a estabilizar o sensor, ou seja, igualar a tensão nos elétrodos interiores, corrigindo a carga acumulada nas capacidades dos elétrodos. Quando a diferença de tensão for suficientemente pequena para evitar a saturação, é efetuada a medida da condutividade. Esta rotina permitiu aumentar a resistência na entrada para valores muito mais aceitáveis, de 150  $\Omega$  para 100 k $\Omega$ . Para além disso, além desta resistência, foram adicionadas duas de 100 k $\Omega$  ligadas à tensão de referência (1,65 V), para assegurar as correntes de polarização, de acordo com as recomendações do *datasheet* do amplificador. Esta alteração está representada no circuito da Figura 4.10.

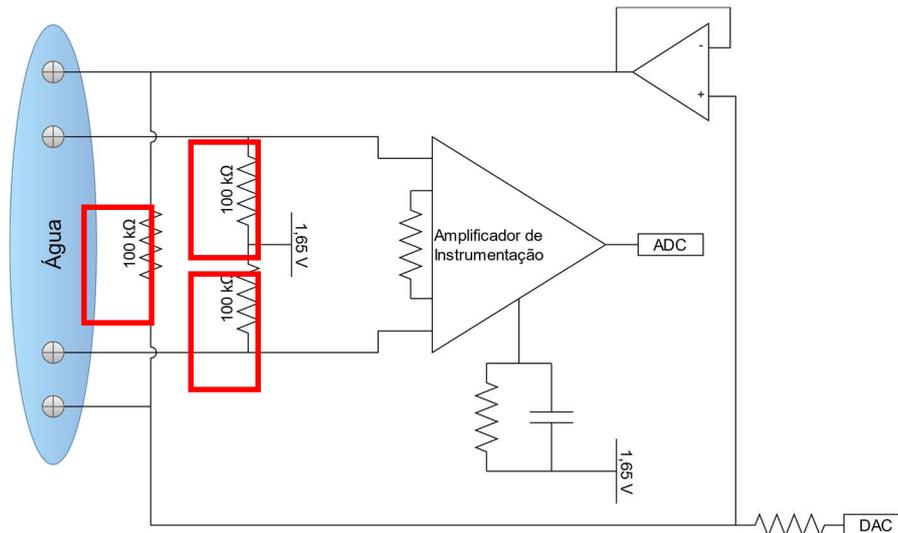


Figura 4.10 - Diagrama do circuito de leitura da condutividade com as novas resistências de estabilização. Os elétrodos são representados pelos círculos cruzados cinzentos. As resistências novas ou alteradas aparecem assinaladas a vermelho.

A estabilização foi testada com várias salinidades, mostrando-se mais rápida para as salinidades mais altas. Salinidade alta corresponde a condutividade alta, que ajuda a descarregar as capacidades dos elétrodos mais rapidamente. Na Figura 4.11 é possível ver leituras em dez escalas diferentes consecutivas (com salinidade 10 PSU). Uma leitura é o conjunto das dez escalas, e as leituras têm um espaçamento de 1 segundo entre si. Um período de instabilidade pode ser observado no intervalo de 1,48 segundos entre as linhas verticais contínua e tracejada. Para salinidades menores o tempo tem tendência a aumentar, podendo chegar a tempos na ordem do minuto para as salinidades mais baixas, por isso foi implementado um limite temporal que se for ultrapassado faz o sensor abandonar a leitura e enviar apenas os dados de pressão e temperatura para o *datalogger*.

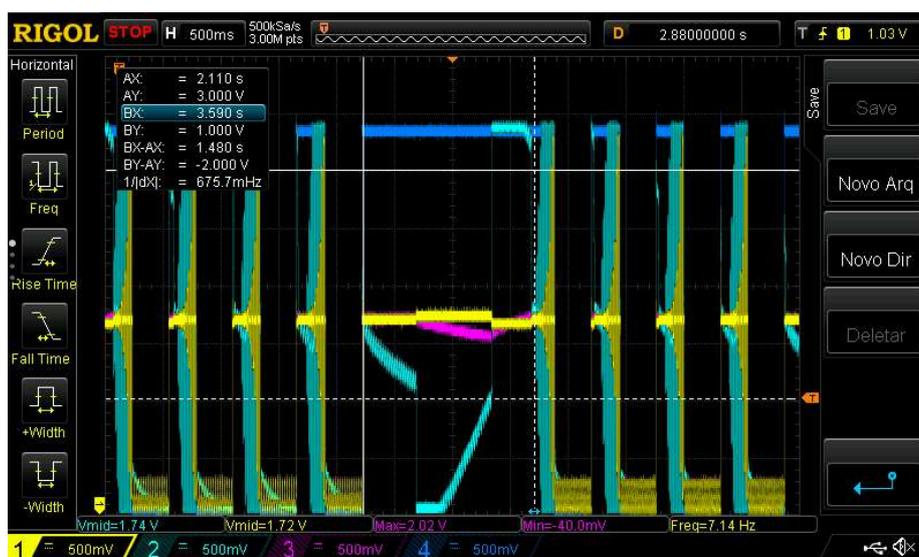


Figura 4.11 - Leituras consecutivas da salinidade, período de instabilidade do sensor e respetiva estabilização. O tempo de estabilização, neste caso em específico foi de 1,48 segundos. Azul-escuro indica quando o sensor é ligado, azul-claro é a tensão de saída do amplificador de instrumentação, amarelo a tensão do DAC e roxo a tensão do elétrodo que injeta corrente.

## 4.5 Encapsulamento

Ao reduzir o tamanho da PCB, o encapsulamento também fica naturalmente mais pequeno. Inicialmente foram usados fios para conectar os elétrodos e o sensor de temperatura e pressão ao microcontrolador. Nestas condições o tamanho dos fios pode induzir distorções no sinal que por eles se propaga, dando problemas na comunicação entre o microcontrolador e o sensor de pressão e temperatura e tornando os elétrodos mais suscetíveis a ruído, por isso na nova versão estes elementos estão o mais próximo possível da placa, garantindo sempre o isolamento do restante, dando resultado a um sensor mais compacto. A Figura 4.12 representa várias perspetivas do encapsulamento do sensor. É composto por um molde de PLA ou ABS, onde é acomodada a PCB com os circuitos e isolada com resina epóxi.

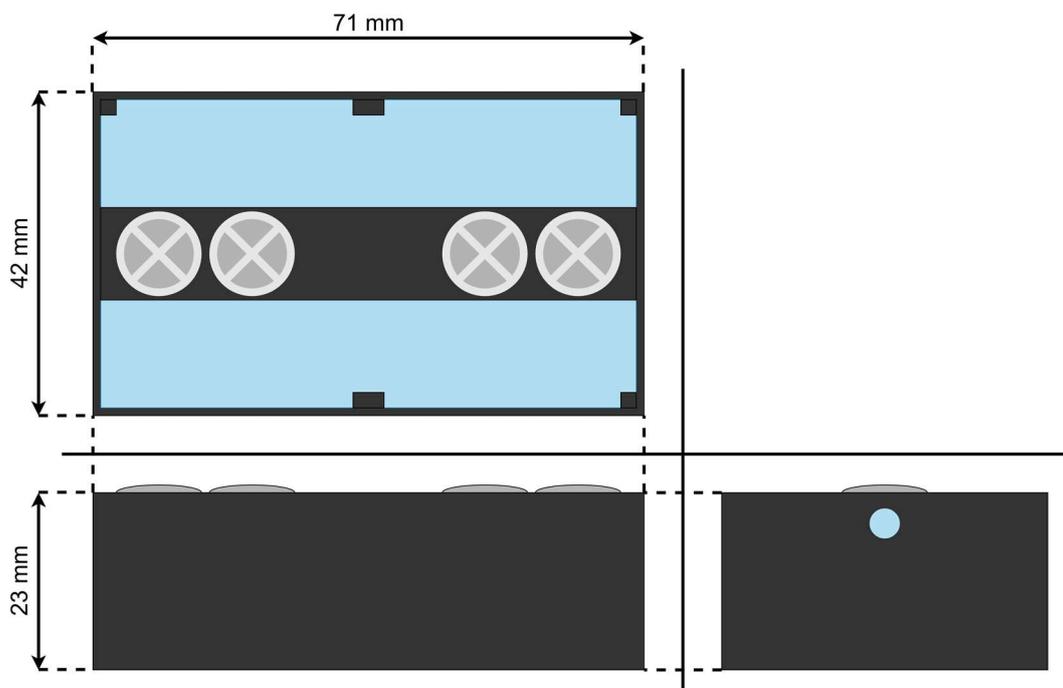


Figura 4.12 - Dimensões do encapsulamento. A azul está a parte preenchida com resina, onde a eletrónica é protegida.

## 4.6 Protocolo de comunicação

Foi implementado um protocolo de comunicação entre os sensores e o *datalogger*, para que haja fluxo de dados organizado entre os vários nós da rede. Há uma relação de *master-slave* entre os dois tipos de nós, em que o *datalogger (master)* dá instruções de funcionamento e recebe os dados produzidos pelos sensores (*slaves*). A função de cada sensor é receber as instruções, interpretá-las, fazer a leitura e enviar o resultado para o *datalogger*.

Assim foram implementados dois protocolos diferentes:

-No fluxograma da Figura 4.13, o *datalogger* sincroniza cada uma das leituras feitas pelos sensores. Os sensores apenas recebem a ordem do *datalogger*, executam a leitura e devolvem o resultado. Apenas o *datalogger* tem um temporizador para saber quando são feitas as leituras, mas são trocadas mensagens nos dois sentidos, aumentando o tempo de atividade dos microcontroladores e tornando o consumo energético do sistema maior.

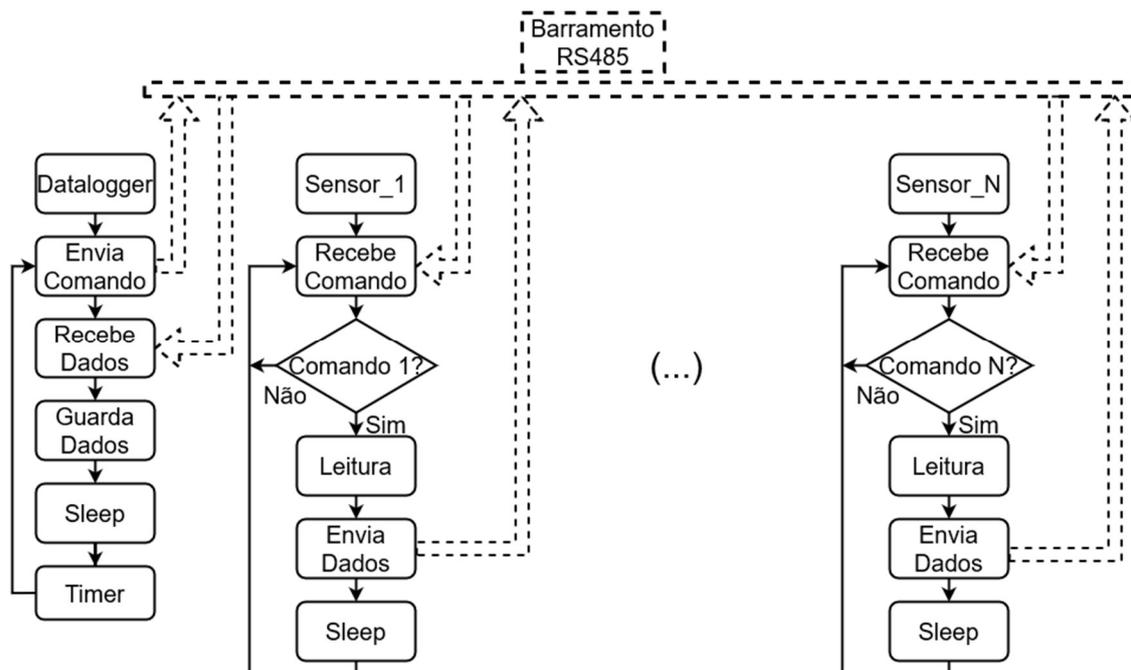


Figura 4.13 – Fluxograma das comunicações por RS-485 para o caso de pedido do datalogger e resposta dos sensores.

-No fluxograma da Figura 4.14, os sensores são programados para enviar os dados com um período previamente definido. A partir do momento em que são ligados, enviam as tramas de dados espaçadas no tempo, acordando apenas para fazer a leitura, enviá-la e voltando a entrar em modo de poupança de energia. O *datalogger* recebe os dados dos sensores de forma assíncrona e armazena-os num ficheiro, poupando assim tempo de processamento e energia. Há, no entanto, uma pequena probabilidade de colisões de dados no barramento RS-485 devido ao *drift* entre os *clocks* dos sensores, que aumenta com o número de sensores no barramento e com a taxa de amostragem, sendo que a trama enviada permite controlo de erros. Para lidar com este problema foi introduzido um mecanismo de controlo de erros que consiste em verificar se a trama recebida está de acordo com um formato predefinido, neste caso o indicador do sensor que envia a trama, seguido dos dados de pressão, temperatura e salinidade. Caso a trama tenha o formato correto, os dados são guardados.

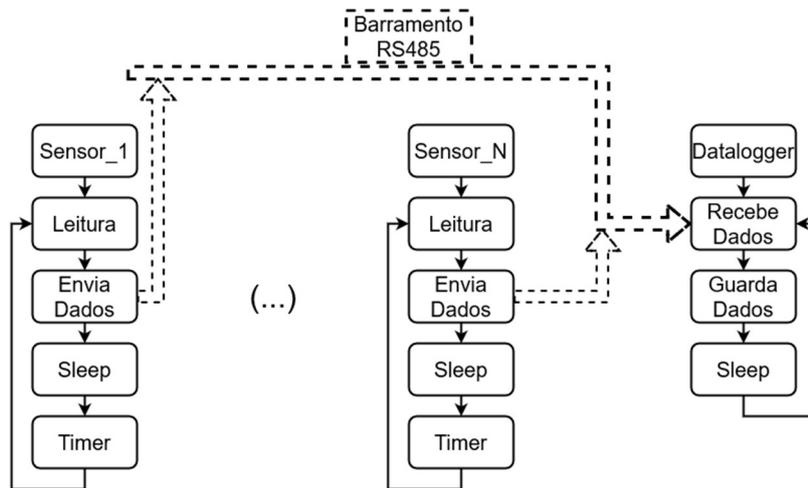


Figura 4.14 - Fluxograma das comunicações por RS-485 para o caso de os sensores enviarem os dados desfasados no tempo, sem haja dois sensores a tentar comunicar ao mesmo tempo com o datalogger.

A escolha do protocolo a usar depende da aplicação de monitorização. No caso de haver muitos sensores no sistema e energia suficiente, o primeiro protocolo é mais favorável. No caso de haver poucos sensores e necessidade de poupar ao máximo a bateria do sistema, o segundo protocolo será a melhor escolha.

#### 4.7 Software

O software foi adaptado ao novo microcontrolador e atualizado com o novo método de cálculo da salinidade com compensação de temperatura e pressão. O fluxograma da Figura 4.15 apresenta as etapas principais do software do microcontrolador. Foi criada uma rotina que envia os dados para o *datalogger*, onde são organizados e armazenados para facilitar a sua recolha. Para acompanhar a necessidade de um sistema com baixo consumo e custo, o microcontrolador entra em modo de poupança de energia sempre que não está a fazer leituras.

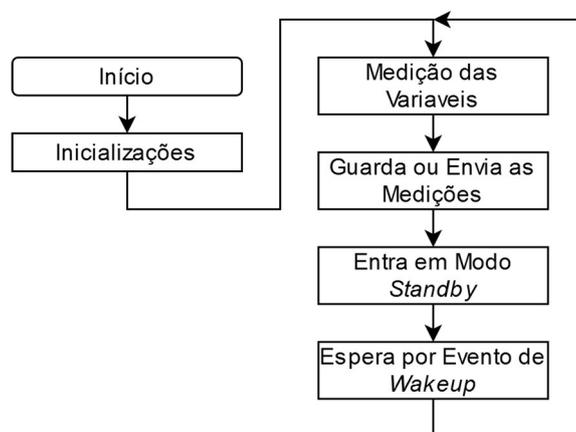


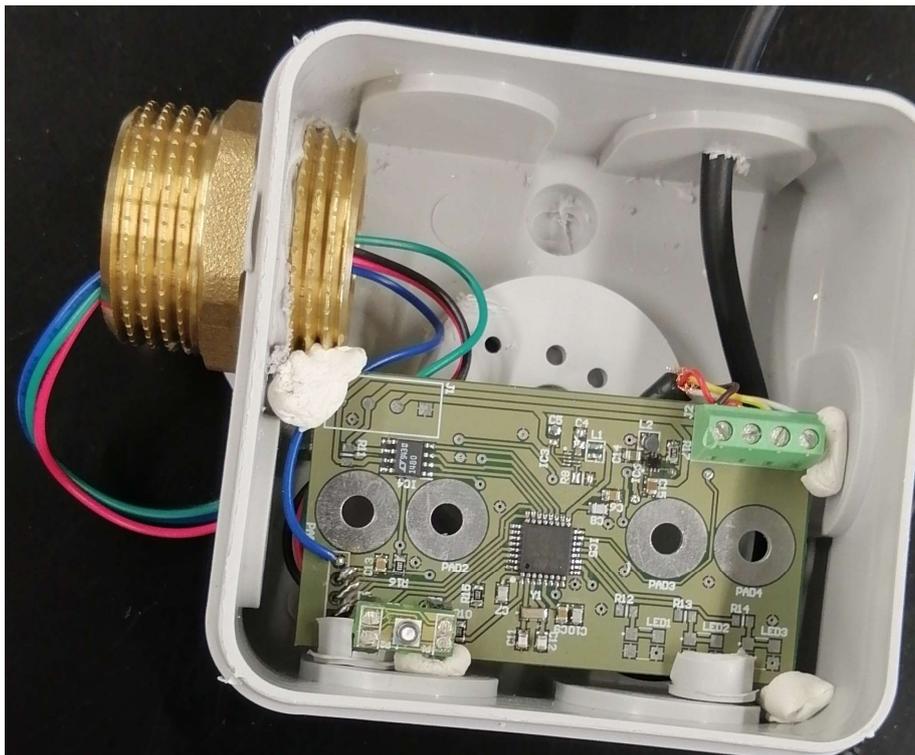
Figura 4.15 - Fluxograma do software do sensor de salinidade.

## 4.8 Testes e Calibração

Neste capítulo são apresentados os testes de laboratório, testes de campo iniciais e calibrações do sensor de CTD. Estes testes ajudam a detetar que ajustes são necessários para o correto funcionamento do sensor, antes de este ser produzido em maior número para integrar o sistema de monitorização a implementar no estuário.

### 4.8.1 Sensor de marés

Inicialmente o sensor foi testado unicamente com o sensor de pressão e temperatura, para medir a profundidade, o ciclo da maré e a temperatura. Estes dados podem ser relevantes para o estudo da foz do rio Lima, para ajudar a perceber a influência que estas variáveis têm na entrada da água salgada do mar a montante da foz. Na aplicação concreta do sensor de salinidade, estas variáveis são também usadas como fator de correção da condutividade.



*Figura 4.16 - Sensor com os componentes necessários para fazer a medição da pressão e temperatura, antes de ser envolvido pela resina epóxi.*

Depois de testar o funcionamento do sensor da Figura 4.16 em laboratório, o mesmo foi envolvido numa camada de resina epóxi, isolando-o da água e possibilitando a sua imersão. Para poder reprogramar o sensor mesmo depois de ir para a água, sem danificar o isolamento, foi montada uma

rosca de latão com tampão de uma polegada, deixando os terminais de programação protegido da água, mas acessíveis. O consumo em modo *standby* foi de 283  $\mu\text{A}$  e de 770  $\mu\text{A}$  durante as leituras. De seguida, o sensor foi integrado num sistema de monitorização na foz do rio Cávado, em Esposende (mapa da Figura 4.17).



Figura 4.17 - Sensor instalado num suporte metálico preso ao leito do rio Cávado, em Esposende. Mapa base e dados de OpenStreetMap e Fundação OpenStreetMap [32].

A amostragem foi feita a cada 10 minutos, sendo que no fim de cada leitura é enviada uma trama para o *datalogger* existente no sistema de monitorização. A trama representada na Figura 4.18 contém caracteres alfanuméricos, iniciando com o identificador do sensor, seguido da pressão (mbar) e a temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ), sendo estes valores separados por “\_” e a trama terminada por “\$”, como se pode ver no exemplo seguinte:



Figura 4.18 - Exemplo de uma trama enviada do sensor para o datalogger.

Neste caso de estudo em Esposende, o sistema funciona a bateria durante o dia enquanto, de noite, as baterias são carregadas por um poste de iluminação próximo do local da instalação. O *data logger* do sistema armazena os valores lidos num cartão de memória e envia-os via WiFi, de forma a dar hipótese ao utilizador de adquirir os dados no local, ou acompanhar a evolução das variáveis à distância. No gráfico da Figura 4.19 é possível ver a variação da maré (profundidade do sensor a azul) e da temperatura da água (a vermelho).

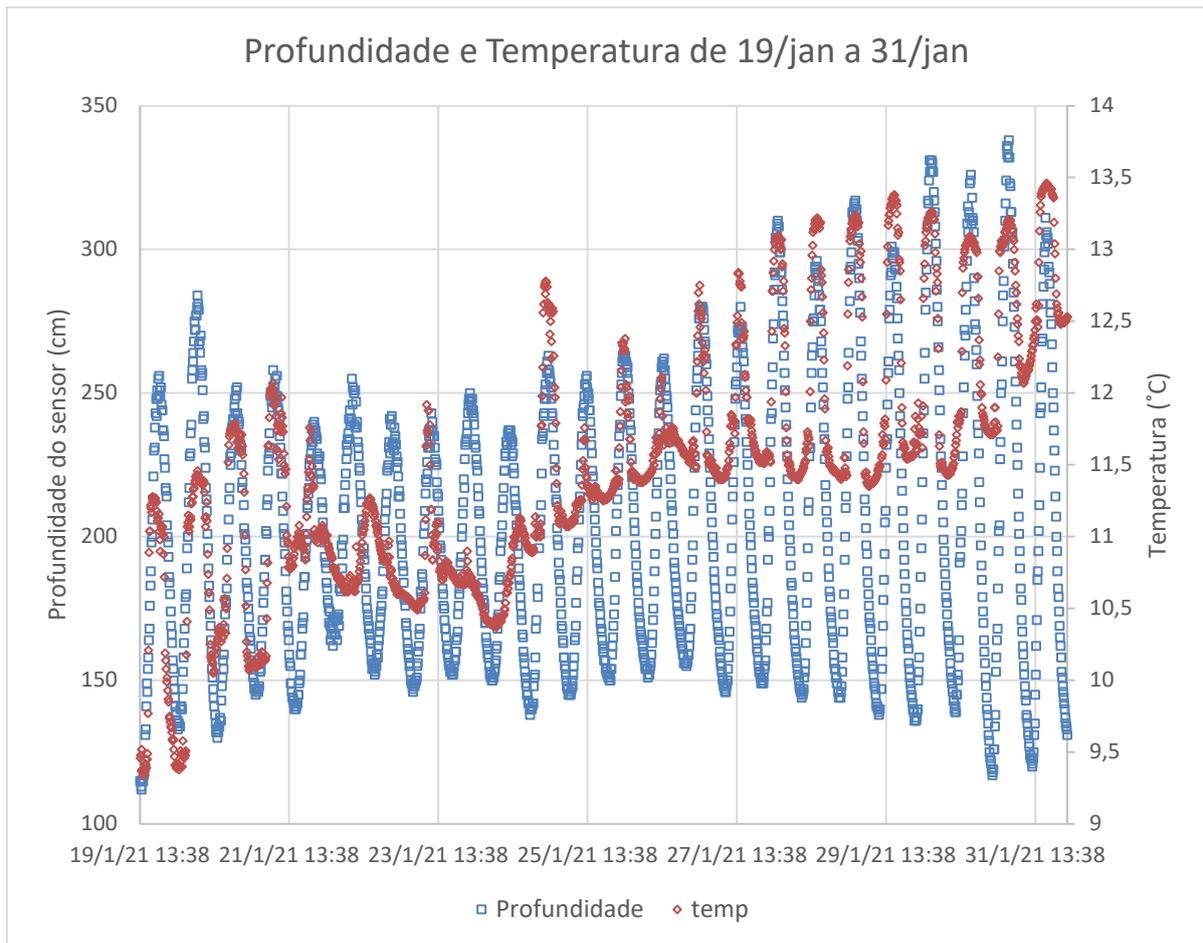


Figura 4.19 - Gráfico da evolução da profundidade (a azul) e da temperatura (vermelho) de 19/jan a 31/jan.

Neste gráfico é possível observar dois períodos diferentes na altura das marés. De 20 a 28 de janeiro houve um período de marés mortas, com baixa amplitude das marés, enquanto de 28 de janeiro a 4 de fevereiro houve um período de marés vivas. Durante o inverno, a temperatura da água do mar é superior à da água do rio, pelo que a temperatura tipicamente aumenta com a maré alta, com a entrada da água do mar no rio.

Ao comparar os picos da maré no mar e no local de instalação foi possível concluir que, estando cerca de 1 km a montante da foz do rio, relativamente à foz, os picos de profundidade medidos pelo sensor apresentam um atraso relativamente à previsão de maré na foz do rio.

Durante um período de pouca afluência do rio, o atraso da preia-mar (pico superior da maré) entre a foz e o sensor varia tipicamente entre poucos minutos a meia hora, enquanto a baixa-mar (pico inferior da maré) pode atrasar até duas horas. Na Figura 4.20 é possível comparar a altura da maré no mar e no local da instalação do sensor.

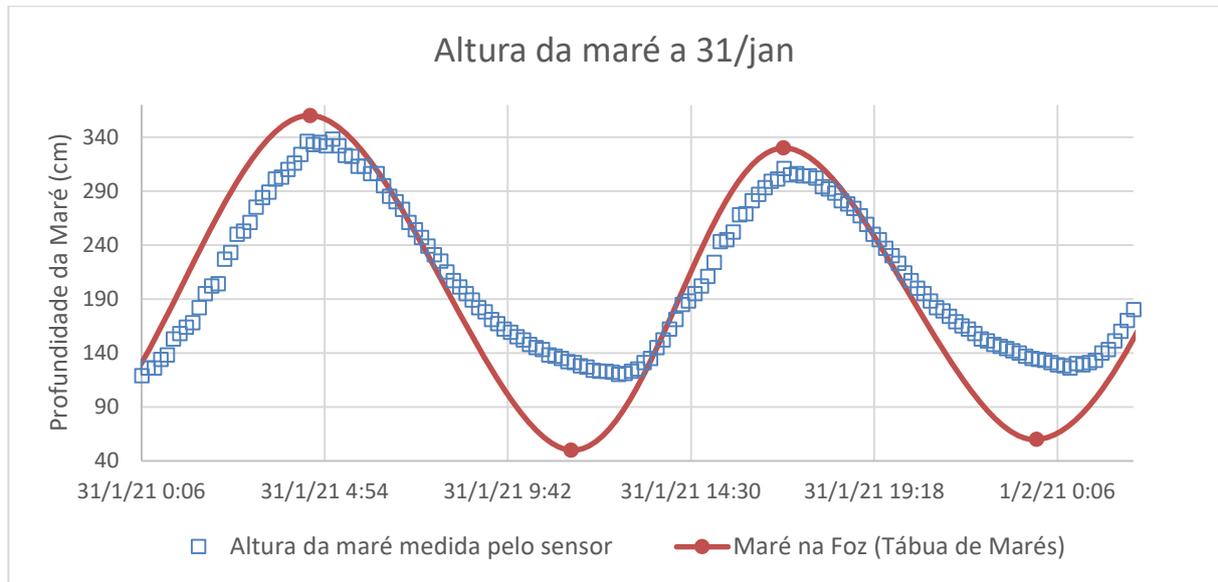


Figura 4.20 - Altura da maré no dia 31 de janeiro no mar e no local de instalação do sensor (Esposende).

Em situações em que a afluência do rio é maior, por exemplo ao longo de períodos de chuva, a profundidade do rio não é tão afetada pela maré. O caudal pode até ser suficiente para manter a altura da água do rio mais alta que a do mar ao longo de um ou mais ciclos de maré, como pode ser observado na Figura 4.21.

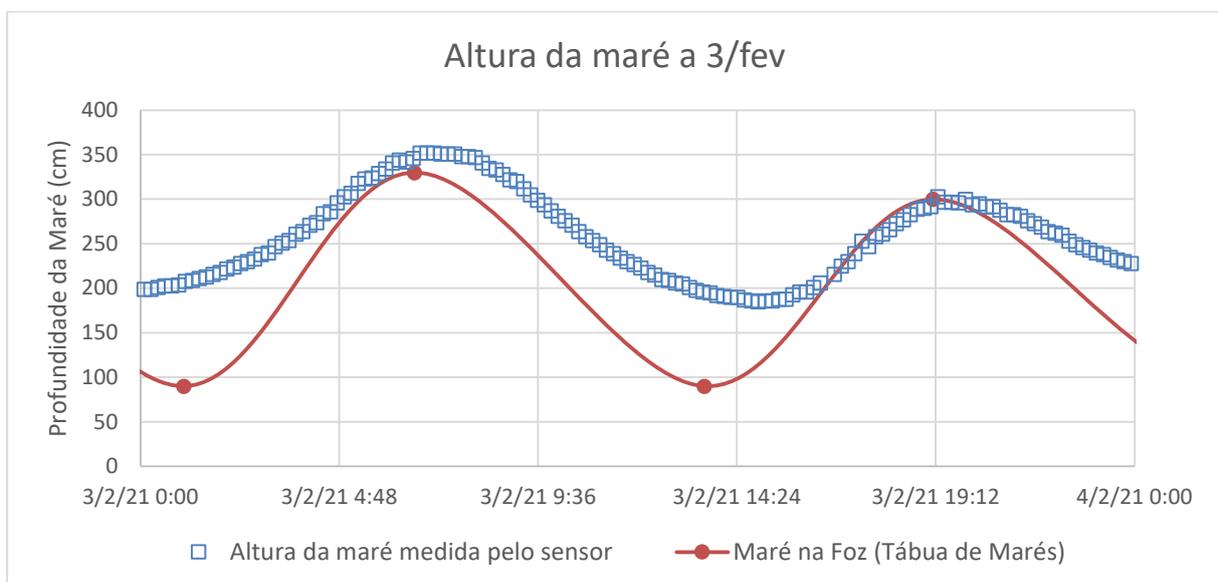


Figura 4.21 - Altura da maré no dia 3 de fevereiro no mar e no local de instalação do sensor (Esposende).

#### 4.8.2 Definição das escalas de medição

A eletrônica de instrumentação apresenta limites, tanto de resolução como de gama de leitura. Assim, foram implementadas três escalas de medição, nas quais são aplicadas correntes diferentes nos elétrodos exteriores, uma escala baixa ( $I_{min} = 2 \mu A$ ), uma média ( $I_{med} = 20 \mu A$ ), e uma alta ( $I_{max} = 200 \mu A$ ). Nos testes iniciais em laboratório, para simular a resistividade da água do mar, usou-se resistências entre os elétrodos, representado na Figura 4.22.

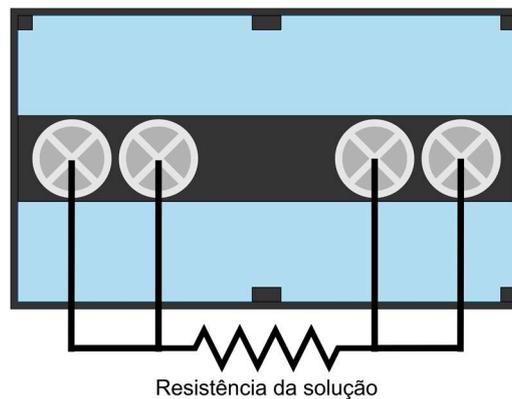


Figura 4.22 - Representação do teste de leitura da condutividade com resistências. É aplicada corrente elétrica pelos elétrodos exteriores e lida a tensão resultante pelos elétrodos interiores.

Com os dados recolhidos, representados na Figura 4.23, é possível perceber que o sensor tem a capacidade de medir resistências entre os 2  $\Omega$  e os 11 k $\Omega$ , alternando entre as três escalas.

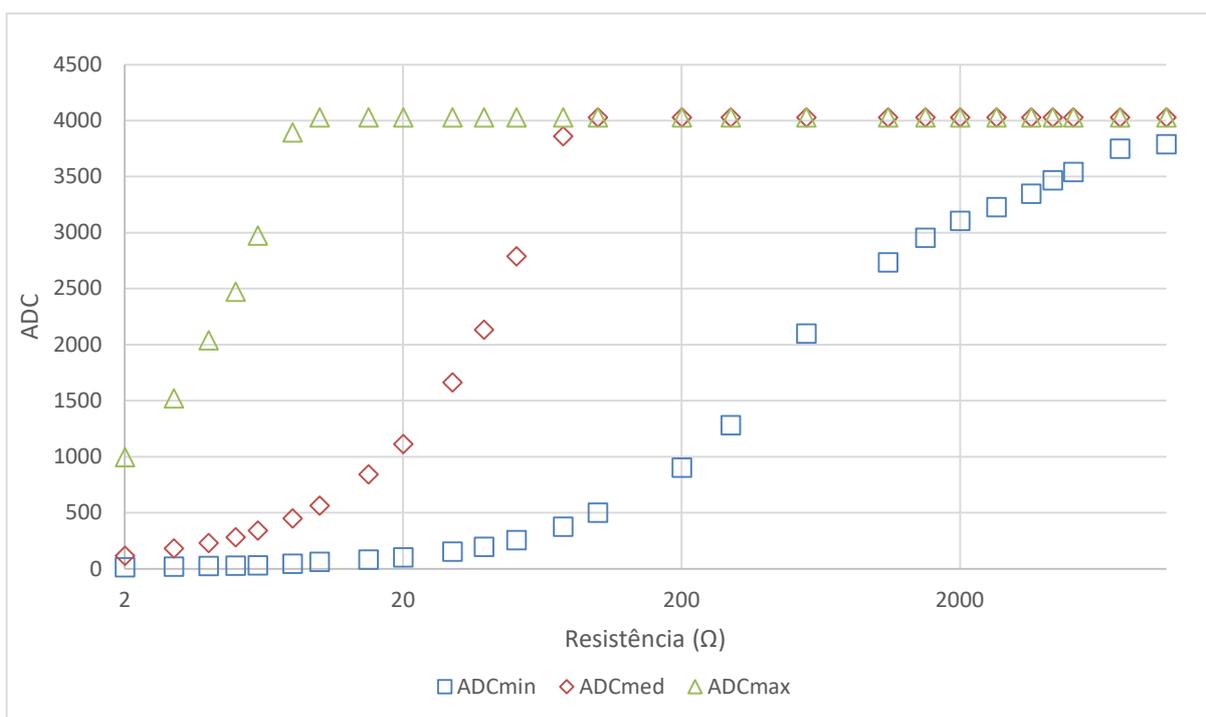


Figura 4.23 - Gráfico que relaciona o valor de ADC com a resistência entre os elétrodos para as diferentes escalas.

### 4.8.3 Testes de Laboratório

Ao testar em água as escalas inicialmente escolhidas, verificou-se que estas escalas podiam ser afinadas para ter o maior alcance de medição sem perder precisão na leitura da salinidade. Assim, foram feitos testes em várias escalas diferentes para várias salinidades (resultados das leituras de ADC na Tabela 4). Na Figura 4.24 estão representados os dados das leituras do ADC e é possível ver que determinadas correntes são mais adequadas para um intervalo de salinidade. No eixo horizontal a salinidade da água e no eixo vertical o valor digital obtido no microcontrolador. Foi feito um estudo para determinar quais as melhores escalas a usar, com correntes nos elétrodos entre 2  $\mu\text{A}$  e 261  $\mu\text{A}$ .

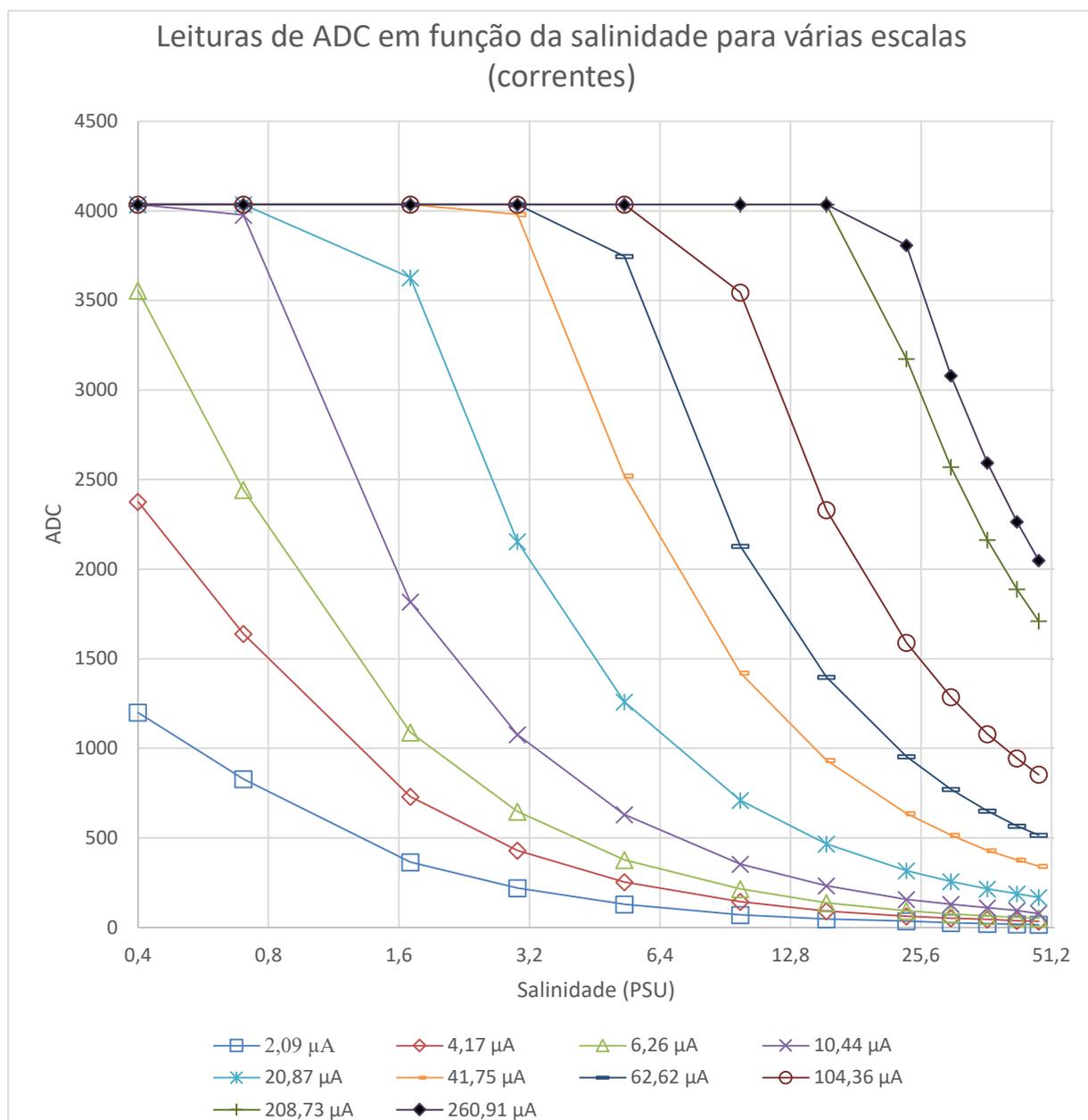


Figura 4.24 – Gráfico dos valores de ADC lidos pelo microcontrolador do sensor em função da salinidade para várias correntes diferentes.

Salinidade Real (PSU)	ADC em função da salinidade para várias correntes dos elétrodos ( $\mu\text{A}$ )									
	2,09	4,17	6,26	10,44	20,87	41,75	62,62	104,36	208,73	260,91
0,4	1200	2377	3556	4036	4036	4036	4036	4036	4036	4036
0,7	828	1640	2443	3977	4036	4036	4036	4036	4036	4036
1,7	364	730	1089	1818	3628	4036	4036	4036	4036	4036
3	220	430	648	1077	2154	3980	4036	4036	4036	4036
5,3	129	254	378	630	1259	2522	3746	4036	4036	4036
9,8	71	144	215	353	709	1422	2128	3545	4036	4036
15,5	46	92	138	233	467	933	1398	2330	4036	4036
23,7	35	63	93	157	317	636	954	1590	3174	3808
30	26	51	75	129	257	516	771	1286	2570	3081
36,4	22	45	64	110	215	430	650	1080	2164	2595
42,6	18	37	56	94	188	378	567	944	1889	2265
47,8	16	34	52	78	168	343	516	854	1710	2050

*Tabela 3 - Resultados experimentais de medições do ADC com várias correntes diferentes.*

Os dados da Tabela 3 são usados para calcular a condutividade, que por sua vez é usada para o cálculo da salinidade segundo o PSS-78, na Tabela 4. O gráfico da Figura 4.25 apresenta o a salinidade calculada a partir dos valores de ADC em todas a dez escalas testadas. Ao analisar os dados concluiu-se que o uso de quatro escalas leva ao menor erro das leituras, pelo que foram escolhidas as seguintes correntes (escalas): 2.09  $\mu\text{A}$  para o intervalo de salinidade 0,2 PSU a 0,7 PSU; 6,26  $\mu\text{A}$  para 0,7 PSU a 3 PSU; 20,87  $\mu\text{A}$  para 3 PSU a 10 PSU; e 104,36  $\mu\text{A}$  para 10 PSU a 50 PSU. Estes intervalos foram escolhidos de maneira a ser possível efetuar leituras a com o menor erro possível ao longo do espectro de leitura do sensor. Limitou-se o número de escalas em quatro, pois usar mais escalas não reduz o erro consideravelmente e torna o sensor mais complexo em termos de software e com maior gasto de energia, sem vantagens concretas. As constantes do sensor (descritas abaixo na secção 4.8.4) foram ajustadas para obter o menor erro de medição no intervalo de cada uma das escalas.

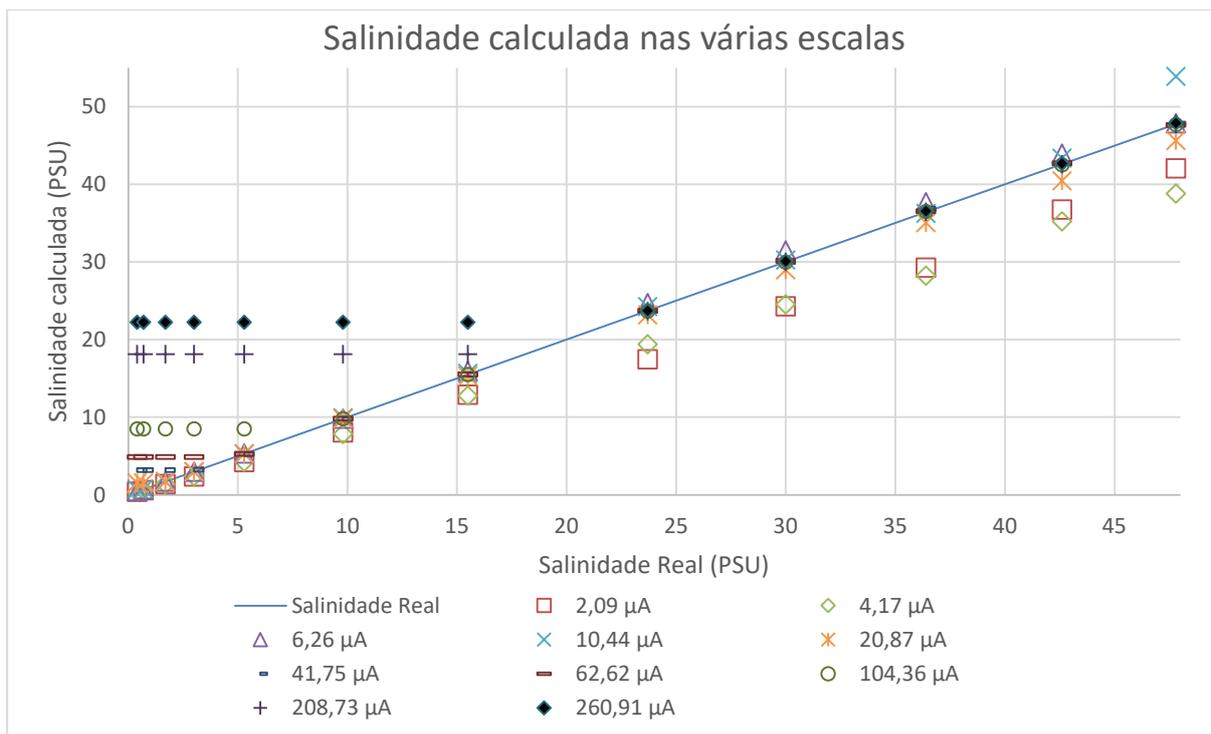


Figura 4.25 – Gráfico da salinidade calculada pelo sensor em função da salinidade real da água. São representadas várias correntes diferentes.

Salinidade Real (PSU)	Salinidade Medida (PSU) em função da salinidade para várias correntes dos elétrodos (µA)									
	2,09	4,17	6,26	10,44	20,87	41,75	62,62	104,36	208,73	260,91
0,4	0,402	0,402	0,497	0,739	1,543	3,171	4,897	8,512	18,123	22,217
0,7	0,591	0,591	0,735	0,750	1,543	3,171	4,897	8,512	18,123	22,217
1,7	1,399	1,381	1,719	1,709	1,727	3,171	4,897	8,512	18,123	22,217
3	2,386	2,420	2,985	2,982	2,997	3,219	4,897	8,512	18,123	22,217
5,3	4,221	4,247	5,321	5,300	5,305	5,251	5,306	8,512	18,123	22,217
9,8	8,041	7,836	9,808	9,929	9,793	9,770	9,793	9,800	18,123	22,217
15,5	12,912	12,774	15,945	15,655	15,304	15,503	15,518	15,504	18,123	22,217
23,7	17,444	19,392	24,711	24,260	23,158	23,711	23,706	23,648	23,671	23,706
30	24,273	24,536	31,471	30,246	28,976	29,980	30,106	29,970	29,996	30,068
36,4	29,277	28,233	37,683	36,232	35,057	36,859	36,534	36,484	36,451	36,527
42,6	36,750	35,227	43,920	43,379	40,455	42,728	42,720	42,516	42,587	42,681
47,8	42,054	38,793	47,850	53,875	45,614	47,804	47,634	47,690	47,777	47,894

Tabela 4 – Resultados experimentais de medições de salinidade da água com várias correntes diferentes. A verde estão os intervalos de valores a ser medidos pelas quatro escalas escolhidas.

Com estas escalas o sensor apresenta um erro inferior a 0,5% a partir de 2 PSU, sendo que o algoritmo da PSS-78 só é aplicável de 2 PSU a 47 PSU. O sensor é capaz de medir fora deste intervalo, podendo apresentar um erro superior a 0,5%. Na Tabela 5 é apresentado o erro percentual de cada medição para as várias escalas, e os dados a verde representam os intervalos utilizados em cada escala. O gráfico da Figura 4.26 exemplifica como o erro das medições se dispõem à medida que a salinidade aumenta, neste caso, para a escala mais alta.

Salinidade Real (PSU)	Salinidade Medida (PSU) em função da corrente dos eletrodos ( $\mu\text{A}$ )			
	2,09	6,26	20,87	104,36
0,4	<b>0,49%</b>	24,19%	285,79%	2027,99%
0,7	-15,58%	<b>4,95%</b>	120,45%	1115,99%
1,7	-17,68%	<b>1,13%</b>	1,57%	400,70%
3	-20,47%	-0,49%	<b>-0,10%</b>	183,73%
5,3	-20,36%	0,41%	<b>0,10%</b>	60,60%
9,8	-17,95%	0,08%	-0,07%	<b>0,00%</b>
15,5	-16,70%	2,87%	-1,26%	<b>0,03%</b>
23,7	-26,39%	4,27%	-2,29%	<b>-0,22%</b>
30	-19,09%	4,90%	-3,41%	<b>-0,10%</b>
36,4	-19,57%	3,52%	-3,69%	<b>0,23%</b>
42,6	-13,73%	3,10%	-5,04%	<b>-0,20%</b>
47,8	-12,02%	0,10%	-4,57%	<b>-0,23%</b>

Tabela 5 - Erro das leituras nas escalas escolhidas. A verde estão os intervalos medidos por cada escala.

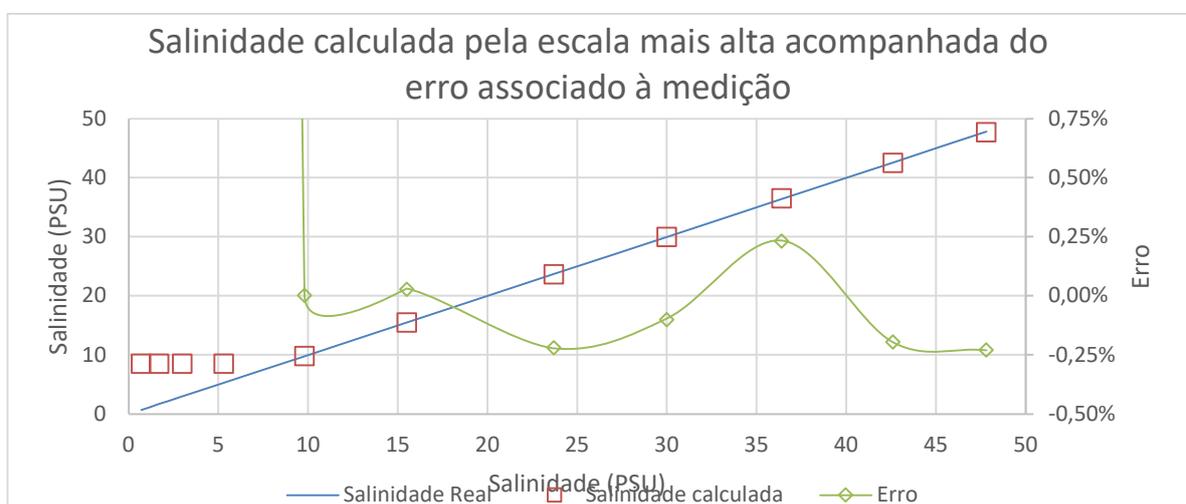


Figura 4.26 - Gráfico da leitura da salinidade acompanhada pelo erro, para o caso da escala mais alta.

Na Figura 4.27 são apresentadas as quatro escalas escolhidas. Os eixos foram formatados em escala logarítmica para melhor visualizar simultaneamente os baixos e altos valores de salinidade. Como era esperado, as escalas mais altas não conseguem fazer a medição nas salinidades mais baixas, por se encontrarem saturadas, enquanto as escalas mais baixas apresentam muito mais erro em salinidades mais altas, dado terem sido calibradas para baixas salinidades onde a PSS-78 poderá introduzir maior erro.

A detecção da saturação pode ser um mecanismo de ajuda na escolha da escala a usar numa leitura. Inicia-se a leitura com a escala maior e caso ela esteja saturada ou perto da saturação, é feita uma leitura pela escala inferior seguinte, e assim sucessivamente até à escala mais baixa. Assim, tendo em conta que a escala maior tem também o maior intervalo de salinidade a medir, há alta probabilidade de ser feito o menor número de leituras necessárias.

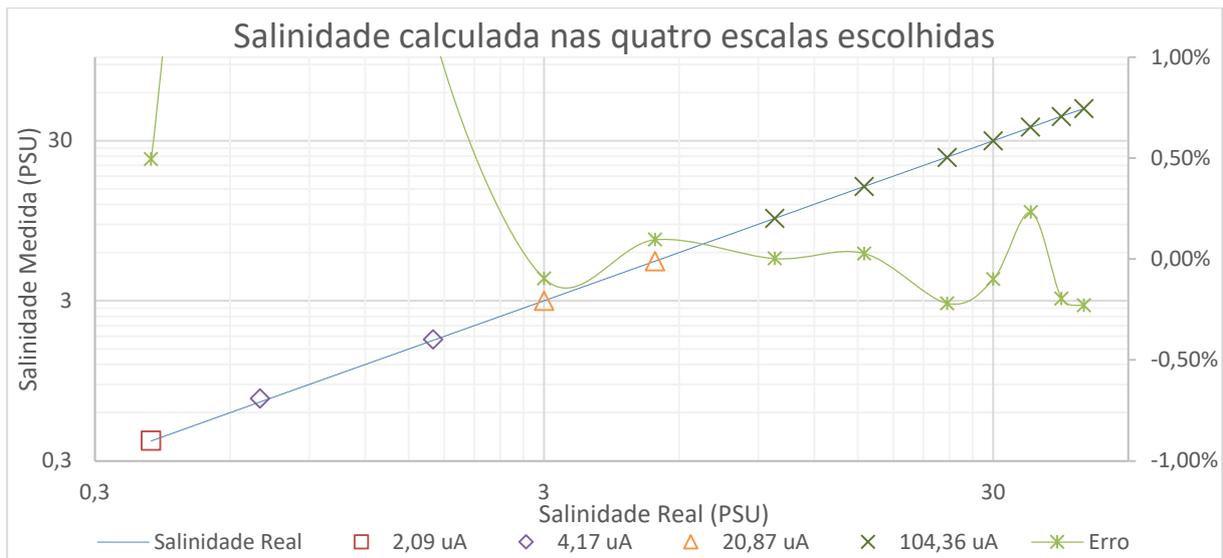


Figura 4.27 - Gráfico da medição da salinidade da água de teste nas quatro escalas escolhidas, desde 0,4 PSU a 47PSU. É ainda apresentado o erro ao longo do espectro de leitura, segundo a escala com menor erro.

Para o sensor escolher que escala usar, ele primeiro efetua uma leitura na escala mais alta. Caso a leitura dessa escala esteja saturada ou perto da saturação, o sensor passa para a escala seguinte, garantindo assim que o sensor faz sempre a leitura na escala adequada. Como é espectável que o sensor faça medições na maioria do tempo em água salgada, ao começar pela escala mais alta (que também é a mais abrangente) há maior probabilidade de ser feita uma só leitura, poupando energia. A Figura 4.28 é o ecrã do osciloscópio com a tensão do DAC a amarelo e a tensão do eléctrodo de injeção de corrente na água a azul. É possível distinguir todas as quatro escalas, da mais baixa para a mais alta.

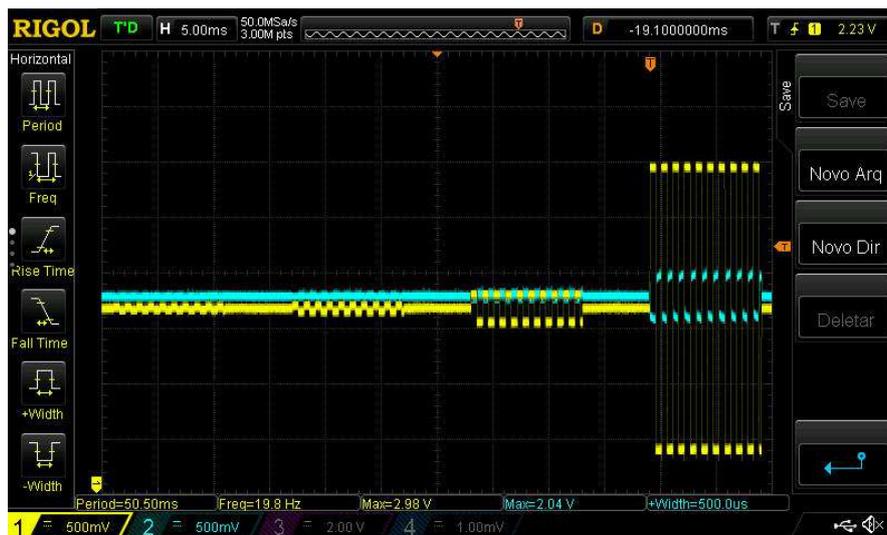


Figura 4.28 - Leitura das escalas com o osciloscópio. A amarelo está a tensão do DAC e a azul a tensão do eléctrodo que injeta corrente na água.

#### 4.8.4 Calibração

Com os dados recolhidos anteriormente, foi possível chegar a uma possível calibração do sensor. A calibração depende de vários fatores, como a geometria do campo elétrico medido, a corrente aplicada e a própria eletrônica de instrumentação. A calibração é feita de forma a reduzir o erro máximo possível dentro de uma escala, ou seja, cada escala tem as suas constantes.

A calibração é feita através de duas constantes, a constante de *offset*, responsável por corrigir o valor lido pelo ADC na conversão de valor analógico para tensão, que pode ter um desvio por efeito indesejado da eletrônica de instrumentação, e a constante do sensor, que ajusta o fator de conversão de tensão para condutividade. Esta última, em condições ideais seria igual para todas as escalas, mas há uma alteração no campo elétrico, que é dependente da corrente aplicada aos elétrodos exteriores, mudando ligeiramente a geometria do sensor para cada escala. Na Tabela 6 são apresentadas as constantes de correção do sensor para as diferentes escalas.

Escala (µA)	2,09	6,26	20,87	104,36
Ksensor	0,18672	0,22615	0,227907	0,228377
Offset	0	0	-14	-7

Tabela 6 - Constantes de calibração para cada escala usada no sensor.

A constante de *offset* (Offset) é somada ao valor de ADC lido pelo microcontrolador, para calcular a tensão entre os elétrodos interiores. Na Equação 4-1, que faz o cálculo da tensão (V), também é tido em conta o ganho (1000X) do amplificador de instrumentação. A constante do sensor (Ksensor) é usada no cálculo da condutividade da água. Na Equação 4-2 a constante representa a geometria do sensor e do campo elétrico (que varia ligeiramente entre escalas) e *R* representa a impedância calculada entre os elétrodos, obtida pela divisão da tensão medida (V) pela corrente aplicada.

$$V = \frac{ADC - Offset}{4096} * \frac{3,3}{1000} \quad \text{Equação 4-1}$$

$$\sigma = Ksensor / R \quad \text{Equação 4-2}$$

## 5. SISTEMA DE MONITORIZAÇÃO

Neste capítulo é exposto o desenvolvimento do *datalogger* e o processo de construção e instalação do sistema de monitorização da coluna de água.

### 5.1 Datalogger

Com o objetivo de facilitar a recolha dos dados, o *datalogger* concentra-os num só cartão de memória, organizando-os por sensor e dia. Com o RTC (*Real Time Clock*) é possível registar o dia (dia/mês/ano) e a hora (hora/minuto/segundo) a que uma leitura é feita, permitindo ter um registo preciso de quando os dados são adquiridos. Os dados são armazenados num cartão SD, que apresenta elevada fiabilidade e baixo consumo. Está ainda contemplada a integração futura de outras formas de comunicação, como *Wi-Fi*, *ZigBee* ou *Bluetooth*, através dos pinos reprogramáveis livres do microcontrolador, disponíveis em conectores integrados na PCB.

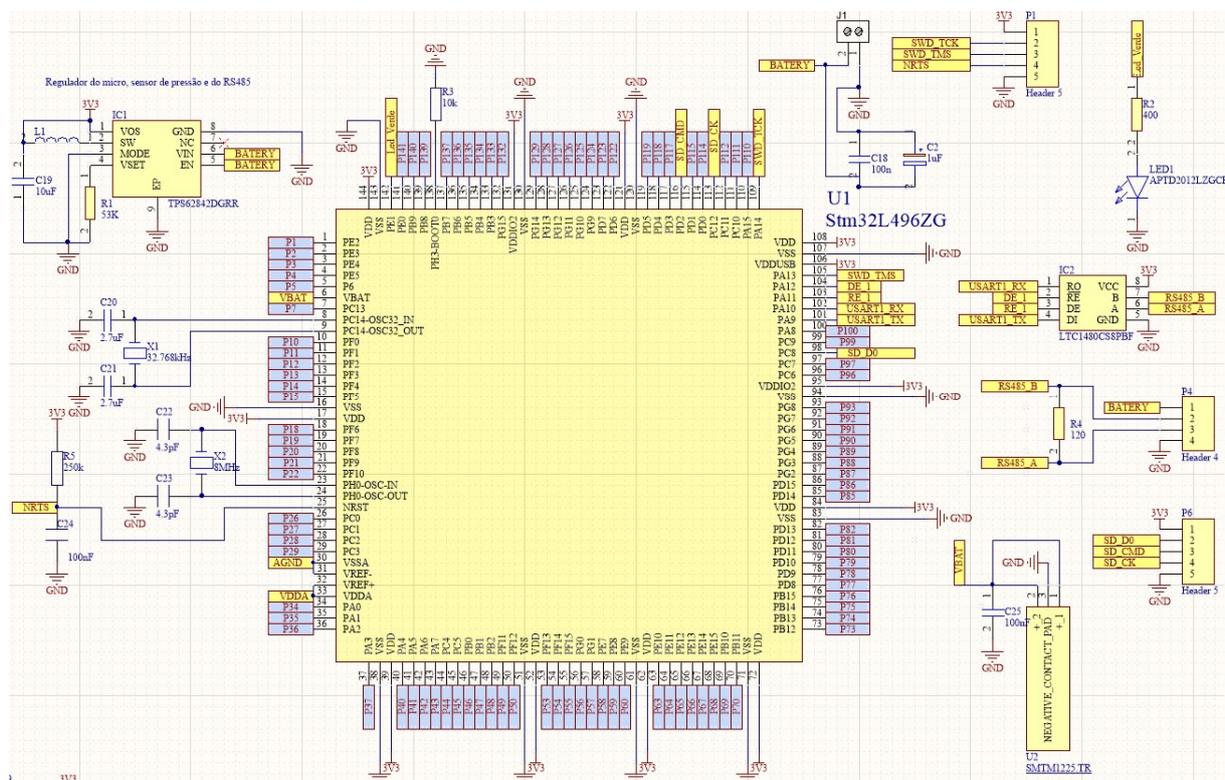


Figura 5.1 – Esquema da PCB do datalogger, desenvolvido em Altium.

Foi desenvolvido o *datalogger* cujo esquemático é apresentado na Figura 5.1 com base noutro previamente desenvolvido neste projeto, mas adaptado ao sistema de monitorização em desenvolvido nesta dissertação. O *datalogger* anterior integrava vários módulos de RS-485, comunicação série e dois reguladores de tensão[1]. Esta versão foi simplificada para ter apenas um módulo RS-485 (LTC1480CS8PBF) e um regulador de tensão (TPS62842DGRR), baixando o custo e o consumo, sem perder a adaptabilidade. O microcontrolador usado é o STM32L496ZG, que tem 144 pinos programáveis para posteriormente poderem ser integrados vários módulos de comunicação ou sensores, mas mantendo um consumo baixo.

Para permitir a ligação de periféricos exteriores à placa do *datalogger*, os pinos reprogramáveis do microcontrolador podem ser acedidos pelos portos em torno da PCB. Assim basta redefinir os pinos desejados por *software* e ligá-los a outros módulos externos, como por exemplo uma memória externa, um segundo cartão de dados ou um módulo GSM ou GPS. O modelo tridimensional do *datalogger* da Figura 5.2 foi desenvolvido com o objetivo de ser usado neste projeto, mas por questões de falta de tempo e de conveniência para os testes, este não chegou a ser usado.

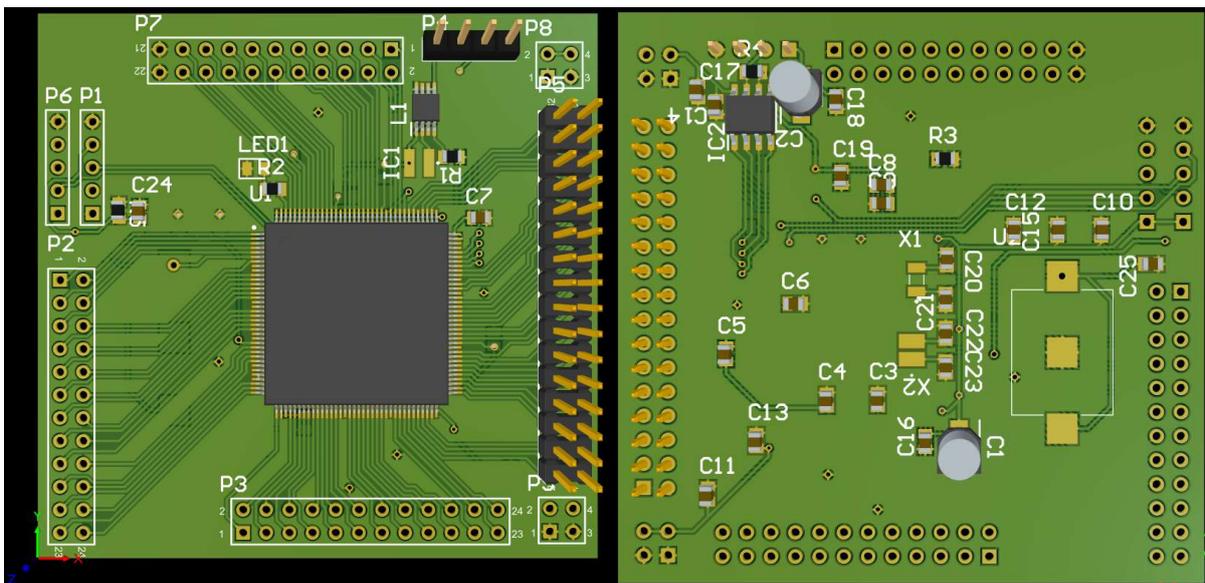


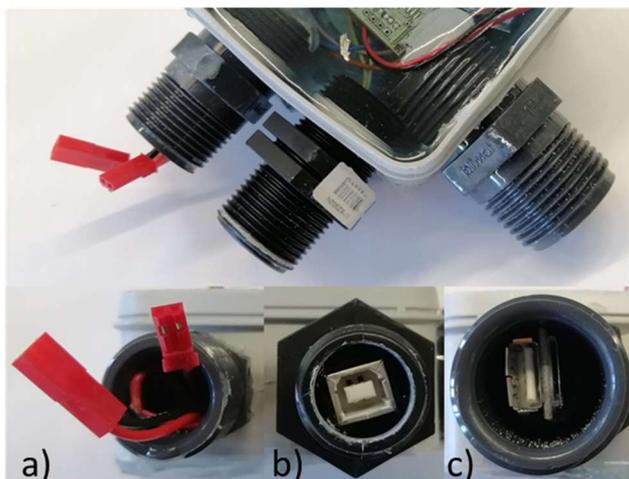
Figura 5.2 - Modelo 3D da PCB do *datalogger*, em Altium.

Para ser possível testar os sensores isoladamente, foi usado o *datalogger* desenvolvido em [1], que cumpria todos os requisitos anteriormente mencionados. Na Figura 5.3 é apresentado o *datalogger* usado para testar um sensor sem ligação à rede.



*Figura 5.3 – Datalogger usado nos testes submersos em Esposende. Nesta fase, a eletrônica já está envolvida em resina epóxi.*

A PCB foi isolada com resina epóxi, dentro de um molde com três acessos diferentes, protegidos por roscas, cujas fotografias são apresentadas na Figura 5.4. Um acesso ao cartão SD e aos pinos de programação do microcontrolador, para permitir a extração de dados e para o caso de ser necessário reprogramar (na parte a) da figura). O acesso da arte b) da figura faz a conexão aos sensores, com a alimentação e as comunicações RS-485. O último acesso, na parte c) da figura, serve para desligar o sistema ou recarregar a bateria.



*Figura 5.4 – Ligações disponíveis no datalogger. Em a) a ligação à bateria, em b) o conector para ligar os sensores (energia e comunicações) e em c) o conector de programação do micro e o conector do cartão SD.*

O software usado inclui o protocolo de comunicação em que o *datalogger* apenas recebe as tramas e guarda-as no cartão SD. Visto que inicialmente serão usados poucos sensores, as colisões entre tramas não serão comuns. Isto permite manter o sistema mais tempo em funcionamento antes de ser necessário recarregá-lo.

## 5.2 Suporte dos Sensores na Coluna de Água

Para reduzir o consumo de energia e tornar o sistema eletronicamente mais simples e económico, optou-se por ligar os sensores (entre eles e ao *data logger*) por cabo elétrico de quatro fios (um para alimentação, um para massa e dois para as comunicações RS-485). Mas o uso do cabo pode revelar-se um problema, pois a violência do mar pode danificá-lo, causando mau funcionamento do sistema ou avaria. Os dois principais movimentos que pode danificar o cabo são a tração e a torção.

Assim foi desenvolvida uma corrente de apoio, que mantém a integridade do sistema. É composta por tubos de PPR (material usado em canalizações, capaz de suportar agitação marítima) interligados por manilhas de aço inox, garantindo que a estrutura se adapta a diferentes profundidades causadas pela maré, sem deixar que o cabo elétrico que liga os sensores e o *data logger* torça ou estique ao ponto de se danificar. O tubo PPR, por ser eletricamente isolante, não interfere com as medições da condutividade, por isso o sensor é instalado a meio do mesmo, de forma a distanciar das manilhas de aço. Na extremidade da corrente de apoio, uma boia garante a flutuabilidade de uma das extremidades, enquanto a outra extremidade é ancorada ao fundo, através de um lastro. A Figura 5.5 representa este mesmo sistema.

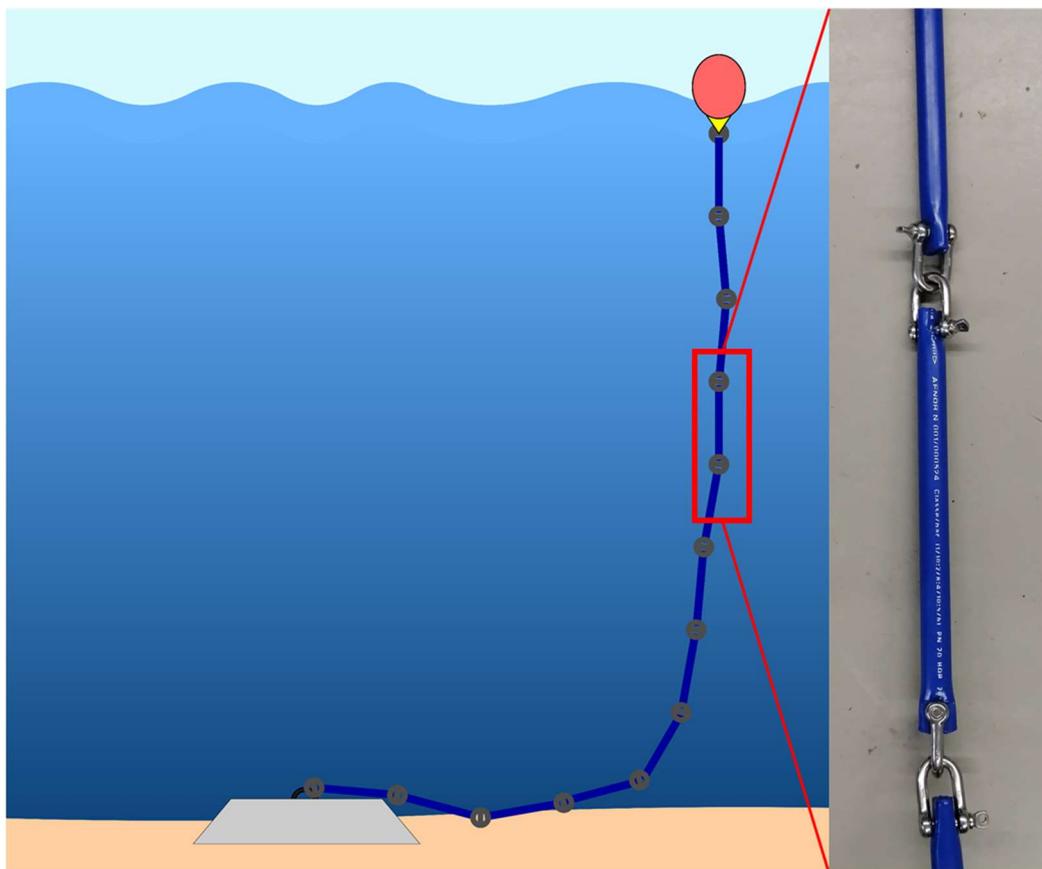


Figura 5.5 - Corrente de tubos de PPR, representada em maré baixa à esquerda.

Nesta aplicação, são efetuadas medições em toda a coluna de água, estando o sistema suportado por uma boia à superfície. Quando a maré baixa, a parte inicial da coluna vertical fica pousada no fundo (conforme na Figura 5.5,) sendo que os sensores desta zona irão medir todos à mesma profundidade.

No caso de não ser relevante ou essencial fazer a leitura das variáveis nos primeiros metros da coluna vertical (Figura 5.6), pode-se optar por instalar o sistema completamente submerso, mesmo durante a maré baixa. Neste caso, uma boia é utilizada para manter a sistema na vertical, sendo que esta tem de ser capaz de suportar a pressão causada pela água quando esta está submersa.

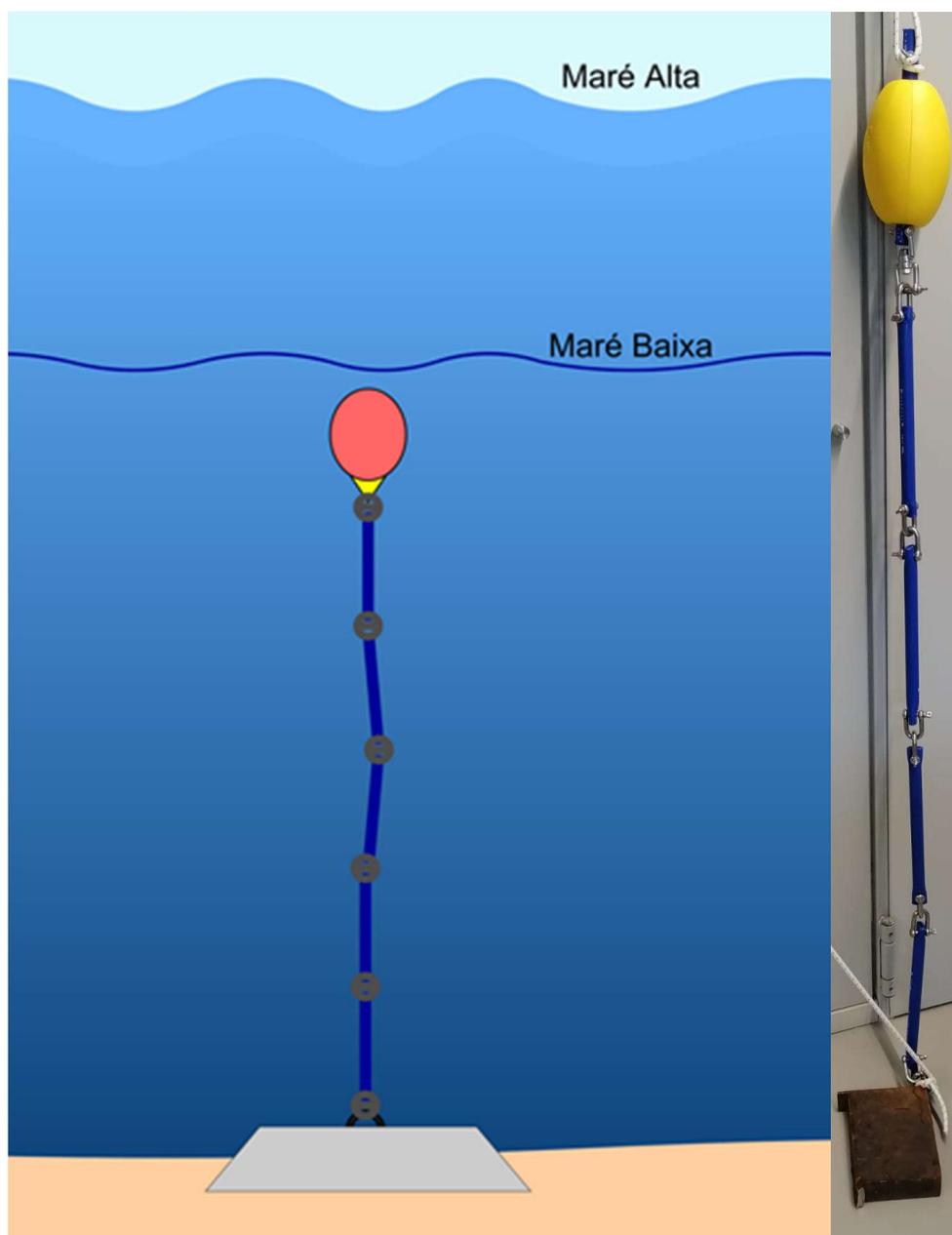


Figura 5.6 – Ilustração da corrente de tubos de PPR submersa à esquerda. À direita, o primeiro protótipo da estrutura, com o objetivo de se usada na instalação do rio Cávado. Neste caso, o lastro é um bloco de aço com 9,5 kg e a boia tem flutuabilidade de 950 g.

Em qualquer um dos casos acima descritos há necessidade do uso de um lastro, que mantém o sistema na localização em que é instalado, e um flutuador, para manter a estrutura o mais vertical possível. Tem de haver um compromisso entre o peso do lastro o a força da boia, já que a boia deve conseguir içar os sensores na vertical, enquanto o lastro não pode ser levantado pela boia, mas deve ser possível de ser extraído da água quando for desejado extrair os dados do *datalogger* ou simplesmente mudar o sistema de lugar. Neste caso, a vantagem dos tubos de PPR é a sua baixa densidade, tornando-os muito leves na água e assim exigindo menor força de sustentação por parte do flutuador.

### 5.3 Sistema dos cabos de alimentação e comunicação

Para ligar os sensores ao *datalogger* e entre eles mesmos, é necessário usar cabos de quatro núcleos condutores, dois para alimentação e dois para as comunicações no protocolo RS-485. Para o sistema ser verdadeiramente modular, tem de ser possível adicionar ou retirar sensores ao sistema facilmente. Surgiu o problema de não haver disponível no mercado conectores à prova de água capazes de suportar a pressão exercida pela água a um preço acessível. Para solucionar este problema, foi desenvolvido um sistema de cabos que usa ligações de canalizações em PVC, como os da Figura 5.7 para isolar as conexões entre os cabos e os sensores.



*Figura 5.7 - Conectores em PVC usados para isolar as ligações entre sensores e o datalogger. Foram usados conectores de 3/4 de polegada para as comunicações, alimentação e reprogramação e de 1 polegada para o cartão SD do datalogger.*

### 5.3.1 Sistema de cabos e conectores

De seguida foi testado um cabo com as extremidades isoladas com roscas de PVC, como mostra a Figura 5.8. Os cabos são ligados a um conector USB-B de 4 contactos macho, enquanto do lado do sensor é instalada a versão fêmea do mesmo conector.



*Figura 5.8 - Cabo de comunicação e energia com conectores USB-B isolados por ligações de PVC à esquerda. Conector USB fêmea do datalogger para comunicação e alimentação com os sensores à direita.*

O sistema fica assim modular, pois sempre que se quiser acrescentar um sensor, é apenas necessário conectar uma extremidade do cabo a uma entrada livre do último sensor instalado ou ao *datalogger* e a outra extremidade ao novo sensor. Na Figura 5.9 pode ser ver a ligação do *datalogger* ao sensor.



*Figura 5.9 – Datalogger e sensor de salinidade ligados pelo cabo de energia e comunicações, com os conectores de PVC.*

## 5.4 Montagem dos sensores no suporte

Como na Figura 5.10, o sensor é preso à estrutura mecânica por abraçadeiras, bem como o *datalogger*. A estrutura é então presa na extremidade inferior a um lastro de peso e a superior a uma boia que mantém a estrutura na vertical. Como o sistema fica completamente submerso, e para facilitar a sua extração, uma corda é amarrada à estrutura e à plataforma presente em Esposende. Para largar o sistema sem um ponto de referência (por exemplo no meio de um rio, onde não há plataformas) bastava amarrar a corda a uma boia de sinalização para o sistema ser facilmente detetado e recuperado.



*Figura 5.10 – O sistema do datalogger (acima) e do sensor de salinidade (abaixo) montados na estrutura. Quando instalado no rio, o peso de aço e a boia foram suficientes para manter o sistema esticado verticalmente sem se mover de lugar, mesmo com alguma corrente causada pela descida da maré.*

## 6. TESTES E RESULTADOS

### 6.1 Robustez mecânica do sensor

Inicialmente testou-se o sistema com uma só rosca e um tampão a isolar os cabos de reprogramação dos sensores de salinidade. Após três meses debaixo de água a uma profundidade até 5 metros em Esposende (varia de acordo com a maré), a camara isolada no interior da rosca continuava seca, o que pode ser observado na Figura 6.1.



Figura 6.1 – Sensor de salinidade com rosca de PVC que veda os cabos de reprogramação. O sensor apresenta marcas de sujidade e corrosão do período de 3 meses em que esteve a fazer leituras no rio Cávado, mas continua funcional.

Ao fim de mais de três meses de testes, o sensor continuava a medir corretamente a pressão e temperatura, resultando nos dados do gráfico da Figura 6.2. Neste gráfico é possível ver a variação cíclica antes as marés mortas e vivas, tendo em conta que este ciclo nem sempre é tão visível na maré baixa como na maré alta, muitas vezes por consequência da chuva e de alterações do caudal do rio. É ainda possível ver o aumento da temperatura à medida que se afasta do inverno.

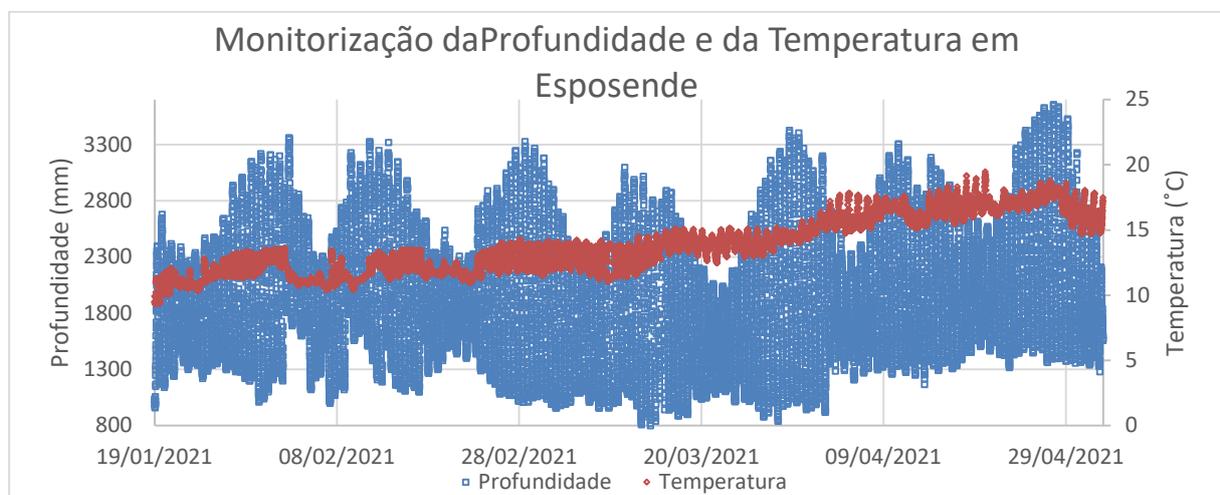


Figura 6.2 - Gráfico dos dados de profundidade e temperatura da água no rio Cávado, em Esposende, entre os dias 19 de janeiro a 3 de maio de 2021.

## 6.2 Sistema de Monitorização

Este sistema foi instalado no rio Cávado no dia 2 de julho de 2021. Os dados foram recolhidos com sucesso no dia 5 de julho. O sensor não apresentava sinais de desgaste nem *biofouling*, mas acumulou algumas algas, principalmente no lastro, como é visível na Figura 6.3. Esta acumulação pode ser um problema em futuras instalações, visto que pode arrastar o sensor para fora do ponto de instalação, caso a ancoragem através do lastro seja insuficiente. O sistema de conectores de PVC funcionou como esperado, pelo que manteve o cartão e os contactos do *datalogger* e do sensor isentos de humidade.



*Figura 6.3 - Sistema de monitorização depois de três dias de teste de campo. A acumulação de algas é visível principalmente no lastro e ligeiramente no datalogger. O sensor manteve-se relativamente limpo.*

### 6.3 Sensor de Salinidade

O sensor de salinidade foi ligado à rede RS-485 do *data logger* já existente no local, instalado fora de água e com ligação à rede elétrica, para uma verificação de funcionamento durante duas semanas. As leituras são feitas a cada 10 minutos, dando ao sensor 1 minuto no máximo para estabilizar. Para aproveitar a instalação de ancoragem no leito fluvial do Cávado, foi usado tubo PPR para segurar os sensores. Esta configuração permite testar o material, visto que também será usado na instalação dos sensores no rio Lima. Na Figura 6.4 é apresentada a estrutura com o sensor, antes de o instalar no rio.

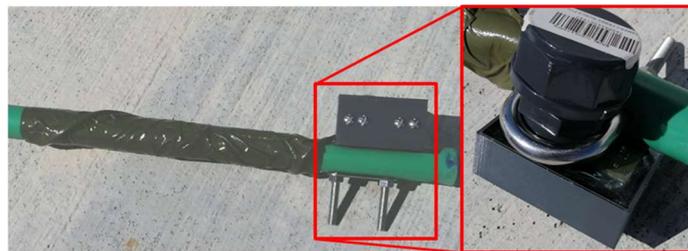


Figura 6.4 - Sensor de salinidade montado num tubo PPR antes de ser instalado no rio Cávado, em Esposende. O Sensor é preso ao tubo por uma manilha de aço inox pela traseira do sensor, para não perturbar a medida da salinidade.

O sensor esteve instalado doze dias, a adquirir os dados de salinidade, pressão e temperatura. Foram adquiridos dados de salinidade entre os 1,62 e 35 PSU, pressão entre 1087 mbar e 1297 mbar, e temperatura entre 14,04 °C e 20,49 °C, como é possível observar no gráfico da Figura 6.5. Os espaços sem dados de salinidade são resultantes de medições fora da gama de leitura do sensor. A relação entre a salinidade da água e a altura da maré é evidente, visto que na maré alta a salinidade é maior, enquanto na maré baixa a salinidade chega a estar abaixo da escala de medição do sensor.

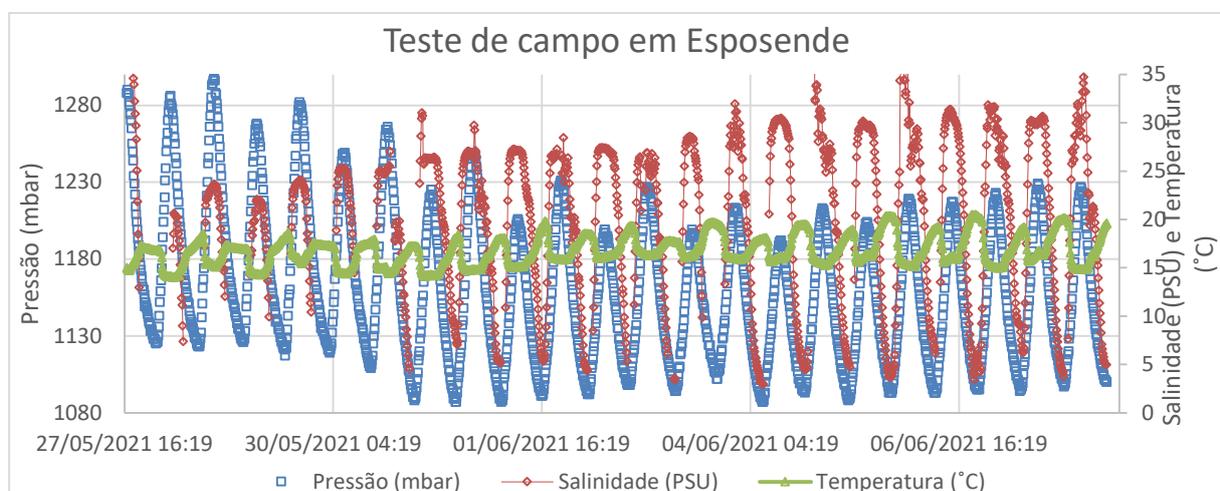


Figura 6.5 - Gráfico dos resultados do teste de campo em Esposende, entre os dias 27 de maio e 8 de junho. A azul está a pressão, a vermelho a salinidade e a verde a temperatura.

A salinidade apresentou valores inconstantes em algumas marés altas, sensivelmente entre as 21:00 e as 7:00, ou seja, durante o mesmo período do dia em que o poste de iluminação pública se encontrava ligado (gráfico dos resultados na Figura 6.6). É possível que estas variações sejam consequência da ligação ao poste de iluminação (que alimenta eletricamente o sistema durante a noite), que pode ter alguma ligação de massa em contacto com a água salgada (mais condutora) da maré alta, introduzindo ruído na leitura da salinidade.

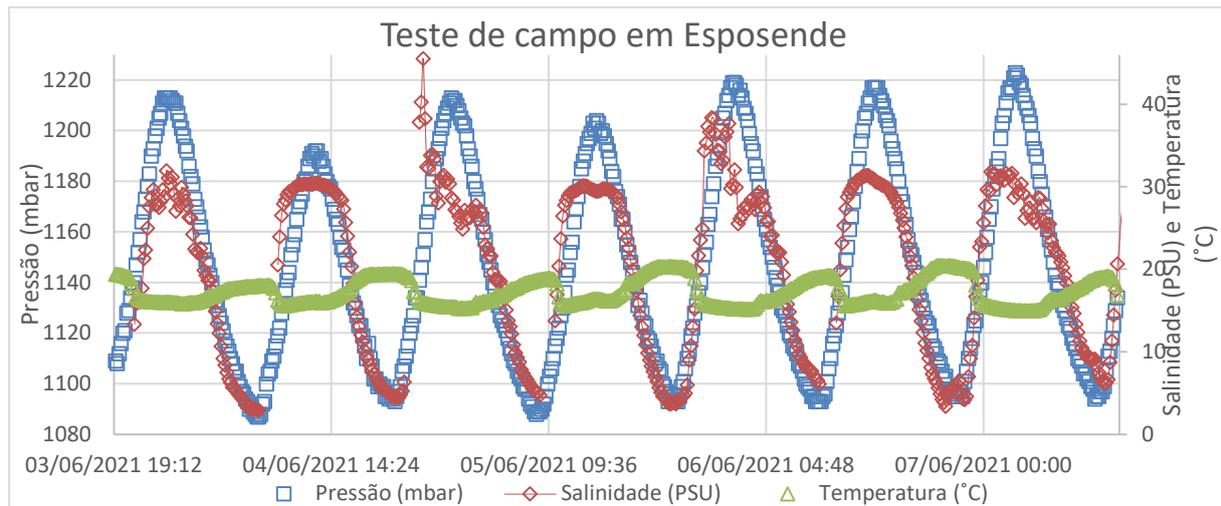


Figura 6.6 - Gráfico dos resultados do teste de campo em Esposende, entre os dias 3 e 7 de junho. A azul está a pressão, a vermelho a salinidade e a verde a temperatura. As perturbações nos picos da salinidade acontecem durante a noite, geralmente entre as 21:00 e as 7:00.

Na Figura 6.7 é apresentado o sensor debaixo de água, em Esposende, ao fim de duas semanas a fazer leituras de salinidade, pressão e temperatura. Há claras deposições de algas e *biofouling*, mas a performance do sensor parece inalterada por este fator.



Figura 6.7 - Sensor de salinidade instalado em Esposende ao fim de duas semanas a adquirir dados de salinidade, temperatura e pressão. À esquerda a perspectiva de cima do sensor, onde as algas que se depositam na estrutura de suporte são visíveis. À direita a perspectiva de frente.

## 6.4 Sensor de ondulação

Aproveitando as características do sensor de pressão e temperatura, o mesmo foi testado para medir a ondulação. Tendo em conta que as ondas do mar podem variar o seu período entre 1 e 13 segundos, o sensor faz medições de pressão a uma frequência de 50 Hz, durante 30 segundos, dando origem a 1500 dados de pressão. Ao fim dos 30 segundos, o sensor envia os dados para o *datalogger*. O sensor foi testado no rio Douro, em Melres, onde durante a época balnear é comum a passagem de barcos a motor, dando origem a ondas de cerca de 10 cm de altura e períodos menores que 2 segundos, como na Figura 6.8.



Figura 6.8 - Fotografia de uma onda resultante da passagem de um barco a motor no rio Douro, em Melres.

O sensor foi capaz de medir a ondulação, como nos gráficos da Figura 6.9 e da Figura 6.10. É possível ver que no gráfico da Figura 6.9 o rio estava relativamente calmo, até que passou um barco e começou a haver perturbação da água.

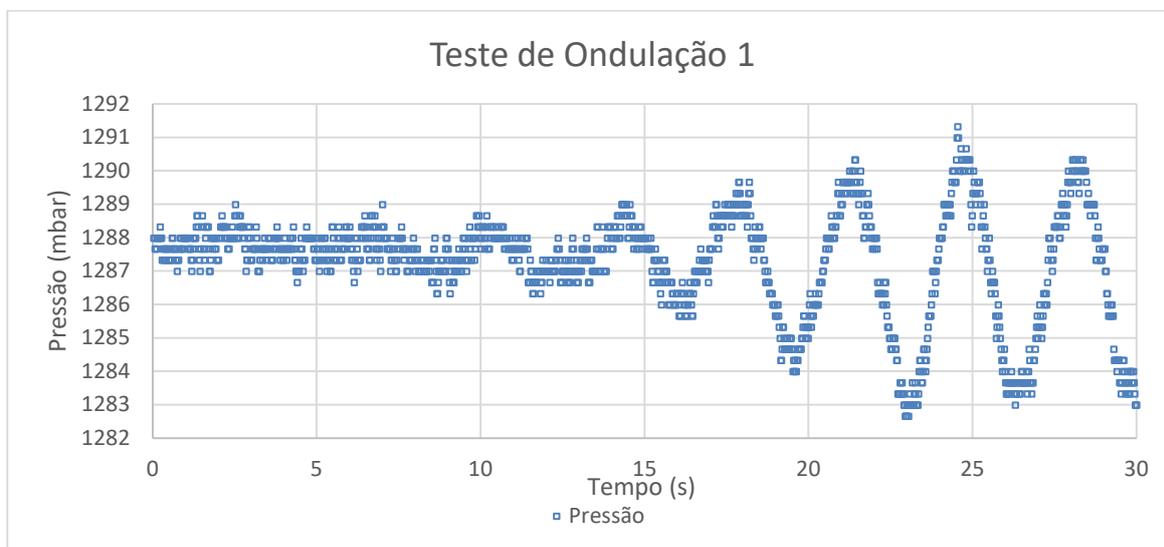


Figura 6.9 - Gráfico dos dados do teste de ondulação, em que o sensor deteta a perturbação causada por um barco a passar.

No gráfico da Figura 6.10, o rio já se encontrava com a perturbação do barco e começou a acalmar.

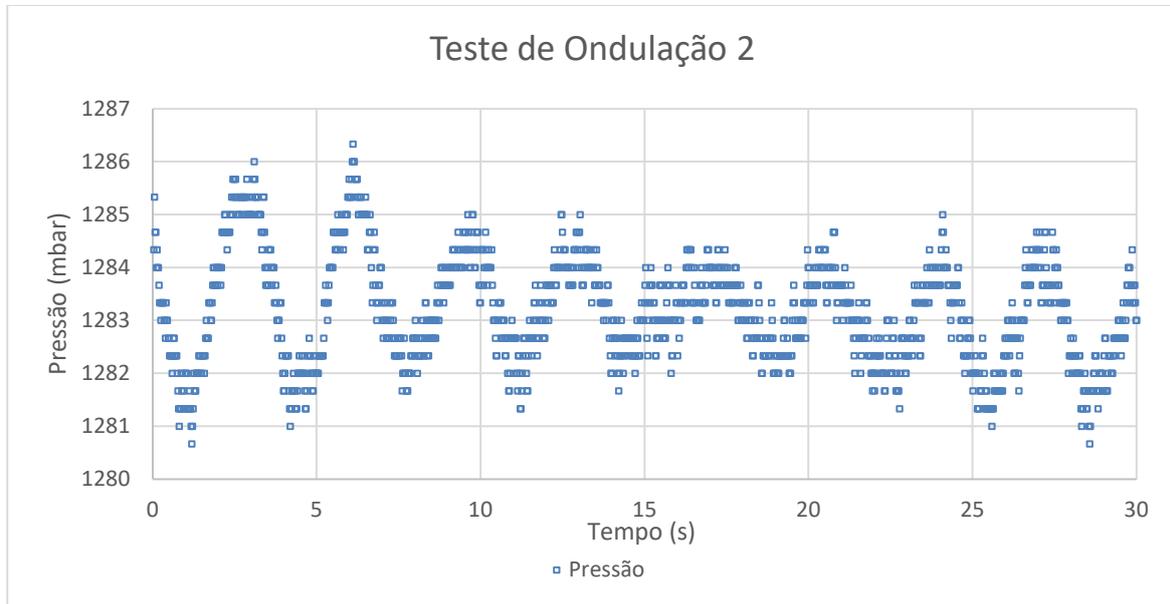


Figura 6.10 - Gráfico dos dados do teste de ondulação, em que é visível a diminuição da amplitude das ondas.

## 7. CONCLUSÕES E TRABALHO FUTURO

Neste capítulo final, vão ser expostas as conclusões deste trabalho de dissertação, bem como as perspectivas de trabalho para um futuro próximo.

### 7.1 Conclusões

O objetivo desta dissertação era continuar o desenvolvimento do sensor de salinidade previamente desenvolvido, e integrá-lo numa rede de sensores para monitorizar a salinidade da coluna de água no estuário.

O sensor de salinidade foi desenvolvido com a configuração de quatro elétrodos, neste caso parafusos de aço inoxidável. Mostrou-se capaz de medir a salinidade entre 2 e 47 PSU, com erro associado inferior a 0,23% com um consumo em modo *standby* de 26  $\mu$ A e de 10 mA durante a leitura da salinidade, alcançando um melhoramento significativo quando comparado com o sensor anterior, que apresentava erro inferior a 0,5% na gama de 10 g/L a 47 g/L e o consumo de 1,2 mA em *standby* e 12 mA em durante uma leitura. É ainda capaz de medir valores de salinidade inferiores e superiores a esta gama, mas o erro aumenta consideravelmente por estar fora da gama de cálculo da PSS-78 (método prático para estimar a salinidade da água através da sua condutividade, entre 2 e 47 PSU[24]). As dimensões também foram reduzidas, passando de 100x100x55 mm para 75x45x25 mm, sem os conectores de PVC.

Em teste real, o sensor ficou duas semanas instalado no rio Cávado, em Esposende, tendo transmitido dados de salinidade, pressão e temperatura a cada dez minutos. Os dados adquiridos permitiram distinguir claramente a variação da salinidade da água em função da maré, sem alterações significativas durante o tempo de teste. Foram efetuados testes e robustez durante um período de 3 meses.

O sistema de monitorização, apesar de não ser testado relativamente ao objetivo de monitorizar toda a coluna de água com vários sensores, tem o conceito demonstrado ao mostrar o seu funcionamento com um sensor ligado ao *datalogger* e isolado da rede de energia, adquirindo dados de salinidade, pressão e temperatura.

Foi ainda desenvolvido um sistema modular, cujas ligações podem ser realizadas debaixo de água, utilizando comuns conexões em PVC de baixa custo, para isolar os conectores elétricos do *datalogger* e

dos sensores, tornando o sistema mais modular, permitindo montar um número variável de sensores e a recuperação do cartão SD do *data logger*, onde estão guardados os dados.

## 7.2 Trabalho Futuro

Findada esta dissertação, há melhorias que podem ser feitas. Neste capítulo é abordado o futuro deste trabalho de investigação, separado por soluções possíveis para a continuação da evolução do sensor de salinidade e do sistema de monitorização.

### 7.2.1 Sensor de salinidade a quatro pontas

O sensor desenvolvido nesta dissertação foi melhorado a partir de uma base previamente desenvolvida. No final já foi possível efetuar leituras com erro muito inferior ao original, com um consumo muito mais reduzido, o design menos volumoso, entre outras melhorias. Mesmo assim o sensor deixa margem manobra para melhorar, nomeadamente no software do microcontrolador, na estabilização do sensor antes das leituras e no fabrico.

O software pode diminuir tempo de processamento e conseqüentemente diminuir ainda mais o consumo de energia. Existem modos de poupança de energia (inexistentes no microcontrolador escolhido) que também podem ajudar à eficiência do sensor.

A estabilização do sensor é um problema que surgiu na resolução de outro. A fim de reduzir o erro e aumentar a escala de medição, a resistência entre os elétrodos foi aumentada de 100  $\Omega$  para 100 k $\Omega$ , o que propicia a existência de carga nas capacidades dos elétrodos, e conseqüente destabilização. Diminuir o tempo que o sensor demora até estar pronto a fazer leituras é das melhorias mais urgentes de ser resolvida. Este objetivo pode ser atingido pelo uso de um MOSFET entre os elétrodos interiores, funcionando como resistência variável, que antes da leitura ser feita descarrega as capacidades dos elétrodos, mas mantém uma resistência de entrada elevada quando desligado.

Com a ligação em rede de vários sensores poderão surgir dificuldades de estabilização, quando a alimentação é comum aos vários sensores da rede (que pode surgir pela massa comum na alimentação ou nas comunicações). Este problema será mais evidente quando os sensores estão muito próximos, tipicamente menos de 50 cm.

O fabrico em escala deve ser estudado, caso seja necessária a instalação de um número alargado de sensores, para aumentar a eficiência da montagem, sem perder fiabilidade e repetibilidade entre sensores. É ainda possível reduzir mais a dimensão do sensor, mas será necessário testar a

diminuição da área dos elétrodos (parafusos de inox) e o espaçamento entre eles. Poderão também serem testados encapsulamentos para proteger o sensor de algas ou materiais que possam afetar a medição da salinidade.

### 7.2.2 Sensor de salinidade indutivo

Outra abordagem possível para a medição da salinidade que pode ser estudada é a técnica indutiva de medição de condutividade, que pode ser viável pela sua teórica invulnerabilidade a outros sensores que tenham contacto do circuito com a água, como a tipologia a quatro pontas usada nesta dissertação. Pode também ser uma mais-valia para aplicações de longo tempo de instalação ou *deepsea*, por não ser necessário haver contactos elétricos com a água, sendo possível maiores períodos de operação submerso.

### 7.2.3 Sistema de monitorização

O sistema pode ser adaptado para ser usado em mais situações de monitorização de águas salgadas, bem como para outros parâmetros. Dependendo das premissas do estudo a ser feito, também podem ser instaladas novas funcionalidades, como comunicações por rádio frequência ou acústica, diferentes opções de ancoragem ou de disposição dos sensores ou outras formas de armazenamento e transmissão dos dados.

O funcionamento do sensor foi comprovado, assim é possível passar para a próxima etapa, que é integrá-lo no sistema de monitorização do rio Lima.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] J. P. Baptista, “Sistema Monitorização Subaquática,” Universidade do Minho, 2018.
- [2] “OSIL | Data Buoys | Monitoring Systems | Water Column & Seabed Sampling.” <https://osil.com/> (accessed Nov. 15, 2019).
- [3] “APA - Aquisição de dados em tempo real.” <http://apambiente.pt/index.php?ref=x76> (accessed Nov. 15, 2019).
- [4] “Seafloor to Surface to Satellite to Shore – Woods Hole Oceanographic Institution.” <https://www.whoi.edu/oceanus/feature/seafloor-to-surface-to-satellite-to-shore/> (accessed Nov. 15, 2019).
- [5] B. S. Halpern *et al.*, “GlobalMapImpactMarineHalpernetal2008,” *Science*, vol. 319, no. February, pp. 948–952, 2008.
- [6] “Saline Water and Salinity.” [https://www.usgs.gov/special-topic/water-science-school/science/saline-water-and-salinity?qt-science\\_center\\_objects=0#qt-science\\_center\\_objects](https://www.usgs.gov/special-topic/water-science-school/science/saline-water-and-salinity?qt-science_center_objects=0#qt-science_center_objects) (accessed Nov. 19, 2019).
- [7] “Understanding Salinity.” <http://www.water.wa.gov.au/water-topics/water-quality/managing-water-quality/understanding-salinity> (accessed Nov. 19, 2019).
- [8] K. Watling, “Measuring salinity,” 2007.
- [9] O. of Wetlands, “Volunteer Estuary Monitoring A Methods Manual Second Edition.”
- [10] S. M. C. Ramalho, “Sensor de Condutividade com Condicionamento de Sinal,” Técnico de Lisboa, 2009.
- [11] “InPro 7250ST PEEK Conductivity Sensor - Overview - METTLER TOLEDO.” <https://www.mt.com/ph/en/home/products/Process-Analytics/conductivity-sensor/conductivity-meter-inductive/probe-InPro-7250-ST.html> (accessed Nov. 15, 2019).
- [12] “Transmissores e sensores de condutividade para todas as indústrias | Endress+Hauser.” <https://www.pt.endress.com/pt/produtos/analitica/transmissores-condutividade-sensores> (accessed Nov. 15, 2019).
- [13] MeterLab®, “Conductivity Theory and Practice - Radiometer Analytical SAS,” 2005.
- [14] “SE 604 Conductivity Sensor | KNICK.” <https://www.knick-international.com/en/products/industrial-sensors/cond-sensors/se-604/index.html> (accessed Nov. 15, 2019).

- [15] “SE 600 Conductivity Sensor | KNICK.” <https://www.knick-international.com/en/products/industrial-sensors/cond-sensors/se-600/index.html> (accessed Nov. 15, 2019).
- [16] “Refratômetro Óptico Soma Mede Salinidade Marinho Shr-10atc.” <https://www.universodoaquario.com.br/refratometro-optico-soma-mede-salinidade-marinho-shr-10atc> (accessed Nov. 15, 2019).
- [17] “Separating the solvent from a solution – simple distillation - Separating mixtures - KS3 Chemistry Revision - BBC Bitesize.” <https://www.bbc.co.uk/bitesize/guides/zgvc4wx/revision/3> (accessed Apr. 09, 2021).
- [18] “Notes from the Field - Measuring Salinity from Space.” <https://earthobservatory.nasa.gov/blogs/fromthefield/2012/09/11/measuring-salinity-from-space/> (accessed Apr. 08, 2021).
- [19] “A Measure of Salt.” <https://earthobservatory.nasa.gov/images/78250/a-measure-of-salt> (accessed Sep. 23, 2020).
- [20] Mershon Jay, “Applying and Maintaining Analytical Sensors | FierceElectronics.” <https://www.fierceelectronics.com/components/applying-and-maintaining-analytical-sensors> (accessed Sep. 30, 2020).
- [21] “Conductivity-Temperature-Depth | Ocean Networks Canada.” <https://www.oceannetworks.ca/learning/ocean-sense/resources-lessons/conductivity-temperature-depth> (accessed Oct. 02, 2020).
- [22] SCOR/IAPSO Working Group 127, “The international thermodynamic equation of seawater-2010: Calculation and use of thermodynamic properties Intergovernmental Oceanographic Commission.”
- [23] J. P. Baptista *et al.*, “A four-probe salinity sensor optimized for long-term autonomous marine deployments,” in *OCEANS 2019 - Marseille*, Jun. 2019, pp. 1–5. doi: 10.1109/OCEANSE.2019.8867544.
- [24] E. L. Lewis, “The practical salinity scale of 1978 and its antecedents,” *Marine Geodesy*, vol. 5, no. 4, pp. 350–357, 1982, doi: 10.1080/15210608209379432.
- [25] “Instituto Hidrográfico.” <https://www.hidrografico.pt/op/27> (accessed Nov. 15, 2019).
- [26] “SeaSat Mission — the world's first satellite mission dedicated to oceanography.” <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/s/seasat> (accessed Nov. 15, 2019).

- [27] "PROJECT – MarinEye – A New Concept of Ocean Observation."  
<http://marineye.ciimar.up.pt/projectscope/> (accessed Nov. 15, 2019).
- [28] "Monitorização ambiental e previsão operacional." <https://www.hidrografico.pt/op/20>  
(accessed Oct. 27, 2021).
- [29] NATIONAL INSTITUTE OF OCEAN TECHNOLOGY - India, "DESIGN OF MOORING SYSTEM FOR MET - OCEAN AND TSUNAMI DATA COLLECTION," p. 50, 2012.
- [30] Oregon Wave Energy Trust, "Advanced Anchoring and Mooring Study," p. 192, 2009.
- [31] D. T. Monfort, "Design optimization of the mooring system for a floating offshore wind turbine foundation," Técnico de Lisboa, 2017.
- [32] "OpenStreetMap." <https://www.openstreetmap.org/#map=15/41.6840/-8.8364> (accessed Apr. 16, 2021).
- [33] "TE Connectivity: Connectors & Sensors for Harsh Environments." <https://www.te.com/us-en/home.html> (accessed May 25, 2021).