

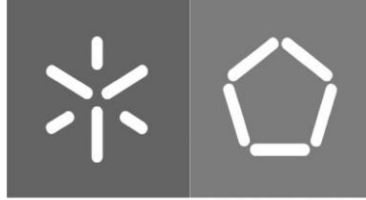


Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Maria João Neves de Alvim Barroso **Sensor de Salinidade Indutivo**

Maria João Neves de Alvim Barroso

Sensor de Salinidade Indutivo



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Maria João Neves de Alvim Barroso

Sensor de Salinidade Indutivo

Dissertação de Mestrado
Mestrado em Engenharia Eletrónica
Industrial e Computadores
Instrumentação e Microssistemas Eletrónicos [IME]

Trabalho efetuado sob a orientação do

Professor Doutor Luís Miguel Valente Gonçalves

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, 30 de Julho de 2023

Maria João Neves de Alvim Barroso

Maria João Neves de Alvim Barroso

AGRADECIMENTOS

Esta dissertação de Mestrado foi desenvolvida de forma individual, entretanto, não posso deixar de expressar minha profunda gratidão pelo apoio e presença de várias pessoas ao longo desta jornada.

Desejo expressar meu sincero reconhecimento ao meu orientador e coordenador do projeto, Luís Miguel Gonçalves, pelo aconselhamento, orientação e pelas condições proporcionadas durante todo o processo.

Aos meus colegas de laboratório, gostaria de agradecer pelo companheirismo, apoio e colaboração constante. Em particular, agradeço imensamente a João Rocha, Carlos Faria e Maria Camila Penso pela generosidade e pelo suporte que forneceram.

Às oficinas do departamento de eletrónica, especialmente a Carlos Torres e Paulo Silva, quero expressar minha gratidão pela partilha de conhecimento e pelo acesso ao material que foram essenciais para o desenvolvimento deste trabalho.

Gostaria de dedicar um agradecimento especial aos meus pais, irmãos e namorado, pela paciência, apoio e compreensão inestimáveis ao longo de todo este percurso.

A todas as outras pessoas que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho, meu sincero agradecimento.

Por fim, desejo expressar minha profunda gratidão a todos os mencionados e a todos aqueles que estiveram presentes e ofereceram seu apoio ao longo desta jornada.

Meu mais sincero obrigado a todos.

Este trabalho foi financiado pelo Programa Operacional Regional do Norte (NORTE2020), Projeto Atlantida, NORTE-01-0145-FEDER-000040 e por fundos nacionais da FCT, projeto PlastiSensor, PTDC/EAM-OCE/6797/2020.

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, 30 de julho de 2023

Maria João Neves de Alvim Barroso

Maria João Neves de Alvim Barroso

RESUMO

A salinidade é definida como o peso em gramas de sais dissolvidos num quilograma de água do mar. A medição da salinidade é importante em oceanografia na medida em que tem efeito sobre a vida marinha e a qualidade da água. Condutividade e salinidade anormais são indicativas de poluição, independentemente de fontes antropogénicas ou naturais. As espécies aquáticas adaptam-se a níveis específicos de salinidade. Se este nível for alterado, pode resultar na morte dessas espécies devido às alterações nas concentrações de oxigénio (maior salinidade, menor concentração de oxigénio dissolvido). Por essa razão, algumas espécies adaptaram-se a viver em estuários, onde a salinidade está constantemente a mudar.

A determinação da salinidade é geralmente feita de forma indireta, medindo a condutividade elétrica, que depende da salinidade e da temperatura.

Ao longo desta dissertação é demonstrado o desenvolvimento de um sensor de salinidade indutivo de baixo custo e baixo consumo a integrar numa rede de sensores para medição da coluna de água desde estuários até aplicações em oceanos profundos.

Palavras-Chave: Baixo consumo, Condutividade, Salinidade, Sensor Indutivo

ABSTRACT

Salinity is defined as the weight in grams of dissolved salts in one kilogram of seawater. Salinity measurement is important in oceanography as it influences marine life and water quality. Abnormal conductivity and salinity are indicative of pollution, regardless of anthropogenic or natural sources. Aquatic species are adapted to specific levels of salinity. If this level is altered, it can result in the death of these species due to changes in oxygen concentrations (higher salinity, lower dissolved oxygen concentration). For this reason, some species have adapted to live in estuaries, where salinity is constantly changing.

The determination of salinity is usually done indirectly by measuring electrical conductivity, which depends on salinity and temperature.

Throughout this dissertation the development of a low-cost and low-power inductive salinity sensor to be integrated in a sensor network for water column measurement from estuaries to deep ocean applications is demonstrated.

Keywords: Conductivity, Inductive Sensor, Low-Power, Salinity

ÍNDICE

Agradecimentos	iii
Resumo	v
Abstract	vi
Índice de Figuras.....	x
Índice de Tabelas	xiv
Índice de Abreviaturas, Siglas e Acrónimos	xv
1 Introdução	1
1.1 Enquadramento e Motivação.....	1
1.2 Objetivos	4
1.3 Organização do Documento	4
2 Fundamentos teóricos e revisão da literatura.....	7
2.1 Métodos de medição de salinidade	7
2.1.1 Titulação de Cloro	7
2.1.2 Sensores de condutividade de contacto	8
2.1.3 Sensores de condutividade indutivo	9
2.1.4 Refratómetro	10
2.2 Sensor Indutivo.....	11
2.2.1 Princípio de Funcionamento	11
2.2.2 Sensor Indutivo utilizando dois transformadores	12
2.2.3 Indutor.....	13

2.3	Núcleos do Indutor	19
2.4	Condutividade elétrica.....	21
2.4.1	Condutividade e Temperatura.....	23
2.5	Cálculo da Salinidade	25
2.6	Revisão de literatura	26
3	Projeto de Sensor de Salinidade.....	33
3.1	Projeto do Sensor Indutivo	33
3.1.1	Seleção dos indutores	34
3.1.2	Encapsulamento	44
3.2	Eletrónica de Instrumentação.....	48
3.2.1	Oscilador	49
3.2.2	Retificador de Onda Completa	49
3.2.3	Filtro RC.....	50
3.2.4	Amplificador Operacional.....	50
3.3	Pilha LI-ION	51
3.4	Carregador de Bateria.....	52
3.5	Reguladores	52
3.6	Sensor de Pressão e Temperatura	54
3.7	Microcontrolador.....	55
3.8	Desenho do Circuito Impresso	56
3.9	Processamento de Dados	56
4	Testes e Resultados.....	61
4.1	Simulação e teste da eletrónica de instrumentação	61
4.2	Testes e Resultados funcionais.....	63

4.3	Testes com o sensor encapsulado.....	65
4.4	Protótipo Final	67
5	Conclusão e Trabalho Futuro	70
5.1	Conclusão	70
5.2	Trabalho futuro	72
	Bibliografia.....	73

Índice de Figuras

Figura 1-1- Faixa de tolerância de salinidade das espécies.....	2
Figura 1-2- Óleo ou hidrocarbonetos podem reduzir a condutividade da água. (crédito da foto: Lamiot via Wikimedia Commons)	3
Figura 1-3- Efeito da salinidade na convecção do oceano.....	3
Figura 2-1-Bureta de Knudsen.....	7
Figura 2-2-Martin Knudsen no laboratório.....	7
Figura 2-3-Esquema sensor com dois elétrodos.....	8
Figura 2-4-Sensor com dois elétrodos comercial.....	8
Figura 2-5-Esquema sensor com quatro elétrodos	9
Figura 2-6 - Sensor com quatro elétrodos comercial.....	9
Figura 2-7-Esquema de sensor indutivo.....	9
Figura 2-8- InPro 7250 series	10
Figura 2-9-CLS54D	10
Figura 2-10-Refratômetro da marca Kasvi	10
Figura 2-11-Construção de um sensor de condutividade utilizando um transformador	11
Figura 2-12-Construção de um sensor de condutividade usando dois transformadores.....	11
Figura 2-13- A condutividade pode ser medida por meio de indutância por um par de bobinas magnéticas.....	12
Figura 2-14-Esquemático equivalente ao funcionamento de um sensor indutivo toroidal.....	13
Figura 2-15-Linhas de campo magnético de um solenoide.....	13
Figura 2-16- Raio e comprimento do solenoide.....	14
Figura 2-17- Bobina com formato toroidal	15
Figura 2-18-Campo magnético na bobina toroidal.....	15
Figura 2-19-Modelo elétrico equivalente de um Indutor real	16
Figura 2-20-Diagrama de bode da impedância do indutor, funcionamento como indutor e condensador	17
Figura 2-21-Núcleo de ar	18
Figura 2-22-Núcleo de Ferro	18
Figura 2-23-Aço Laminado	19
Figura 2-24-Núcleo de Ferrite.....	19

Figura 2-25- Estrutura cristalina da ferrite.....	21
Figura 2-26-Fatores que afetam o volume da água (como chuva forte ou evaporação) afetam a condutividade.....	22
Figura 2-27- Dependência da condutividade em relação à temperatura.....	24
Figura 2-28- Sensor de Salinidade.....	27
Figura 2-29-Topologia de rede.....	27
Figura 2-30-Desenho do sensor desenvolvido (Ribeiro et al)	28
Figura 2-31-Dimensões do sensor desenvolvido.....	28
Figura 2-32-Esquemático do sensor	29
Figura 2-33-Sensor desenvolvido (Karuppuswami et al)	29
Figura 2-34-Trabalho experimental no sensor indutivo	30
Figura 2-35-Esquemático do sensor Indutivo (Schoinas et al)	31
Figura 3-1-Funcionamento do sensor	33
Figura 3-2-Princípio de funcionamento	34
Figura 3-3-Tensão na bobina de recepção nos diferentes modelos.....	36
Figura 3-4-Teste em laboratório.....	36
Figura 3-5-Tensão de saída em função da frequência (lado esquerdo) e tensão de saída em função da salinidade (lado direito) de cada modelo.....	37
Figura 3-6-Tensão de saída em função da frequência (lado esquerdo) e tensão de saída em função da salinidade (lado direito) do modelo E e F	39
Figura 3-7-Tensão de saída em função da salinidade entre 100 kHz e 150 kHz- Modelo F	39
Figura 3-8- Tensão de saída em função da frequência (lado esquerdo) e tensão de saída em função da salinidade (lado direito) com indutor de material N87	41
Figura 3-9- Tensão de saída em função da frequência para diferentes valores de tensão de excitação	42
Figura 3-10-Tensão de saída em função da frequência (lado esquerdo) e tensão de saída em função da salinidade (lado direito) com material Mn-Zn	43
Figura 3-11-Tensão de saída em função da frequência 5 PSU	43
Figura 3-12-Sensor isolado em silicone	45
Figura 3-13- Tensão de saída em função da frequência (lado esquerdo) e tensão de saída em função da salinidade (lado direito) em silicone.....	45
Figura 3-14-Sensor imerso Resina Epóxi.....	45

Figura 3-15-Tensão de saída em função da frequência (lado esquerdo) e tensão de saída em função da salinidade (lado direito) em resina epóxi.....	46
Figura 3-16-Spray isolante Plastik 70	46
Figura 3-17-Tensão de saída em função da frequência (lado esquerdo), tensão de saída em função da salinidade (lado direito) e tensão de saída em função da salinidade em escala logarítmica em Plastik 70.....	47
Figura 3-18- Incrustação	47
Figura 3-19-Diagrama de blocos do sistema total	49
Figura 3-20-Esquemático do oscilador no Altium	49
Figura 3-21-Esquemático do Retificador de onda completa no Altium.....	50
Figura 3-22-Esquemático filtro RC no Altium.....	50
Figura 3-23-Ampop OPA2889ID	51
Figura 3-24-Pilha LI-ION.....	52
Figura 3-25-DFROBOT DFR0667	52
Figura 3-26-Regulador Buck (direita) e Regulador Inversor (esquerda).....	53
Figura 3-27-Esquemático do Regulador Buck, no Altium	53
Figura 3-28-Esquemático do Regulador Inversor, no Altium	54
Figura 3-29-Sensor de pressão e temperatura, MS5837-30BA.....	54
Figura 3-30- STM32L010K8T6	55
Figura 3-31-Esquemático do microcontrolador no Altium	55
Figura 3-32-PCB (lado esquerdo Top Layer e do lado direito Bottom Layer).....	56
Figura 3-33- LTC1480-RS485	57
Figura 3-34- Fluxograma programa principal	58
Figura 3-35- Fluxograma Interrupções.....	59
Figura 3-36- Fluxograma processamento_dados.....	60
Figura 4-1-Oscilador TINA-TI.....	61
Figura 4-2-Resultados de Simulação do Oscilador TINA-TI (onda quadrada vermelho e onda sinusoidal verde).....	61
Figura 4-3-Resultado teste em laboratório do oscilador	61
Figura 4-4-Circuito retificador para simulação em TINA-TI.....	62
Figura 4-5-Resultados de Simulação do Oscilador TINA-TI (onda de entrada amarelo e onda retificada verde).....	62

Figura 4-6-Resultado teste em laboratório do retificador.....	63
Figura 4-7- Regulador de tensão positiva (à esquerda) e Regulador de tensão negativa (à direita) .	63
Figura 4-8- Saída do oscilador, saída da bobina recetora e retificação da onda.....	64
Figura 4-9- Encapsulamento do sensor em silicone	65
Figura 4-10- Tensão de saída em função da salinidade.....	66
Figura 4-11- Função de calibração	67
Figura 4-12- Elaboração do protótipo.....	67
Figura 4-13- Parte superior do protótipo	68
Figura 4-14- Ligação Re-Programação Microcontrolador e Datalogger	68

Índice de Tabelas

Tabela 2-1- Valores dos parâmetros para o cálculo da salinidade	25
Tabela 2-2- Resumo Revisão da Literatura	32
Tabela 3-1- Dimensões dos modelos A, B,C e D	35
Tabela 3-2-Dimensões dos modelos E e F	38
Tabela 3-3- Dimensões do modelo de N87	40
Tabela 3-4- Dimensões do modelo de Mn-Zn	42
Tabela 3-5- Resumo testes realizados em laboratório	44
Tabela 4-1- Valores de tensão, em mV na bobina de recepção com o sensor encapsulado	65
Tabela 4-2- Resultados de testes finais, em mV, no sensor encapsulado	66

Índice de Abreviaturas, Siglas e Acrónimos

AC	<i>Alternating Current</i>
Co	Cobalto
Cu	Cobre
d	Diâmetro
Fe	Ferro
Mn	Manganês
Ni	Níquel
O	Oxigênio
<i>PCB</i>	<i>Printed Circuit Board</i>
RF	<i>Radio Frequency</i>
r	Raio
Zn	Zinco

1 Introdução

1.1 Enquadramento e Motivação

A salinidade define-se como o peso em gramas de sais dissolvidos num quilograma de água do mar. A medição da mesma é importante no estudo dos oceanos, pois, alterações na salinidade têm efeitos na vida marinha e na qualidade da água. As determinações de salinidade são feitas indiretamente, através da condutividade elétrica que, por sua vez depende, da salinidade e da temperatura.

A condutividade e a salinidade podem ter um impacto na vida aquática e na qualidade da água [1]. Valores incomuns podem ser indicativos de poluição, independentemente de ter sido causado pelo homem ou por fontes naturais (chuva excessiva ou seca).

As espécies aquáticas adaptam-se a níveis específicos de salinidade. Quando os valores de condutividade e salinidade se afastam demasiado da sua gama normal, podem ser prejudiciais para a vida aquática. Geralmente, os organismos aquáticos toleram apenas uma faixa específica de salinidade.

A adaptação fisiológica de cada espécie é determinada pela salinidade do ambiente circundante. A maioria das espécies de peixes são do tipo estenalina ("*Stenohaline*"), ou são exclusivamente de água doce ou exclusivamente de água salgada. No entanto, existem alguns organismos que podem adaptar-se a uma variedade de salinidades. Esses organismos são denominados por eurialinos ("*Euryhaline*"). Dentro deste grupo podem ser:

- Anádromos- vivem em água salgada, mas reproduzem-se em água doce.
- Catádromos - vivem em água doce e migram para a água salgada para desovar.
- Eurialinos verdadeiros- podem ser encontrados em água salgada ou doce em qualquer momento do ciclo de vida [1].

Na Figura 1-1 é possível observar a faixa de tolerância de salinidade de diversas espécies.



Figura 1-1- Faixa de tolerância de salinidade das espécies

A tolerância à salinidade depende dos processos osmóticos dentro de um organismo. Como já referido, cada grupo de organismos adapta-se a concentrações iônicas dos ambientes, e absorve ou excreta sais conforme necessário. A alteração da condutividade do ambiente, aumentando ou diminuindo os níveis de sal, afetará negativamente as habilidades metabólicas dos organismos. Para além disso, pode resultar em mortes dos seres vivos, isto porque, há alterações nas concentrações de oxigénio (maior salinidade, menor concentração de oxigénio dissolvido).

Algumas espécies, as mais resistentes, adaptaram-se à vida nos estuários, onde a salinidade está constantemente em fluxo. Embora as espécies estuarinas apresentem uma maior tolerância a mudanças rápidas nos níveis de salinidade em comparação com seus equivalentes de água doce e marinha, é importante notar que mesmo essas espécies podem sofrer se a salinidade se tornar excessivamente extrema.

Por outro lado, como já citado, um aumento ou diminuição repentina da condutividade pode indicar poluição. O escoamento agrícola ou vazamento de esgoto aumentará a condutividade devido aos iões de cloreto, fosfato e nitrato adicionais. Um derramamento de óleo ou adição de outros compostos orgânicos diminuiria a condutividade, pois esses elementos não se decompõem em iões. Em ambos os casos, os sólidos dissolvidos adicionais terão um impacto negativo na qualidade da água.

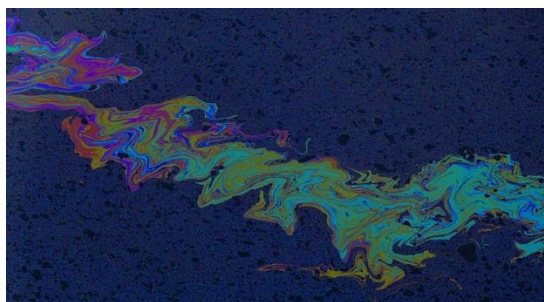


Figura 1-2- Óleo ou hidrocarbonetos podem reduzir a condutividade da água. (crédito da foto: Lamiot via Wikimedia Commons)

A salinidade contribui, também, para a convecção do oceano. Quanto maior for a concentração de sal dissolvido, maior é a densidade da água. O efeito da salinidade na densidade da água é uma das forças motrizes por detrás da circulação oceânica. Sempre que o gelo marinho se forma perto das regiões polares, não inclui os iões de sal. Em vez disso, as moléculas de água congelam, forçando o sal a formar bolsas de água salgada. Esta salmoura acaba por drenar do gelo, deixando uma bolsa de ar, aumentando assim a salinidade da água que envolve o gelo. Como esta água salina é mais densa do que a água circundante, afunda-se, criando um padrão de convecção que pode influenciar na circulação oceânica em centenas de quilómetros.

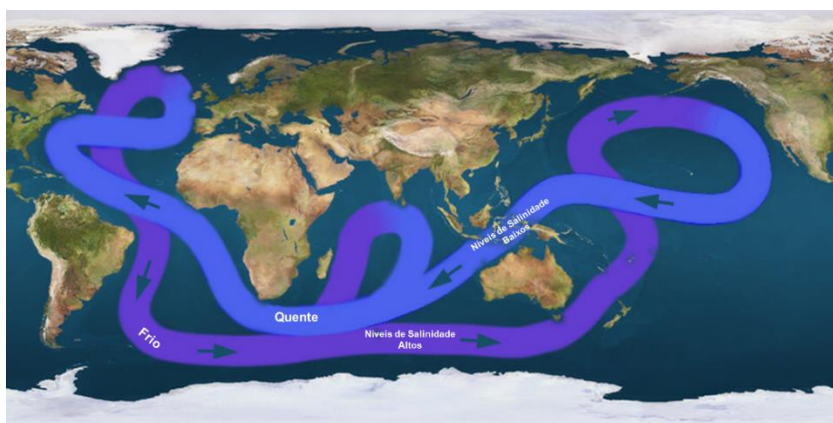


Figura 1-3- Efeito da salinidade na convecção do oceano

Uma das motivações para este projeto foi a área de aplicação, pois há pouco conhecimento em áreas aquáticas comparando com áreas terrestres. Desenvolver um sensor confere e cria maiores aptidões, aumentando o espírito crítico.

1.2 Objetivos

O objetivo da dissertação é desenvolver um sensor de salinidade indutivo, de baixo custo e elevada autonomia, para integrar numa rede de sensores para medir em coluna de água.

Esta dissertação integra-se no projeto ATLANTIDA, onde o objetivo, é desenvolver uma plataforma de monitorização do Oceano Atlântico Norte e ferramentas para a exploração sustentável dos recursos marinhos.

O sensor é composto por duas bobinas, bobina de acionamento e bobina de receção, e é projetado de forma que parte do meio líquido forme um caminho fechado de corrente. Aplicando uma tensão AC sinusoidal à bobina de acionamento induz uma corrente. A bobina de receção recebe o fluxo magnético do ciclo da água do mar e origina uma tensão por indução. É esperado uma relação linear entre a condutividade e a tensão de saída na bobina de receção. A partir da tensão induzida na bobina de receção, calcula-se a condutividade elétrica estimada, e a partir desta realiza-se o cálculo aproximado do valor da salinidade, tendo em conta a temperatura e pressão.

1.3 Organização do Documento

Esta tese documenta o trabalho realizado na elaboração de um sensor indutivo destinado a ser instalado numa coluna de água. O corpo principal está dividido da seguinte forma:

- Capítulo 1: Introdução

Este capítulo introduz o contexto e a motivação por trás do desenvolvimento do sensor indutivo.

- Capítulo 2: Fundamentos teóricos e revisão da literatura

Neste capítulo, são abordados os princípios teóricos que sustentam o trabalho realizado, bem como uma análise detalhada da literatura disponível sobre sensores indutivos e suas diversas aplicações em colunas de água.

- Capítulo 3: Projeto do Sensor Indutivo

Neste capítulo, são apresentados os detalhes da análise e do projeto do sensor indutivo. São abordadas as considerações de engenharia, como o dimensionamento dos componentes, circuitos para o correto funcionamento do sistema e a seleção dos materiais adequados para a elaboração do sensor.

Também são tratados os aspetos relacionados ao design da placa de circuito impresso (PCB) utilizada no sensor indutivo. São abordados os desafios de layout e as considerações de fabricação.

- Capítulo 4: Testes e Resultados

Este capítulo descreve a implementação prática do sensor indutivo na coluna de água. São apresentados os testes e simulações dos circuitos projetados, tanto na *breadboard* como na PCB. São discutidos, também, os procedimentos de instalação, calibração e integração do sensor.

- Capítulo 5: Conclusão e Trabalho Futuro

O capítulo final apresenta as conclusões derivadas do trabalho realizado, destacando os principais resultados alcançados e suas implicações. Além disso, são sugeridas direções para trabalhos futuros, visando aprimorar ainda mais o sensor indutivo desenvolvido.

2 Fundamentos teóricos e revisão da literatura

A realização deste projeto requer uma revisão abrangente do estado atual do conhecimento sobre o tópico específico que é objeto de análise ou estudo.

O objeto de estudo é o desenvolvimento de um sensor indutivo que visa medir a salinidade da água do mar.

Neste capítulo são abordados os diferentes métodos de medição de salinidade indutiva, bem como, a revisão do trabalho desenvolvido para o assunto específico.

2.1 Métodos de medição de salinidade

Para mensuração de salinidade, a água do mar não pode simplesmente ser evaporada para uma medição de massa de sal seco, pois os cloretos são perdidos durante o processo [2]. Por essa razão, foram necessários métodos para a salinidade ser medida.

2.1.1 Titulação de Cloro

Durante um longo período, a determinação do teor de sal em amostras de água do mar, era feita através da determinação química do teor de haletos. Este método é conhecido como método de *Mohr* (*Mohr*, 1856) [3]. Este procedimento, consiste em titular uma amostra de água do mar com solução de nitrato de prata de concentração conhecida, até ao ponto em que todos os haletos, cloreto mais uma pequena quantidade de brometo, fossem precipitados como haleto de prata, conforme detetado por indicadores ou sistemas de eléctrodos adequados.

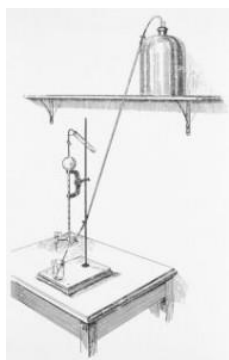


Figura 2-1-Bureta de Knudsen



Figura 2-2-Martin Knudsen no laboratório

Uma das principais desvantagens deste método reside no tempo gasto por amostra e a exigência de habilidade analítica do operador.

Por esse motivo, o método de *Mohr* foi substituído pela medição da condutividade elétrica como meio de estimar a salinidade.

Para medir a condutividade dos líquidos, podem ser usados dois métodos: indutivo ou de contacto (com dois elétrodos ou quatro elétrodos).

2.1.2 Sensores de condutividade de contacto

Os sensores de condutividade de contacto normalmente utilizados são os sensores de condutividade de dois elétrodos ou de quatro elétrodos.

Sensores de condutividade de dois elétrodos, consistem em dois elétrodos distanciados a um comprimento constante. Quando os elétrodos estão submersos numa amostra de água, a corrente é induzida entre eles (Figura 2-3 e Figura 2-4). Quanto mais iões estiverem presentes na solução da amostra, maior será a corrente e, por essa razão, maior será o valor de condutividade da solução.

As faixas de medição típicas são $0 \mu\text{S} / \text{cm}$ a $20 \text{mS} / \text{cm}$. [4]

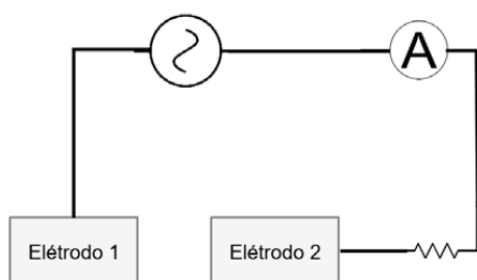


Figura 2-3-Esquema sensor com dois elétrodos



Figura 2-4-Sensor com dois elétrodos comercial

Uma célula de condutividade de quatro elétrodos (Figura 2-5 e Figura 2-6) introduz mais dois elétrodos no sensor, comparando com o anterior. Uma tensão AC no par mais externo dos elétrodos gera uma corrente na amostra. Os dois elétrodos mais internos medem a diferença de potencial na amostra, que depende da condutividade da mesma.

As faixas de medição típicas são $1 \mu\text{S} / \text{cm}$ a $600 \text{mS} / \text{cm}$. [4]

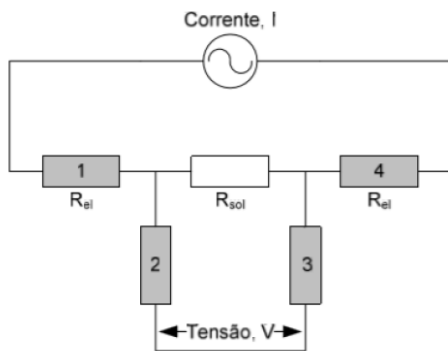


Figura 2-5-Esquema sensor com quatro elétrodos



Figura 2-6 - Sensor com quatro elétrodos comercial

2.1.3 Sensores de condutividade indutivo

Um sensor de condutividade indutivo ou toroidal não envolve elétrodos em contato direto com o meio a medir.

Estes sensores usam normalmente dois toroides ou solenoides, fortemente enrolados. Um corpo de plástico resistente à corrosão encapsula esses toroides. Contêm uma bobina de acionamento e de recepção e medem a condutividade [4]. Um oscilador gera um campo magnético alternado na bobina de acionamento, o que induz tensão/corrente no meio. De seguida, os cátions e aniões do meio começam a mover-se gerando uma corrente alternada, o que induz um campo magnético alternado e, desta forma, gera uma corrente na bobina de recepção, como mostra a Figura 2-7 [5].



Figura 2-7-Esquema de sensor indutivo

Para além disso, é necessário a integração de um sensor de temperatura dentro do corpo de plástico para compensar os valores medidos [3].

As faixas típicas de medição vão entre 2 $\mu\text{S}/\text{cm}$ to 2,000 mS/cm . Sensores comercialmente vendidos são representados nas Figura 2-8 e Figura 2-9 [4-5]. Apesar destes sensores já apresentarem uma gama favorável para medição de salinidades os valores de comercialização são muito elevados.



Figura 2-8- InPro 7250 series



Figura 2-9-CLS54D

2.1.4 Refratómetro

O sensor por refração ou refratómetro estima a salinidade medindo o grau em que uma amostra de água refrata a luz em comparação com uma amostra de água pura. Depois que algumas gotas de água sejam colocadas sobre a placa o valor de salinidade pode ser lido à luz do dia. Este tipo de sensor não é ideal para efetuar leituras no submerso.

Comercialmente, pode-se encontrar os sensores da marca *Kasvi* que é possível observar na Figura 2-10 [6].



Figura 2-10-Refratómetro da marca Kasvi

2.2 Sensor Indutivo

2.2.1 Princípio de Funcionamento

Segundo Striggow & Dankert [7], o sensor de condutividade indutivo baseia-se num transformador que, conforme a concentração de sal na água, mede a condutividade. Os sensores indutivos podem ser fabricados de duas formas:

- Através da utilização de apenas um transformador;
- Através da utilização de dois transformadores.

No primeiro caso a forma mais simples, é utilizar um transformador, com um enrolamento para a bobina primária, e cuja bobina secundária é formada pelo líquido circulante, que neste caso, é a água mar (Figura 2-11). Embora esta configuração seja muito simples, não tem sido aplicada a sensores de condutividade oceanográfica [8]. Isto acontece porque, a utilização de um transformador só iria gerar um campo magnético que interage com a água. Para medir a variação desse campo magnético gerado pela presença do mar implicaria usar sensores de campo magnético externos.

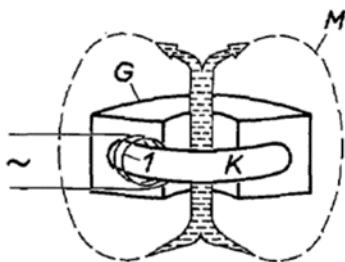


Figura 2-11-Construção de um sensor de condutividade utilizando um transformador

O transformador duplo (Figura 2-12), como o próprio nome indica, utiliza dois transformadores, onde a água circula tanto na bobina secundária do primeiro transformador (K1), como na bobina primária do segundo transformador (K2). É importante organizar os dois transformadores de tal forma a que o único acoplamento entre eles seja apenas a água do mar [8].

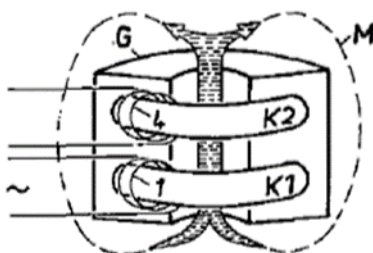


Figura 2-12-Construção de um sensor de condutividade usando dois transformadores

As vantagens de utilizar um sensor indutivo, devido à sua não necessidade de contatos elétricos com a água, são as seguintes [9]:

- Sem incrustações, revestimento ou contaminação da superfície do sensor:

Como as bobinas são isoladas, nunca tocam na solução envolvente. Por conseguinte, é fisicamente impossível que a superfície do sensor se torne entupida, revestida ou contaminada.

- Precisão melhorada devido à ausência de efeitos polarizadores:

Estes sensores medem a condutividade através de campos magnéticos, não de elétrodos. Por essa razão, não causam polarização e produzem medições mais precisas em aplicações de alta condutividade.

- Mais rentável ao longo do tempo:

Devido aos seus requisitos reduzidos de manutenção, um sensor indutivo será mais rentável do que um sensor de contacto ao longo do tempo, apesar de apresentar um custo inicial mais elevado.

2.2.2 Sensor Indutivo utilizando dois transformadores

O sensor indutivo, utilizando dois transformadores, consiste em duas bobinas com forma de toroide incorporadas uma ao lado da outra. Essas bobinas formam transformadores de corrente. O sensor é projetado de forma que parte do meio líquido forme um caminho fechado de corrente que passa pelas bobinas, como mostra a Figura 2-13, dos autores Wood et al [10]. O primeiro enrolamento produz um campo magnético na água, originando uma corrente na mesma, que por sua vez é proporcional à condutância. Esta corrente provoca um campo magnético no segundo enrolamento, onde a tensão (ou corrente) do segundo enrolamento é medida.

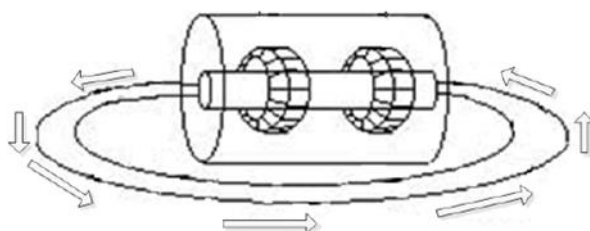


Figura 2-13- A condutividade pode ser medida por meio de indutância por um par de bobinas magnéticas

O sensor é imerso no líquido, neste caso na água do mar. Observando a Figura 2-14 verifica-se que o toroide ou bobina toroidal de acionamento tem uma indutância L_1 e o toroide de receção tem uma indutância L_2 . Aplicando uma tensão AC ou corrente sinusoidal à bobina de acionamento induz uma corrente I_1 , uma tensão indutiva V_1 na água do mar (representada uma resistência R_2). A bobina de

reção recebe o fluxo magnético obtido pela corrente que circula na água e proporciona uma tensão indutiva V_3 (Sheng et al.) [11].

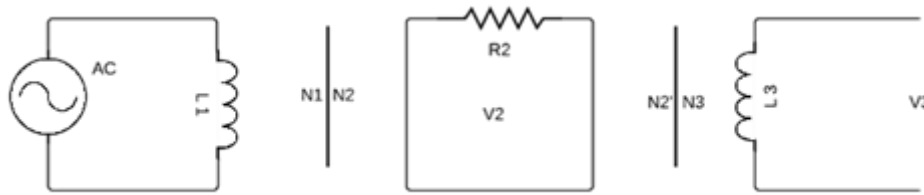


Figura 2-14-Esquemático equivalente ao funcionamento de um sensor indutivo toroidal

Apesar de ter sido abordado o funcionamento do sensor indutivo utilizando dois toroides como elemento sensor, é importante considerar outras opções de indutores para otimizar o desempenho do sensor em diferentes cenários.

2.2.3 Indutor

O indutor, também pode ser chamado de solenoide ou bobina toroidal. É um dispositivo elétrico passivo, capaz de armazenar energia criada num campo magnético formado por uma corrente alternada (AC).

2.2.3.1 Solenoide

Um solenoide é um longo fio enrolado na forma de uma bobina. Quando a corrente elétrica passa pela bobina, cria um campo magnético relativamente uniforme dentro da mesma, que é a soma vetorial dos campos magnéticos criado por cada uma das espiras (Figura 2-15). O seu sentido é dado pela regra da mão direita [12-13].

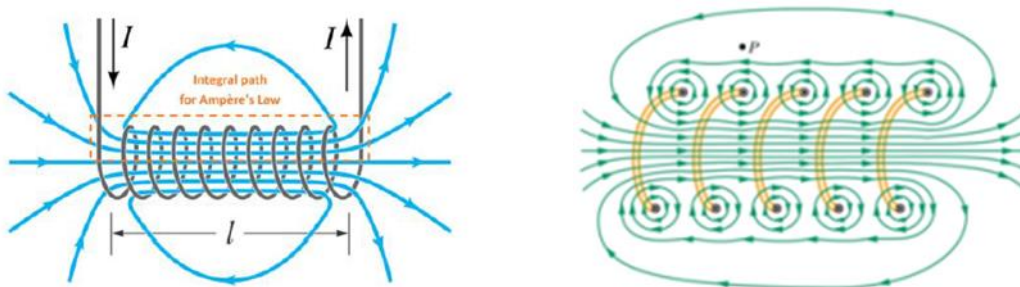


Figura 2-15-Linhas de campo magnético de um solenoide

Como as linhas de campo magnético, B , no interior do solenoide são praticamente paralelas, aplicando a Lei de Ampère é possível calcular o campo magnético (B) de um solenoide de núcleo de ar:

$$B = \mu_o \frac{N}{l} I \quad 2-1$$

Sendo:

B – Campo magnético (T)

μ_o - Permeabilidade vázio $4\pi \times 10^{-7}$ (N/A², T m/A, H/m)

N – Número de espiras

L – Comprimento do solenoide

I – Corrente (A)

(considera-se a permeabilidade do ar igual à permeabilidade do vácuo)

A indutância (L) de uma bobina com núcleo de material com permeabilidade (μ_r) pode ser calculada por [14]:

$$L = A_L N^2$$

$$L = \frac{\mu_r \mu_o A}{l} N^2 \quad 2-2$$

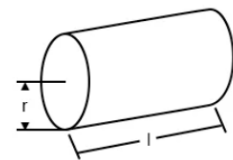


Figura 2-16- Raio e comprimento do solenoide

Onde:

A_L - Fator de indutância (nH / N^2)

N - Número de espiras

l - Comprimento do caminho magnético (m)

A- Área transversal efetiva do núcleo (m^2)

μ_r - Permeabilidade relativa do núcleo

μ_o - Permeabilidade vácuo $4\pi \times 10^{-7}$ (H/m)

De forma a aumentar o valor da indutância, utiliza-se núcleos ferrosos, com elevado valor de permeabilidade. A permeabilidade relativa de um núcleo de ferrite situa-se tipicamente 1500 e 3000, dependendo dos núcleos escolhidos [15]. No entanto, em bobinas com este formato, o campo magnético atravessa o núcleo ferroso, mas também o ar circundante. Isto consegue ser reduzido em bobinas em formato de toroide.

2.2.3.2 Toroide

O toroide é formado a partir de uma bobina curvada em forma de círculo fechado (Figura 2-17) [16]. As linhas de campo são paralelas seguindo a simetria das espiras, desta vez de forma circular [17].

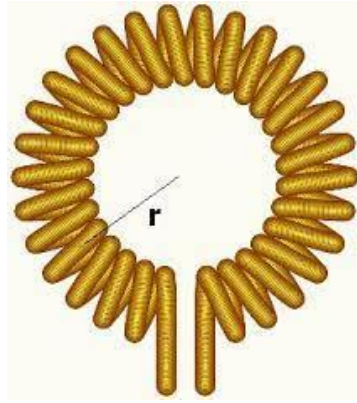


Figura 2-17- Bobina com formato toroidal

É possível observar que só existe campo magnético no interior da bobina toroidal (Figura 2-18). Pela Lei de Ampère, [18], em que, N é o número de espiras, I é a corrente que atravessa nas espiras, r , o raio (médio) da bobina, μ_r e μ_0 respectivamente a permeabilidade relativa do meio e do vácuo. Através da Figura 2-18 e equação 2-3, observa-se que o campo magnético gerado nos toroides depende do raio do mesmo, entre outros fatores.

$$B = \frac{\mu_r \mu_0 N I}{2\pi r} \quad 2-3$$

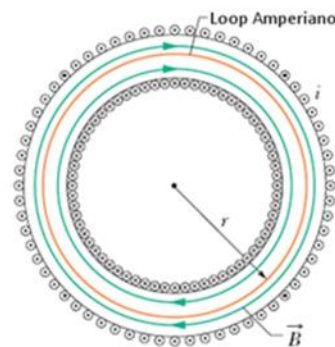


Figura 2-18-Campo magnético na bobina toroidal

Comparando com os solenoides é possível dizer que [18-19]:

- Os toroides são mais difíceis de enrolar.
- Os toroides são mais eficientes na produção de indutâncias. Ou seja, para uma mesma indutância, os toroides requerem menos voltas e um tamanho menor que os solenoides.

- Os toroides podem ser colocados próximos de outros componentes eletrônicos, visto que só há campo magnético no interior do toroide.

De forma análoga, a indutância (L) de um indutor em toroide pode ser calculado com a 2-4:

$$L = \frac{\mu_r \mu_0 N^2 A}{2\pi r} \quad 2-4$$

Onde:

N - Número de espiras

r – Raio médio do núcleo toroidal (m)

A- Área transversal efetiva do núcleo (m^2)

μ_r - Permeabilidade relativa do núcleo

μ_0 - Permeabilidade ar $4\pi \times 10^{-7}$ H/m

2.2.3.3 Modelo otimizado de um indutor

Num indutor ideal há apenas indutância, mas na realidade, um indutor de fio enrolado, tem alguma resistência nos enrolamentos. Por outro lado, há uma capacidade parasita em paralelo com a combinação em série da resistência parasita e a indutância ideal. Isto surge principalmente porque as espiras da bobina estão próximas umas das outras. Essas características não ideais levam a um modelo de indutor como ilustrado na Figura 2-19:

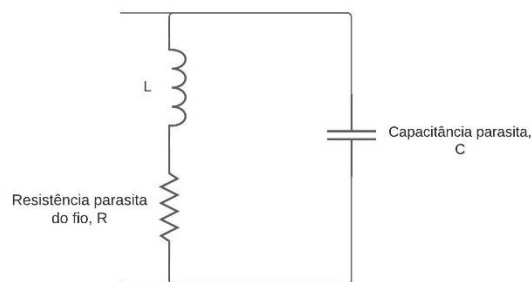


Figura 2-19-Modelo elétrico equivalente de um Indutor real

A frequência de auto ressonância (SRF) de um indutor é a frequência na qual ocorre a ressonância entre a indutância e a capacidade parasita do indutor [20]. A frequência de ressonância é dado pela equação 2-5.

$$F = \frac{1}{2\pi \times \sqrt{LC}}$$

Onde:

L- Indutância (H)

C- Capacidade (F)

F- Frequência de Ressonância (Hz)

Até à frequência de ressonância, o indutor tem um comportamento indutivo, como é desejado. Ao ultrapassar a frequência de ressonância, a influência capacitiva parasita torna-se dominante. Assim conclui-se que na região de frequência acima da frequência de ressonância, o comportamento dominante do dispositivo deixa de ser o indutivo, conforme representado na Figura 2-20 [20].

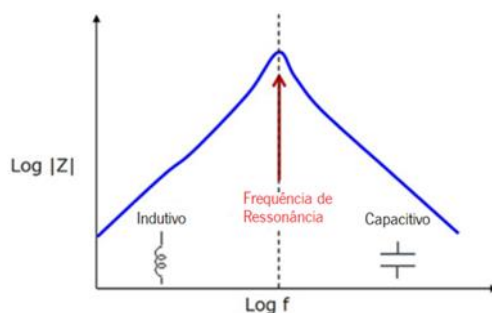


Figura 2-20-Diagrama de bode da impedância do indutor, funcionamento como indutor e condensador

Como já referido, um indutor que possui fio enrolado, tem alguma resistência nos enrolamentos, representado pela resistência R da Figura 2-19. A resistividade, cujo símbolo é ρ , consiste na propriedade característica de um material que expressa a maior ou menor resistência que este opõe ao ser atravessado pela corrente elétrica. De acordo com a equação 2-6, para 1 metro de fio, quanto menor for o diâmetro do fio, maior a resistência do fio e, por sua vez, haverá mais perdas [21].

$$R = \rho_{material} \times \frac{L}{A} \quad 2-6$$

R- Resistência do fio (Ω)

ρ - Resistividade do material (Ωm)

L- Comprimento do fio (m)

A- Área da transversal secção transversal do fio (m^2)

Para além do número de espiras e diâmetro do fio que possui é importante ter em consideração o tipo de núcleo do indutor. Os mais comuns são do tipo ar, ferromagnético, aço laminado e ferrite [22].

2.2.3.4 Núcleos

Como já referido, a indutância depende do núcleo do sensor a ser utilizado. Segundo Almeida & Silva [23] os núcleos podem ser de:

Ar - Não necessita de utilizar núcleo magnético para obter indutância. São geralmente utilizados com núcleo de plástico, cerâmica, ar, ou qualquer tipo de material não-magnético. A vantagem do núcleo de ar é, pelo facto de este oferecer uma baixa indutância em relação a outros núcleos. São utilizados em aplicações onde a frequência é superior a 1 MHz, pois não possuem perda de energia no núcleo.



Figura 2-21-Núcleo de ar

Ferromagnético- Utilizam um núcleo magnético, como por exemplo o ferro. Os núcleos magnéticos têm como o objetivo de aumentar a indutância, porque, como o ferro tem alta permeabilidade magnética, o campo magnético aumenta. A desvantagem que este núcleo apresenta é o facto de haver perdas por histerese e correntes de *Foucault*, que leva à saturação mais facilmente.



Figura 2-22-Núcleo de Ferro

Aço Laminado- São muito parecidos com os núcleos dos transformadores. O núcleo é feito de finas camadas de aço amontoadas, recobertas individualmente com uma camada isolante. Este isolamento

evita que as correntes de *Foucault* circulem entre as lâminas. Por outro lado, também reduz as perdas por histerese.

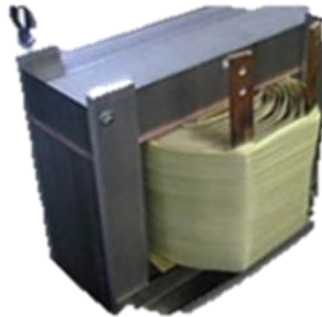


Figura 2-23-Aço Laminado

Ferrite- São utilizados para altas frequências, pois a ferrite é cerâmica ferromagnética não-condutora. Por essa razão, as correntes de *Foucault* no núcleo são nulas. Além disso, a magnetização do material pode facilmente mudar de direção, reduzindo as perdas de energia por histerese, aumentando assim a indutância em relação aos outros núcleos.



Figura 2-24-Núcleo de Ferrite

Para o projeto, serão utilizados núcleos de ferrite devido à sua alta sensibilidade e resistência à corrosão, tornando-a a opção mais eficiente e confiável para monitorar os níveis de salinidade em ambientes aquáticos. Para além disso, os sensores indutivos são muito sensíveis a fatores externos irresolvíveis, alterando significativamente o seu comportamento. Para minimizar esse acontecimento, é importante que o núcleo tenha a mínima interferência, quer por perdas de Foucault quer por histerese.

2.3 Núcleos do Indutor

As ferrites são compostas por ferro, cobalto, níquel ou zinco.

Para um projeto que envolve o uso de ferrites, é importante considerar a escolha entre as ferrites macias e duras, uma vez que elas possuem diferentes propriedades magnéticas. A principal característica que define a distinção entre esses dois tipos de materiais é a coercividade, que é a força necessária para mudar a direção do campo magnético num material.

As ferrites duras têm uma coercividade mais alta, o que significa que são mais resistentes à desmagnetização e são frequentemente utilizadas como ímãs permanentes em sistemas de refrigeração ou em alto-falantes.

Por outro lado, as ferrites macias possuem uma coercividade mais baixa, o que as torna mais fáceis de magnetizar e desmagnetizar. Isso resulta em poucas perdas de energia durante o ciclo de magnetização e desmagnetização, tornando-as ideais para diversas aplicações [24].

Em geral, estas últimas, possuem uma estrutura cúbica do tipo espinélio com fórmula genérica MeFe_2O_4 , onde Me representa um ou mais dos metais de transição Mn, Fe, Co, Ni, Cu ou Zn.

As ferrites macias compostas por Ni-Zn e Mn-Zn são as mais amplamente utilizadas no mercado. Entre elas, as ferrites de níquel-zinco (Ni-Zn) são compostas por ferro, níquel e zinco e são conhecidas por apresentarem alta permeabilidade magnética, baixa perda dielétrica e alta estabilidade térmica. Essas características torna-as ideais para aplicações elétricas e magnéticas em dispositivos eletrônicos. Além disso, essas ferrites apresentam boa resistência à corrosão e oxidação, o que é de grande importância para aplicações em ambientes desfavoráveis. A permeabilidade deste tipo de material pode variar de 15 a 1500, o que permite uma ampla gama de aplicações. São geralmente utilizadas em aplicações de alta frequência, variando de 2 MHz até centenas de MHz. Com essas propriedades, as ferrites de Ni-Zn são amplamente empregadas em transformadores de alta frequência, indutores, núcleos de impedância, filtros de sinal e outros dispositivos eletrônicos [25].

As ferrites de manganês-zinco (Mn-Zn) são compostas por uma combinação de ferro, manganês e zinco. Assim como as ferrites de Ni-Zn, estas ferrites também apresentam alta permeabilidade magnética e baixa perda dielétrica, o que as tornam ideais para uso em dispositivos eletrônicos. As ferrites Mn-Zn são mais adequadas para aplicações em que a

frequência operacional é inferior a 5 MHz. São amplamente encontradas no mercado e usadas em aplicações de até 2 MHz. Essas ferrites possuem alta permeabilidade, podendo variar de 750 a 30.000, e uma resistividade elétrica mais baixa em comparação com as ferrites Ni-Zn.

Outro ponto a considerar é a estrutura cristalina, onde os átomos metálicos ocupam ou não posições bem definidas em relação aos átomos de oxigênio. Existem três tipos principais de estruturas nas ferrites: amorfa, cristalina e nano cristalina.

Na estrutura amorfa não existe ordem na estrutura atômica. Os átomos estão dispostos aleatoriamente no material, o que implica uma alta resistividade elétrica, baixa coercividade e alta permeabilidade magnética.

Já na estrutura cristalina, os átomos estão organizados e ordenados periodicamente, o que implica uma baixa resistividade elétrica, anisotropias magneto-cristalina e coercividade altas.

As ferrites com estrutura nano cristalina são compostas por cristais de tamanho nanométrico imersos num material amorfo. Essa estrutura pode combinar as propriedades dos dois tipos de estrutura, resultando num material com alta permeabilidade magnética, alta resistividade elétrica e alta coercividade [26].

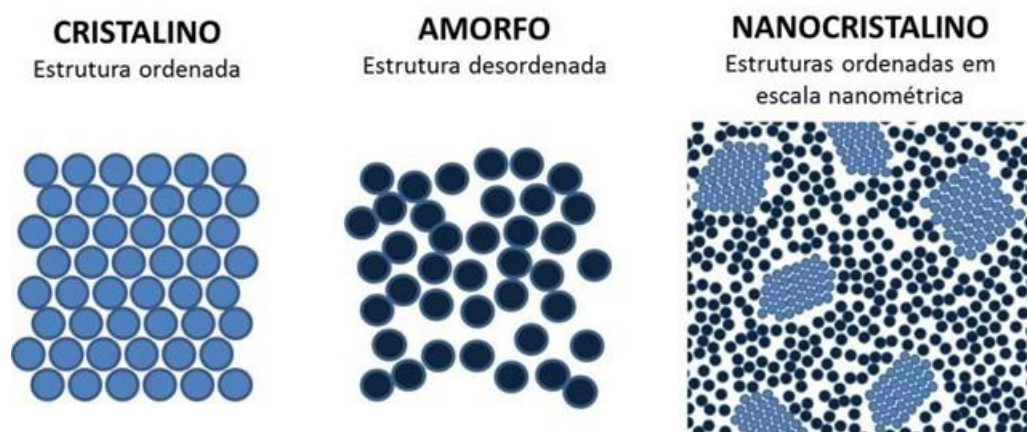


Figura 2-25- Estrutura cristalina da ferrite

As ferrites com material amorfo e macio serão submetidas a testes neste projeto para avaliar sua adequação e desempenho na medição de salinidade em ambientes aquáticos.

2.4 Condutividade elétrica

A condutividade, é um dos parâmetros de qualidade da água mais úteis. Além de ser a base da maioria dos cálculos de salinidade e sólidos dissolvidos totais, a condutividade é um indicador precoce

de mudança em ambiente aquático. A maioria dos organismos aquáticos mantém uma condutividade razoavelmente constante que pode ser usada como base de comparação para medições futuras [27].

A condutividade e a salinidade têm forte correlação. Como a condutividade é mais simples de ser medida, é usada em algoritmos de estimativa de salinidade, que afetam a qualidade da água e a vida aquática. A condutividade depende da salinidade, na medida em que, o fluxo da água e as alterações do nível da água, tais como fases da maré e evaporação, contribuem para a oscilação dos níveis de salinidade e, consecutivamente, para a condutividade. Na Figura 2-26, observa-se vários fatores que afetam a condutividade ao longo do ano, tais como: chuva intensa, inundações, evaporação e escoamentos.

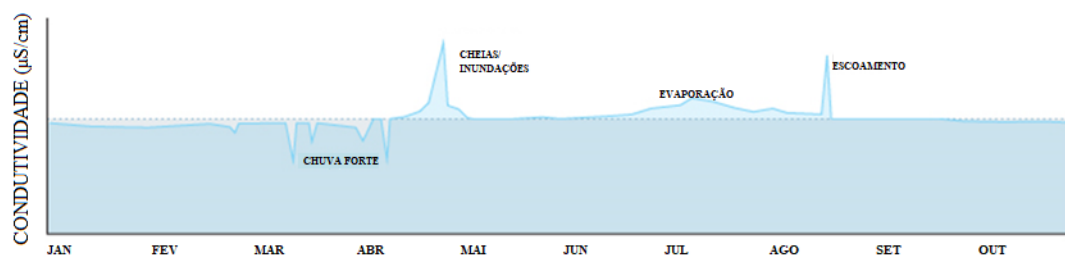


Figura 2-26-Fatores que afetam o volume da água (como chuva forte ou evaporação) afetam a condutividade

A condutividade pode ser calculada com a ajuda da resistência, corrente, tensão e condutância [27].

A condutância (G) é definida por:

$$G = \frac{1}{R} [S] \quad 2-7$$

A resistência, através da Lei Ohm, é dada por:

$$R = \frac{U (V)}{I (A)} [\Omega] \quad 2-8$$

Logo,

$$G = \frac{I}{U} \quad 2-9$$

A condutividade, por sua vez, é representada pela seguinte equação:

$$\sigma = G \times K \left[\frac{S}{cm} \right] \quad 2-10$$

Onde:

$$K = \frac{d \text{ (cm)}}{A \text{ (cm}^2\text{)}} [\text{cm}^{-1}]$$

d- distância entre elétrodos

2-11

A- Área dos elétrodos

Estas equações não podem ser utilizadas para sensores de condutividade indutivos, visto que, a tensão medida no segundo toroide é resultado da indução eletromagnética causada pela variação do campo magnético. A fórmula de condutividade elétrica não leva em consideração este processo. Para além disso, a resposta do sensor indutivo é influenciada por diversos fatores, como a geometria do indutor, as propriedades magnéticas, diâmetro do fio, indutância, entre outros.

2.4.1 Condutividade e Temperatura

A condutividade também depende da temperatura. A temperatura da água pode fazer com que os níveis de condutividade flutuem diariamente. Para além do seu efeito direto na condutividade, a temperatura também influencia a densidade da água, o que leva à estratificação. A água estratificada pode ter diferentes valores de condutividade a diferentes profundidades.

Para cada 1 °C de aumento, os valores de condutividade podem aumentar dois a quatro por cento. A temperatura afeta a condutividade aumentando a mobilidade iónica, bem como a solubilidade de muitos sais e minerais. Isto pode ser visto em variações diurnas, à medida que um corpo de água aquece devido à luz solar, a condutividade aumenta. Posteriormente arrefece, durante a noite, diminuindo a condutividade.

Devido ao efeito direto da temperatura, a condutividade é medida ou corrigida a uma temperatura normalizada, geralmente 25 °C, para comparabilidade.

As variações sazonais da condutividade, embora afetadas pelas temperaturas médias, são também afetadas pelo fluxo de água [28].

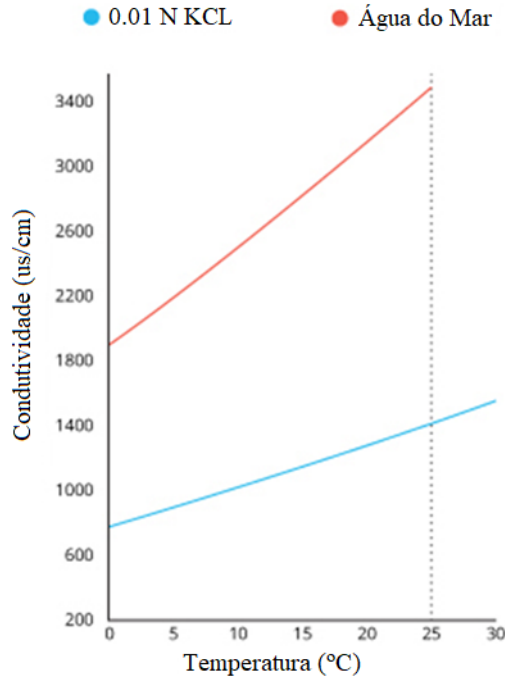


Figura 2-27- Dependência da condutividade em relação à temperatura

Como já referido, a condutividade depende da temperatura da água do mar. A correção é feita utilizando a 2-13, onde, T é a temperatura de medição, T_{Ref} é a temperatura de referência, σ_T é a condutividade medida na temperatura T e σ_{Ref} é a condutividade calculada na temperatura T_{Ref} e o α é um coeficiente de temperatura. Se o coeficiente de temperatura da amostra específica não for conhecido, pode ser determinado experimentalmente a uma temperatura de referência de referência T_1 , geralmente, 25 °C e a segunda temperatura, T_2 , com uma diferença de 10 °C ou mais [29].

$$\sigma_{Ref} = \frac{\sigma_T}{1 + \frac{\alpha}{100} \% \times (T - T_{Ref})} \left[\frac{S}{cm} \right] \quad 2-12$$

Onde,

$$\alpha = \frac{(\sigma_{T2} - \sigma_{T1}) \times 100}{(T_2 - T_1) \times \sigma_{T1}} [\%] \quad 2-13$$

$$R = \frac{R_S}{R_{KCl}(15^\circ C)} \quad 2-14$$

$$R_T = \frac{R}{r_t \times R_p} \quad 2-15$$

$$R_p = 1 + \frac{A_1 p + A_2 p^2 + A_3 p^3}{1 + B_1 T + B_2 T^2 + B_3 R + B_4 T R} \quad 2-16$$

$$r_t = C_0 + C_1 T + C_2 T^2 + C_3 T^3 + C_4 T^4 \quad 2-17$$

$$S = a_0 + a_1 R_t^{\frac{1}{2}} + a_2 R_t + a_3 R_t^{\frac{3}{2}} + a_4 R_t^2 + a_5 R_t^{\frac{5}{2}} + \frac{T - 15}{1 + k(T - 15)} (b_0 + b_1 R_t^{\frac{1}{2}} + b_2 R_t + b_3 R_t^{\frac{3}{2}} + b_4 R_t^2 + b_5 R_t^{\frac{5}{2}}) \quad 2-18$$

2.5 Cálculo da Salinidade

A condutividade pode ser convertida num valor de salinidade de escala prática, adimensional, de salinidade definida em 1978 (PSS-78, Practical Salinity Scale) que é influenciado também pela temperatura e pressão ambiente (Medições CTD - **c**onductivity, **t**emperature e **d**epth). A conversão está definida nas equações 2-14 à 2-18.

Os valores dos coeficientes no PSS-78 (Tabela 2-1) são baseados em medições experimentais realizadas em águas do mar padrão existentes, que foram diluídas e evaporadas por peso [26]. Isso garante o conservadorismo de uma salinidade assim definida e sua reprodutibilidade local. O desvio padrão foi 0.0013 na salinidade. Foi estabelecida uma equação para converter as relações de condutividade medidas em pressão maior que uma atmosfera (isto é, para medições CTD), em que S é a salinidade calculada, R_S a condutividade medida, T a temperatura ($^\circ C$) e p a pressão (dbar [1 dbar=0.1 bar]) à qual foi medida a condutividade R_S , r_t e R_p os coeficientes de correção de temperatura e pressão, e $R_{KCl}(15^\circ C)$ a constante da condutividade da água do mar de Copenhaga [30]. Os coeficientes são apresentados na Tabela 2-1.

Tabela 2-1- Valores dos parâmetros para o cálculo da salinidade

$a_0 = 0,008$	$b_0 = 0,0005$
$a_1 = -0,1692$	$b_1 = -0,0056$
$a_2 = 25,3851$	$b_2 = -0,0066$
$a_3 = 14,0941$	$b_3 = -0,0375$
$a_4 = -7,0261$	$b_4 = 0,0636$

$a_5 = 2,7081$	$b_5 = -0,0144$
$A_1 = 2,070 \times 10^{-5}$	$B_1 = 3,426 \times 10^{-2}$
$A_2 = -6,370 \times 10^{-10}$	$B_2 = 4,464 \times 10^{-4}$
$A_3 = 3,989 \times 10^{-15}$	$B_3 = 4,215 \times 10^{-1}$
$C_0 = 0,6766097$	$C_2 = 1,104259 \times 10^{-4}$
$C_1 = 2,00564 \times 10^{-2}$	$C_3 = -6,9698 \times 10^{-7}$
$C_4 = 1,0031 \times 10^{-9}$	$k = 0,0162$
$R_{KCl}(15^\circ C) = 42,914 \text{ mS/cm}$	

2.6 Revisão de literatura

Existem alguns trabalhos na literatura, onde os autores desenvolveram sensores de condutividade indutivos. Esta secção apresenta uma revisão dessas obras. A fim de ser capaz de realizar todas estas medições, é importante caracterizar as bobinas e as suas interações com o meio.

Os autores Parra et al., 2014 [31] propõem o desenvolvimento de uma rede de sensores de salinidade sem fios de baixo custo, para controlar as comportas de água doce dos lagos e reservatórios, que chegam à área dos mangais. Um mangal é um ecossistema costeiro de transição entre os biomas terrestre e marinho.

Como solução deste problema, os autores, apresentam um sensor indutivo para medir condutividade da água salgada. Este sensor é composto por duas bobinas, em forma de toroide e solenoide, respetivamente, como mostra a Figura 2-28, com as seguintes características:

- Diâmetro do fio: 0.8 mm e 0.8 mm, respetivamente.
- Tamanho da bobina:
 - Diâmetro interior: 23.2 mm e 25.3 mm, respetivamente.
 - Diâmetro exterior: 56.5 mm e 33.6 mm, respetivamente.
 - Altura: 26.9 mm e 22.6 mm, respetivamente.
- Núcleo: Não ferroso.
- Número de espiras: 81 e 324 em 9 camadas, respetivamente.



Figura 2-28- Sensor de Salinidade

Para a realização das medições da salinidade, os autores induziram uma das duas bobinas (neste caso, a bobina com menos voltas) com um sinal sinusoidal e efetuaram a medição da tensão de saída, gerado pelo campo magnético induzido, na segunda bobina.

Antes de desenvolver o sistema, este artigo descreve uma série de testes realizados no sensor indutivo a diferentes frequências, para saber a que frequência o sensor é capaz de distinguir a salinidade de uma solução aquosa. O teste é realizado utilizando 5 amostras de diferentes concentrações de sal, desde a água da torneira até à água altamente saturada com sal.

As amostras incluem os valores de condutividade da água doce e da água do mar. Cada amostra é medida a 8 frequências diferentes entre 10 kHz e 750 kHz. A frequência escolhida neste artigo foi de 150 kHz.

O sensor sem fios é baseado no módulo sem fios chamado *Openpicus Flyport*. É um módulo Wi-Fi IEEE 802.11g baseado no Transceptor Microchip MRF24WG0MB. Para aquisição de dados é utilizado um microcontrolador, Microchip PIC24FJ256.

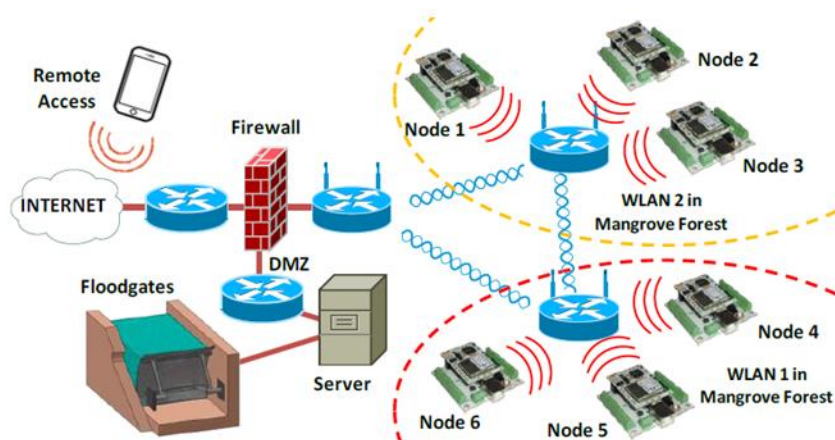


Figura 2-29-Topologia de rede

Os resultados alcançados foram favoráveis, apesar do sistema ser ótimo para medir salinidades entre 0 e 35 ppm. Nas gamas superiores o sensor indutivo desenhado não é capaz de distinguir diferentes salinidades.

Noutra perspetiva, os autores Ribeiro et al. [32], descrevem um sensor indutivo construído como um transformador duplo, a ser aplicado para a medição da salinidade da água do mar e nos estuários. O sensor utiliza dois núcleos toroidais. Cada núcleo é fornecido com um único enrolamento. Os enrolamentos têm o mesmo número de voltas.

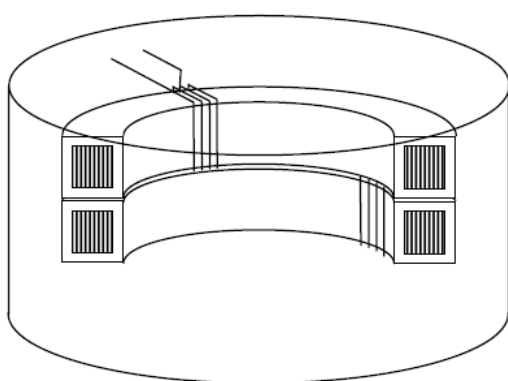


Figura 2-30-Desenho do sensor desenvolvido (Ribeiro et al)

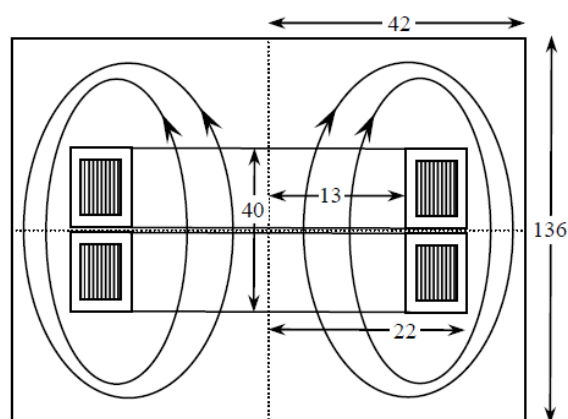


Figura 2-31-Dimensões do sensor desenvolvido

As forças eletromotoras desenvolvidas na água dão origem a correntes elétricas que atuam como correntes secundárias de um transformador e as correntes primárias do outro. A relação entre a tensão aplicada ao circuito primário e a tensão no secundário depende da condutividade da água.

Os dois núcleos toroidais de ferro amorfo são montados em conjunto. Cada núcleo é fornecido com um enrolamento de 20 voltas. Este conjunto é imerso na solução aquosa e é aplicada uma tensão sinusoidal num dos núcleos a uma frequência de 50 kHz.

Para a realização de testes, neste artigo, foi utilizado um recipiente de plástico para delimitar as linhas de corrente dentro da água, impedindo a influência de objetos estranhos no processo de medição. Por conseguinte, toda a corrente na água é encerrada pelo recipiente de plástico.

O sensor, neste artigo, funcionará de forma autónoma. Ou seja, será fornecido com um microprocessador para automatizar o processo de medição e para controlar a transmissão de dados para um ponto central onde a informação recolhida será processada.

Por outro lado, os autores Karuppuswami et al., 2016 [33], apresentam que a condutividade de um fluido é obtida utilizando radiofrequência (RF). O sensor é formado a partir de duas bobinas toroidais com as seguintes características:

- Espessura 1.5 mm
- Tamanho de 1 polegada
- Distância entre as duas bobinas: 3 mm

A bobina de alimentação e a bobina sensorial, como o artigo intitula, está ligada à eletrônica do sensor utilizando cabos de RF estáveis em fase. Uma das bobinas é alimentada com um sinal de RF de frequência conhecida enquanto a segunda bobina atua como uma bobina de detecção e recebe o sinal acoplado. Os autores calculam a condutividade, convertendo uma mudança de fase entre dois sinais para uma tensão de saída. Os resultados mostram que é possível definir quatro gamas lineares como função do fluido de condutividade.

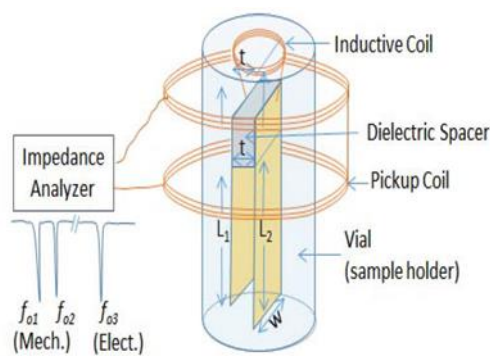


Figura 2-32-Esquemático do sensor

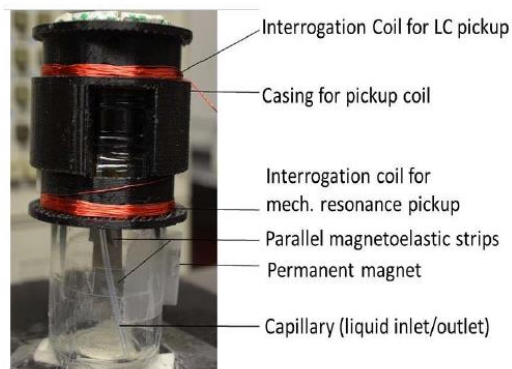


Figura 2-33-Sensor desenvolvido (Karuppuswami et al)

Os autores Parra et al., 2015 [34], apresentam um sensor indutivo para monitorização da salinidade de águas subterrâneas.

O sensor é capaz de medir a condutividade elétrica da água, que está diretamente relacionada com a salinização da água. É composto por dois solenoides de cobre, e mede as alterações do campo magnético devido à presença de cargas elétricas na água.

Os autores concluem que diferentes salinidades da água geram diferentes alterações. Neste artigo os autores realizaram vários protótipos que serão testados e comparados com o propósito de escolher a melhor combinação de bobinas. O artigo explica pormenorizadamente todos os testes realizados. Resumindo, o primeiro teste consiste em estudar o efeito do número de enrolamentos (mas mantendo a relação dos enrolamentos entre a bobina induzida e a bobina alimentada). Foram usados 4 protótipos. O segundo teste estuda a alteração produzida no desempenho do sensor quando a relação de

enrolamentos altera, mas mantém o número de enrolamentos na bobina alimentada. Para este teste, foram usados 4 protótipos.

O terceiro teste, altera o número de enrolamentos da bobina alimentada mantendo o número de enrolamentos da bobina induzida. Foram usados os mesmos protótipos do segundo teste, mas a bobina inalterada é a bobina de acionamento. O quarto teste, avalia o efeito da alteração do diâmetro do fio de cobre usando três diferentes diâmetros de fio de cobre, mantendo o resto dos parâmetros (número de enrolamentos nas bobinas e diâmetro da bobina). Finalmente, um quinto teste foi realizado para verificar o efeito da alteração do diâmetro da bobina, mas mantendo o resto dos parâmetros (diâmetro do fio e número de enrolamentos).

De seguida, os autores selecionaram o melhor protótipo. A uma frequência de 400 kHz este foi calibrado usando até 30 amostras diferentes. Os testes foram apenas realizados em laboratório, como mostra a Figura 2-34, sendo que este artigo informa que o sensor de condutividade apresenta uma gama operacional de 0.585 mS/cm a 73.8 mS/cm, que é suficientemente largo para cobrir a gama típica de salinidade de água.

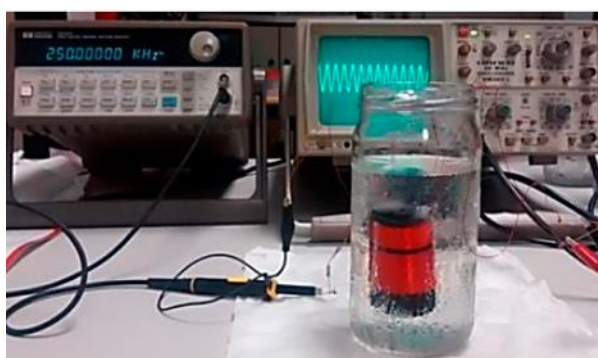


Figura 2-34-Trabalho experimental no sensor indutivo

Por fim, os autores Schoinas et al.[35], apresentam um sensor flexível utilizando bobinas solenoides.

O sensor, apresentado, é composto por três bobinas solenoides, o núcleo magnético e o isolamento que rodeia o núcleo. A partir destas três bobinas, a que se encontra no meio, é a bobina de detecção com 21 voltas, e as bobinas de excitação serão as restantes, com 13 voltas cada.

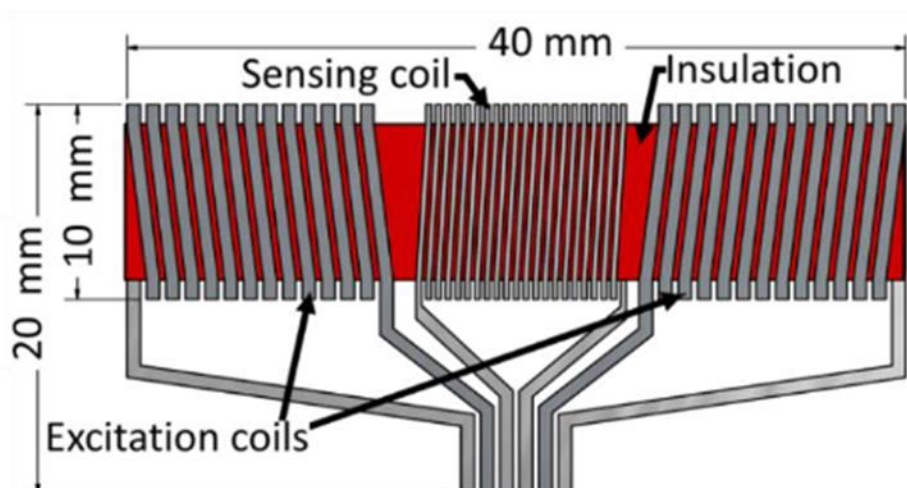


Figura 2-35-Esquemático do sensor Indutivo (Schoinas et al)

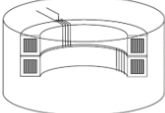
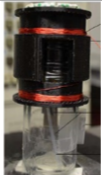
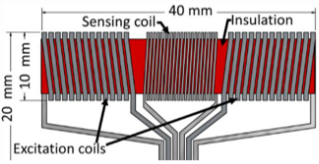
O papel do isolamento é evitar curto-circuitos entre o núcleo magnético e as bobinas. As dimensões de todo o sensor são de 40 mm, 20 mm e 0.3 mm, enquanto a largura das bobinas solenoides é de 10 mm. Além disso, as dimensões do núcleo magnético são de 40 mm, 7 mm e 0.025 mm, respectivamente.

Ambas as bobinas de excitação geram simultaneamente um campo magnético AC, que periodicamente, conduz o núcleo magnético à saturação. Quando não existe campo magnético externo, a tensão induzida que pode ser medida na bobina de detecção é simétrica e só é possível detectar harmônicos desconhecidos na forma de onda. Se um campo magnético externo for aplicado na direção de detecção, a simetria da tensão induzida é perturbada, e assim os harmônicos começam a aparecer na forma de onda.

Segundo o artigo, a aplicação do campo magnético pode ser medida através da sua proporcionalidade em relação ao segundo harmônico ou ainda mais elevados harmônicos da tensão induzida na bobina de detecção.

Tendo em conta o estado da arte, é complexa a determinação da configuração da bobina que apresenta melhores resultados. Analisando a Tabela 2-2, a escolha da configuração de sensores indutivos centra-se em formatos toroidais a uma frequência de trabalho espectral entre os 150-300 kHz. Conclui-se, também, que estes sensores, tendem a medir gamas superiores aos típicos valores de salinidade da água do mar. Por outro lado, o número de enrolamentos necessários para cada bobina e o tamanho do mesmo são incertos, sendo necessário realizar um estudo do mesmo.

Tabela 2-2- Resumo Revisão da Literatura

Autor	Constituição Sensor	Material Núcleo	Número Voltas	Medição Sensor Indutivo	Frequência de Operação
Parra, L., Sendra, S., Lloret, J., & Rodrigues, J. J. P. C.		Não ferrosos	Toroide- 81 voltas Solenóide- 324 voltas em 9 camadas	0 ppm - 35 ppm	150 kHz
Ribeiro, A. L., Geirinhas Ramos, H. M., Ramos, P. M., & Dias Pereira, J. M.		Ferro	Transformador duplo, utilizando duas toróides com 20 voltas	0 S/m- 4,5 S/m	50 kHz
Karuppuswami, S., Arangali, H., & Chahal, P.		Ar	Transformador duplo. Sem informação número de voltas	Teste realizado apenas em Acetona, Metanol, Álcool Isotrópico, entre outros	210 kHz
Parra, L., Sendra, S., Lloret, J., & Bosch, I.		Cobre	Transformador duplo Duas toróides 20 voltas 40 voltas	0.585 mS/cm -73.8 mS/cm	400 kHz
Schoinas, S., Guamra, A. M. el, Moreillon, F., & Passeraub, P.		Núcleo Magnético	Solenóides Bobinas excitação – 21 voltas Bobina de recepção 13 voltas	Não especificado	100 kHz- 200kHz

Embora os resultados indiquem que os sensores têm uma tendência para medir níveis de salinidade abaixo e acima do esperado, não conseguem fornecer informações sobre a consistência das medições. No entanto, adquirir um sensor de condutividade indutiva comercial pode ser extremamente caro, razão pela qual a fabricação personalizada pode reduzir os custos em até 100 vezes.

Por essas razões, o sensor de condutividade indutiva será fabricado de raiz, com a análise minuciosa de cada componente envolvido, levando em consideração possíveis influências que podem impactar o desempenho do mesmo.

3 Projeto de Sensor de Salinidade

Neste capítulo, são detalhadas a análise e o projeto do sensor indutivo, com ênfase nas considerações de engenharia. Inclui dimensionamento dos componentes e circuitos necessários para o funcionamento adequado do sistema, bem como a seleção dos materiais apropriados para a construção do mesmo. Além disso, são tratados aspectos relacionados ao design do circuito impresso (PCB) utilizado no sensor.

3.1 Projeto do Sensor Indutivo

Para este trabalho, foram escolhidas bobinas em forma de toroide. Esta seleção deve-se ao facto de estes apresentarem uma maior eficácia na produção de indutâncias. Ou seja, para a mesma indutância, os toroides requerem menos voltas e um tamanho menor do que os solenoides. Para além disso, também apresentam menor perda de fluxo, e, o campo magnético é gerado apenas dentro do toroide.

O protótipo a ser desenvolvido é composto por duas bobinas, em forma de toroide. O núcleo da bobina será de ferrite e é fornecido com N enrolamentos de fio de cobre.

O sensor é projetado de forma que parte do meio líquido forme um caminho de corrente fechado que passa por ambas as bobinas, conforme ilustrado na Figura 3-1.

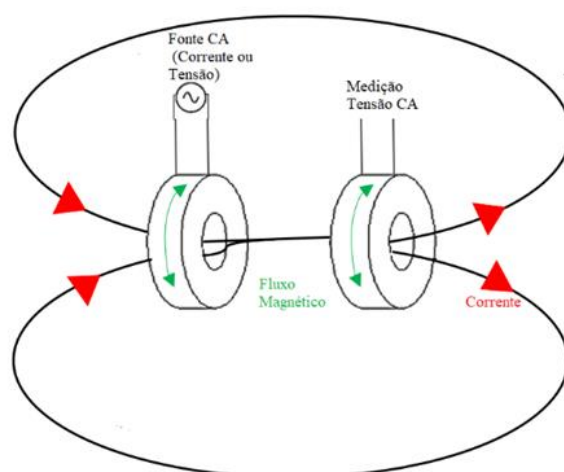


Figura 3-1-Funcionamento do sensor

Analisando a Figura 3-2, o primeiro enrolamento N_1 produz um campo magnético na água, fazendo com que uma corrente flua na mesma (a água implementa o enrolamento secundário N_2 do transformador T_1), que por sua vez é proporcional à condutância da água (representada pela resistência R). Esta corrente (que também é o enrolamento primário N_3 do segundo transformador T_2) causa um campo magnético no enrolamento secundário (N_4) do segundo transformador, onde é medida a tensão

(ou corrente) no segundo enrolamento. O toroide ou bobina de acionamento tem uma indutância $L1$ e o toroide recetor tem uma indutância $L3$.

O sensor é imerso num líquido, neste caso água do mar. Segundo a Figura 3-2, o toroide ou bobina de transmissão tem uma indutância $L1$ e o toroide recetor tem uma indutância $L3$. A aplicação de uma tensão AC ou corrente sinusoidal à bobina transmissora induz uma corrente, uma tensão indutiva $V2$ na água do mar, proporcionando uma corrente na resistência R . R representa a resistência da água, obtida a partir da condutividade e formato do meio condutor. A bobina recetora recebe o fluxo magnético da corrente na água do mar e fornece uma tensão indutiva $V3$ [35].

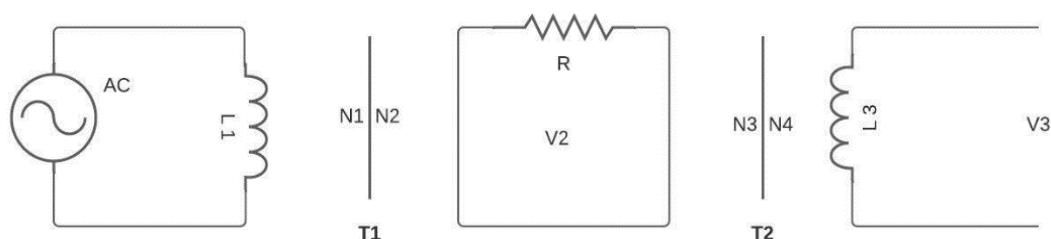


Figura 3-2-Princípio de funcionamento

Relativamente ao núcleo toroidal, foi escolhida a ferrite, como já mencionado, uma vez que as correntes de Foucault no núcleo são zero, a magnetização do material pode facilmente mudar de direção, ou seja, reduz as perdas de energia devido à histerese, aumentando assim a indutância em comparação com os outros núcleos.

Para garantir medições precisas de salinidade, será incluído um sensor de temperatura para corrigir o efeito da variação térmica na condutividade. Toda a eletrónica e seus módulos serão isolados e protegidos por resina *epóxi*.

O sistema será controlado por um microcontrolador, que é responsável por comunicar com os sensores, recolhendo os dados das variáveis.

3.1.1 Seleção dos indutores

A fim de escolher o protótipo mais adequado para medir a salinidade da água do mar, foram realizados e testados alguns protótipos. O teste, em primeiro lugar, concentra-se na verificação de comportamentos de diferentes núcleos de ferrite amorfa disponíveis. Em ferrites de dimensões semelhantes foram colocados o mesmo número de voltas para uma possível análise.

Para isso, foram escolhidos quatro núcleos de dimensões diferentes de ferrite amorfa, com diferente número de voltas com fio de cobre isolado, tal como apresentado na **Erro! A origem da referência não foi encontrada.**

Tabela 3-1- Dimensões dos modelos A, B, C e D

	A	B	C	D
Toroides				
Diâmetro Interno (mm)	19,73	7,5	10,7	12,16
Diâmetro Externo (mm)	33,25	17,4	18,1	24,35
Espessura (mm)	11,05	8,6	5,4	11,05
Número de Voltas	50	25	25	50
Diâmetro do Fio de Cobre (mm)	0,46	0,35	0,35	0,38
Referência	MP7548MDGC	MP1506L4AS	MP1603L4AS	MP2310MDGC

Como descrito anteriormente, duas bobinas foram utilizadas para implementar um sensor de salinidade. As duas bobinas que constituem cada modelo (A, B, C e D) são iguais entre si.

Para verificar o funcionamento de cada modelo, primeiramente, com uma amostra de água proveniente do mar, a tensão na bobina de recepção foi medida para diferentes tensões de alimentação a diferentes frequências. Na Figura 3-3 é possível observar a tensão na bobina de recepção, de cada modelo, para tensões de alimentação entre 50 mV a 1.5 V, aplicando frequências entre os 5 kHz a 400 kHz.

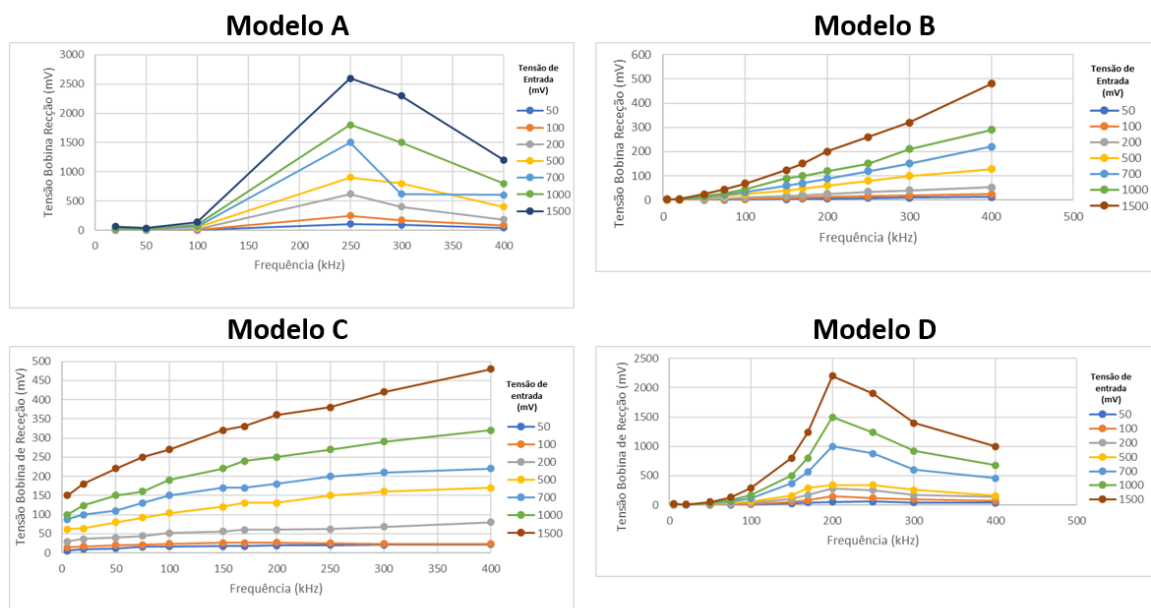


Figura 3-3-Tensão na bobina de recepção nos diferentes modelos

O teste realizado anteriormente permitiu verificar o princípio do funcionamento teórico de um sensor indutivo. Confirma-se que ao aplicar uma tensão AC à bobina de acionamento, esta irá induzir uma corrente, que por sua vez gera uma tensão indutiva na bobina de recepção.

Validado o teste anterior, foram efetuados em laboratório, através de um copo, um conjunto ensaiado desde a água com baixa salinidade, até à água mais saturada (desde 1 PSU a 50 PSU), como mostra a Figura 3-4.

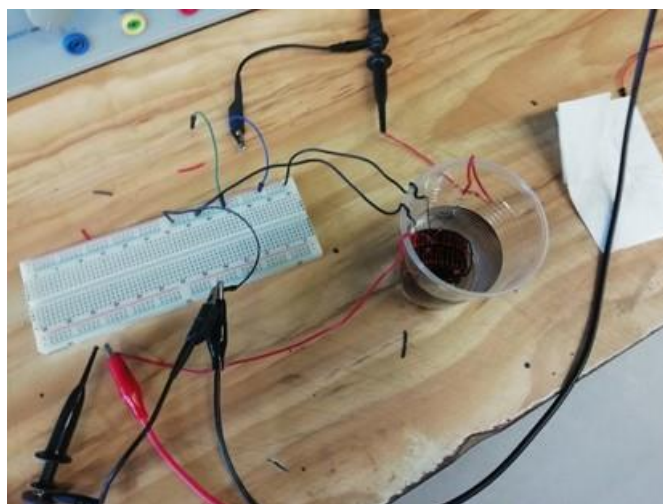
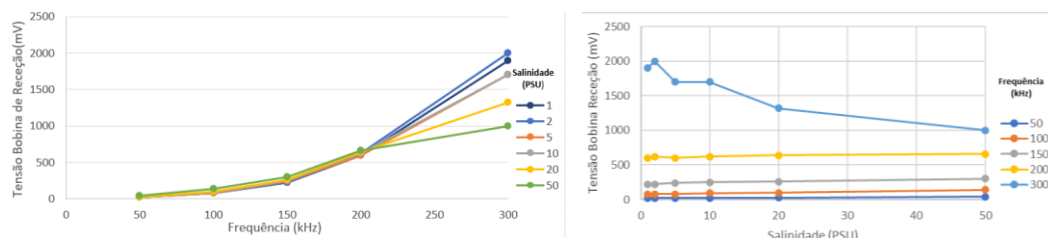


Figura 3-4-Teste em laboratório

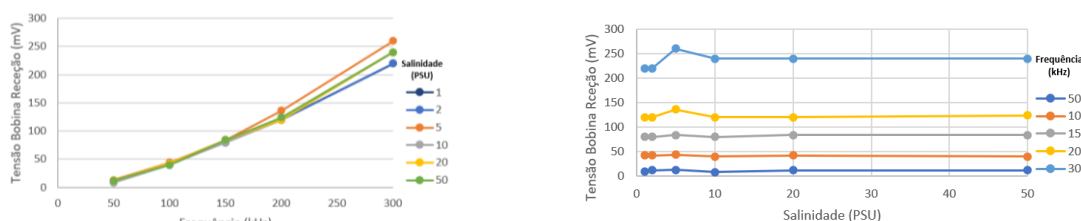
Os sensores fabricados foram testados com tensão de excitação sinusoidal (amplitude na gama de 1V). Esta escolha deve-se ao facto de, para tensões de entrada mais altas, foram obtidas tensões de saída mais altas e, consequentemente, uma relação sinal-ruído mais alta, devido à tensão de ruído

constante. A tensão foi medida na bobina recetora. Para cada bobina, testada em frequência única com uma única amostra de água, é espectável que a tensão de saída seja proporcional à tensão de entrada.

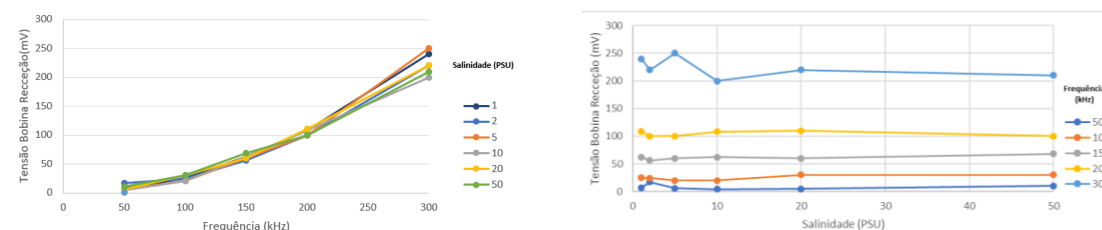
MODELO A



MODELO B



MODELO C



MODELO D

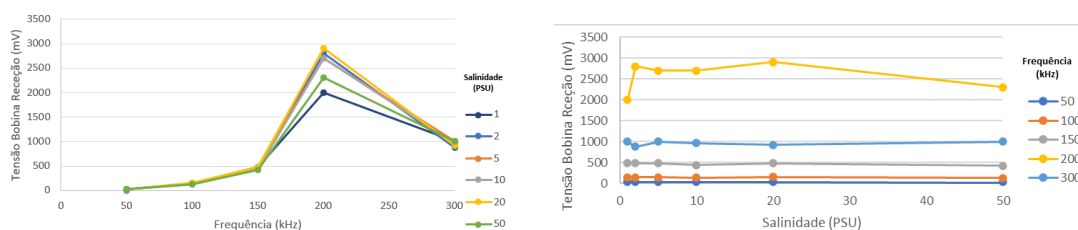


Figura 3-5-Tensão de saída em função da frequência (lado esquerdo) e tensão de saída em função da salinidade (lado direito) de cada modelo

A Figura 3-5 apresenta a amplitude da tensão de saída (eixo y), em função da frequência aplicada (eixo x) para diversos valores de salinidade da água (diferentes cores de linha).

Para além disso, é também exibida a tensão de saída (eixo y), em função da salinidade da amostra (eixo x) para diversos valores de frequência (diferentes cores de linha), para cada modelo.

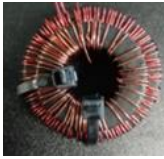
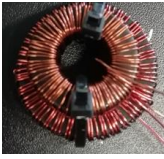
Pela análise do gráfico do lado esquerdo da Figura 3-5, verifica-se que existe uma frequência ressonante apenas num dos modelos, D (aproximadamente 200 kHz), na gama de frequências analisada (50-300kHz). A frequência de ressonância caracteriza-se por uma tensão de saída superior,

comparativamente à tensão de saída obtida nas outras frequências. No modelo D, à frequência de ressonância, a salinidade influencia a tensão de saída. Abaixo ou acima desta frequência de ressonância, a influência da salinidade é menos notória. No entanto, através da análise da tensão de saída em função da salinidade do modelo D (Figura 3-5) a variação da tensão de saída não é monótona (uma tensão é monótona se for sempre crescente ou decrescente), logo não permite determinar a salinidade pelo valor de tensão obtida. Para um determinado valor de tensão de saída correspondem vários valores de salinidade. Não foram utilizadas frequências superiores, dado tornar a eletrônica mais complexa.

Verifica-se, também, que nenhum dos modelos consegue discriminar adequadamente as diferentes concentrações de sal, embora o modelo A, a 300 kHz seja o que apresentou melhores resultados. Por essa razão, para este teste, foram adicionados mais dois conjuntos de sensores, caracterizados na Tabela 3-2.

Os sensores E e F usam bobinas de tamanhos diferentes, combinando os modelos A e C e os modelos A e D, respetivamente.

Tabela 3-2-Dimensões dos modelos E e F

Toroides	E	F
	 A+C	 A+D
Diâmetro Interno (mm)	19,73	19,73
	10,7	12,16
Diâmetro Externo (mm)	33,25	33,25
	18,1	24,35
Espessura (mm)	11,05	11,05
	5,4	
Número de Voltas	100	100
	25	50
Diâmetro do Fio de Cobre (mm)	0,46	0,46

Realizando o mesmo teste, a Figura 3-6 apresenta a tensão de saída (eixo y), em função da frequência aplicada e também, a tensão de saída (eixo y) em função da salinidade (eixo x) para diversos valores de frequência.

MODELO E

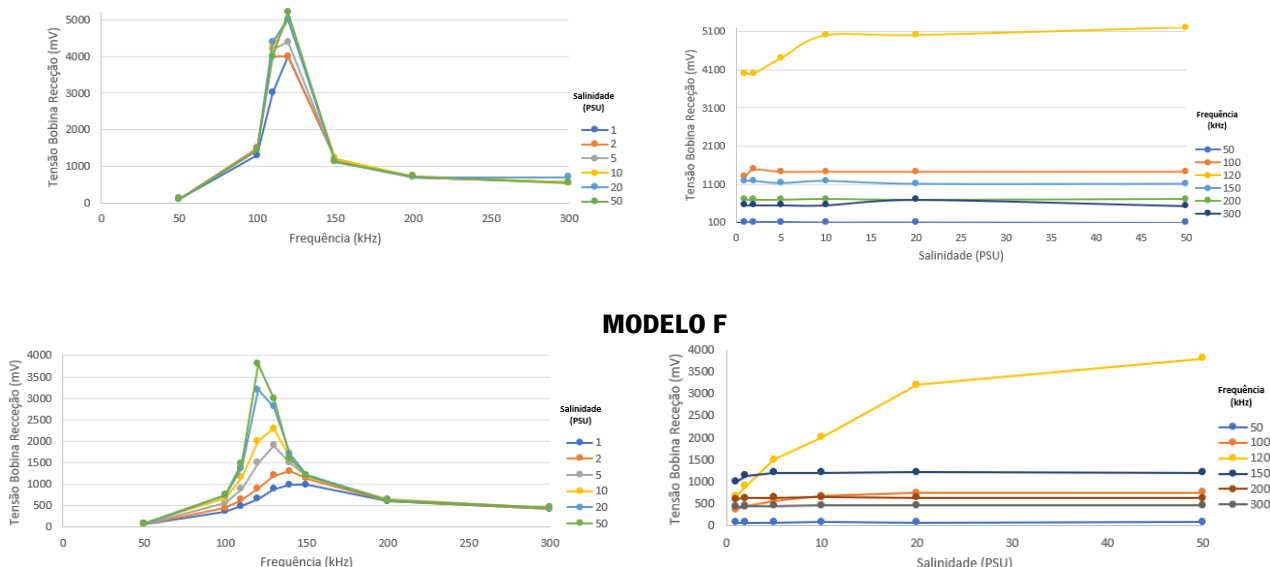


Figura 3-6-Tensão de saída em função da frequência (lado esquerdo) e tensão de saída em função da salinidade (lado direito) do modelo E e F

Estes modelos também apresentam frequências de ressonância na gama medida (50-300 kHz). No modelo E e F é, respetivamente, 130 kHz e 120 kHz, aproximadamente. Verifica-se também que, no modelo F, apenas próximo da frequência de ressonância a tensão de saída varia com a salinidade.

No modelo F, foram analisadas detalhadamente frequências entre 100 kHz e 150 kHz, Figura 3-7, e é notório que numa escala logarítmica de salinidade a relação é quase linear, aumentando a capacidade de implementação de um sensor de grande escala, medindo desde água doce até água de alta salinidade.

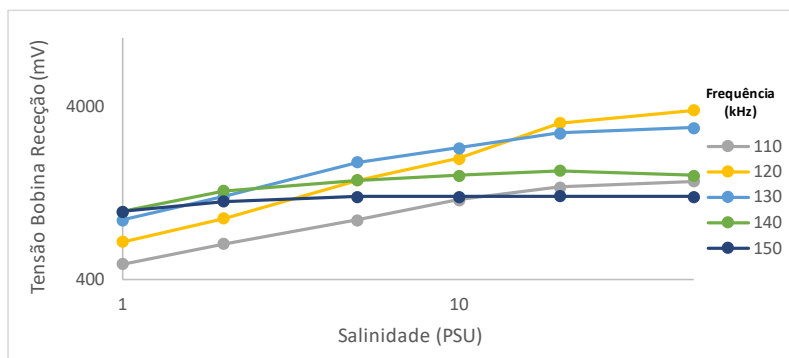


Figura 3-7-Tensão de saída em função da salinidade entre 100 kHz e 150 kHz- Modelo F

Analisando todos os modelos em teste, é possível verificar que o modelo F, é o mais favorável para a medição de salinidade quando utilizado com excitação a 120 kHz. Foi também possível analisar que as ferrites amorfas, nomeadamente este modelo, apesar de apresentar sempre o mesmo comportamento, não apresenta uma repetibilidade nas medições efetuadas na bobina de recepção.

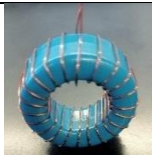
Embora tenha sido verificado que uma ferrite com material amorfo poderia ser uma escolha vantajosa, mas com pouca repetibilidade para o objetivo do projeto, foi realizado o mesmo teste,

utilizando uma ferrite com material Mn-Zn. A utilização de ferrites com material de Mn-Zn pode ser mais vantajosa que o material amorfo para medição de salinidade devido às suas propriedades magnéticas. A ferrite de Mn-Zn possui uma alta permeabilidade magnética, como já referido no Capítulo 2, o que significa que é altamente sensível a campos magnéticos externos. A salinidade da água afeta a condutividade elétrica, que por sua vez altera o campo magnético da solução.

Além disso, a ferrite de Mn-Zn é mais estável e confiável em termos de variações de temperatura em comparação com o material amorfo. Isso é importante para medições precisas e confiáveis da salinidade, pois a temperatura da água afeta a condutividade elétrica. Verifica-se, também, que a permeabilidade magnética de um núcleo de material amorfo é, em geral, significativamente menor do que a de um núcleo de material de Mn-Zn, geralmente em torno de 10 vezes menor. Consecutivamente, o campo magnético é menos concentrado no material amorfo. Para obter a mesma indutância, um núcleo de material amorfo precisaria ter mais voltas do que um núcleo de material de Mn-Zn.

Com o intuito de aprimorar o teste anterior, conduziu-se uma nova análise, utilizando núcleos de ferrite de Mn-Zn com material específico denominado N87, cujas características são apresentadas na Tabela 3-3. A principal diferença entre ferrites de Mn-Zn e a ferrite N87 reside nas composições químicas específicas e nas propriedades magnéticas resultantes.

Tabela 3-3- Dimensões do modelo de N87

Toroides	
Diâmetro Interno (mm)	14.8
Diâmetro Externo (mm)	25.3
Espessura (mm)	10
Número de Voltas	27
Diâmetro do Fio de Cobre (mm)	0.35
Fabricante/Referência	TDK/B64290L0618X087

Duas bobinas foram utilizadas para implementar o sensor de salinidade. Os sensores fabricados foram testados com tensão de excitação sinusoidal (amplitude na gama de 1V). A Figura 3-8 apresenta a tensão de saída (eixo y), em função da frequência aplicada. A tensão de saída (eixo y) em função da salinidade (eixo x) para diversos valores de frequência é ilustrada também na Figura 3-8.

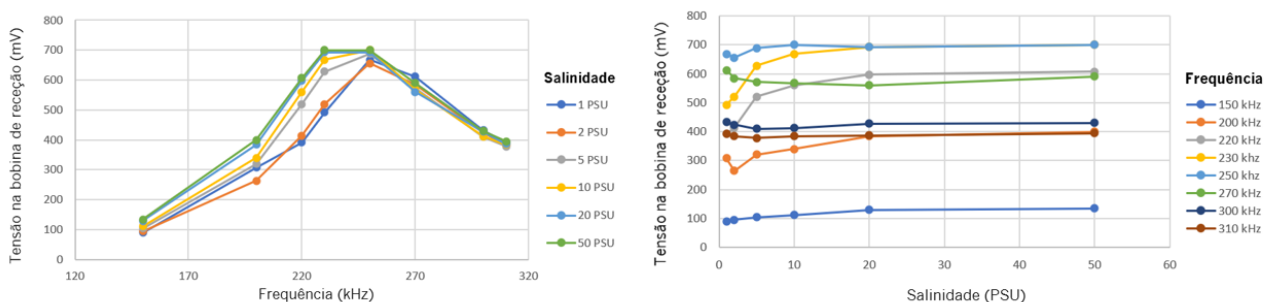


Figura 3-8- Tensão de saída em função da frequência (lado esquerdo) e tensão de saída em função da salinidade (lado direito) com indutor de material N87

Ao analisar o gráfico apresentado, é possível notar que a tensão aumenta com a salinidade, até chegar a uma frequência de aproximadamente 250 kHz, a partir da qual começa a diminuir. É também notória a alteração da frequência de ressonância com a salinidade.

Outro ponto importante a ser destacado é a maior discrepância entre os valores medidos para salinidades baixas e altas. É possível concluir que o uso de ferrites de Mn-Zn é mais adequado para medições de salinidade, devido à sua maior capacidade de concentração do campo magnético e, consequentemente, maior sensibilidade à mudança de salinidade.

No decorrer deste estudo, foram realizados uma série de testes para determinar a influência da tensão de excitação na resposta do sensor. Para isso, foram utilizadas diferentes tensões de excitação em várias salinidades cujas respostas foram medidas e registadas, Figura 3-9.

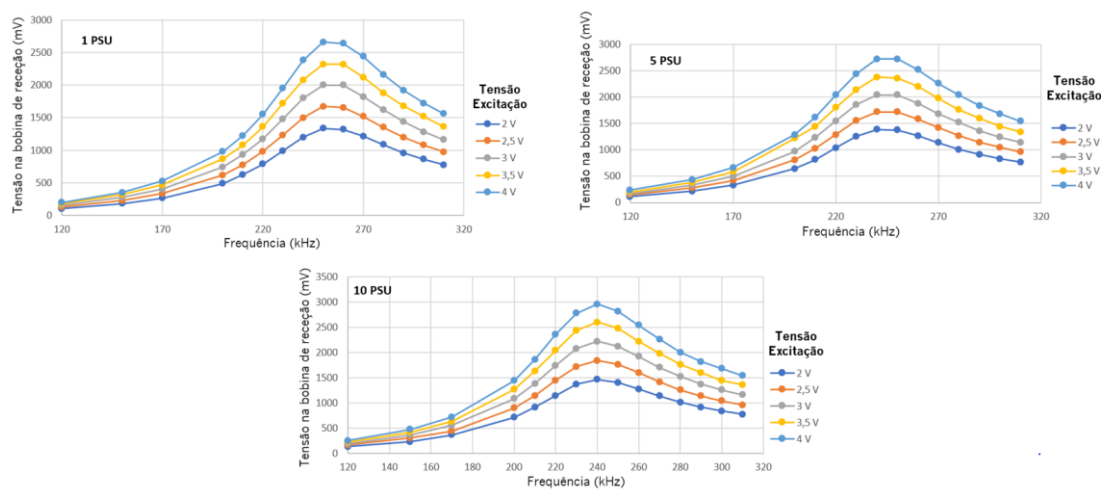


Figura 3-9- Tensão de saída em função da frequência para diferentes valores de tensão de excitação

Os resultados destes testes mostraram que a tensão de excitação não tem influência significativa na resposta do sensor. Na verdade, a resposta do sensor foi bastante linear com a tensão de excitação. Isso sugere que o comportamento do sensor é mais dependente das propriedades do material de ferrite e da frequência de excitação utilizados do que da tensão de excitação. A tensão de excitação não é um detalhe importante para a operação do sensor.

Foi também realizado um teste utilizando apenas material Mn-Zn. As características desse material estão apresentadas na Tabela 3-4.

Tabela 3-4- Dimensões do modelo de Mn-Zn

Toroide	
Diâmetro Interno (mm)	15
Diâmetro Externo (mm)	25
Espessura (mm)	13
Número de Voltas	27
Diâmetro do Fio de Cobre (mm)	0.35
Fabricante/Referência	TDK/HF90T25X13X15

Os sensores fabricados foram testados com a mesma tensão de excitação sinusoidal do teste anterior. A Figura 3-10 apresenta a tensão de saída (eixo y), em função da frequência aplicada. A tensão

de saída (eixo y) em função da salinidade (eixo x) para diversos valores de frequência é ilustrada também na Figura 3-10.

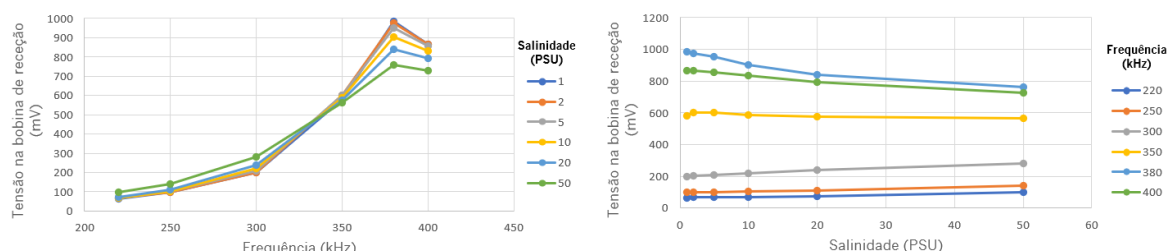


Figura 3-10-Tensão de saída em função da frequência (lado esquerdo) e tensão de saída em função da salinidade (lado direito) com material Mn-Zn

Comparando com o teste anterior, observa-se que houve um aumento na frequência de ressonância, além da presença de dois comportamentos distintos: um antes da frequência de ressonância e outro após a frequência de ressonância. Isso é evidente porque, à medida que a salinidade aumenta, a tensão também aumenta antes da frequência de ressonância, enquanto após a frequência de ressonância a tensão diminui. Para este projeto específico, é importante levar em consideração que a faixa de frequência ideal é abaixo de 300 kHz (devido a limitações do circuito eletrônico receptor). Por essa razão, o conjunto de bobinas atualmente disponível não atende aos requisitos necessários.

Utilizando o mesmo conjunto de bobinas do teste anterior, realizou-se uma modificação no número de voltas, reduzindo-o para 10. A tensão de excitação permaneceu a mesma, com 1 V, e a medida foi feita exclusivamente para uma salinidade de 5 PSU, Figura 3-11. Durante a análise, foi observado um aumento na frequência de ressonância, o qual confirma a equação 2-5. Ao diminuir o número de voltas das bobinas, a indutância (L) é reduzida. Consequentemente, a frequência de ressonância (f) aumenta, mantendo-se o valor da capacitância (C) constante.

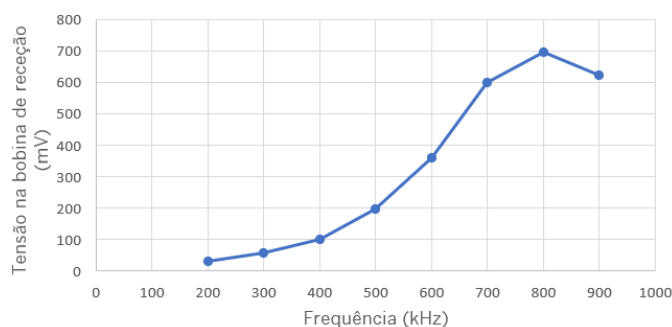


Figura 3-11-Tensão de saída em função da frequência 5 PSU

Após análise de todos os testes realizados para este projeto, resumidos na Tabela 3-5, conclui-se que a melhor opção é a utilização da bobina toroidal com material N87, apresentando as características listadas na Tabela 3-3.

Tabela 3-5- Resumo testes realizados em laboratório

Modelo	Material do Núcleo	Número de Voltas	Medição Sensor Indutivo	Frequência de Operação
A	Ferrite Amorfa	50	2 PSU – 50 PSU	300 kHz
B	Ferrite Amorfa	25	Comportamento inaceitável	----
C	Ferrite Amorfa	25	Comportamento inaceitável	----
D	Ferrite Amorfa	50	Comportamento inaceitável	----
E	Ferrite Amorfa	100/25	1 PSU - 50 PSU	120 kHz
F	Ferrite Amorfa	100/50	1 PSU - 50 PSU	100 kHz - 150 kHz
N87	Ferrite Mn-Zn	27	1 PSU- 50 PSU	220 kHz – 250 kHz
Mn-Zn	Ferrite de Mn-Zn	27	1 PSU – 50 PSU	220 kHz- 230 kHz

3.1.2 Encapsulamento

Selecionando o melhor modelo para a aplicação pretendida, é necessário isolar o sensor para verificar o comportamento do mesmo.

O tipo de encapsulamento escolhido também pode afetar as propriedades elétricas do sensor. Por exemplo, o encapsulamento pode afetar a capacitância parasita do dispositivo e, por sua vez, a frequência de ressonância. É importante escolher um material de encapsulamento com propriedades dielétricas apropriadas que possam minimizar esses efeitos indesejados [36].

Outra consideração importante é o ambiente em que o sensor será usado. Em ambientes agressivos, como em aplicações marítimas, o encapsulamento deve ser capaz de proteger o sensor contra a corrosão e a exposição à água salgada. Nesses casos, pode ser necessário escolher materiais de encapsulamento específicos, como resina epóxi, que são resistentes à corrosão. O encapsulamento é uma parte crítica na fabricação deste tipo de sensores, e a escolha do material de encapsulamento deve ser cuidadosamente considerada para garantir a proteção adequada e garantir a operação confiável do dispositivo em ambientes agressivos.

O sensor que foi colocado em teste para isolamento foi o modelo F, ou seja, composto por duas bobinas de tamanhos diferentes de material amorfo. Primeiro, o sensor foi imerso em silicone com a ajuda de um molde em PLA, como ilustrado na Figura 3-12.

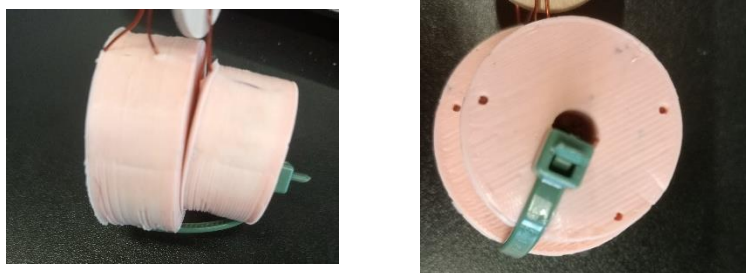


Figura 3-12-Sensor isolado em silicone

Foram realizados os mesmos testes, descritos no subcapítulo anterior, em laboratório. Analisando a Figura 3-13, é notória uma redução de tensão na bobina de recepção e a alteração na frequência de ressonância, para 250 kHz. Este evento pode ter acontecido devido a uma redução muito acentuada no caminho de água que passa pelas bobinas ou pelo material isolador.

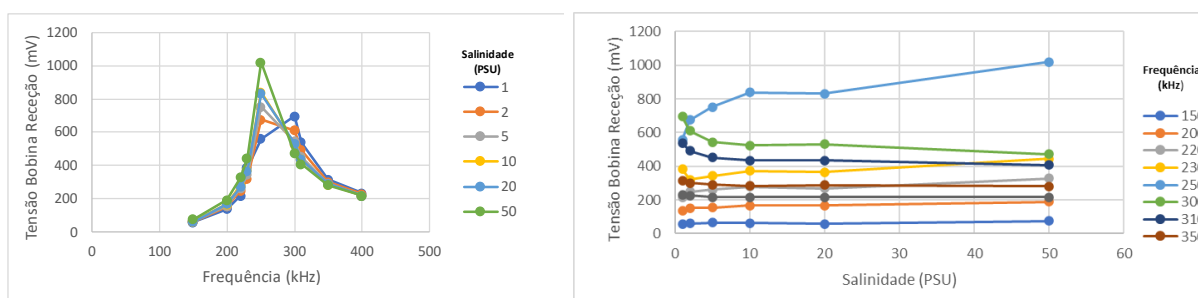


Figura 3-13- Tensão de saída em função da frequência (lado esquerdo) e tensão de saída em função da salinidade (lado direito) em silicone

Para melhor avaliar o efeito do material isolante, o mesmo conjunto de bobinas foram encapsuladas em resina epóxi como é possível observar pela Figura 3-14.



Figura 3-14-Sensor imerso Resina Epóxi

Os mesmos testes foram realizados. É possível notar o diferente comportamento na Figura 3-15. A frequência de ressonância não é atingida com frequências de excitação até 500 kHz. Nestas condições não é possível discriminar as diferentes concentrações de água com sal.

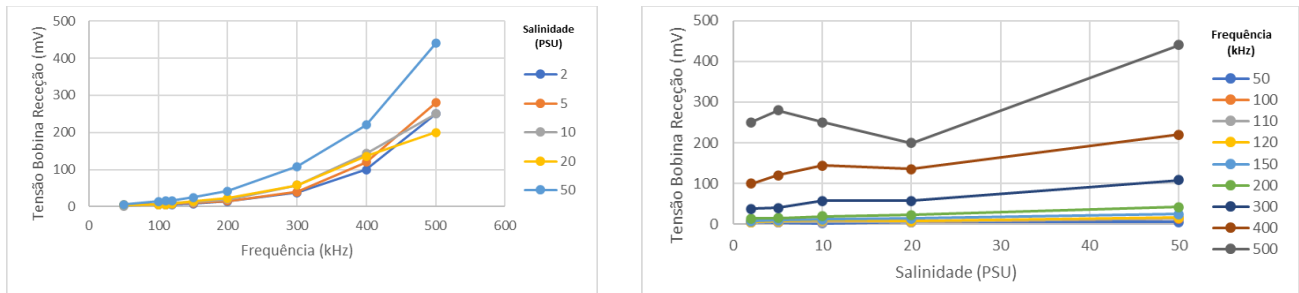


Figura 3-15-Tensão de saída em função da frequência (lado esquerdo) e tensão de saída em função da salinidade (lado direito) em resina epóxi

Verificando que, o tipo de material em que o sensor é encapsulado influencia a saída do sensor, é necessário aferir se a quantidade colocada de resina ou silicone interfere no comportamento do mesmo. Para isso, foi empregue um isolante em spray (Plastik 70) como apresentado na Figura 3-16, que permite uma camada muito fina de isolante.



Figura 3-16-Spray isolante Plastik 70

Como anteriormente descrito, o sensor foi, novamente, colocado numa solução aquosa com diferentes concentrações de sal, entre 1 PSU a 50 PSU. Os resultados estão apresentados na Figura 3-17.

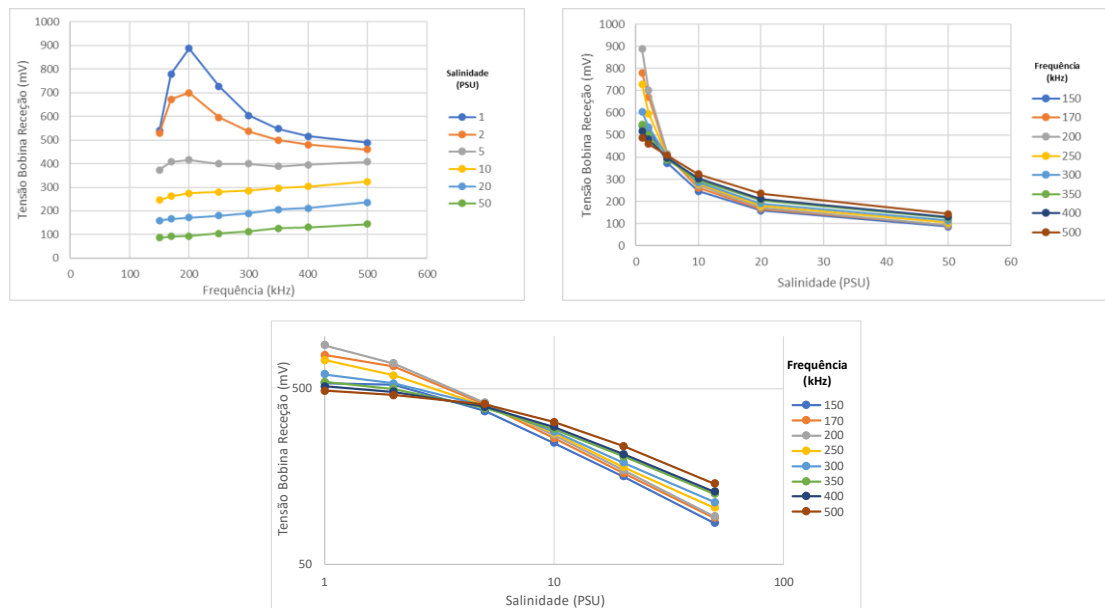


Figura 3-17-Tensão de saída em função da frequência (lado esquerdo), tensão de saída em função da salinidade (lado direito) e tensão de saída em função da salinidade em escala logarítmica em Plastik 70

É possível verificar que, o sensor, nestas condições, consegue discriminar as diferentes concentrações de sal, sendo similar aos primeiros testes. Neste caso, é observável que a tensão do sensor diminui à medida que a salinidade aumenta, contrariamente ao modelo F anterior (Figura 3-7) onde a amplitude da tensão aumentava com a salinidade. Não foi encontrada justificação para esta alteração do comportamento, que se verificou ao revestir as bobinas com Plastik 70. Por outro lado, é importante ressaltar que a opção de utilizar Plastik 70 como material de encapsulamento não é recomendada para este tipo de sensor. Como é aplicada uma fina camada de resina, com o passar do tempo, os sais presentes no ambiente marítimo podem começar a acumular-se entre os fios de cobre, Figura 3-18, afetando a precisão das medições e tornando os resultados não confiáveis.

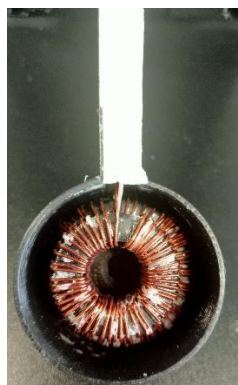


Figura 3-18- Incrustação

Por essa razão, é fundamental utilizar materiais de encapsulamento mais resistentes e duráveis, capazes de proteger adequadamente o sensor contra possíveis danos e interferências externas.

Após terem sido feitos testes em diferentes materiais de encapsulamento para o sensor, concluiu-se que o silicone é o material mais adequado. Quando o sensor é encapsulado em silicone, o seu comportamento não sofre alterações significativas, permitindo a discriminação das salinidades. É notório também que a frequência de ressonância é alterada. Por outro lado, quando o sensor é encapsulado em resina ou Plastik 70, a sua fiabilidade é posta em causa. No caso da resina o sensor não tem um comportamento linear, não conseguindo discriminar com precisão as diferentes salinidades. No Plastik 70, apesar de um bom resultado, os sais podem encrustar-se entre os fios de cobre e alterar o resultado. Assim, neste projeto será utilizado silicone como material de encapsulamento, garantindo assim a estabilidade e a precisão das medidas ao longo do tempo.

3.2 Eletrónica de Instrumentação

Neste subcapítulo são abordados todos os componentes que permitem realizar a leitura e tratamento de dados do sensor de salinidade e a estrutura do sensor. Estes são compostos pela eletrónica de instrumentação, processamento de dados realizado pelo microcontrolador, alimentação do sistema, memórias e interfaces e o sensor de pressão e temperatura, como ilustrado na Figura 3-19.

A eletrónica de instrumentação possibilita a medição da salinidade, incorporando o sensor desenvolvido. São necessários um oscilador, que alimentará a bobina de acionamento, um retificador e um filtro passa-baixo, ligado na bobina de receção, para obter um valor DC proporcional à amplitude do sinal recebido que permite a leitura pelo ADC do microcontrolador, para posterior tratamento de dados e cálculo da salinidade.

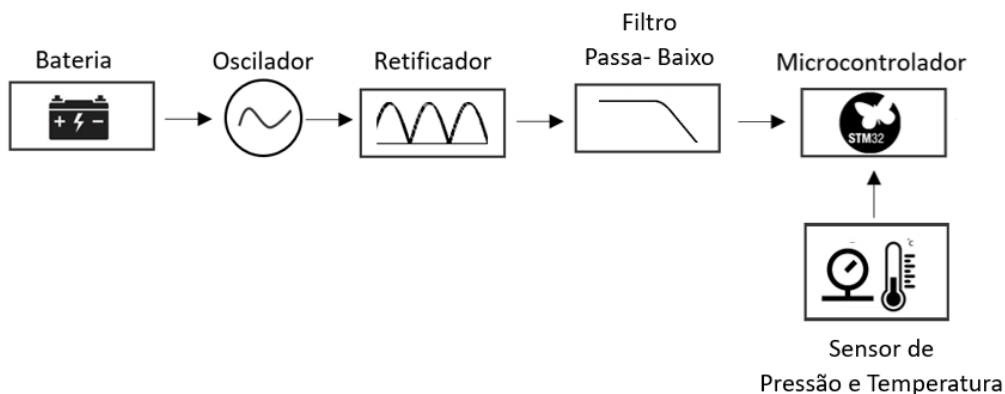


Figura 3-19-Diagrama de blocos do sistema total

3.2.1 Oscilador

O oscilador é composto por dois andares. O primeiro andar forma um oscilador com uma saída de onda quadrada de 260 kHz, e o segundo andar, filtra os harmônicos da onda quadrada e produz uma saída de onda sinusoidal pura. O circuito é apresentado na Figura 3-20, em que o IC4 são dois ampops. A frequência do oscilador pode ser ajustada por C19 e R12. A amplitude da onda sinusoidal pode ser ajustada por R10 e R11.

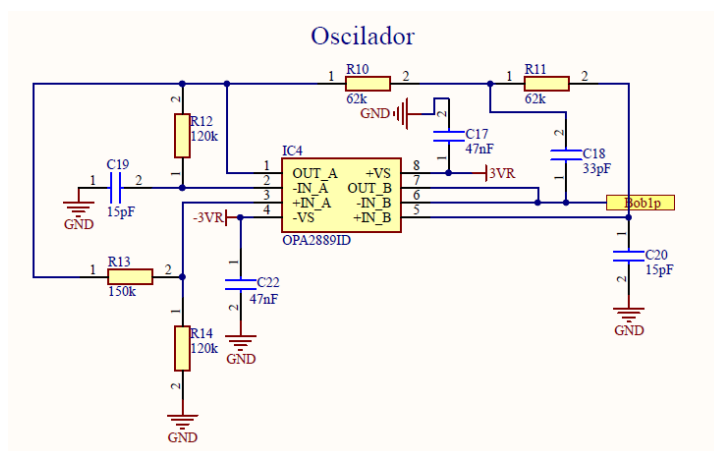


Figura 3-20-Esquemático do oscilador no Altium

3.2.2 Retificador de Onda Completa

Na Figura 3-21 é possível observar um retificador de precisão de onda completa. Os dois *ampops* controlam a polarização dos díodos, com o intuito de alterar o sinal com base na polaridade do sinal de entrada, alcançando a retificação de onda completa. O condensador C16 permite a estabilidade a altas frequências, evitando oscilações.

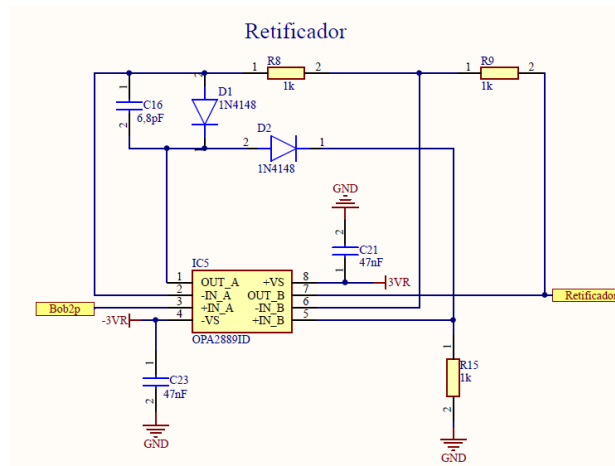


Figura 3-21-Esquemático do Retificador de onda completa no Altium

3.2.3 Filtro RC

De seguida, o sinal retificado é filtrado, utilizando um filtro passa-baixo RC, obtendo na sua saída o valor média do sinal retificado. O circuito RC foi dimensionado para uma frequência de 2,6 kHz. O dimensionamento dos componentes é possível através da Equação 3-1.

$$F_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad 3-1$$

$$F_c = 2,6 \text{ kHz} \rightarrow R_1 = 1,3 \text{ kHz} ; C = 47 \text{ nF}$$

Na Figura 3-22 é apresentado o esquemático do filtro RC no Altium.

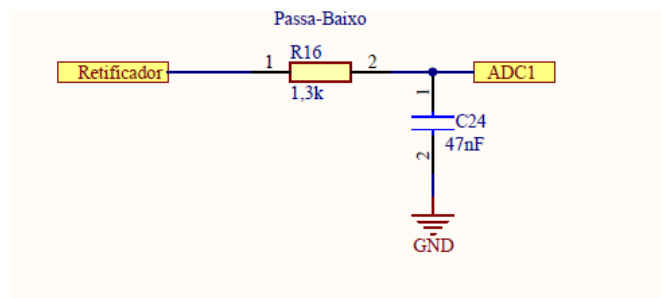


Figura 3-22-Esquemático filtro RC no Altium

3.2.4 Amplificador Operacional

Como visto anteriormente, tanto o circuito oscilador como circuito retificador, utilizam dois *ampops*, sendo estes iguais.

Neste projeto, vão ser utilizados amplificadores operacionais de alta velocidade, OPA2889ID, como ilustra a Figura 3-23. Para além de suportar uma gama de operação entre os $\pm 1.3\text{ V}$ a $\pm 6\text{ V}$, tem uma corrente quiescente baixa, $460\text{ }\mu\text{A}$ e um consumo de $18\text{ }\mu\text{A}$, quando o amplificador se encontra desligado (*shutdown*) [37]. A largura de banda excede 100 MHz para ganho unitário e o slew-rate é de $200\text{ V}/\mu\text{S}$, características relevantes para o circuito a implementar. As tensão de entrada e saída situam-se entre -2 V e $+2\text{ V}$, quando o *ampop* é alimentado a $+3\text{V}$ e -3V .



Figura 3-23-Ampop OPA2889ID

3.3 Pilha LI-ION

Para alimentação da eletrónica de instrumentação e de todos os elementos associados ao tratamento de dados do sensor é utilizada uma bateria de lítio recarregável, de 3.7 V , Figura 3-24, no formato 18650 (18 mm diâmetro e 65 mm comprimento) da marca LG, com 3350 mAh de capacidade e capaz de debitar 0.65 A continuamente e 4.9 A de pico.[38]

Esta bateria proporciona uma autonomia prevista de aproximadamente um ano e seis meses (face aos valores de consumo teórico de cada componente utilizado, indicado em cada subcapítulo do mesmo) ao realizar medições de 2 em 2 minutos para acompanhar a evolução da salinidade da água do mar ao longo do tempo. Esta autonomia é aceitável para garantir uma monitorização contínua e abrangente das mudanças na salinidade, permitindo uma análise detalhada ao longo de um período significativo.



Figura 3-24-Pilha LI-ION

3.4 Carregador de Bateria

O carregador de bateria utilizado neste projeto foi o DFR0667, Figura 3-25. Este carregador foi projetado para baterias de lítio de 3.7 V de célula única. Devido à sua dimensão reduzida é possível integrá-lo facilmente no projeto.[39]



Figura 3-25-DFROBOT DFR0667

3.5 Reguladores

Uma vertente importante a considerar é que os *ampops*, microcontrolador, sensor de pressão de temperatura, entre outros, tenham uma tensão de alimentação constante. Por essa razão, é necessário a utilização de reguladores, dado a tensão da bateria variar entre os 4.2V quando carregada e 3V quando totalmente descarregada.

Neste trabalho são empregues dois reguladores: Regulador *Buck* (XC9265A301MR-G), e um Regulador Inversor (LTC1261LCS8#PBF), Figura 3-26.



Figura 3-26-Regulador Buck (direita) e Regulador Inversor (esquerda)

O Regulador *Buck*, alimenta os *ampops*, microcontrolador e sensor de pressão e temperatura, com uma tensão constante de +3 V. Este valor limita a tensão da bateria, que deve estar acima de aproximadamente 3.1V, para manter o funcionamento do regulador. O consumo de corrente deste regulador é abaixo de 0.8 μ A. É possível observar, na Figura 3-27, o esquemático do regulador, como indicado no *datasheet*. Analisando a figura, são utilizados dois reguladores deste tipo. Isto acontece, porque o microcontrolador não pode ser desligado, ao contrário dos *ampops*, que devem ser desligados quando não estão em funcionamento, para reduzir o consumo. O acionamento destes é controlado pelo microcontrolador, com a utilização do pino “Enable Reg” [40].

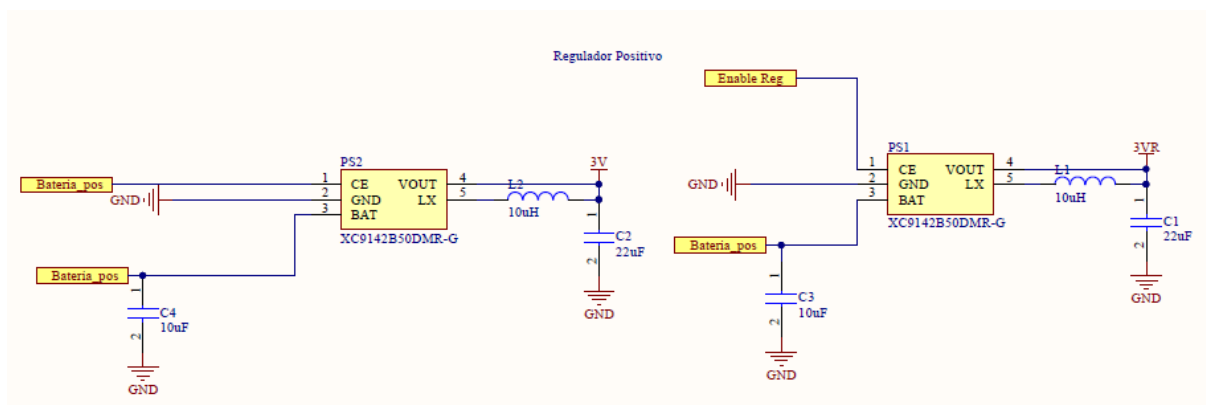


Figura 3-27-Esquemático do Regulador Buck, no Altium

O Regulador Inversor (LTC1261LCS8#PBF), Figura 3-28, por sua vez, alimenta, também, o *ampop* com -3 V. Na figura seguinte é apresentado o esquemático, como indicado no *datasheet*. Este regulador permite ajustar a tensão de saída do mesmo, dimensionando duas resistências [41].

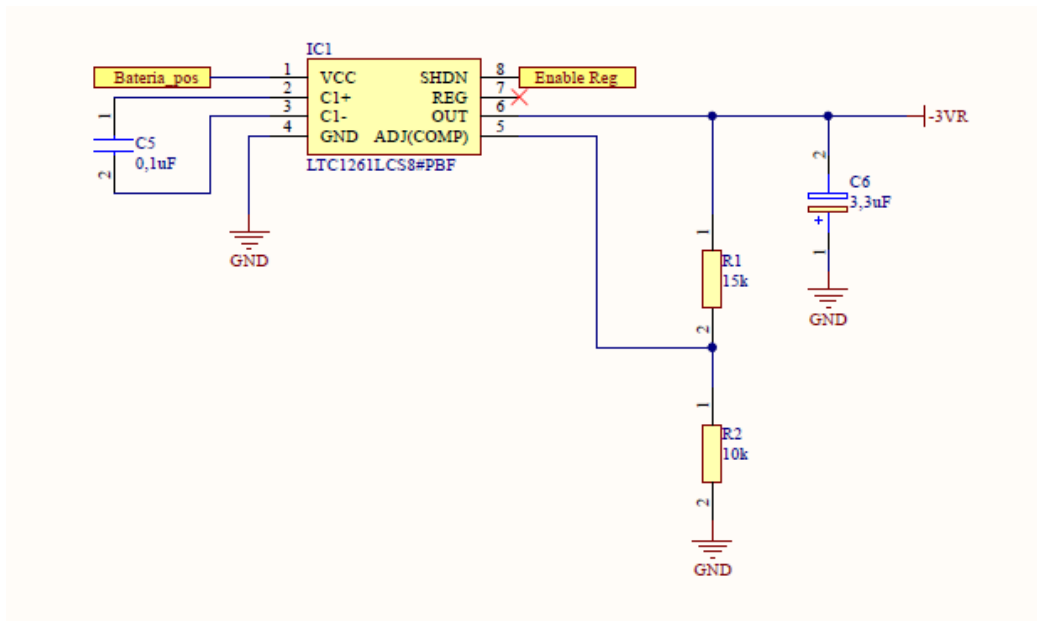


Figura 3-28-Esquemático do Regulador Inversor, no Altium

A equação do seu dimensionamento é apresentada na 3-2.

$$V_{out} = -1.23 V \times \left(\frac{R1 + R2}{R2} \right) \quad 3-2$$

$$V_{out} = -3 V \rightarrow R1 = 15 k\Omega ; R2 = 10 k\Omega$$

Apesar de ter um consumo que excede os 650 µA, este regulador permite o *shutdown*, e o consumo desce para 5 µA.

3.6 Sensor de Pressão e Temperatura

Foi integrado um sensor de temperatura e pressão MS5837-30BA, Figura 3-29, que mede a temperatura numa gama entre -20 °C a 85 °C com resolução de 0.0022 °C. Em relação à pressão, é possível ler pressões até 30 bar com resolução de 0.2 mbar. O sensor comunica com o microcontrolador utilizando o protocolo I2C, tendo um tempo de leitura inferior a 0,5 ms e um consumo (em modo sleep) de 0,6 µA [42].

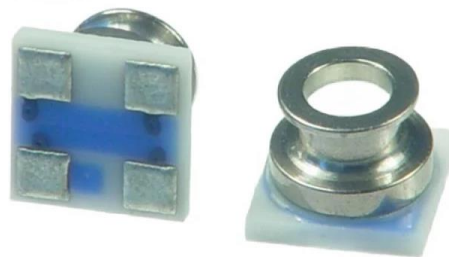


Figura 3-29-Sensor de pressão e temperatura, MS5837-30BA

3.7 Microcontrolador

O microcontrolador é responsável por comunicar com os sensores, recolher os dados das variáveis e armazená-los na memória externa.

Foi escolhido o microcontrolador STM32L010K8T6, Figura 3-30 por ser de tamanho reduzido e pertencer a uma família de microcontroladores de baixo consumo, com um número reduzido de pinos (cerca de 32 pinos) e velocidade de processamento adequadas à aplicação do sensor.



Figura 3-30- STM32L010K8T6

Possui um processador Cortex-M3 de 32 bits e possui 32 KB de memória flash e 8 KB de SRAM. Inclui interfaces de comunicação como USART, I2C e SPI, além de periféricos de entrada e saída como GPIOs, timers e ADCs. Opera numa tensão de alimentação de 2.0V a 3.6V.[43]

O microcontrolador é responsável por adquirir variáveis de condutividade, temperatura e pressão; converter para salinidade e transmitir os dados para um *data logger*, onde são armazenados. O esquema de ligações do microcontrolador está representado na Figura 3-31.

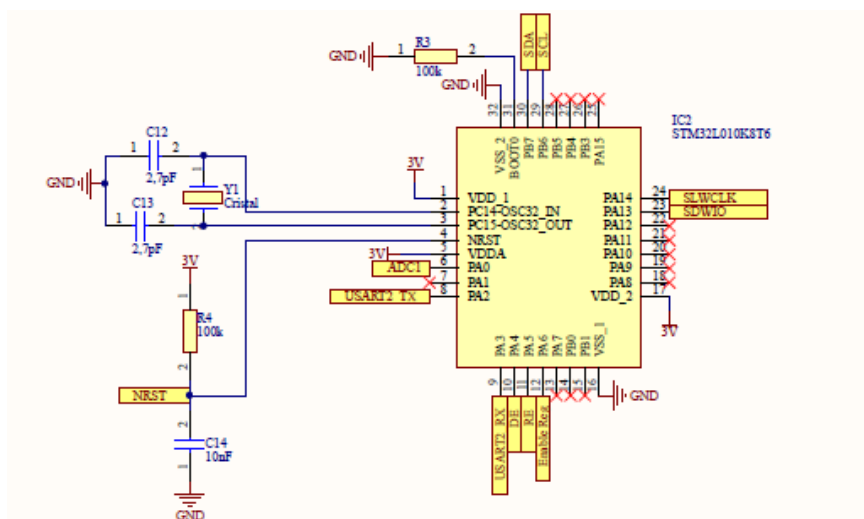


Figura 3-31-Esquemático do microcontrolador no Altium

3.8 Desenho do Circuito Impresso

Neste subcapítulo é descrito o design e resultado da colocação de todos os componentes, caracterizados anteriormente, numa PCB.

A PCB, Figura 3-32, é composta pela eletrônica de instrumentação, sensor de pressão e temperatura, microcontrolador, para posterior processamento de dados e todos os componentes necessários para a comunicação. À exceção de alguns condensadores, que necessitam de se encontrar perto do microcontrolador, todos os componentes foram colocados numa camada.

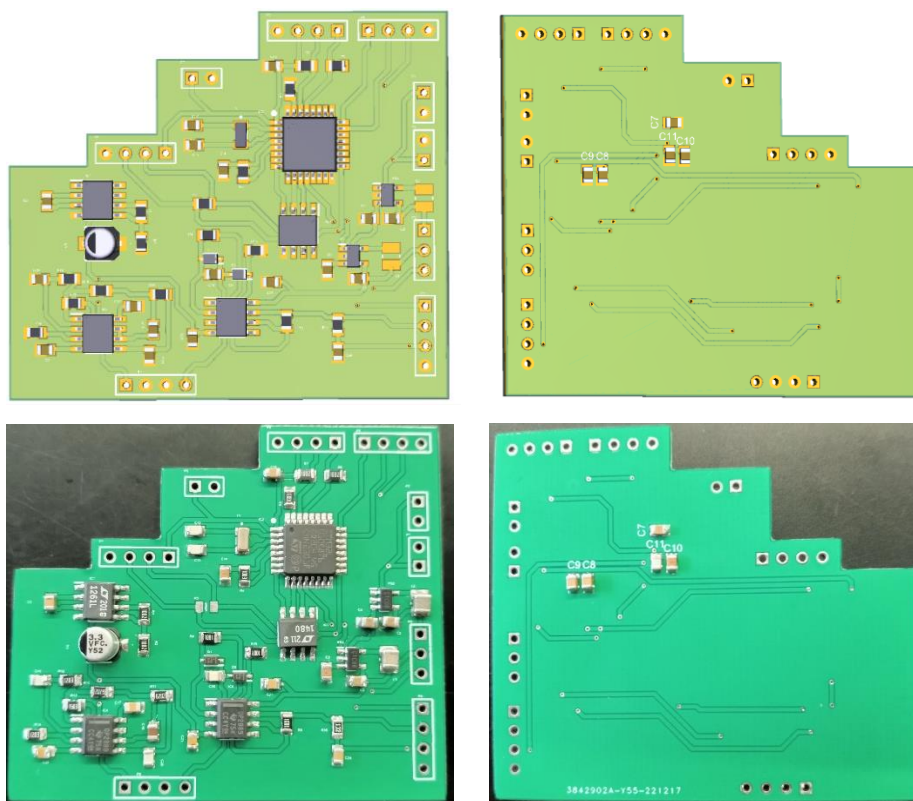


Figura 3-32-PCB (lado esquerdo Top Layer e do lado direito Bottom Layer)

3.9 Processamento de Dados

O processamento de dados é o processo de recolher, armazenar e posteriormente analisar as informações recebidas pelo sensor. Neste projeto, é recolhido o valor do ADC, temperatura e pressão para posteriormente, essa informação, ser tratada e convertida num valor de salinidade. A monitorização desse processo é realizada pela STM32L010K8T6, características apresentadas no subcapítulo anterior.

O processo de recolha é realizado pelo RS-485 ilustrado na Figura 3-33[44].



Figura 3-33- LTC1480-RS485

O RS-485 é um padrão de comunicação série que permite a conexão de até 32 dispositivos numa única linha de comunicação. É baseado no padrão RS-232, mas oferece maior distância de transmissão e resistência a interferências eletromagnéticas.

No RS-485, os dados são transmitidos através de duas linhas, A e B. A linha A é usada para transmitir um sinal positivo, enquanto a linha B é usada para transmitir um sinal negativo. O dispositivo recetor comparará esses dois sinais para recuperar o sinal original.

O fluxograma na Figura 3-34 indica que há um período de espera antes que a medição dos dados possa ocorrer. Após esse período, quando *tempo_espera*==1, a medição dos dados é realizada, onde *flag_adc*==1, e, em seguida, o sistema é desligado, *desliga_sistema*==1, até que a próxima medição dos dados seja feita novamente.

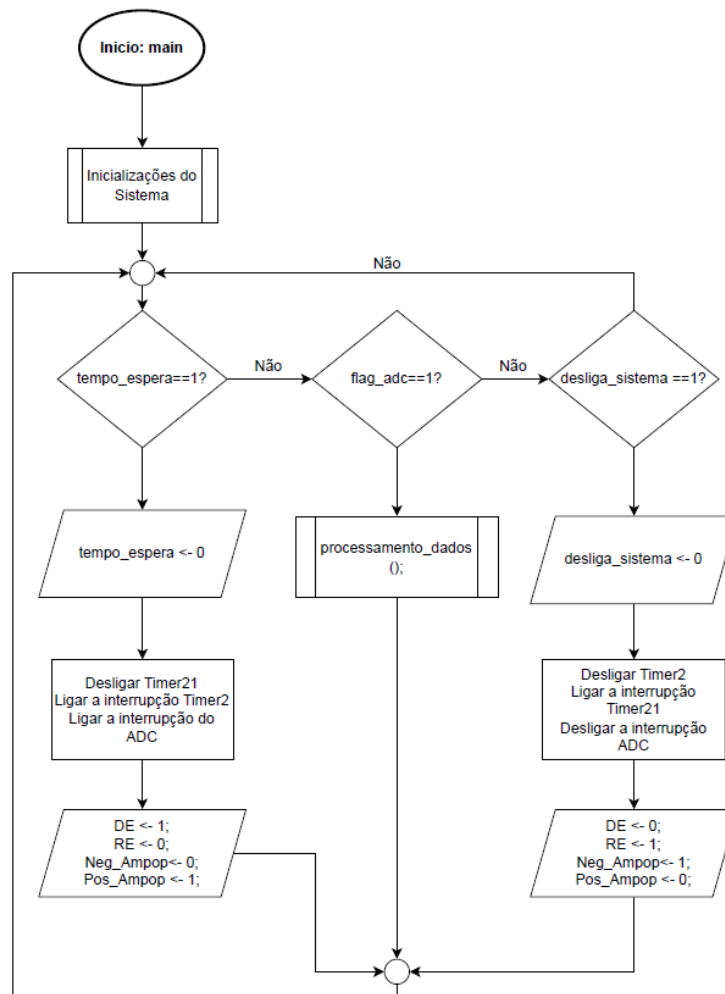


Figura 3-34- Fluxograma programa principal

O fluxograma apresentado na Figura 3-35 ilustra como as variáveis *tempo_espera* e *flag_adc* atingem um valor alto. Para iniciar a leitura, o sistema aguarda 10 minutos, embora esse intervalo possa ser ajustado. Após esse período, a variável *tempo_espera* é definida como 1 e os dados do sensor começam a ser medidos. Em seguida, podemos observar que a variável *flag_adc* é definida como alto quando ocorre a interrupção do *timer 2*. Essa interrupção ocorre a cada 1 milissegundo.

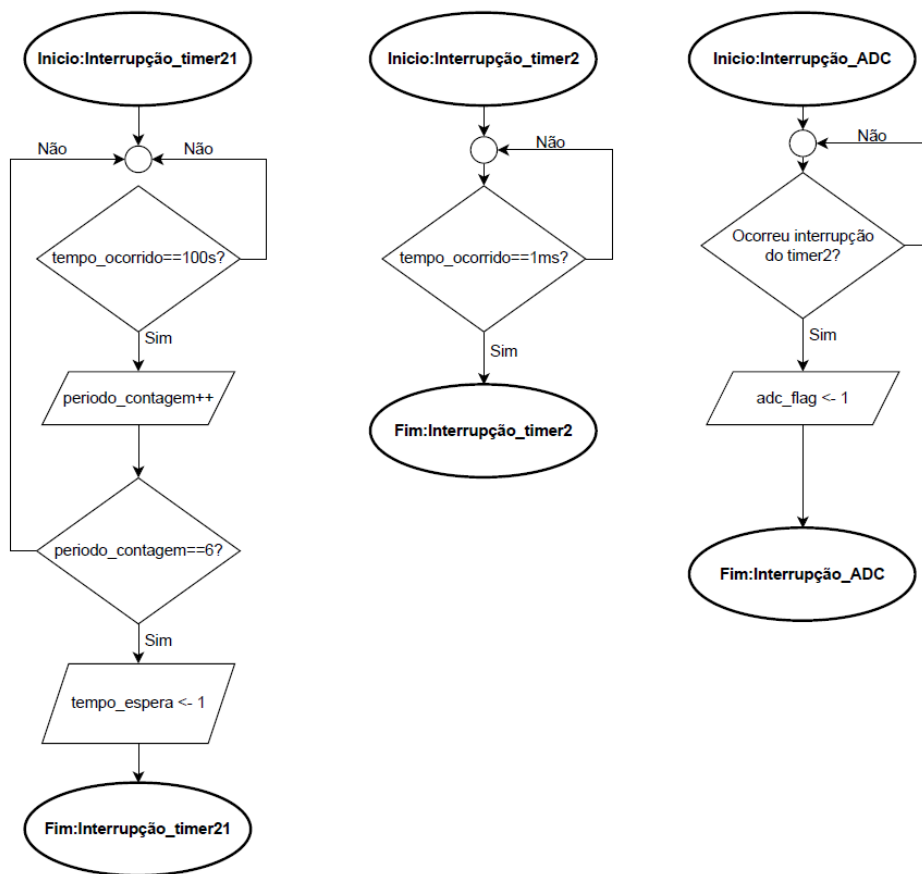


Figura 3-35- Fluxograma Interrupções

A tensão da bobina recetora é medida pelo ADC1, enquanto a pressão e temperatura são recolhidas pelo sensor específico. Para garantir uma amostragem significativa, são coletados 50 valores, esse valor pode ser alterado também, antes de o sistema pausar e retornar após um determinado período. Dessa forma, a análise dos dados é otimizada e o funcionamento do sistema é assegurado com maior eficiência. Esse processo de recolha é realizado pela função *processamento_dados ()*, onde o seu fluxograma é apresentado na Figura 3-36.

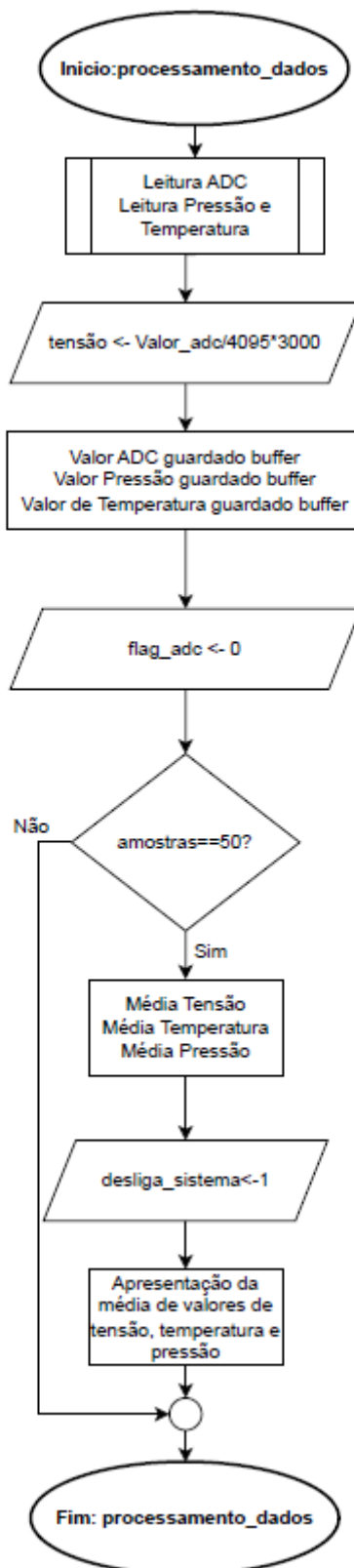


Figura 3-36- Fluxograma processamento_dados

4 Testes e Resultados

Neste capítulo, são apresentados os testes realizados na eletrônica de instrumentação, incluindo simulação e em laboratório. Após a validação desses resultados, os componentes são integrados numa PCB e submetidos novamente a teste. Ao verificar o seu correto funcionamento, a PCB é adicionada à parte indutiva e é realizado o teste final.

4.1 Simulação e teste da eletrônica de instrumentação

Os testes de simulação da eletrônica de instrumentação foram realizados utilizando o TINA-TI. O primeiro circuito simulado foi o oscilador (Figura 4-1).

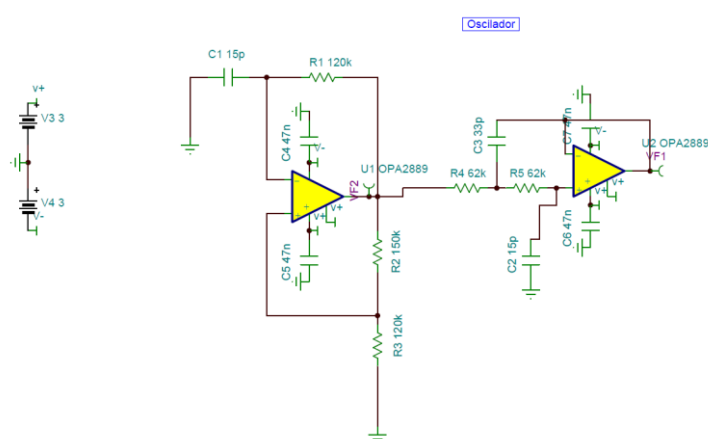


Figura 4-1-Oscilador TINA-TI

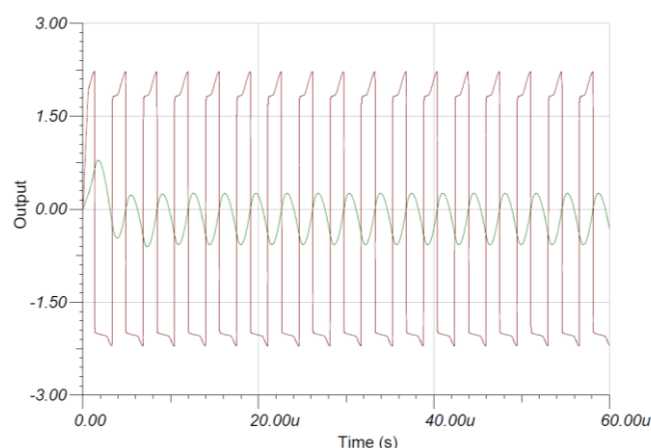


Figura 4-2-Resultados de Simulação do Oscilador TINA-TI (onda quadrada vermelho e onda sinusoidal verde)

Através dos resultados de simulação é possível observar que o oscilador demora cerca de 4 μ s para estabilizar. Apesar da saída do primeiro andar não ser uma onda quadrada ideal, verifica-se que no segundo andar uma onda sinusoidal é gerada com a mesma frequência do primeiro andar.

Após a validação, é realizado o teste em laboratório. O resultado está ilustrado na Figura 4-3.

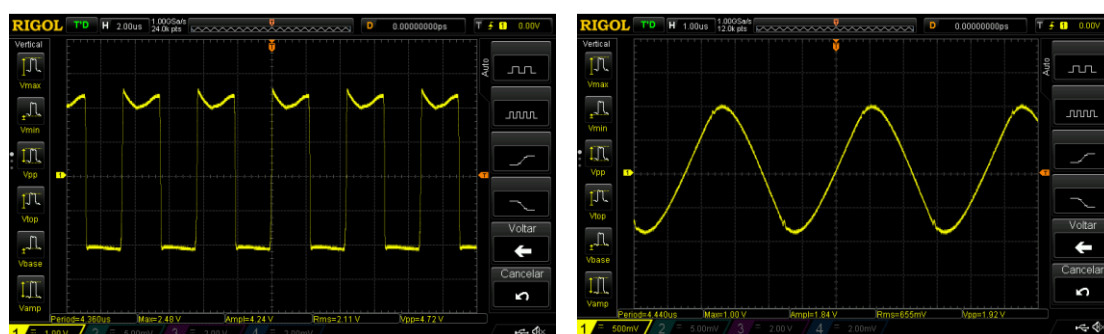


Figura 4-3-Resultado teste em laboratório do oscilador

Os resultados foram os esperados, apesar que, em laboratório a frequência da onda quadrada diminui para 230 kHz. Para o projeto, esta diminuição não é crítica, visto que os resultados foram aceitáveis na ordem dos 200 kHz.

De seguida, o teste realizado foi a verificação do funcionamento do retificador de onda completo e o passa baixo. Nas Figura 4-4 e Figura 4-5 estão representados o circuito simulado e o resultado de simulação, respetivamente.

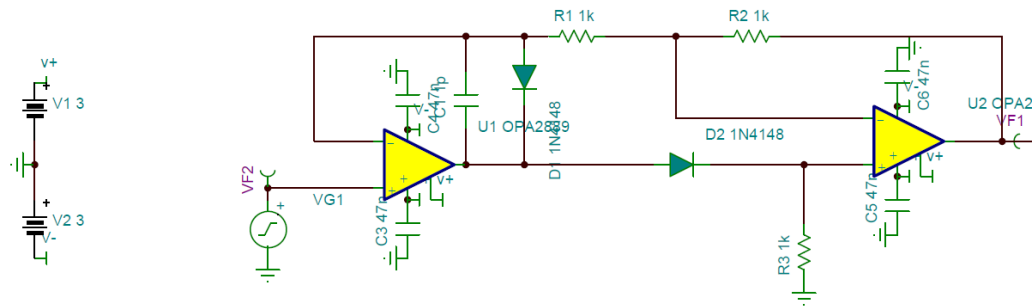


Figura 4-4-Circuito retificador para simulação em TINA-TI

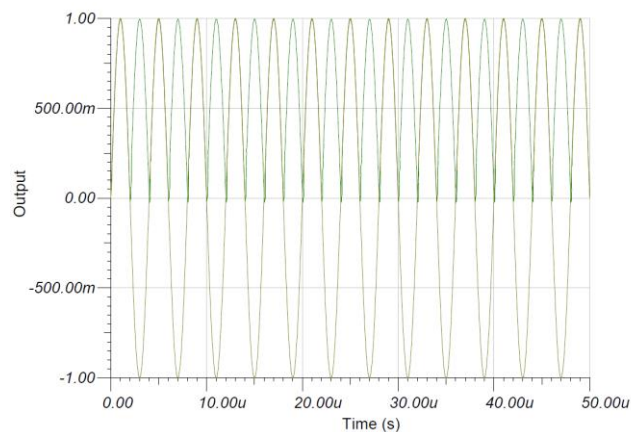


Figura 4-5-Resultados de Simulação do Oscilador TINA-TI (onda de entrada amarelo e onda retificada verde)

Validado o circuito no simulador, o mesmo foi submetido em teste no laboratório. Os resultados são ilustrados na Figura 4-6.

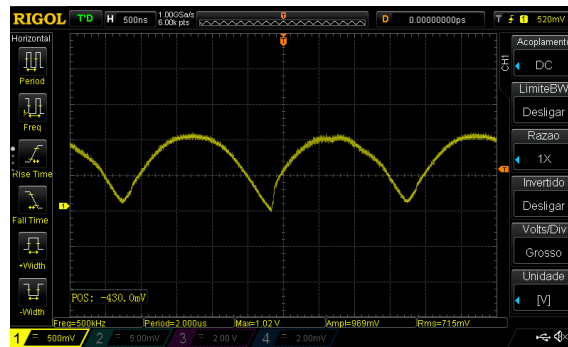


Figura 4-6-Resultado teste em laboratório do retificador

Os resultados em laboratório foram favoráveis, apesar de ser ainda possível verificar a onda retificada com ruído (proveniente da *breadboard*, fios elétricos, entre outros) e ligeira distorção.

4.2 Testes e Resultados funcionais

Após fabrico da PCB é necessário examinar o seu desempenho. Na Figura 4-7 é possível observar as entradas do microcontrolador, e dos amplificadores operacionais, vindas dos reguladores. Nos reguladores positivos, alimentação do microcontrolador e alimentação positiva do ampop, pode-se ver 3.2 V, ao contrário do regulador negativo, em que a entrada é de cerca de -2.4 V. Esse valor não será uma questão, visto que não influencia o comportamento do oscilador.

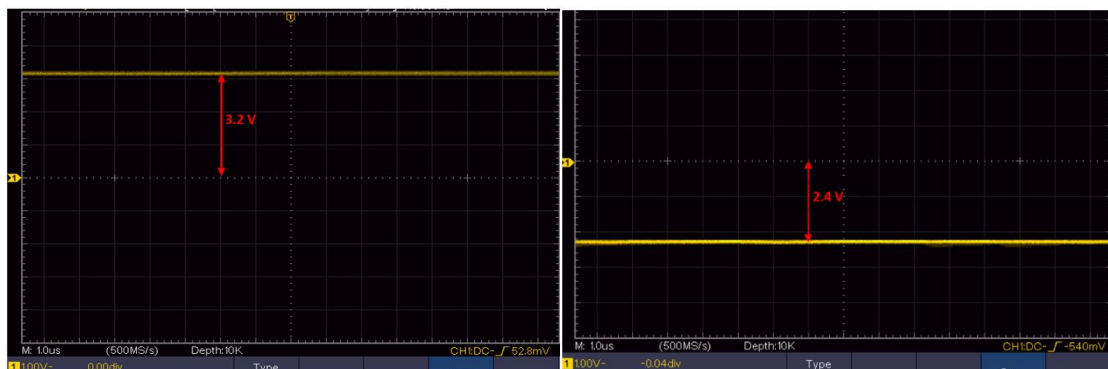


Figura 4-7- Regulador de tensão positiva (à esquerda) e Regulador de tensão negativa (à direita)

Na Figura 4-8 é possível observar a saída do oscilador, a saída da bobina recetora e a retificação da onda.

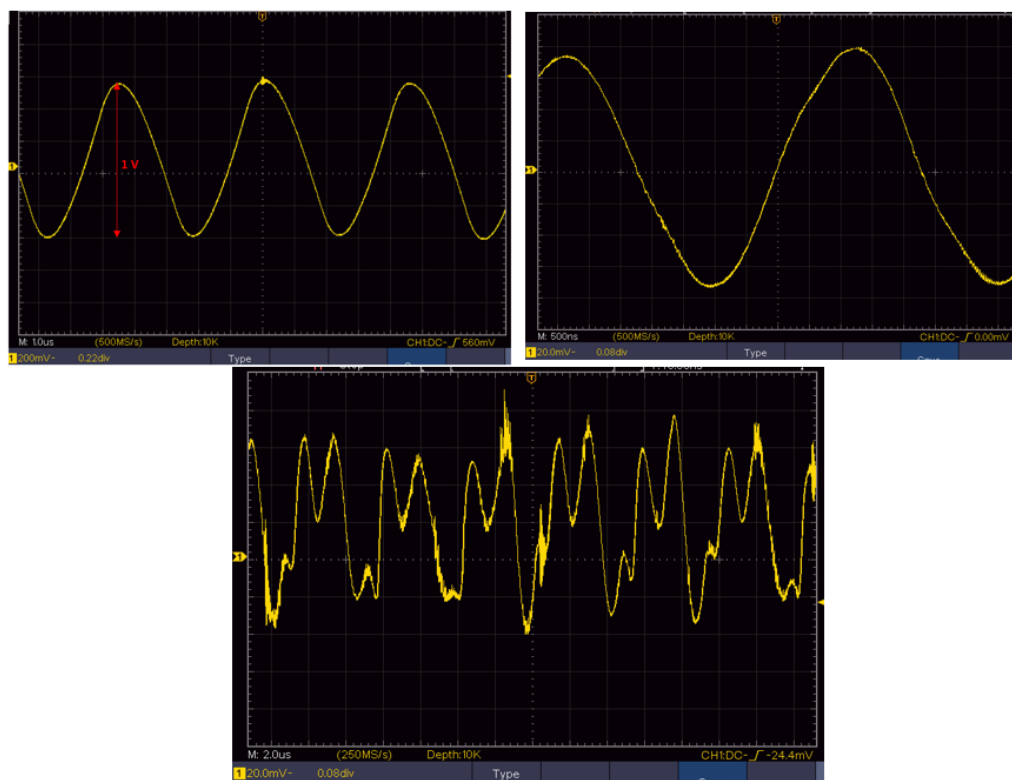


Figura 4-8- Saída do oscilador, saída da bobina recetora e retificação da onda

Ao verificar a retificação da onda, percebe-se que esta não está de acordo com o previsto. Existem duas possíveis causas para isso.

Uma delas é a presença de um *loop* de realimentação negativa no circuito. Isso acontece quando o sinal de saída do circuito é realimentado para a entrada do amplificador operacional (*ampop*) de forma a atenuar o sinal original, em vez de amplificá-lo. Esse tipo de realimentação negativa pode ocorrer devido a uma diferença de fase entre o sinal de entrada e o sinal de saída do *ampop*, o que pode levar à alteração do ganho do circuito e à distorção da forma de onda retificada.

A outra possível causa é a inadequação dos díodos escolhidos para o circuito. Se os díodos utilizados não forem rápidos o suficiente para acompanhar a frequência da forma de onda de entrada, isso pode levar a uma onda retificada distorcida ou incompleta.

Este problema não foi uma entrave para a continuação do projeto porque ocorre uma filtragem do retificador, provocando apenas uma pequena diminuição do valor medido, que pode ser corrigido por software.

4.3 Testes com o sensor encapsulado

Como verificado no Capítulo 3, o melhor encapsulamento seria silicone. Por essa razão, procedeu-se ao isolamento do sensor da Tabela 3-3, pois era um dos conjuntos com um comportamento estável e fiável. A Figura 4-9 apresenta o sensor encapsulado em silicone.



Figura 4-9- Encapsulamento do sensor em silicone

O sensor foi submetido a um teste usando a PCB fabricada. O teste foi repetido 5 vezes para avaliar a precisão das medições, e no final foi calculada a média dos valores obtidos. Os resultados individuais de cada teste, juntamente com a média, estão apresentados na Tabela 4-1.

Tabela 4-1- Valores de tensão, em mV na bobina de receção com o sensor encapsulado

Água destilada						Média
	78,22	78,53	78,12	78	78,57	78,288
1PSU						
	79,88	79,88	80,69	80,53	80,14	80,224
2PSU						
	81,18	81,38	81,37	81,2	81,3	81,286
5PSU						
	82,86	82,6	82,93	82,76	83,14	82,858
10 PSU						
	87,8	87,47	87,77	87,63	87,5	87,634
20 PSU						
	93,27	93,09	93,68	93,5	93,39	93,386
50PSU						
	104,48	103,17	101,27	101,45	103,49	102,772

A partir da média, observa-se pela Figura 4-10 o comportamento do sensor após encapsulamento, apresentando a tensão de saída (eixo y), em função da salinidade.

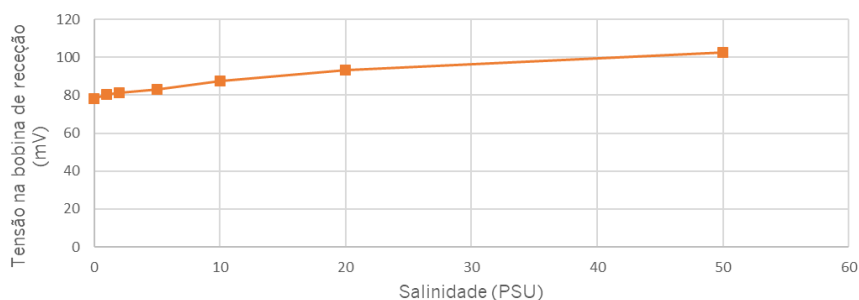


Figura 4-10- Tensão de saída em função da salinidade

Após confirmar um comportamento adequado do sensor, foi realizado o processo final de medição. Nesta etapa, os resultados são obtidos após o sinal ser retificado, filtrado e lido pelo (ADC) do microcontrolador. Foram, novamente, realizadas 5 repetições e os valores estão na Tabela 4-2.

Tabela 4-2- Resultados de testes finais, em mV, no sensor encapsulado

Água destilada					Média	Desvio Padrão
20,2564	20,3297	20,3516	20,1319	20,1612	20,24616	0,087721072
1PSU						
22,0293	22,2637	22,2051	22,1392	22,1172	22,1509	0,079650009
2PSU						
23,4872	23,3993	23,6117	23,4872	23,2527	23,44762	0,118645715
5PSU						
26,4103	26,4103	26,6007	26,9158	26,9231	26,65204	0,229152836
10 PSU						
30,1612	30,4322	30,4322	30,4542	30,5788	30,41172	0,136615818
20 PSU						
33,4359	33,7729	33,7436	33,5018	33,6923	33,6293	0,13514012
50PSU						
44,1886	44,1099	44,18024	44,2722	44,0952	44,16923	0,06340304

A Figura 4-11 representa a salinidade PSU (eixo y) em função do valor (média) do ADC do microcontrolador. Os valores apresentados encontram-se em mV.

Com este teste realizado é possível fazer a reta de calibração, ainda que esta não seja a final. É possível observar que uma reta de calibração possível seria função potência, Equação 4-1.

$$PSU = 0,1697 \times ADC^{1,761} \quad 4-1$$

A equação foi possível obter, através da ferramenta Excel. A reta original e a função de potência encontram-se na Figura 4-11, azul e laranja, respectivamente. PSU representa a salinidade e ADC o valor obtido no ADC do microcontrolador. A cada valor do ADC foi ocorrido uma subtração de 19.5 para

possível offset natural. Por outro lado, a função potência nunca obterá valores negativos, o que para o projeto em questão não será um problema, visto que, não existe valores de PSU negativos.

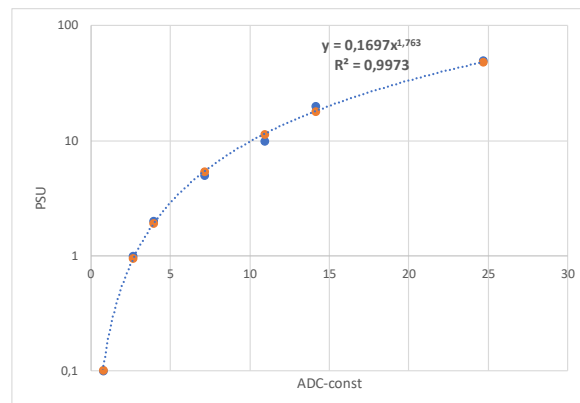


Figura 4-11- Função de calibração

4.4 Protótipo Final

Conforme analisado nos capítulos anteriores, o encapsulamento da parte indutiva requer o uso de silicone devido às suas propriedades específicas. Por outro lado, para a parte eletrônica, é preferível o uso de resina epóxi devido às vantagens que ela oferece. A resina epóxi é aderente e forma uma barreira sólida em torno dos componentes eletrônicos, proporcionando proteção eficaz contra danos externos.

Foi possível criar um protótipo como ilustrado na

Figura 4-12. Na parte superior encontra-se a parte eletrônica e na inferior o sensor indutivo.

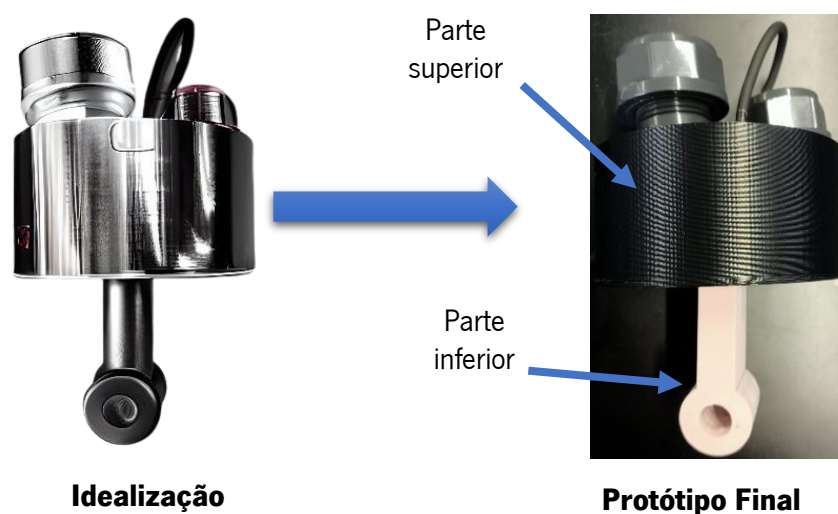


Figura 4-12- Elaboração do protótipo

Especificando melhor, é possível verificar pela Figura 4-13, que na parte superior encontram-se duas roscas, onde na maior se depara com o acionamento do sistema (através de um interruptor) e o carregamento do mesmo, e na mais pequena para uma reprogramação necessária do microcontrolador do sensor. Para verificar, se o sistema está ligado, é acionado um led vermelho, onde, ao longo do seu funcionamento este liga só para confirmar que o sensor continua ligado.

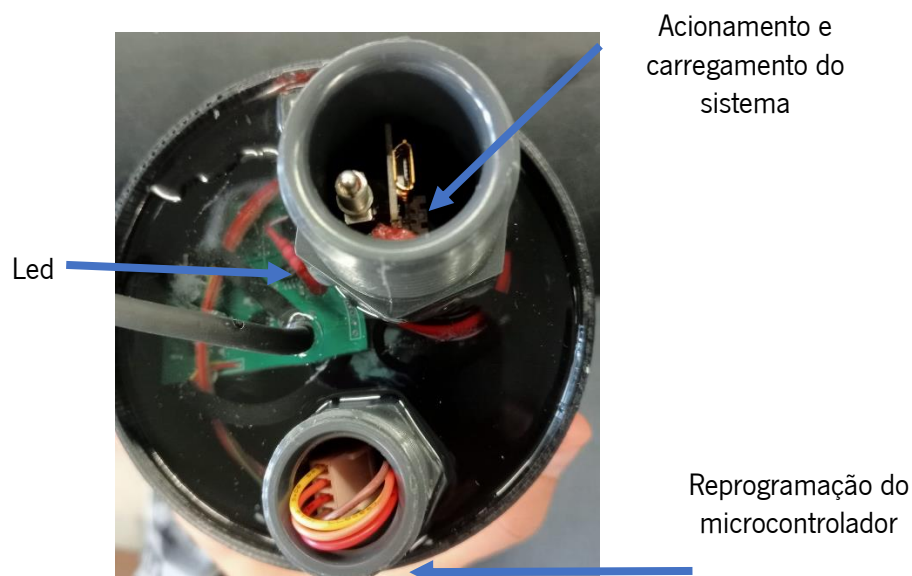


Figura 4-13- Parte superior do protótipo

Na Figura 4-14, é apresentado o esquemático de ligação do conector da rosca pequena e as ligações para o datalogger (cabo preto que sai do sistema).

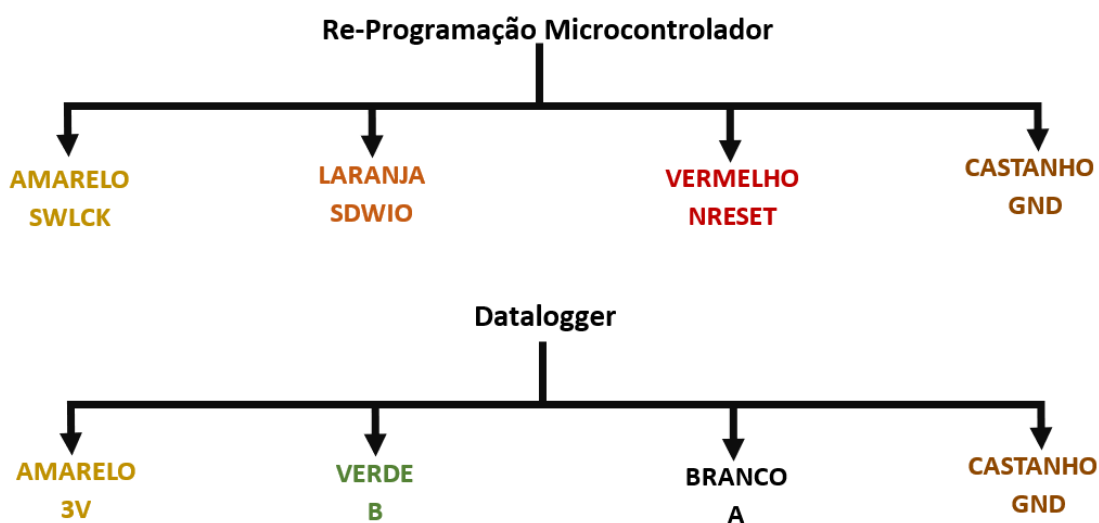


Figura 4-14- Ligação Re-Programação Microcontrolador e Datalogger

Após a integração e resinação conjunta da parte indutiva e eletrónica, é viável prosseguir com a segunda calibração, considerando a influência da temperatura.

5 Conclusão e Trabalho Futuro

Nesta secção conclusiva, serão expostas as considerações finais desta dissertação, abrangendo as principais conclusões derivadas da mesma, bem como as perspectivas e direções para futuro.

5.1 Conclusão

Ao longo da dissertação, foi explorado em profundidade o tema proposto, analisando diversos aspetos inter-relacionados. O objetivo da dissertação concentra-se no desenvolvimento de um sensor de salinidade indutivo, de baixo custo e elevada autonomia, para integrar numa rede de sensores para medir em coluna de água.

Após análise, é evidente que a configuração de um sensor indutivo não possui um consenso claro. No entanto, nesta dissertação, optou-se por utilizar um sensor indutivo composto por duas bobinas em formato de toroide, que são enroladas com espiras de fio de cobre.

Durante esta dissertação, foi realizada uma cuidadosa seleção do material das toróides, e o escolhido foi a ferrite. Essa escolha foi baseada em diversas vantagens associadas a esse material. Além disso, foi necessário investigar e identificar o tipo específico de ferrite a ser utilizado, levando em consideração as categorias de ferrites macias, duras, amorfas, cristalinas e nano-cristalinas. No contexto deste estudo, as toróides selecionadas foram feitas de material amorfo e com ferrites macias, caracterizadas pela sua estrutura cristalina.

Para validar o funcionamento de um sensor indutivo, foram realizados uma série de testes. Várias bobinas de material amorfo, com diferentes formatos e números de voltas, foram imersas em água do mar, e foi observado que todos os conjuntos detetavam a presença de campo magnético, conforme previsto pela teoria.

Em seguida, os mesmos conjuntos foram submetidos a testes num ambiente controlado, onde a quantidade de salinidade variava de 1 PSU a 50 PSU. No entanto, esses testes não forneceram resultados conclusivos, pois nenhum dos conjuntos conseguia detetar com facilidade as diferentes concentrações de salinidade. Isso indica que os conjuntos originais não eram adequados para essa finalidade específica.

Diante disso, foram formados dois novos conjuntos, utilizando bobinas que foram empregadas nos testes anteriores. Num novo teste, esses conjuntos demonstraram a capacidade de discriminar as

diferentes concentrações de salinidade. Em particular, o conjunto F foi capaz de realizar essa tarefa com sucesso.

Esses resultados apontam para a importância de selecionar adequadamente as bobinas e suas características, levando em consideração as propriedades específicas do meio em que o sensor será introduzido.

A fim de investigar a capacidade discriminativa de um conjunto de bobinas feitas de material amorfo em relação às diferentes salinidades, foi conduzida uma análise adicional utilizando núcleos de ferrite de Mn-Zn, especificamente N87. Concluiu-se que o uso dessas ferrites é adequado para medições de salinidade devido à sua capacidade ampliada de concentração do campo magnético, resultando numa maior sensibilidade às mudanças de salinidade. Durante o curso deste estudo, foram realizados diversos testes para avaliar a influência da tensão de excitação na resposta do sensor. Os resultados desses testes revelaram que a tensão de excitação não exerce uma influência significativa na resposta do mesmo.

Num teste subsequente, foi realizado o uso exclusivo do material Mn-Zn. Nesse teste, assim como no experimento anterior, observou-se uma discriminação da salinidade. No entanto, foi observado um aumento na frequência de ressonância, além da presença de dois comportamentos distintos: um antes da frequência de ressonância e outro após a frequência de ressonância. Este conjunto não seria adequado para o projeto, pois apresenta uma frequência de ressonância elevada.

Por fim, o último teste realizado visou investigar a influência do número de voltas nas bobinas. Observou-se que, ao diminuir o número de voltas mantendo o conjunto de bobinas, a frequência de ressonância aumentou. Essa variação sugere que o número de voltas tem um impacto direto na resposta do sensor, afetando a frequência de ressonância.

Na segunda parte deste estudo, o tipo de encapsulamento escolhido para o sensor também foi avaliado quanto ao seu impacto nas propriedades elétricas. Três materiais de encapsulamento foram testados: resina epóxi, silicone e plastik 70. Através desses testes, foi possível determinar qual material de encapsulamento é o mais adequado para o sensor.

Após a realização dos testes com diferentes materiais de encapsulamento, concluiu-se que o silicone é o material mais indicado. Quando o sensor é encapsulado em silicone, o seu comportamento não sofre alterações significativas, permitindo a discriminação das diferentes salinidades. Além disso, observou-se que a frequência de ressonância do sensor é afetada pelo encapsulamento em silicone.

Após a conclusão destes procedimentos, foi possível desenvolver o sensor e realizar o primeiro teste de calibração. O conjunto de bobinas com melhores resultados, lembra-se que este é composto pelo material de N87, foi submetido ao processo de isolamento, utilizando silicone. Foram realizados os

mesmos testes, a que anteriormente este foi submetido, para verificar o correto funcionamento do sensor, e, por fim, obteve-se uma reta de calibração que permite calcular a salinidade através do valor obtido no ADC do microcontrolador.

A integração e encapsulamento em conjunto da parte indutiva e eletrônica, permitem prosseguir com a segunda calibração, considerando a influência da temperatura.

Este projeto foi apresentado na 12^a edição do Congresso Internacional Ibero-Americano de Sensores (Aveiro, 2022) e no Congresso Nacional Ciência 2023 (Aveiro, 2023).

5.2 Trabalho futuro

Para trabalho futuro, apesar de ter sido realizado um teste preliminar de funcionamento antes da aplicação do isolamento final à eletrônica, ainda não foi possível realizar uma avaliação completa do sistema. Como próximo passo, é necessário desenvolver uma curva de calibração apropriada, investigando a influência da temperatura no desempenho do sistema. Essa etapa é realizada criando um ambiente controlado de diversas temperaturas com a mesma quantidade de sal a fim de calcular o fator de correção necessário para garantir resultados mais precisos e realistas. Essa análise permitirá compreender como o sistema se comporta em diferentes condições térmicas, garantindo uma caracterização abrangente.

Por último torna-se importante verificar o verdadeiro consumo de energia do sistema, e validar a autonomia.

Bibliografia

- [1] Salinidade: Definição e Importância para a Vida Marinha. (n.d.). Retrieved April 20, 2022, from <https://www.greelane.com/pt/ci%C3%A4ncia-tecnologia-matem%C3%A1tica/animais-e-natureza/salinity-definition-2291679>
- [2] Salinidade (parte I). (n.d.). Retrieved January 3, 2022, from <https://www.batepapocomnetuno.com/post/salinidade-parte-i>
- [3] Methods of Determination of Salinity – Salinometry. (n.d.). Retrieved January 10, 2022, from <https://salinometry.com/methods-of-determination-of-salinity/>
- [4] Conductivity Measurement Basics for the Process Industry - M4 Knick. (n.d.). Retrieved January 10, 2022, from <https://m4knick.com/conductivity-measurement-basics-for-the-process-industry/>
- [5] Transmissores e sensores de condutividade para todas as indústrias | Endress+Hauser. (n.d.). Retrieved January 10, 2022, from <https://www.pt.endress.com/pt/produtos/analitica/transmissores-condutividade-sensores>
- [6] Refratômetro - princípios e aplicação - Kasvi. (n.d.). Retrieved January 2, 2022, from <https://kasvi.com.br/refratometro-aplicacao/>
- [7] Striggow, K., & Dankert, R. (1985). Communications The Exact Theory of Inductive Conductivity Sensors for Oceanographic Application. In IEEE JOURNAL OF OCEANIC ENGINEERING (Vol. 10, Issue 2).
- [8] K. Striggow and R. Dankert, "Induktive Leitfähigkeitsmessung für die ozeanologische Anwendung-Physiologische Wirkprinzipien, thematische Grundlagen und die Möglichkeiten zur Eliminierung des Einflusses einer variablen Kempermeabilität," Beitr. zur Meereskunde, vol. 50, pp. 25-41, Berlin, 1984.
- [9] J. Williams, "A small portable unit for making in situ salinity and temperature measurements," in Proc. Fall Instrument-Automation Conf and Exhibit, (Instrument Society of America), New York, N Y, Preprint 43-NY60, 1960, pp. 1-6.
- [10] Wood, R. T., Bannazadeh, A., Nguyen, N. Q., & Bushnell, L. G. (2010). A salinity sensor for long-term data collection in estuary studies. MTS/IEEE Seattle, OCEANS 2010. <https://doi.org/10.1109/OCEANS.2010.5664602>
- [11] Sheng, W. U., Hui, L., Liang, J.-J., Yu, T., Deng, Y., Li, H.-Z., & Ning, L. (2015). Investigation of the Performance of an Inductive Seawater Conductivity Sensor. In Sensors & Transducers (Vol. 186). <http://www.sensorsportal.com>
- [12] The calculation of inductance and core. (n.d.). Retrieved January 10, 2022, from <http://www.pocomagnetic.com/html/2014/03/06/2014030605592122540691.html>
- [13] Transmissores e sensores de condutividade para todas as indústrias | Endress+Hauser. (n.d.). Retrieved January 10, 2022, from <https://www.pt.endress.com/pt/produtos/analitica/transmissores-condutividade-sensores>
- [14] Capítulo, & Aula. (n.d.). Ampère Gauss. http://coral.ufsm.br/cograc/graca7_2.pdf
- [15] Magnetics Design 2 - Magnetic Core Characteristics. (n.d.).
- [16] <https://www.preparaenem.com/fisica/campo-magnetico-gerado-pelo-toroide.htm>, Retrieved January 10, 2022
- [17] Campo magnético de um solenoide e de uma bobina toroidal | Dona Atraente. (n.d.). Retrieved January 10, 2022, from <https://donaatraente.wordpress.com/enquadramento-teorico/campo-magnetico/campo-magnetico-de-um-solenoide-e-de-uma-bobina-toroidal>
- [18] Toroide – O que é e como funciona! - Mundo da Elétrica. (n.d.). Retrieved January 10, 2022, from <https://www.mundodaeletrica.com.br/toroide-o-que-e-como-funciona/>
- [19] Student Baba. (n.d.). Retrieved January 10, 2022, from <https://student-baba.com/2019/07/differences-and-similarities-between-toroid-and-solenoid.html>

- [20] What are Toroidal Conductivity Sensors and How Do They Work? - Sensorex. (n.d.). Retrieved January 10, 2022, from <https://sensorex.com/2021/02/22/toroidal-conductivity-sensors/>
- [21] Resistivity and Electrical Conductivity. (n.d.). Retrieved January 16, 2022, from <https://www.electronics-tutorials.ws/resistor/resistivity.html>
- [22] Entendo Toroides. (n.d.). Retrieved January 10, 2022, from https://vhfmais.webnode.pt/_files/200004106-562cd57052/Entendendo-toroides.pdf
- [23] Almeida, T., & Silva, O. (n.d.). ESTUDO DE UM SENSOR INDUTIVO PARA MEDIÇÃO DE ADULTERAÇÃO DE ÁLCOOL COMBUSTÍVEL.
- [24] Carlos Almeida Bastos de Pinho, L., Energia Orientador, M., & Artur Manuel de Figueiredo Fernandes Costa, D. (2009). Materiais Magnéticos e suas Aplicações.
- [25] Kong, L. B., Li, Z. W., Lin, G. Q., & Gan, Y. B. (2007). Ni-Zn ferrites composites with almost equal values of permeability and permittivity for low-frequency antenna design. IEEE Transactions on Magnetics, 43(1), 6–10. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2006.886321>
- [26] Sílvio, M., & Medeiros, A. (n.d.). Síntese e caracterização de cerâmicos magnetoelétricos/multiferróicos Synthesis and characterization of Magnetoelctric/Multiferroic Ceramics.
- [27] Conductivity, Salinity & Total Dissolved Solids - Environmental Measurement Systems. (n.d.). Retrieved January 10, 2022, from <https://www.fondriest.com/environmental-measurements/parameters/water-quality/conductivity-salinity-tds/>
- [28] Natural science laws experience “live”-learn easily Conductivity Guide A Guide to Conductivity Measurement Theory and Practice of Conductivity Applications. (n.d.).
- [29] What are influencing factors on conductivity measurements? (s.d.). Turbidity Meters, Colorimeters, UV, pH and Conductivity sensors. Retrieved January 17, 2022 <https://www.optek.com/en/influencing-factors-on-conductivity.asp>
- [30] Practical Salinity Scale – 1978 – Salinometry. (n.d.). Retrieved January 17, 2022, from <https://salinometry.com/pss-78/>
- [31] Parra, L., Sendra, S., Lloret, J., & Rodrigues, J. J. P. C. (2014). Low-cost wireless sensor network for salinity monitoring in mangrove forests. Proceedings of IEEE Sensors, 2014-December (December), 126–129. <https://doi.org/10.1109/ICSENS.2014.6984949>
- [32] Ribeiro, A. L., Geirinhas Ramos, H. M., Ramos, P. M., & Dias Pereira, J. M. (n.d.). XVIII IMEKO WORD CONGRESS Metrology for a Sustainable Development INDUCTIVE CONDUCTIVITY CELL FOR WATER SALINITY MONITORING.
- [33] Karuppuswami, S., Arangali, H., & Chahal, P. (2016). A Hybrid Electrical-Mechanical Wireless Magnetoelastic Sensor for Liquid Sample Measurements. Proceedings - Electronic Components and Technology Conference, 2016-August 2535–2540. <https://doi.org/10.1109/ECTC.2016.283>
- [34] Parra, L., Sendra, S., Lloret, J., & Bosch, I. (2015). Development of a conductivity sensor for monitoring groundwater resources to optimize water management in smart city environments. Sensors (Switzerland), 15(9), 20990–21015. <https://doi.org/10.3390/s150920990>
- [35] Schoinas, S., Guamra, A. M. el, Moreillon, F., & Passeraub, P. (2020). Fabrication and characterization of a flexible fluxgate sensor with pad-printed solenoid coils. Sensors (Switzerland), 20(8). <https://doi.org/10.3390/s20082275>
- [36] Sanchez, R. O. (n.d.). *A METHOD FOR REDUCING ENCAPSULATION STRESS TO FERRITE POT CORES*
- [37] OPA2889ID Texas Instruments | Mouser Portugal. (n.d.). Retrieved May 10, 2023, from <https://pt.mouser.com/ProductDetail/Texas->
- [38] Pilha Li-Ion 18650 3,7V 3350mAh. (n.d.). Retrieved December 19, 2022, from <https://www.botnroll.com/pt/baterias/3649-bateria-18650-3-7v-3350mah-5a-li-ion-recarreg-vel.html>

[39] Carregador de baterias Li-Po entrada micro-USB - DFRobot DFR0667. (n.d.). Retrieved December 19, 2022, from <https://www.botnroll.com/pt/carregadores/4499-carregador-de-baterias-li-po-entrada-micro-usb-dfrobot-dfr0667.html>

[40] XC9265A301MR-G Torex Semiconductor | Mouser Portugal. (n.d.). Retrieved December 19, 2022, from <https://pt.mouser.com/ProductDetail/Torex-Semiconductor/XC9265A301MR-G?qs=AsjdqWjXhJ%252BryNYn7UBrgQ%3D%3D>

[41] LTC1261LCS8#PBF Analog Devices | Mouser Portugal. (n.d.). Retrieved December 19, 2022, from <https://pt.mouser.com/ProductDetail/Analog-Devices/LTC1261LCS8PBF?qs=hVkg5c3xu%2FoRzioeHMk5A%3D%3D>

[42] MS583730BA01-50 Measurement Specialties | Mouser Portugal. (n.d.). Retrieved December 19, 2022, from <https://pt.mouser.com/ProductDetail/Measurement-Specialties/MS583730BA01-50?qs=SvmF4ZFxmlz%2F53mFym%252BZPQ%3D%3D>

[43] STM32L010K8T6 STMicroelectronics | Mouser Portugal. (n.d.). Retrieved December 19, 2022, from <https://pt.mouser.com/ProductDetail/STMicroelectronics/STM32L010K8T6?qs=PqoDHHvF649oOqlyQcWO2g%3D%3D>

[44] LTC1480CS8#PBF Analog Devices | Mouser Portugal. (n.d.). Retrieved July 28, 2023, from <https://pt.mouser.com/ProductDetail/Analog-Devices/LTC1480CS8PBF?qs=hVkg5c3xu9xGzCVotO6JA%3D%3D>