



# ESCOLA NAVAL

talant de bi-faire



**Darso António Adão Gambôa**

**Comunicação entre veículos robóticos de sub-superfície**

**Estudo de viabilidade de utilização de soluções óticas de baixo custo**

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Ciências Militares Navais, na  
especialidade de Engenharia Naval, Ramo de Armas e Eletrónica



**Alfeite**

**2021**





# ESCOLA NAVAL



*talant de bi-faire*



**Darso António Adão Gambôa**

## **Comunicação entre veículos robóticos de sub-superfície**

### **Estudo de viabilidade de utilização de soluções óticas de baixo custo**

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Ciências Militares Navais, na especialidade de Engenharia Naval, Ramo de Armas e Eletrónica

**Orientação de:** Professor Doutor Bruno Damas

**Co-orientação de:** Professor Doutor Vítor Viegas

O Aluno Mestrando

O Orientador

*Darso A.A. Gambôa*

*Bruno Damas*

Darso António Adão Gambôa

Bruno Duarte Damas

**Alfete**

**2021**



## Epígrafe

*“He who feeds you, controls you”*

Thomas Sankara



## **Dedicatória**

*Dedico esse trabalho à minha querida filha:  
Cristina dos Santos Gambôa, aos meus pais: André  
Gambôa e Francisca Adão, e à minha querida e adorável  
esposa: Jandira dos Santos Gambôa.*



## Agradecimentos

- Ao Alfa e o Omega;
- A mim, por alcançar um objetivo traçado: superar todas às adversidades adjacentes a formação e obter o grau de mestre;
- Aos meus pais: embora (estiveram) sempre distantes, agradeço pelo constante incentivo;
- A minha filha: o pai vai estar mais em casa agora;
- A minha esposa: pela sua paciência, compreensão, apoio e amor ao longo de todos esses anos. O seu contínuo incentivo e apoio ajudaram-me a alcançar muitas conquistas na minha vida. Verdadeiramente;
- Aos meus orientadores, Professores Doutores Bruno Damas e Vitor Víegas: por aceitarem a responsabilidade de orientarem esse trabalho; por toda a ajuda prestada, tanto teórica como experimentalmente; pelos valiosos *feedback* e ideias sobre os métodos das investigações. As nossas reuniões semanais incentivaram-me a manter um constante cronograma de trabalho, e não há palavras suficientes para expressar a minha gratidão pelo apoio prestado para a conclusão desse trabalho;
- Por fim, agradeço a todos pela generosidade e apoio durante a minha formação e permanência na Escola Naval da República Portuguesa.



## Resumo

A forte atenuação dos sinais eletromagnéticos na água é a principal razão pela qual a exploração subaquática, a vigilância marítima e outras aplicações, atualmente dependem de cabos submarinos para enviar ou receber dados de um terminal de comunicação. Embora a comunicação acústica se tenha tornado o método de comunicação sem fios padrão para as aplicações subaquáticas devido ao seu longo alcance, elas incorrem em alto custo e têm baixas taxas de dados. A necessidade por comunicações de alto débito binário e largura de banda estimulou a exploração de métodos não acústicos que antes eram negligenciados devido às limitações de distância.

Contrariamente aos sistemas acústicos e de radiofrequência, que apresentam limitações como custo, velocidade de propagação das ondas e largura de banda disponível, o que se traduz na taxa de transmissão de dados, a comunicação ótica sem fios é apresentada como solução alternativa para ultrapassar as limitações mencionadas. À vista disso, a solução proposta nesta dissertação baseia-se num sistema de comunicação ótica de baixo custo, viável para as comunicações sem fio subaquática à curta distância entre veículos não tripulados. Assim sendo, um sistema transmissor baseado em LED de alto brilho de  $3W$  com uma faixa de comprimento de onda entre  $460 - 470 \text{ nm}$  e um sistema recetor baseado em fotodíodo com uma sensibilidade espectral entre  $400 - 1100 \text{ nm}$ , foram desenvolvidos e testados em diferentes canais de comunicação, ao ar livre, num tanque de água doce e por fim na água do mar. O resultado das experiências com o protótipo mostrou com sucesso que, na presença da luz ambiente, a distância de transmissão - receção dos dados chega a  $4,5 \text{ m}$  e, na ausência da luz ambiente  $5,50 \text{ m}$  ambos com uma taxa de transmissão de  $300 \text{ bps}$ .

Por fim, o trabalho apresenta sugestões para trabalhos futuros de modo a melhorar o desempenho, a eficiência e a robustez do sistema.

**Palavras-chave:** Comunicação ótica sem fio subaquática, veículos subaquáticos autónomos, modulação *On-Off-keying*, optoelectrónica.



## Abstract

The strong attenuation of electromagnetic signals in water is the main reason why underwater exploration, maritime surveillance and other applications currently rely on underwater cables to send or receive data from a communication terminal. Although acoustic communications have become the standard wireless communication method for underwater applications due to their long range, they incur high cost and have low data rates. The need for high data rate and bandwidth communications has stimulated the exploration of non-acoustic methods that were previously neglected due to distance limitations.

Contrary to acoustic and radio-frequency systems, which present limitations such as cost, wave propagation speed and available bandwidth, which translates into data transmission rate, wireless optical communication is presented as an alternative solution to overcome the mentioned limitations. In view of this, the solution proposed in this dissertation is based on a low-cost optical communication system, feasible for underwater wireless communications at short distance between unmanned vehicles. Therefore, a transmitter system based on 3W high-brightness LED with a wavelength range between 460 - 470 nm and a receiver system based on photodiode with a spectral sensitivity between 400 - 1100 nm, were developed and tested in different communication channels, outdoors, in a freshwater tank and finally in seawater. The result of the experiments with the prototype successfully showed that, in the presence of ambient light, the data transmission-reception distance reaches 4,5 m and, in the absence of ambient light 5,50 m both with a transmission rate of 300 bps.

Finally, the work presents suggestions for future work in order to improve the performance, efficiency and robustness of the system.

**Keywords:** *Underwater wireless optical communication, autonomous underwater vehicle, modulation On-Off-keying, optoelectronics.*



## Índice

1. Introdução.....	1
1.1. Enquadramento.....	1
1.1.1. Projeto SABUVIS.....	3
1.2. Motivação.....	6
1.3. Objetivos.....	6
1.4. Estrutura da investigação.....	7
2. Estado de Arte.....	9
2.1. Tecnologias de comunicação subaquática.....	9
2.1.1. Acústica.....	10
2.1.2. Modems acústicos subaquáticos existentes.....	12
2.1.3. Radiofrequência.....	14
2.1.4. Ótica.....	17
2.2. Resumo.....	25
3. Definições conceituais.....	27
3.1. Composição do sistema ótico.....	27
3.2. Caracterização do canal ótico.....	30
3.3. Configuração da ligação ótica.....	33
3.4. Técnica de Modulação digital do sinal.....	37
3.4.1. Alguns parâmetros de mérito das comunicações digitais.....	38
3.4.2. Modulação OOK.....	40
3.4.3. Cuidados e recomendações.....	43
4. Implementação.....	45

4.1. Requisitos do projeto .....	46
4.2. A camada física - <i>Hardware</i> .....	46
4.2.1. Arduíno.....	46
4.2.2. Transmissor ótico .....	48
4.2.3. Recetor ótico- Protótipo I.....	53
4.2.4. Componentes adicionais .....	60
4.3. Resumo.....	62
5. Validação experimental .....	63
5.1. Testes ao ar livre .....	63
5.1.1. Transmissão dos primeiros <i>bits</i> .....	65
5.1.2. Transmissão de sequência de caracteres .....	68
5.2. Recetor ótico - Protótipo II.....	71
5.3. Testes em ambiente subaquático .....	78
5.3.1. Impermeabilidade dos circuitos .....	78
5.3.2. Metodologia de teste na água.....	80
5.3.3. Primeiro modelo do canal de teste na água .....	80
5.3.4. Segundo modelo do canal de teste na água.....	84
5.4. Custo.....	87
5.5. Resumo.....	88
6. Conclusão.....	91
6.1. Resumo do trabalho realizado.....	91
6.2. Objetivos concluídos.....	91
6.3. Trabalho futuro.....	93
7. Lista Bibliográfica.....	95

Apêndice A – Folha de dados dos componentes usados no Tx e Rx .....	101
Apêndice B – Código em Arduino usado nas experiências ao ar livre .....	103
Apêndice C – Código em Arduino usado nos ensaios dentro da água.....	105
Anexo I – Lista de material do circuito recetor do protótipo I.....	107
Anexo II – Lista de material do circuito recetor do protótipo II.....	109



## Índice de Figuras

Figura 1: Primeiro modelo BUV para SABUVIS .....	4
Figura 2: Segundo modelo BUV para SABUVIS com hidrofones .....	4
Figura 3: Terceiro modelo BUV para SABUVIS .....	4
Figura 4: Comunicação acústica subaquática.....	11
Figura 5: Alguns Modems acústicos disponíveis comercialmente.....	14
Figura 6: Comunicação subaquática em RF .....	17
Figura 7: Atenuação das ondas óticas no meio aquático .....	18
Figura 8: Nó de teste com a posição do emissor e recetor do modem ótico .....	21
Figura 9: <i>Neptune Underwater Communications</i> em teste.....	22
Figura 10: <i>Neptun</i> – Comunicação ótica debaixo da água .....	23
Figura 11: Comparação visual da distância entre as diferentes tecnologias de comunicação subaquática .....	23
Figura 12: Diagrama resumido do sistema de comunicação ótica.....	27
Figura 13: Geometria utilizada para representar a propagação da luz na água e as propriedades óticas inerentes .....	30
Figura 14: Configurações de ligação entre o transmissor-recetor no sistema UWOC .....	34
Figura 15: Configuração geométrica da ligação LOS entre AUVs .....	35
Figura 16: Configuração geométrica da ligação retro-refletiva entre AUVs .....	36
Figura 17: Configuração geométrica da ligação NLOS entre AUVs.....	37
Figura 18: Modulação digital em ASK .....	41
Figura 19: Modulação digital em OOK.....	42
Figura 20: Canal VLC de intensidade ótica e deteção direta .....	42
Figura 21: Estado do LED na modulação OOK.....	43
Figura 22: Visão simplificada do sistema UWOC implementado .....	45
Figura 23: Visão geral do transmissor .....	48
Figura 24: Relação entre a corrente direta e o brilho do LED .....	48
Figura 25: Esquema elétrico do circuito transmissor.....	49
Figura 26: Transístor 2N2222A - Metálico .....	51
Figura 27: <i>3W High Power LED</i> .....	51
Figura 28: Padrão de Radiação do LED .....	52

Figura 29: Visão geral do recetor.....	53
Figura 30: Fotodíodo SFH 206 K .....	54
Figura 31: Características direcionais do fotodíodo.....	55
Figura 32: Esquema elétrico do amplificador de transimpedância.....	56
Figura 33: Amplificador Operacional <i>Rail-to-Rail MCP6272</i> .....	56
Figura 34: Esquema elétrico do filtro passivo passa-alto.....	57
Figura 35: Circuito retificador de precisão de meia onda .....	58
Figura 36: Esquema elétrico do circuito recetor - Protótipo I.....	58
Figura 37: <i>Flip-Flop RS CD4043BCN</i> .....	59
Figura 38: Bateria de 9V recarregável .....	60
Figura 39: <i>Adjustable Output DC Converter Board</i> .....	60
Figura 40: Osciloscópio <i>Tektronix TDS 1002B</i> .....	61
Figura 41: Montagem completa do circuito transmissor na <i>Breadbord</i> .....	61
Figura 42: Montagem completa do circuito recetor na <i>Breadbord</i> – Protótipo I....	61
Figura 43: Montagem completa do Tx e do Rx na bancada de teste .....	64
Figura 44: Formato do conjunto de dados ( <i>data frame</i> ) na norma RS232 .....	65
Figura 45: Configuração de teste com uma distância de 20 <i>cm</i> entre o Tx e o Rx...66	
Figura 46: Formas de onda do desempenho do LED e do fotodíodo com 20 <i>cm</i> de distância entre o Tx e o Rx.....	66
Figura 47: Relação entre a tensão pico-a-pico na saída do fotodíodo e a distância de transmissão .....	67
Figura 48: Transmissão dos primeiros <i>bits</i> com uma distância de 1,4 <i>m</i> entre o Tx e o Rx .....	67
Figura 49: Transmissão de dados entre o Tx e o Rx com uma distância de 20 <i>cm</i> .68	
Figura 50: Configuração de teste com uma distância de 70 <i>cm</i> entre o Tx e o Rx...69	
Figura 51: Transmissão de dados entre o Tx e o Rx com uma distância de 70 <i>cm</i> .69	
Figura 52: Configuração de teste com uma distância de 1,40 <i>m</i> entre o Tx e o Rx .70	
Figura 53: Transmissão de dados entre o Tx e o Rx com uma distância de 1,40 <i>m</i> 70	
Figura 54: Transmissão de dados entre o Tx e o Rx com uma distância superior a 1,40 <i>m</i> .....	71
Figura 55: Filtro ativo passa-banda de primeira ordem.....	72
Figura 56: Esquema elétrico do circuito recetor - Protótipo II .....	72
Figura 57: Montagem completa do circuito recetor na <i>Breadbord</i> – Protótipo II...73	
Figura 58: Configuração de teste com uma distância de 4,50 <i>m</i> entre o Tx e o Rx..73	

Figura 59: Transmissão de dados entre o Tx e o Rx com uma distância de 4,50 m	74
Figura 60: Transmissão de dados entre o Tx e o Rx com uma distância de 4,70 m	74
Figura 61: Configuração de teste com uma distância de 5,30 m entre o Tx e o Rx.	76
Figura 62: Transmissão de dados entre o Tx e o Rx com uma distância de 5,30 m	76
Figura 63: Resultado da comunicação ao ar livre com diferentes cores do LED.	77
Figura 64: Bolsa estanque para impermeabilizar os circuitos	78
Figura 65: Circuito transmissor e recetor dentro do suporte estanque	79
Figura 66: Suporte para estabilizar o circuito transmissor e recetor durante os testes subaquático	79
Figura 67: Tanque de água utilizado para testar o sistema UWOC.	81
Figura 68: Esquema de montagem do bloco Tx e Rx para testar o sistema UWOC.	81
Figura 69: Montagem e teste do Tx - Rx no tanque de água da EN.	82
Figura 70: Número de vezes que o Rx identificou o caracter na água limpa - com luz ambiente	83
Figura 71: Número de vezes que o Rx identificou o caracter na água limpa - sem luz ambiente	83
Figura 72: Montagem e teste do Tx - Rx na água do mar da BNL.	84
Figura 73: Número de vezes que o Rx identificou o caracter na água do mar - com luz ambiente	85
Figura 74: Número de vezes que o Rx identificou o caracter na água do mar - sem luz ambiente	85
Figura 75: Comparação do número de vezes que o Rx identificou o caracter entre os diferentes canais de comunicação - com luz ambiente	86
Figura 76: Comparação do número de vezes que o Rx identificou o caracter entre os diferentes canais de comunicação - sem luz ambiente	86



## Índice de Tabelas

Tabela 1: Comparação das tecnologias utilizadas nas comunicação sem fio em ambiente subaquático.....	24
Tabela 2: Valores típicos do coeficiente de absorção $a(\lambda)$ , dispersão $b(\lambda)$ e atenuação $c(\lambda)$ .....	33
Tabela 3: Especificações técnicas do Arduino <i>NANO</i> .....	47
Tabela 4: Características elétrica e ótica do <i>3W High Power LED</i> .....	53
Tabela 5: Características elétrica e ótica do fotodiodo.....	55
Tabela 6: Custo dos componentes do protótipo .....	88



## Lista de Abreviaturas, Siglas e Acrónimos

AMPOP	Amplificador Operacional
AUV	<i>Autonomous Underwater Vehicles</i>
BER	<i>Bit Error Ratio</i>
BNL	Base Naval de Lisboa
BUV	<i>Biomimetic Underwater Vehicles</i>
DPSK	<i>Differential Phase Shift Keying</i>
<i>DPSK</i>	<i>Differential Phase Shift Keying</i>
EDA	<i>European Defence Agency EDA</i>
EEPROM	<i>Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory</i>
ELF	<i>Extremely Low Frequency</i>
EN	Escola Naval
FH-FSK	<i>Frequency Hopping – Frequency Shift Keying</i>
FSK	<i>Frequency Shift Keying</i>
ISR	<i>Intelligence, Surveillance and Reconnaissance</i>
IST	Instituto Superior Técnico
LASER	<i>Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation</i>
LED	<i>Light Emitting Diode</i>
MFSK	<i>Multiple Frequency Shift Keying</i>
MIT	<i>Massachusetts Institute of Technology</i>
NOAA	<i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i>
PIB	Produto Interno Bruto
PPM	<i>Pulse Position Modulation</i>
QAM	<i>Quadrature Amplitude Modulation</i>
QAM-OFDM	<i>Quadrature Amplitude Modulation - Orthogonal Frequency Division Multiplexing)</i>
QPSK	<i>Quadrature Phase-Shift Keying</i>
RF:	Radiofrequência
ROV	<i>Remotely Operated Vehicle</i>
Rx	Circuito recetor
SABUVIS	<i>Swarm of Biomimetic Underwater Vehicles for Surveillance and Reconnaissance</i>

SaeR	Sociedade de Avaliação Estratégica e de Risco
SAR	<i>Search and Rescue</i>
Seacon	<i>System of Training, Demonstration and Development of Concepts of Operation with Multiple Autonomous Underwater Vehicles</i>
SNR	<i>Signal To Noise Ratio</i>
TIA	Amplificador De Transimpedância
Tx	Circuito transmissor
UUV	<i>Unmanned Underwater Vehicles</i>
UWAC	<i>Underwater Wireless Acoustic Communication</i>
UWOC	<i>Underwater Wireless Optical Communication</i>
VLC	<i>Visible Light Communication</i>
WHOI	<i>Woods Hole Oceanographic Institution</i>

# 1. Introdução

## 1.1. Enquadramento

Segundo as pesquisas da *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA)<sup>1</sup> dos Estados Unidos da América, perto de 70% da superfície terrestre é coberto por oceanos, e desses a maior parte é inexplorada, isto é, sensivelmente 95% desse reino subaquático não é visto pelos olhos humanos. Assim, investir na exploração e estudo do fundo do mar como mecanismo de crescimento e diversificação económica, tem-se tornado cada vez mais uma prioridade para os institutos de pesquisa oceanográfica em vários países.

De acordo com um estudo da Fundação *Calouste Gulbenkian*, com o objetivo de compreender o valor dos oceanos e o seu papel no desenvolvimento económico sustentável e no bem-estar humano, com base no conhecimento científico em Portugal, na União Europeia e globalmente, estima-se que 90% do comércio global seja feito por via marítima (Grilo et al., [2017](#)).

Falando especificamente de Portugal, foi realizado um estudo pela Sociedade de Avaliação Estratégica e de Risco (SaER), sobre o impacto da exploração marinha no PIB (Produto Interno Bruto) nacional, para elucidar o valor económico dessas atividades na economia portuguesa. Esse estudo, denominado “Hypercluster da Economia do Mar”, esclarece que o valor económico dessas atividades é cerca de 2% do PIB nacional. O referido estudo, também mostra que devido ao crescimento da economia marítima, ela representará 10% a 12% do PIB e do emprego nacional até 2025 (Lopes & SAER, [2009](#)).

A jurisdição marítima portuguesa cobre uma área de cerca de 1,6 milhões de  $km^2$  correspondente à Zona Económica Exclusiva (terceira maior da União Europeia e a quinta maior da Europa)(Azul, 2021), o que significa que cerca de 97% do país é zona marítima(Lisboa, 2021), e o território marítimo nacional é 40 vezes superior ao terrestre. Essa jurisdição marítima é um ativo no contexto económico e na criação de empregos, o que estimula a necessidade de se investir no desenvolvimento focado em tecnologias para acelerar a monitorização da área marítima nacional,

---

<sup>1</sup>Agência governamental dos EUA especializada em previsões meteorológicas diárias, monitoramento climático, etc.

recolhendo o máximo de informações possíveis das áreas inexploradas e dos recursos existentes, de modo a ganhar a notoriedade da comunidade internacional e atrair investidores estrangeiros.

Denota-se que nas análises e pesquisas gerais sobre o fundo do mar e os seus recursos, ainda há muito espaço para pesquisas e explorações. Diante disso, para acelerar o desenvolvimento deste campo, sistemas subaquáticos de telecomunicações devem ser utilizados. Portanto, de modo a solucionar a situação acima, surge a seguinte questão: “qual a melhor forma de projetar e implementar sistemas de comunicação subaquática segura, económica, eficientes e com o mínimo de interferências?”. Atualmente, a solução é baseada em dois aspetos: a criação de redes de sensores subaquáticos<sup>2</sup>, e a utilização de dispositivos robóticos que podem transmitir e receber os dados obtidos. Com o atual desenvolvimento da tecnologia, os dispositivos eletrónicos têm desempenhado funções que substituem o Homem, descobrindo e investigando áreas que os mesmos não podem alcançar.

A inadaptabilidade do Homem em permanecer submerso por longo período, impulsionou a criação de veículos subaquáticos autónomos (doravante, *Autonomous Underwater Vehicles* AUV), veículos operados remotamente (daqui adiante, *Remotely Operated Vehicle* ROV) e os veículos subaquáticos não tripulados (doravante, *Unmanned Underwater Vehicles* UUV), na qual podem realizar funções múltiplas, como, por exemplo, exploração de petróleo *offshore*, atividades militares submarinas, levantamento do fundo do mar, nós de rede de comunicação e navegação, e pesquisa oceanográfica.

A robótica tem sido cada vez mais utilizada para missões em ambiente subaquático para melhorar a precisão e a capacidade de manobra. Em tais tarefas, esses veículos são normalmente utilizados. Um ponto importante, é como efetuar a comunicação com esses veículos, isso, porque, os dados obtidos devem e precisam ser transmitidos de forma rápida e eficiente durante as missões subaquáticas. Em ambiente terrestre, utilizam-se normalmente tecnologias de comunicação baseadas em fio ou fibra ótica, pois, são confiáveis e suportam alta velocidade. Isso é, a conexão física, é a solução mais simples. A utilização desses veículos em locais de

---

<sup>2</sup> Trata-se de uma rede composta por nós sensores cuja finalidade é a comunicação entre esses nós, e possuem encapsulamento resistente à pressão da água.

difícil acesso e em alto mar com conexões físicas, pode ser bastante desafiador e causar complicações operacionais, porque poderá limitar o alcance e a manobrabilidade dos mesmos. À vista disso, há grandes interesses nas técnicas de comunicação sem fio. Portanto, uma comunicação sem fio, é uma solução prática para os problemas intrínsecos as comunicações com esta categoria de veículos (Ghassemlooy et al., [2015](#)).

### **1.1.1. Projeto SABUVIS**

Nos últimos anos, a aplicação da tecnologia robótica na construção de veículos não tripulados e autónomos em ambientes subaquáticos, continuou a aumentar. Uma das inovações neste campo são os veículos submarinos biomiméticos autónomos (ou *Biomimetic Underwater Vehicles* BUVs). Eles conseguem assemelhar-se à aparência e à cinemática dos organismos vivos subaquáticos, como, por exemplo, peixe ou foca.

No plano internacional da Agência Europeia de Defesa (em inglês *European Defence Agency* EDA), Portugal está presente no programa *Swarm of Biomimetic Underwater Vehicles for Surveillance and Reconnaissance* (SABUVIS). Essencialmente, o projeto SABUVIS incide na construção e testes de BUVs para a sua utilização em operações militares. Esse sistema alegadamente apresenta propulsão mais eficiente, são mais silenciosos e mais difíceis de detetar.

A presente dissertação está incluída no projeto internacional SABUVIS II da EDA. Esse projeto fundamenta-se no âmbito do projeto SABUVIS I concluído em 2019, e visa dar continuidade ao primeiro projeto SABUVIS criado por um consórcio entre Portugal, Polónia e Alemanha. O objetivo principal do projeto SABUVIS II é o desenvolvimento de tecnologia para o controlo de um *Swarm* de BUVs. No primeiro projeto três diferentes modelos de BUVs foram construídos(Araújo, [2020](#)), e concluiu-se que os BUVs podem ser efetivamente projetados com vários graus de similaridade com organismos vivos. Alguns dos benefícios identificados: a propulsão ondulante consome menos energia do que os sistemas de propulsão convencionais e, o seu nível de ruído é menor em comparação com os outros modelos de veículos submarinos.



Figura 1: Primeiro modelo BUV para SABUVIS<sup>3</sup>

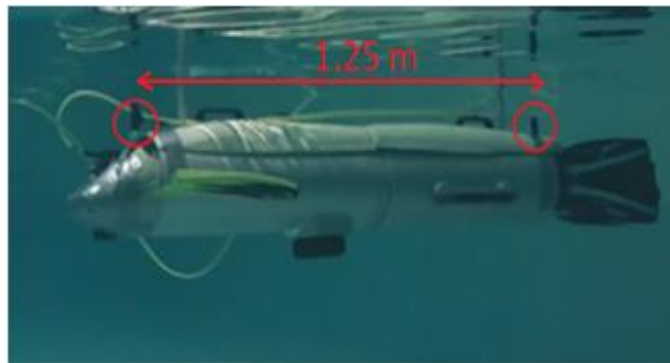


Figura 2: Segundo modelo BUV para SABUVIS com hidrofones<sup>4</sup>



Figura 3: Terceiro modelo BUV para SABUVIS<sup>5</sup>

Esse novo projeto é importante para a defesa nacional, pois, os UUVs são cada vez mais usados para diversas tarefas em ambiente marítimo. Eles representam uma

---

<sup>3</sup> Fonte: <https://cazasyhelicopteros2.blogspot.com/2019/11/biomimeticosautonomosvehiculos.html>

<sup>4</sup> Fonte: <https://www.mdpi.com/1424-8220/20/4/968>

<sup>5</sup> Fonte: Adaptado de (Araújo, 2020)

alternativa viável para a operação de plataformas tripuladas e são particularmente adequados face aos atuais avanços tecnológicos.

Tendo em consideração o mundo marinho como modelo, o projeto SABUVIS II busca replicar algumas das características “chave” da vida marinha, especialmente as características de propulsão e cinemática, de modo a garantir a conclusão bem-sucedida das operações submarinas. Por exemplo, uma das principais características fundamentais das missões de inteligência, vigilância e reconhecimento (em inglês *Intelligence, Surveillance and Reconnaissance* ISR) é a necessidade de realizá-las secretamente e, os sistemas que são difíceis de detetar, tanto audível quanto visualmente, apresenta-se como solução ideal.

O projeto SABUVIS II divide-se nas seguintes etapas principais:

- Estudar os cenários operacionais e providenciar conhecimento relativo à tecnologia que tem de ser implementada para um correto e bem-sucedido uso de *Swarms* de BUVs no contexto desses cenários;
- Investigar a viabilidade, utilidade e eficiência do uso da navegação costeira baseada em sensores óticos, no âmbito de cenários operacionais *GPS-denied*;
- Investigar a viabilidade, utilidade e eficiência da utilização de novas formas de propulsão baseadas em atuadores flexíveis, particularmente no que diz respeito a manobrabilidade, consumo energético, assinaturas acústicas e capacidades furtivas;
- Desenvolver um *Swarm* de veículos de baixo custo e estudar sistemas para controlo do mesmo;
- Realizar um conjunto de testes finais no mar para avaliar o resultado do projeto.

Assim, o trabalho desenvolvido na presente dissertação, visa desenvolver e estudar a viabilidade de um sistema de comunicação de baixo custo entre veículos submarinos, usando um transmissor e recetor ótico.

Tradicionalmente, a tecnologia acústica tem sido utilizada para estabelecer comunicações subaquáticas. No entanto, devido à forte atenuação que depende da frequência das ondas sonoras na água do mar, a largura de banda do canal acústico subaquático é limitada a centenas de *kHz*. Essa limitação também se deve ao facto

destas ondas e portadoras serem de baixas frequências, originando em informação de baixo débito binário e, conseqüentemente, baixa largura de banda (Oubei et al., [2015](#)). Devido à sua alta largura de banda, a comunicação ótica sem fio subaquática ou em inglês *Underwater Wireless Optical Communication* (doravante, UWOC) atraiu considerável atenção da comunidade científica, comercial e militar, como alternativa promissora ou complementar às comunicações por ondas acústicas e Radiofrequência (daqui adiante, RF). À vista disso, espera-se que o sistema UWOC desempenhe um papel importante, oferecendo comunicações seguras, eficientes e com elevados débitos binários entre submarinos, navios, mergulhadores, boias e sensores subaquáticos em distâncias curtas (Hassan Makine Oubei et al., [2015](#)).

## **1.2. Motivação**

A utilização das comunicações subaquáticas encontra-se em contínuo desenvolvimento devido à expansão em curso das atividades humanas no mar, o que torna necessário a criação de sistemas com tecnologias capazes de receber e enviar os dados coletados de forma rápida, eficiente e em tempo real. Apesar da baixa capacidade de largura de banda, os sistemas acústicos têm sido muito bem-sucedidos debaixo da água porque podem se comunicar por vários quilômetros (Chitre et al., [2008](#)). Há mais de 30 anos, foi proposto pela primeira vez o uso de luz visível debaixo da água como uma tecnologia viável para transmissão de dados, porque a absorção eletromagnética da água do mar tem uma janela de atenuação reduzida no espectro visível, essencialmente na região azul-esverdeado (Wiener & Karp, [1980](#)).

Portanto, a motivação para este trabalho, prende-se com a necessidade de demonstrar um sistema de comunicação de curta distância (inferior a 10 m), dentro de um *Swarm* de veículos submarinos autônomos, usando tecnologia de baixo custo.

## **1.3. Objetivos**

Os animais aquáticos fornecem uma fonte primária de inspiração para os projetos de dispositivos robóticos subaquáticos criados com base no princípio dos movimentos desses animais. Considerando a literatura da robótica, os peixes são criaturas aquáticas que inspiram um grande número de cientistas e engenheiros a construir veículos subaquáticos como eles. Infelizmente, a tecnologia moderna,

ainda é incapaz de imitar todas as suas características de movimento. O objetivo do Projeto SABUVIS é projetar, construir e testar veículos submarinos biomiméticos autónomos heterogéneos equipados com sensores e dispositivos de comunicação necessários para a execução de cenários operacionais de reconhecimento subaquático.

A presente dissertação, apresenta-se como a continuação dos trabalhos iniciados em anos anteriores na Escola Naval (EN) no projeto SABUVIS, e possui como objetivo, realizar um estudo experimental relativo à viabilidade de utilização das comunicações óticas entre AUVs e ROVs, permitindo, desse modo, a troca de dados sem haver contacto físico. Para tal, pretende-se em primeiro lugar, construir um circuito emissor e recetor estanques que utilizem esse género de tecnologia, recorrendo a LED (*Light Emitting Diode*) e fotodetector. Pretende-se também efetuar a realização de vários testes de desempenho do sistema em água com diferentes características de turbidez, primeiro ao ar livre, posteriormente em piscina e por último num ambiente real.

Em suma, a definição do problema da dissertação, consiste em projetar e implementar um sistema de comunicação de luz visível subaquático de baixo custo, que deve ser capaz de enviar dados via luz visível através de um LED de alta potência, receber os dados através de um fotodetector e conseguir trabalhar em diferentes situações de luz ambiente.

#### **1.4. Estrutura da investigação**

Esta dissertação contém seis capítulos (incluindo este). Um resumo de cada capítulo e as suas contribuições são descritos abaixo:

**Capítulo 2:** examinará a literatura existente e irá considerar a propagação da luz através da água da perspetiva de um sistema de comunicação subaquática, com ênfase nas comunicações óticas. Descreverá as várias propriedades básicas da propagação da luz na água. Essas propriedades estão na base da construção dos sistemas de comunicação ótica. Apesar disso, apresentará os recentes desenvolvimentos dessa tecnologia;

**Capítulo 3:** fornecerá uma visão geral dos conceitos teóricos fundamentais e inerentes a qualquer sistema de comunicação ótica. Apresentará as principais

configurações óticas de comunicação entre veículos autônomos, e finalizará com o estudo das técnicas de modulação que podem ser aplicadas nos sistemas de comunicação ótica sem fio subaquática, com foco na modulação OOK;

**Capítulo 4:** descreverá todos os procedimentos de dimensionamento e montagem do circuito transmissor e recetor;

**Capítulo 5:** descreverá de forma abrangente os testes planeados que serão conduzidos ao longo da dissertação, os seus cenários gerais e os testes necessários para validar os conceitos que serão apresentados ao longo do documento, incluindo todas as medidas importantes a serem consideradas em cada teste realizado. Apesar disso, aqui serão avaliados os resultados obtidos das experiências realizadas, e resumirá os resultados desses ensaios;

**O capítulo 6:** aqui serão apresentados o resumo de toda a tese, as principais conclusões relativas ao problema em estudo, assim como recomendações para melhorias adicionais no trabalho.

## 2. Estado de Arte

Este capítulo apresenta alguns dos trabalhos científicos desenvolvidos sobre a comunicação sem fio subaquática. Inicialmente analisará as diferentes tecnologias utilizadas nessas comunicações, considerando todas as vantagens e desvantagens de cada tecnologia. Posteriormente, a atenção é focada nas comunicações óticas sem fio subaquática.

Atualmente, há um interesse crescente na exploração do meio subaquático para inúmeras aplicações, como, por exemplo, avaliar mudanças climáticas, estudar a fauna e flora oceânica, supervisionar as plataformas de petróleo, e vigiar operações de veículos não tripulados. Todas essas aplicações requerem um meio de comunicação entre o meio subaquático e o mundo exterior, e, entre o próprio meio subaquático, sem envolver o exterior, por exemplo, entre veículos submarinos. À vista disso, serão estudados os trabalhos científicos e os produtos comerciais que tenham sido desenvolvidos até à data de escrita desta dissertação.

### 2.1. Tecnologias de comunicação subaquática

À medida que a exploração das áreas subaquáticas aumenta, também aumenta a necessidade por sistemas de comunicações subaquáticas rápidas e eficazes. Tradicionalmente, as comunicações subaquáticas são realizadas através de conexões físicas (como, por exemplo, cabos de fibra ótica<sup>6</sup>), essas têm algumas vantagens, como baixa atenuação e elevados débitos binários (Schill, [2007](#)). Porém, isso é impraticável na maioria das atividades subaquáticas porque iria reduzir o alcance e a manobrabilidade dos veículos subaquáticos, conseqüentemente dificultaria a operacionalidade das missões, além de estarem sujeitos aos fatores ambientais do meio, causando a degradação do material sendo necessário a sua substituição, o que resultaria em custos adicionais (Ghassemlooy et al., [2015](#)). Por esses motivos, a busca por uma solução viável, capaz de transmitir e receber informações sem depender de conexões físicas, tem atraído a atenção da comunidade científica.

---

<sup>6</sup> Uma fibra ótica é um filamento flexível feito de um material transparente como, por exemplo, fibras de vidro ou plástico e que é utilizado como meio de propagação da luz.

Nos dias atuais, atenção e importância têm sido dadas às técnicas de comunicação sem fio. Assim sendo, neste capítulo, serão apresentadas as técnicas de comunicação sem fio mais comuns no ambiente subaquático, com ênfase nas suas vantagens e os desafios que enfrentam neste meio de transmissão (Lanbo Liu, [2008](#)).

### 2.1.1. Acústica

A evolução das comunicações acústicas subaquáticas precede o das comunicações óticas subaquáticas, a sua aplicação em áreas como pesquisa marinha, oceanografia, defesa nacional e exploração de petróleo, resultou na criação de equipamentos de comunicações cada vez mais resistentes e com melhor desempenho. Apesar disso, a comunicação acústica apresenta alguns desafios, como: a largura de banda é limitada a 40 kHz para aplicação de média distância e pouca profundidade, dependência do ruído inerente dos sistemas de várias fontes humanas e não humana (Chitre et al., [2008](#)). Esses desafios limitam a taxa de *bits* máximos em torno de poucas dezenas de kilo *bits* por segundo (doravante, *kbps*), mesmo com a utilização de técnicas avançadas de processamento de sinal (Góis et al., [2016](#)).

Atualmente, o canal acústico é o modo mais comum de comunicação sem fio subaquática. Entre todas as técnicas de comunicação sem fio, o método acústico é o que alcança a maior distância de comunicação, até vários quilômetros, com débitos binários em torno de 5-10 *kbps*. Se a distância de comunicação for reduzida, maiores débitos binários são alcançados. Frequentemente, o esquema de modulação mais usado é a modulação *Frequency shift keying* (FSK), mas outras técnicas de modulação tornaram-se populares recentemente, como *Quadrature phase-shift keying* (QPSK) e *Differential Phase Shift Keying* (DPSK) (Schill, [2007](#)).

A comunicação acústica tem sido por muito tempo a solução padrão para as missões submarinas. Comparado com o ar, o som propaga-se melhor debaixo da água. Devido à maior densidade da água, a velocidade de propagação do sinal acústico nesse meio é 4 vezes superior que no ar (cerca de, 1500 *m/s*), permitindo que a transmissão de dados não fique dependente de cabos, possibilitando aos veículos submarinos efetuarem movimentos livremente. Apesar disso, as ondas acústicas podem ser afetadas pelo ruído na água, dispersão e absorção. Contudo, o nível de atenuação resultante permite, ainda assim, que distâncias consideráveis

sejam alcançadas (dezenas de *km*) (Lanbo Liu, [2008](#)).

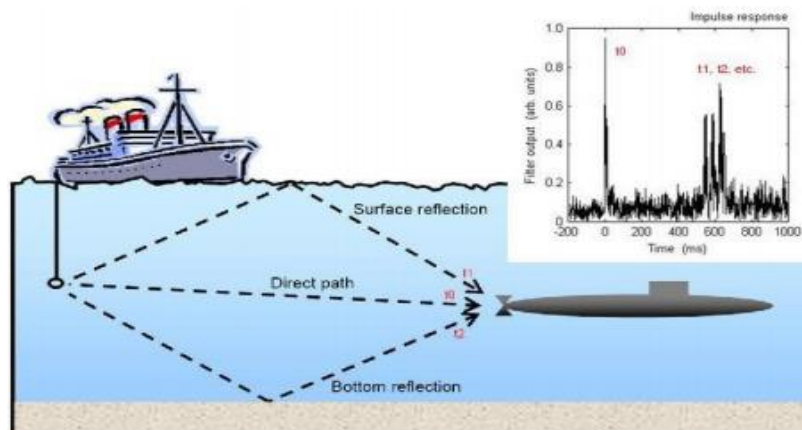


Figura 4: Comunicação acústica subaquática

Fonte: extraído de (Nazar, [2020](#)).

Há cerca de oitenta anos, com o desenvolvimento eficaz dos transdutores para aplicação efetiva nas minas submarinas, se deu início da comunicação acústica subaquática no âmbito militar. Em seguida, se expandiu a área de aplicação dessa tecnologia, como, por exemplo, nos telefones submarinos, nos torpedos ativos e passivos e na localização de objetos subaquáticos.

Em 1995, foi proposto o sistema de comunicação acústica sem fio subaquática, ou em inglês *Underwater Wireless Acoustic Communication* (doravante, UWAC), com 40 *kbps* de débito binário (Stojanovic, [1996](#)). Já em 1996, o sistema UWAC com 8 *kbps* foi desenvolvido para uma profundidade de 20 *m* e distância horizontal de 13 *km* (Zielinski et al., [1995](#)).

Em 2005, foi proposto um sistema UWAC de alto débito binário (H. Ochi & T. Shimura, [2005](#)) que registou um débito binário de 125 *kbps* com a utilização da técnica de modulação de amplitude em quadratura 32-QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*), e com  $10^{-4}$  de taxa de erro. Já em 2013, outro sistema UWAC com 60 *kbps* foi demonstrado em (Song & Hodgkiss, [2013](#)), com a utilização da mesma técnica de modulação, capaz de efetuar comunicação a 100 *m* de profundidade e distância horizontal de 3 *km*. Contudo, as ondas acústicas ainda apresentam algumas desvantagens, como a dispersão, alto atraso devido às baixas velocidades de propagação, baixa largura de banda e impactos negativos na “vida marinha” devido ao impacto das ondas acústicas nos organismos vivos (Au et al., [1997](#)).

Conforme mencionado em (B. M. Cochenour et al., [2008](#)), uma das desvantagens desse método é a sua baixa velocidade de propagação (alta latência) (Akyildiz et al., [2005](#)), além disso, apresenta baixa largura de banda, com um débito binário máximo de aproximadamente dezenas de milhares de *bits* por segundo (Chitre et al., [2008](#)), o que torna a comunicação acústica subaquática uma tecnologia lenta para a transmissão de dados. Este método, também apresenta outros problemas, como a sua suscetibilidade a múltiplos caminhos de propagação, dispersão e ruído ambiente.

### **2.1.2. Modems acústicos subaquáticos existentes**

Os modems acústicos subaquáticos comerciais são usados principalmente por agências governamentais, universidades e grandes companhias petrolíferas. Em seguida, serão apresentados alguns modems acústicos já desenvolvidos e as suas principais características:

- *AquaComm* (desenvolvido pela *DSPComm*): permite ao utilizador alterar a potência de transmissão e recepção dos dados, assim sendo, a potência pode ser ajustada adequadamente, por conseguinte, ajudará a reduzir o consumo de energia. Em condições ideais (oceano profundo), apresenta um alcance típico entre 250 *m* a 1000 *m*. Dependendo do modelo, o débito binário pode variar entre 100, 240 ou 480 *bps*, e operar na faixa de frequência entre 16 *kHz* a 30 *kHz* (DSPComm, [n.d.](#));
- *Benthos ATM-900 Series* (desenvolvido pela *Teledyne Benthos*): existem vários modelos, mas, conforme o selecionado, os dados podem ser transmitidos em profundidade que variam entre 500 *m* a 6000 *m*. Esses modelos permitem transmitir e receber dados a um débito binário de até 15360 *bps* através de uma ligação acústica. Empregam duas técnicas de modulação: PSK, que fornece débitos binários mais elevados, e a *Multiple Frequency Shift Keying* (MFSK), que fornece boa confiabilidade num ambiente de múltiplos caminhos (Benthos, [n.d.](#));
- *CNODE – Modem MINIS* (desenvolvido pela *Kongsberg Maritime*): projetado para a transferência de dados com ligação ponto-a-ponto entre dois CNODEs ou entre um *modem* e um navio na faixa de frequência que varia entre 21 *kHz* a 31 *kHz*, a um débito binário máximo teórico de 6 *kbps* e com capacidade

para estabelecer ligação até uma profundidade máxima de 4000 m (Maritime, [n.d.](#));

- Modems R-Series (desenvolvidos pela *Evologics*): utilizam uma tecnologia denominada *Sweep Spread Carrier* (S2C). Essa portadora consiste numa sucessão de varrimentos, que causam uma flutuação rápida e permanente da frequência do sinal. Além de alguns efeitos úteis adicionais, como fornecer acesso a multiusuário e reduzir a influência do ruído de banda estreita. Em geral, dependendo do modelo, a profundidade operacional varia entre 200 m a 8000 m, e consegue fornecer uma taxa de transferência de dados até 6,9 *kbps* (Evologics, [2015](#));
- *SoundLink* (desenvolvido pela *LinkQuest Inc.*): visa solucionar três principais obstáculos na comunicação subaquática: baixa confiabilidade, baixo débito binário e alto consumo de energia. Com a utilização da tecnologia *Broadband Acoustic Spread Spectrum*, pode-se aumentar significativamente a taxa de dados (até 38400 *baud*), reduzir o consumo de energia, alcançar robustez e ter o número de erros de *bit* por unidade de tempo ou *Bit Error Rate* (BER) inferior a  $10^{-9}$ , equivalente à qualidade da comunicação por fio (Inc, [n.d.](#)).
- *Micro-Modem*: (desenvolvido pelo *Woods Hole Oceanographic Institute - WHOI*): é utilizado como um sistema de comunicação e navegação, possui uma estrutura compacta e baixo consumo de energia. Consegue alterar a sua frequência central *Frequency Hopping - Frequency Shift Keying* (FH-FSK), e pode usar a modulação PSK para transmitir com débito binário entre 300 – 5000 *bps*. (Freitag et al., [2005](#));

Dada a necessidade por sistemas de defesa nacional cada vez mais modernos e eficientes ao nível dos AUVs, e para conciliar os interesses comuns e a experiência acumulada acerca desses veículos, em 2006, a Marinha portuguesa e a Universidade do Porto assinaram um Protocolo de Cooperação que sucintamente teve o racional: “A conveniência de alavancar a investigação e desenvolvimento em domínios de interesse científico e pedagógico comum, especialmente no desenvolvimento desses veículos”. À vista disso, surgiu o projeto: sistema de formação, demonstração e desenvolvimento de conceitos de operação com veículos eficazes autónomos múltiplos, ou em inglês *system of training, demonstration and development of*

*concepts of operation with multiple autonomous underwater vehicles (Seacon)*<sup>7</sup>.

No âmbito desse protocolo surgiram as AUVs Seacon, essencialmente, esses veículos foram projetados para operarem em águas pouco profunda, próximas à costa, e para serem usados em vários cenários de operações militares, como o projeto SABUVIS e nas missões do destacamento de mergulhadores da Marinha portuguesa. Apesar disso, esses veículos também foram projetados para operarem nas missões de busca e salvamento ou *Search And Rescue* (SAR), na recolha de dados oceanográficos e mapeamento do fundo do mar. No que se refere a comunicação subaquática, esse veículo contém o *Micro-Modem* acústico desenvolvido pela WHOI, permitindo assim a transmissão e a receção dos sinais acústicos na faixa de frequência entre 18 e 34 kHz (Azevedo, [2013](#)).

Exemplos de alguns Modems Acústicos desenvolvidos são mostrados na Figura 5:



Figura 5: Alguns Modems acústicos disponíveis comercialmente

### 2.1.3. Radiofrequência

As ondas de rádios são uma escolha comum para a transmissão de dados nas comunicações terrestres. Quando comparadas com as ondas acústicas, as ondas de rádio têm maior largura de banda e velocidade de propagação. Em virtude dessas características, e dependendo do alcance de comunicação, as ondas de rádio apresentam débito binário maior (até dezenas de *Mbps*). No que se refere ao consumo de energia, os sistemas de comunicação baseados em ondas de Radiofrequência (doravante, denominado RF) são mais eficientes do que os

---

<sup>7</sup> Fonte: Retirada da Revista da Armada Portuguesa (*Regresso a Lisboa Dos Prisioneiros de Guerra Do NRP Afonso de Albuquerque*, [2012](#)).

sistemas acústicos, pois, requerem menos energia.

Apesar das características referenciadas, as ondas RF apresentam fatores que limitam o seu uso em larga escala na água. Uma das principais desvantagens desse método consiste na forte atenuação que as ondas de rádio sofrem na água, o que reduz significativamente a magnitude do sinal que se propaga do transmissor para o recetor. Isso limita fortemente o alcance da comunicação. Para compensar a forte atenuação, a potência do transmissor deve ser aumentada exponencialmente, e para isso, deve-se construir antenas eficientes e com dimensões consideráveis (Brundage & Brundage, [2010](#)).

Conforme a experiência realizada em (Chen et al., [2010](#)), as comunicações subaquáticas baseadas em ondas de rádio são viáveis na faixa de frequência ELF (*Extremely Low Frequency* 3 – 30 Hz)<sup>8</sup>. No entanto, o principal problema com o uso das ondas de rádio para essas comunicações, consiste no facto da água salgada apresentar-se como um condutor na faixa de frequência de interesse, afetando assim a largura de banda máxima disponível para a transmissão. As ondas na faixa de frequência ELF, efetivamente penetram na água do mar, o que a torna útil para comunicação com submarinos. Alguns países, como, por exemplo, os EUA construíram transmissores ELF militares para transmitir sinais aos seus submarinos submersos, consistindo em enormes antenas aterradas (também denominado por dipolos terrestres)(Lake, [2001](#)).

A antena é um equipamento fundamental nesse tipo de comunicação subaquática, visto que, servirá como um dispositivo passivo para transmitir e receber energia eletromagnética radiada. Tendo em consideração a faixa de frequência da experiência acima indicada, e considerando a frequência de 30 Hz, a questão que se coloca consiste, por exemplo, em saber o verdadeiro tamanho da antena. O tamanho ideal da antena seria de meio comprimento de onda, isto é, no vácuo, a relação entre o comprimento de onda e a frequência é dada por:

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad (1)$$

---

<sup>8</sup> O primeiro Projeto ELF foi desenvolvido em 1968 para comunicação entre submarinos profundamente submersos. Neste projeto, um sistema de alerta foi usado para chamar o submarino para a superfície para comunicação de alta largura de banda usando ligação de rádio terrestre (Altget, [1989](#)).

onde:

$\lambda$  – Corresponde ao comprimento de onda em metros ( $m$ ).

$v$  – Corresponde a velocidade da luz (aproximadamente,  $3 \cdot 10^8$  ( $m/s$ )).

$f$  – Corresponde ao valor da frequência em Hertz (ou,  $1/s$ ).

Da equação 1 resulta que o valor do  $\lambda = 10^7 m$ . Portanto, a altura( $h$ ) ideal da antena seria:

$$h = \frac{\lambda}{2} = \frac{10^7}{2} = 5 \cdot 10^6 m \quad (2)$$

O resultado apresentado na equação 2, evidencia o quanto as características inerentes a faixa de frequência ELF é de baixa eficiência e elevado custo para uma comunicação subaquática. Portanto, a necessidade de antenas com tamanho ideal “incoerente na construção” torna dispendiosa a sua aplicação com os veículos autônomos.

Comparando as ondas acústicas e as de rádio em (Frater et al., [2006](#)), chegou-se à conclusão que o uso de ondas de rádio proporciona um aumento do débito binário numa conexão de menor alcance ( $< 6 m$ ). Em (Al-Shamma'a et al., [2004](#)), as frequências de RF na faixa de  $MHz$  são capazes de se propagar na água do mar até uma distância de  $100 m$  usando radiação de dipolo com altas potências de transmissão (na ordem de  $100 W$ ). Para tal, é necessário um dimensionamento aprimorado da antena e alta potência de transmissão. Já em (H. Kulhandjian, [2015](#)), usando a modulação QPSK, através de quatro transmissões, a antena foi capaz de transmitir  $48 kbps$  com largura de banda de  $23 kHz$  numa distância de  $2 km$ .

Finalmente, em (Selvarasan et al., [2016](#)), uma aplicação interessante foi proposta, incluindo a realização de uma rede de sensores subaquáticos para observação de sedimentos do fundo do mar. O motivo da utilização das ondas de rádio para esse propósito deve-se ao facto de que o sinal efetivamente atravessou a fronteira água-ar e, como resultado, os sensores comunicaram diretamente com uma estação costeira. Todos os resultados apresentados indicaram que, para obter uma comunicação subaquática confiável entre os sensores distribuídos, seria necessário projetar um sistema com alto SNR (*Signal to Noise Ratio*).

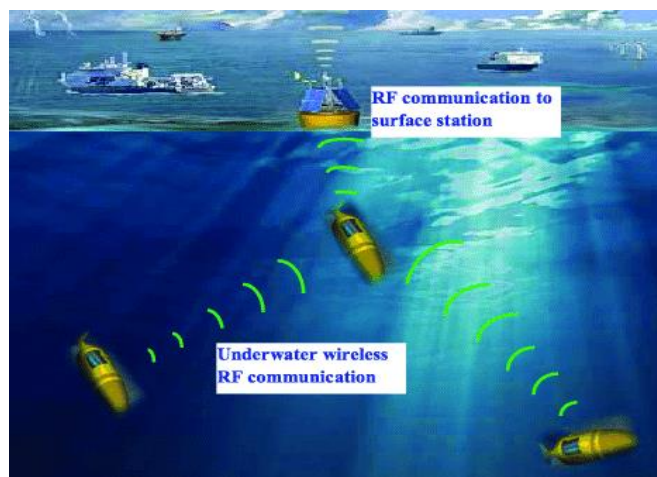


Figura 6: Comunicação subaquática em RF  
Fonte: extraído de (Kaushal & Kaddoum, [2016](#)).

Em conformidade com os cálculos apresentados anteriormente, as comunicações RF requerem antenas de tamanho considerável e especialmente projetadas. Embora existam situações em que a comunicação RF pode ser benéfica, infelizmente, para comunicações subaquáticas, o débito binário ainda é muito lento (Anguita et al., [2010](#)).

#### 2.1.4. Ótica

Após ser aferido os inconvenientes relacionados com as comunicações acústicas, e após analisar a inconveniência associada ao tamanho da antena necessária para realizar a comunicação RF (particularmente na faixa de frequência ELF), as comunicações que utilizam a janela do espectro visível (daqui em diante, comunicações óticas), apresentam-se como resposta apropriada para contrabalançar os problemas intrínsecos aos métodos acústicos e RF. O atual desenvolvimento em oceanografia, tecnologia marinha, estruturas marítimas e a proliferação de veículos subaquáticos, impulsionou a procura por sistemas de comunicação subaquática confiável. Diante disso, a comunicação ótica subaquática, é uma alternativa promissora à acústica para comunicações de baixa latência e elevado débito binário. Avanços recentes em fontes de luz de baixo custo, como LEDs (Simpson, [2007](#)), e LASERs (Jr, [2007](#)), funcionando na janela de mínima atenuação da água do mar, isto é, entre  $400\text{ nm} - 550\text{ nm}$  (Chancey, [2005](#)), tornam possíveis os componentes dos sistemas subaquáticos mais compactos.

De modo a analisar a propagação e o comportamento dos sinais óticos na água, vários modelos teórico-experimentais foram elaborados. Desde 1970, ligações subaquáticas baseadas em LASERs têm sido exploradas (Karp, [1976](#); Wiener & Karp, [1980](#)). Em (Snow et al., [1992](#)), são apresentados os primeiros resultados experimentais com uma onda quadrada de 7 MHz a 30 m de distância, e um sinal de 100 MHz propagando-se a 45 m. Para essa experiência, foram utilizados comprimentos de onda entre 514 nm e 532 nm (luz verde).

Conforme mostrado na Figura 7, a propagação subaquática das ondas óticas exibe características distintas em diferentes comprimentos de onda. Segundo (Duntley, [1963](#)), a atenuação na faixa de comprimentos de onda entre 450 – 550 nm (luzes azul e verde), é muito menor em comparação com os outros comprimentos de onda.

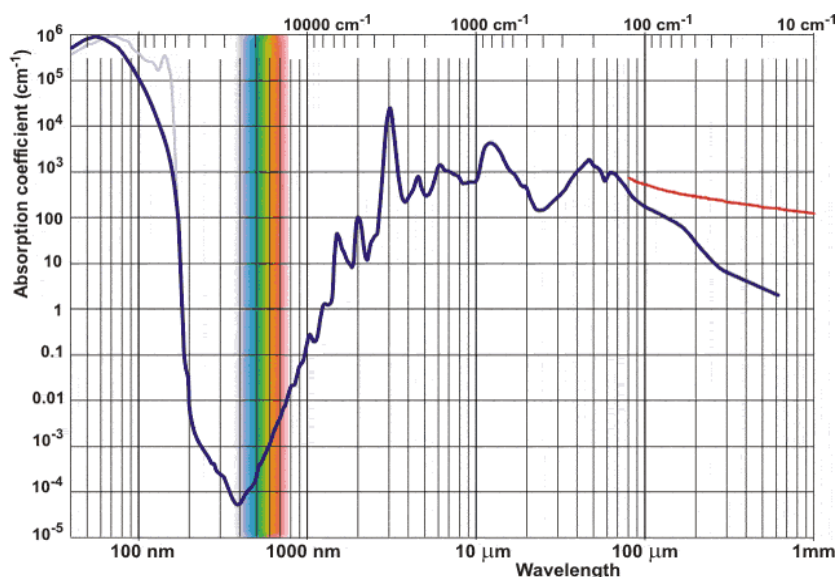


Figura 7: Atenuação das ondas óticas no meio aquático

Fonte: extraído de (Anguita et al., [2008](#)).

A questão que surge é: por que de facto vemos na Figura 7 essa faixa estreita de comprimento de onda em particular? Essencialmente, o espectro visível apresentado, descreve uma pequena “parcela” da enorme extensão da relação entre a frequência e o comprimento de onda, destacando assim a faixa do espectro visível ao olho humano. Observa-se que a luz ótica azul é a radiação eletromagnética com menos atenuação. No entanto, o comprimento exato da onda que penetra mais fundo nas ondas do mar, depende das características específicas da água. Apesar disso, a

atenuação do comprimento de onda na faixa entre 470 a 530 *nm* (azul, verde) e 620 a 700 *nm* (vermelho) é reduzida. Conforme pode ser observado, o espectro visível explora a queda acentuada e estreita do coeficiente de absorção da radiação eletromagnética pela água líquida, por exemplo, a luz ótica vermelha é mais absorvida do que a azul.

Já em (Gilbert et al., [1966](#)), foi confirmado experimentalmente este comportamento das ondas óticas que forneceram a base dos sistemas UWOC. As pesquisas sobre esses sistemas estão focadas em aumentar o alcance de transmissão e o débito binário do mesmo. A tendência para melhorar o débito binário dos sistemas UWOC com a utilização de LEDs foi estudado em (Cossu et al., [2018](#); Hanson & Radic, [2008](#)).

Os sistemas UWOC baseados em LASER foram propostos em (Atef et al., [2012](#); Tsonev et al., [2015](#)), que fornecem grande largura de banda e elevado débito binário. LASER de luz verde com 532 *nm* de comprimento de onda foi empregado em (Arnon, [2008](#)) para fornecer uma ligação UWOC que teve um alcance de 2 *m* com 1 *Gbps* de débito binário. Já em (Nakamura et al., [2015](#)), os autores utilizaram LASER azul com comprimento de onda de 405 *nm* para fornecer uma ligação UWOC com 1,45 *Gbps* a uma distância de 4,8 *m*. Sendo assim, para melhorar o débito binário, em (Hassan M. Oubei et al., [2015](#)) demonstraram um sistema UWOC com 4,8 *Gbps* de débito binário, usando um díodo de LASER de cor azul e fotodíodo como fotodetector, a experiência foi feita com uma ligação de 4,8 *m* utilizando a técnica de modulação 16-QAM-OFDM (*Quadrature Amplitude Modulation - Orthogonal Frequency Division Multiplexing*). Apesar disso, em (Xu et al., [2016](#)) foi proposto um sistema UWOC com 4,88 *Gbps* de débito binário utilizando 32-QAM-OFDM com a finalidade de obter a transmissão a uma distância de 6 *m*. Recentemente, um sistema UWOC de 7,2 *Gbps* foi proposto em (Wu et al., [2017](#)) para um LASER azul de 450 *nm* com uma distância de transmissão de 6 *m*.

Em (Hanson & Radic, [2008](#)), foi alcançado um elevado débito binário, com uma ligação de 1 *Gbps* estabelecido num tanque de teste de 2 *m*. Apesar disso, também se verificou experimentalmente a propagação de sinais modulados de RF com frequências superiores a 1 *GHz* em canal subaquático (Mullen, Laux, et al., [2009](#)). De acordo com os resultados das experiências feitas em (Mullen, Cochenour, et al., [2009](#)), foram aplicadas as mesmas técnicas para modulação da subportadora

RF a um sistema de comunicação ótica (B. Cochenour et al., [2006](#)), e, posteriormente, essa experiência foi expandida em (B. Cochenour et al., [2007](#)) permitindo maior eficiência espectral. Além disso, ligações até 5 *Mbps* foram estabelecidas num tanque de teste com 3,66 *m*. Os resultados experimentais da perda de potência foram apresentados em (B. Cochenour et al., [2010](#)), onde foi também analisada a despolarização da luz à medida que se propagava. Nas experiências (Doniec et al., [2010](#); Doniec & Rus, [2010](#)), foi demonstrado um sistema com 1,2 *Mbps* e com alcance de 30 *m*. Já em (Anguita et al., [2010](#)), é apresentado um sistema transmissor-recetor baseado em LED operando até 2 *Mbps* em distância curta 2 *m*.

Na dissertação de mestrado (Zeng, [2015](#)), o autor apresentou uma interessante pesquisa sobre a comunicação ótica sem fio. Forneceu comentários sobre a modulação do canal e técnicas de codificação. Por outro lado, (Liu et al., [2015](#)) descreveu o canal de comunicação do sistema UWOC considerando a presença de turbulência, absorção e dispersão. Em (Hou et al., [2015](#)), os investigadores descreveram algumas das potenciais aplicações das comunicações óticas sem fios.

Num novo estudo conduzido recentemente (Xiaobin et al., [2020](#)), os investigadores forneceram uma revisão sobre as considerações práticas e soluções viáveis na implementação de um sistema UWOC. Discutiram o problema do desalinhamento numa ligação subaquática e se concentraram em soluções que apresentam robustez nas ligações UWOC.

De facto, as comunicações subaquáticas aprimoradas, permitem o Homem e robôs trabalharem juntos de modo mais eficaz e eficiente para resolução de problemas difíceis que tradicionalmente não eram passíveis de soluções totalmente automatizadas. Diante disso, várias são as empresas e instituições académicas que trabalham para tornar possível essas soluções.

Alguns *modems* óticos já desenvolvidos e as suas principais características:

- *WHOI Optical Modem* (desenvolvido pelo *The Woods Hole Oceanographic Institution – WHOI*): foi implementado num nó de teste do fundo do mar e usado para descarregar dados sem fios do fundo do mar. Esta demonstração ocorreu numa profundidade de aproximadamente 2400 *m*. A tecnologia utilizou LEDs que permitiram débito

binário entre 5 – 20 *Mbps*, com alcance de aproximadamente 100 *m* sem a necessidade de alinhar o transmissor e o recetor (Pontbriand et al., [2016](#));

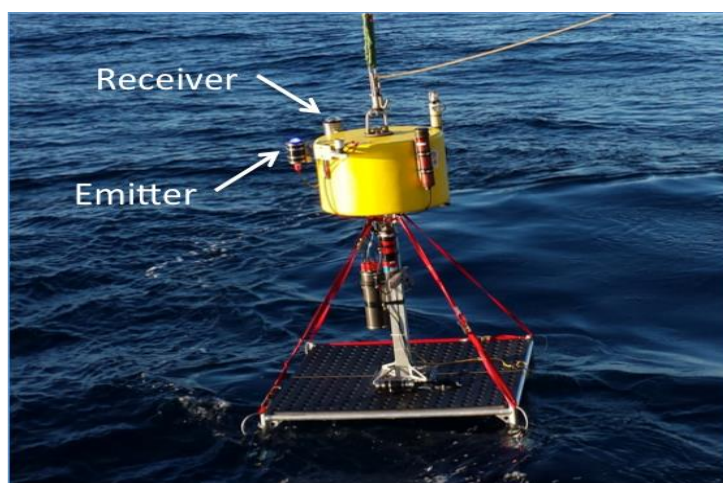


Figura 8: Nó de teste com a posição do emissor e recetor do modem ótico

Fonte: adaptado de (Pontbriand et al., [2016](#)).

- *AquaOptical II* (desenvolvido pelo *Massachusetts Institute of Technology* – MIT): numa experiência realizada em piscina foi feita a demonstração da comunicação bidirecional entre dois modems *AquaOptical II*. Foram transmitidos e recebidos com sucesso todas as formas de onda até 21 *m* de distância. Também foi realizada a demonstração unidirecional a 50 *m* de distância tendo alcançado um débito binário de 2 *Mbps* (Doniec & Rus, [2010](#));
- *Blue Ray Modem* (desenvolvido pelo Instituto Superior Técnico - IST): projetado para rápida transmissão de dados entre veículos subaquáticos MEDUSA<sup>9</sup>. O transmissor usa LEDs com modulação *On-Off keying* (OOK), e codificação *Manchester* enquanto o recetor utiliza uma arquitetura de transimpedância com um detetor de fotodíodo. Esses modems são projetados para atingir débitos binários entre 20-200 *kbps* a uma distância máxima de 10 *m* em configurações de curto alcance e linha de vista (Góis et al., [2016](#)).

Atualmente, várias empresas e instituições académicas trabalham para

---

<sup>9</sup> É um veículo submarino autónomo desenvolvido e produzido em Portugal que permite mergulhar até aos 3000 *m* de profundidade <https://tecnico.ulisboa.pt/pt/noticias/campus-e-comunidade/medusa-deep-sea-ultrapassou-o-primeiro-grande-teste-com-sucesso/>

tornar este método de comunicação cada vez mais eficiente. Infelizmente, em termos comerciais e acadêmico, ainda não existem grandes ofertas de transmissores e recetores óticos. Um sistema UWOC que usa LASER como fonte ótica é o *Neptune Underwater Communications*, desenvolvido e comercializado pela empresa *SA Photonics*. O sistema em causa é apresentado na Figura 9. Essencialmente, consiste num transmissor de LASER flexível que fornece capacidade de modulação adaptativa com base nas condições da água e na distância da ligação. Usado em conjunto com um sistema de deteção ótica de alta sensibilidade, permite uma comunicação mais robusta e confiável. Dependendo da turbidez da água, suporta uma taxa de dados de até 250 *Mbps* a uma distância máxima de 200 *m*. É um sistema compacto e de baixa potência (maior que 5 *W* de potência média).

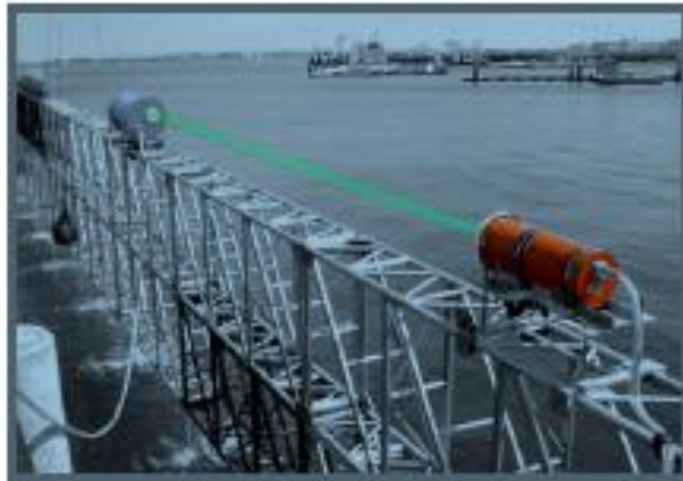


Figura 9: *Neptune Underwater Communications* em teste<sup>10</sup>

---

<sup>10</sup> Fonte: retirada do site da empresa SA Photonics, destinada ao desenvolvimento de sistemas de comunicações óticas subaquáticas. Além disso, fornece sistemas de comunicação subaquática em espaço livre para veículos tripulados e não tripulados.

<https://www.saphotonics.com/communications-sensing/optical-communications/>

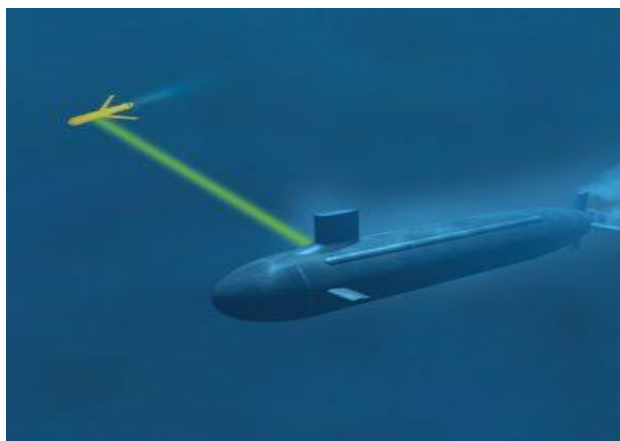


Figura 10: *Neptun* – Comunicação ótica debaixo da água  
Fonte: extraído do website da empresa *SA Photonics*<sup>11</sup>

As Tecnologias emergentes de comunicação subaquática desenvolvida para exploração comercial de recursos marinhos, comunicações militares entre navios e submarinos ou entre veículos autónomos, são tópicos de pesquisas bastante atrativo. A Figura abaixo, descreve um panorama dos métodos de comunicação subaquática que tem sido abordado nesse capítulo:

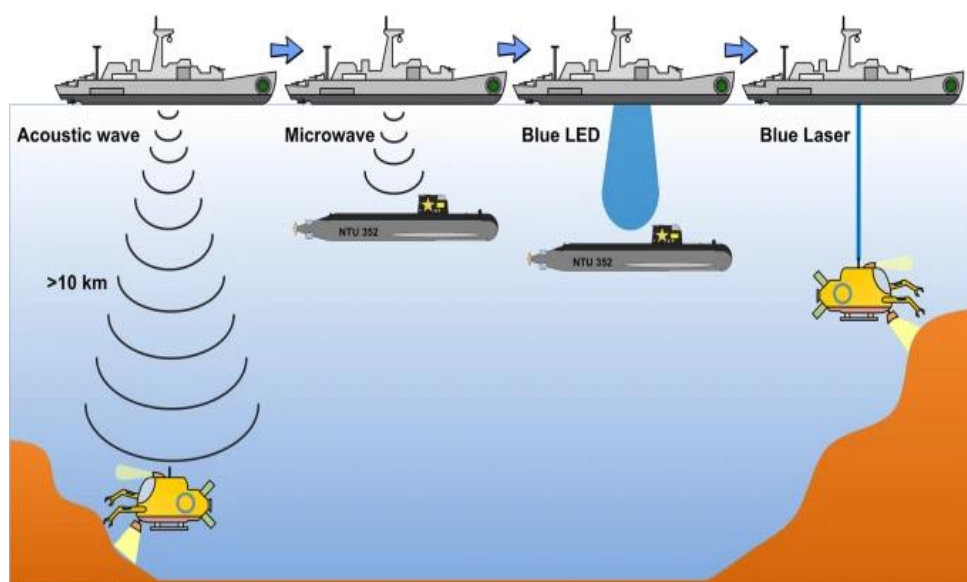


Figura 11: Comparação visual da distância entre as diferentes tecnologias de comunicação subaquática

Fonte: extraído de (Wu et al., [2017](#))

<sup>11</sup> <https://www.saphotonics.com/communications-sensing/optical-communications/>

A Tabela 1 lista as características de desempenho (vantagens, limitações e requisitos) das três principais tecnologias de comunicação subaquática (Acústica, RF e ótica):

<b>Parâmetro</b>	<b>Acústica</b>	<b>Radiofrequência</b>	<b>Ótica</b>
<b>Atenuação</b>	Dependente da distância e da frequência (0,1-4 <i>dB/km</i> )	Dependente da frequência e da condutividade elétrica (3,5-5 <i>dB/m</i> )	0,39 <i>dB/m</i> (Oceano) 11 <i>dB/m</i> (Água turva)
<b>Velocidade</b>	1500 <i>m/s</i>	$\approx 2,3 \times 10^8$ <i>m/s</i>	$\approx 2,3 \times 10^8$ <i>m/s</i>
<b>Débito binário (máximo)</b>	$\sim$ <i>kbps</i>	$\sim$ <i>Mbps</i>	$\sim$ <i>Gbps</i>
<b>Latência</b>	Alta	Moderado	Baixa
<b>Distância</b>	Dezenas de <i>km</i>	Dezenas de <i>m</i>	$\approx$ 10-100 <i>m</i>
<b>Largura de banda</b>	1 <i>kHz</i> - 100 <i>kHz</i>	$\approx$ <i>MHz</i>	10 - 150 <i>MHz</i>
<b>Banda de frequência</b>	10 - 15 <i>kHz</i>	30-300 <i>Hz</i> (ELF e comunicação subaquática direta) ou 30-300 <i>MHz</i> (comunicação ar-água)	$10^{12}$ - $10^{15}$ <i>Hz</i>
<b>Potência de transmissão</b>	Dezenas de Watts	<i>mW</i> – <i>W</i>	<i>mW</i> – <i>W</i>

Tabela 1: Comparação das tecnologias utilizadas nas comunicação sem fio em ambiente subaquático

Fonte: Adaptado de (Kaushal & Kaddoum, [2016](#)).

## 2.2. Resumo

Este capítulo apresentou os trabalhos de pesquisas que têm sido feitos acerca das comunicações subaquáticas, começando com uma referência sobre as comunicações óticas subaquáticas sem fios, e, posteriormente, descrevendo as vantagens e os inconvenientes dos métodos usados nessas comunicações.

Entre as três tecnologias de ondas eletromagnéticas mencionadas acima, os sistemas acústicos têm obtido grande sucesso debaixo da água devido à sua capacidade de comunicar por muitos quilômetros de distância. Porém, a atual tecnologia de comunicação acústica subaquática requer equipamentos mais dispendiosos.

A utilização de comunicação sem fio baseados em ondas de RF subaquáticas foi explorada para melhorar o débito binário, visto que fornece maior largura de banda e velocidade mais rápida debaixo da água. Porém, as ondas de rádio sofrem forte atenuação na água reduzindo consideravelmente a força do sinal. Por outro lado, a comunicação ótica sem fio tem sido proposta como uma alternativa para enfrentar os desafios pendentes. Mas, infelizmente, o desempenho do sistema UWOC está atualmente limitado a curto alcance. Portanto, mesmo que esse método apresente maior largura de banda, maiores débitos binários, e os *modems* UWOC comecem a estar disponível comercialmente, extensas pesquisas sobre esses sistemas são necessárias para tornar possível a transmissão dos dados em distâncias maiores.

No futuro, muitas aplicações subaquáticas usarão comunicação ótica. Apesar disso, as tecnologias UWOC poderão não substituir totalmente a comunicação acústica. Por esta razão, estudos são realizados por investigadores em comunicações híbridas acústicas-óticas (Han et al., [2019](#); Moriconi & Cupertino, [2015](#); Yin et al., [2019](#); Zielinski et al., [1995](#)). Esses estudos são muito promissores e devem ser estudados mais detalhadamente.



### 3. Definições conceituais

#### 3.1. Composição do sistema ótico

Inicialmente é interessante caracterizar o diagrama geral de qualquer sistema de comunicação ótica. Basicamente, qualquer sistema ótico inclui um transmissor, um canal de transmissão e um recetor. O transmissor é responsável por transmitir os *bits* de informação, codificar a mensagem e modular os dados utilizando alguma técnica de modulação. Os dados então podem ser transmitidos por uma fonte ótica, geralmente um LED ou um LASER.

No canal de transmissão, a informação está sujeita a várias categorias de interferência, como, por exemplo, a luz solar ou a luz de outras fontes luminosas. Efetivamente, essas interferências geram ruído no recetor, que recebe o sinal transmitido e distorcido do canal de transmissão e, posteriormente, realiza o processo de desmodulação dos *bits* da informação. A Figura 12 apresenta o resumo da composição de um sistema ótico:

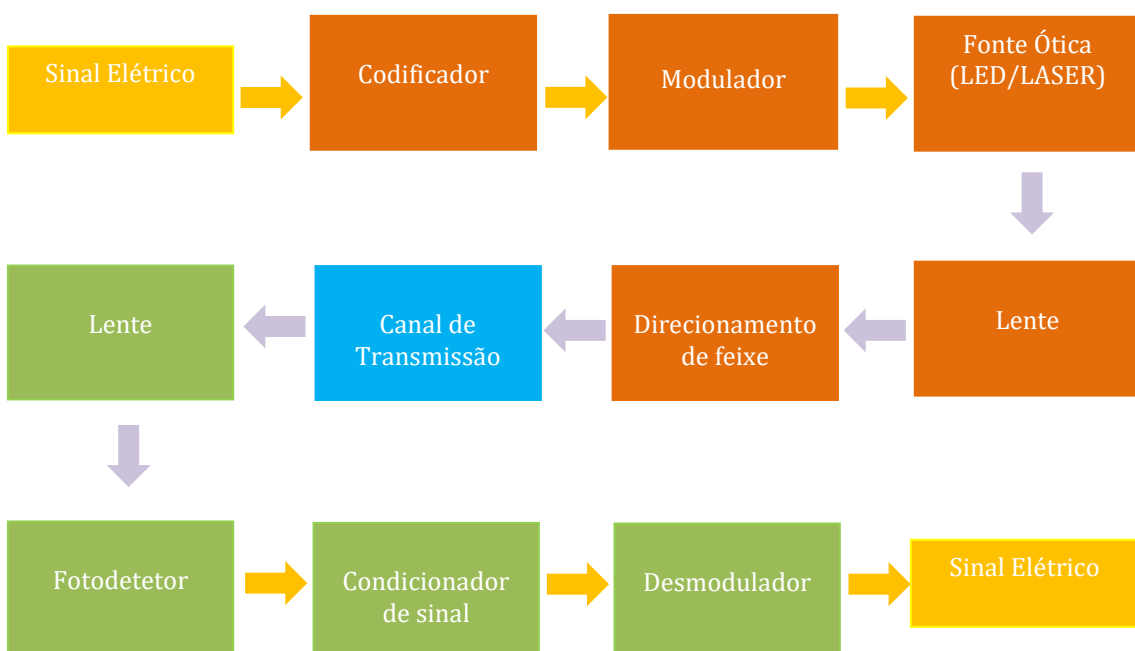


Figura 12: Diagrama resumido do sistema de comunicação ótica

Fonte: Adaptado de (Herji, [2018](#))

O ponto de partida do sistema de comunicação ótica apresentada na Figura 12 é o transmissor, onde o sinal elétrico é convertido num sinal ótico pela modulação

da fonte de luz. A conversão do sinal elétrico em sinal ótico é feita com a utilização de circuitos eletrônicos.

Devido aos efeitos de absorção e espalhamento causado pela água do mar, o sinal ótico transmitido será consideravelmente atenuado. Este efeito indesejável reduzirá diretamente o desempenho do *Bit Error Rate* (BER) do sistema UWOC. De modo a reduzir o impacto da atenuação e manter um baixo BER e elevado SNR durante a comunicação em ambiente subaquático, o codificador será responsável por codificar os impulsos dos sinais elétricos através de técnicas de controlo de erro, que adicionam *bits* redundantes à sequência transmitida para que o recetor possa corrigir um número limitado de erros na mensagem recebida.

O transmissor ótico converte o sinal elétrico de entrada em luz modulada para transmissão através do LED ou LASER. Dependendo da natureza deste sinal, a luz modulada que foi gerada pode ser ligada e desligada, ou a sua intensidade pode ser alterada linearmente entre dois níveis predeterminados (Modulação *On-Off* e Modulação Linear). O modulador opera no sinal enviado pelo LED/LASER e converte os dados transmitidos num formato padronizado. As técnicas de modulação OOK e por modulação da posição de impulsos (ou em inglês *pulse position modulation* PPM), são caracterizadas por técnicas simples com alta confiabilidade e baixos custos de implementação.

Existem poucas variedades de fontes de semicondutores em sistemas de comunicação ótica. Os mais frequentemente usados neste sistema de comunicação são os LEDs e LASERs. Essas duas categorias de fontes têm características diferentes, e os circuitos de acionamento para cada categoria de fonte também são diferentes.

No sistema UWOC, uma fonte de luz como LED ou LASER é usada como emissor. A principal função das fontes de luz é converter sinal elétrico em sinal de luz (ou sinais óticos). Essencialmente, essas fontes de luz, são pequenos dispositivos semicondutores que convertem com eficiência o sinal elétrico em sinais óticos. No entanto, eles são amplamente usados para distâncias de transmissão curtas porque são muito mais económicos, bastante lineares em termos de saída de luz versus entrada de corrente elétrica, e estáveis em termos de saída de luz versus temperatura ambiente de operação. Na presente dissertação, o foco será centrado nos LEDs devido algumas características inerentes a esse dispositivo eletrónico: são dispositivos de tamanho pequeno; têm alto brilho, ou seja, eles emitem muita luz

numa pequena área; têm uma vida útil muito longa, oferecendo alta confiabilidade; podem ser modulados (ligados e desligados) em altas velocidades; e economicamente apresentam baixo custo.

O módulo referente à lente ajuda a reduzir a divergência do feixe de luz emitido pela fonte ótica, aumentando assim a amplitude da potência do sinal no recetor. Por outro lado, também obriga ao alinhamento entre o transmissor e o recetor, o que nem sempre é possível ou desejável. Em contrapartida, o bloco de direcionamento do feixe é utilizado para modificar o ângulo onde se dá o pico do diagrama de radiação, o que poderá ser imprescindível em sistemas onde a ligação entre o transmissor e o recetor seja fora da linha de vista.

No lado do recetor, há inicialmente uma lente cuja função essencial é a mesma da lente do transmissor. Posteriormente, o fotodetector, cuja função principal é converter a luz incidente sobre ele em corrente elétrica. Geralmente, tem-se utilizado o fototransístor e fotodíodo para a realização dessa tarefa. Esses semicondutores convertem toda a luz que atinge a sua área sensível a radiação numa corrente elétrica proporcional à intensidade da luz, incluindo todas as outras fontes de luz. Neste trabalho é expectável que durante a realização dos ensaios práticos o fotodetector seja afetado pela luz externa. Essas fontes de luz geram ruído na forma de energia elétrica no recetor. Para manter um sinal adequado, bom e estável, o ruído deve ser eliminado. Portanto, a implementação de um filtro é crucial e irrefutável para se restaurar a informação inicial.

Em seguida, o sinal precisa ser processado, de modo que, a informação nela contida possa ser analisada, exibida ou convertida em outro tipo de sinal que possa ser útil. Diante disso, o condicionador de sinal será responsável por converter o sinal analógico em digital e transformá-lo num formato digital de 1 e 0.

Quando o recetor ótico recebe a onda modulada, é necessário recuperar o sinal original. Este processo é realizado no recetor por meio da desmodulação do sinal elétrico e, por fim, os *bits* desse sinal elétrico são encaminhados para uma unidade central de processamento.

Em suma, neste trabalho, os *bits* de informação da fonte de dados são modulados em OOK usando uma fonte ótica de LED com comprimento de onda entre 400 *nm* e 530 *nm* (azul-esverdeado). No lado do recetor, um fotodetector, seguido de

circuitos adequados de detecção, filtragem e amplificação do sinal, irão converter a mudança da intensidade da luz em tensões elétricas, com a finalidade de restaurar a informação inicial da fonte de dados.

### 3.2. Caracterização do canal ótico

Em seguida serão apresentados os conhecimentos teóricos relacionados com as propriedades de absorção e dispersão/espalhamento da luz no ambiente subaquático.

Quando a luz interage com a matéria, uma de duas coisas pode acontecer: a luz pode ser absorvida e parte da sua energia ser convertida em outra forma de energia, como, por exemplo, em calor. Quando há esse processo, ele é chamado absorção. Por outro lado, a luz também pode mudar a sua direção e/ou comprimento de onda. Quando ocorre um desses processos é chamado dispersão ou espalhamento.

Conforme o trabalho realizado em (William Charles Cox, 2012), o comportamento da luz na água é uma questão bastante complexa, e muitos trabalhos relacionados com essa temática ainda precisa ser feito. A Figura 13 mostra a “forma geométrica” utilizada para descrever e caracterizar às propriedades acima mencionadas:

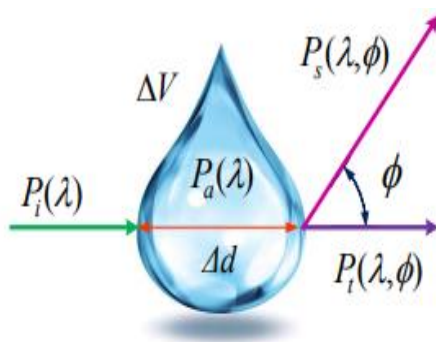


Figura 13: Geometria utilizada para representar a propagação da luz na água e as propriedades óticas inerentes<sup>12</sup>

Considerando um pequeno volume de água  $\Delta V$  ( $m^3$ ), de espessura  $\Delta d \equiv \Delta r$  ( $m$ ), iluminado por um feixe de luz monocromático com potência radiante espectral

<sup>12</sup> Extraído de (Saeed et al., 2018)

em algum comprimento de onda  $[P_i(\lambda)]$ , conforme mostrado na Figura 13. Alguma parte dessa potência que está a ser transmitida é absorvida no volume de água  $[P_a(\lambda)]$ , uma fração dessa potência é espalhada  $[P_s(\lambda)]$  para fora do feixe num ângulo  $\phi$ , e a restante potência  $[P_t(\lambda)]$ , é transmitida através do volume sem mudança de direção. Então, pela conservação de energia:

$$P_i(\lambda) = P_a(\lambda) + P_s(\lambda) + P_t(\lambda) \text{ [W]} \quad (3)$$

A absorção  $A(\lambda)$  é a fração da potência incidente que é absorvida pelo volume:

$$A(\lambda) = \frac{P_a(\lambda)}{P_i(\lambda)} \quad (4)$$

Da mesma forma, a dispersão  $B(\lambda)$  é a parte fracionária da potência incidente que é espalhada para fora do feixe ótico:

$$B(\lambda) = \frac{P_s(\lambda)}{P_i(\lambda)} \quad (5)$$

E a transmitância  $T(\lambda)$ , que consiste na fração da potência incidente que passa pelo volume sem interagir com o meio, é:

$$T(\lambda) = \frac{P_t(\lambda)}{P_i(\lambda)} \quad (6)$$

Evidentemente:

$$A(\lambda) + B(\lambda) + T(\lambda) = 1 \quad (7)$$

O termo absorção é frequentemente usado para indicar valores relacionados, como coeficiente de absorção  $\alpha(\lambda)[m^{-1}]$ . É uma propriedade do material(meio), que descreve o quanto esse meio absorve a radiação eletromagnética da luz ao passar por ele. De maneira sucinta, os coeficientes de absorção e espalhamento  $b(\lambda)[m^{-1}]$  são encontrados considerando  $\Delta r$  infinitesimalmente pequeno, sendo dados como:

$$a(\lambda) = \frac{dA(\lambda)}{dr} \quad (8)$$

$$b(\lambda) = \frac{dB(\lambda)}{dr} \quad (9)$$

Além disso, a perda total é definida como coeficiente de atenuação  $c(\lambda)$  [ $m^{-1}$ ]:

$$c(\lambda) = a(\lambda) + b(\lambda) \quad (10)$$

Visto que a qualidade e o estado da água variam de uma região para outra, as condições de propagação no canal são instáveis. Por consequência, a propagação do feixe ótico no ambiente subaquático apresenta muitos desafios para estabelecer uma ligação estável no tempo entre o transmissor e o recetor.

Em (B. M. Cochenour et al., 2008), são apresentados quatro tipos principais de água:

- Águas puras do mar: o baixo valor do  $b(\lambda)$  faz com que o feixe se propague aproximadamente numa linha reta. O principal fator limitativo é a absorção, que aumenta com o aumento do comprimento de onda. Em comprimentos de onda mais baixos, a atenuação é novamente dominada pela absorção, embora a dispersão também tenha impacto. Em outras palavras, o comprimento de onda na faixa de luz vermelha sofre de maior atenuação do que a luz azul;
- Águas límpida do oceano: têm uma concentração maior de partículas dissolvidas, como sais dissolvidos, componentes minerais, que afetam a dispersão;
- Águas oceânicas costeiras: apresentam uma concentração muito maior de partículas dissolvidas, como componentes minerais, acabando por influenciar ainda mais os coeficientes de absorção e dispersão, conseqüentemente aumenta o nível de turbidez;
- Enseada turva: têm uma concentração muito alta de partículas ou algas dissolvidas. Assim, esta categoria de água restringe a propagação de sinais óticos, pois, o impacto da absorção e dispersão é muito maior.

Os valores típicos do coeficiente de absorção, dispersão e atenuação são mostrados na Tabela 2 para comprimento de onda  $\lambda=532 \text{ nm}$  (azul/verde). Como pode ser observado, efetivamente a propagação da luz num ambiente com água turva é muito mais desafiadora do que em água pura ou oceano limpo:

<b>Tipo de água/ambiente submarino</b>	<b>a(<math>\lambda</math>) (<math>\text{m}^{-1}</math>)</b>	<b>b(<math>\lambda</math>) (<math>\text{m}^{-1}</math>)</b>	<b>c(<math>\lambda</math>) (<math>\text{m}^{-1}</math>)</b>
<b>Mar Límpido</b>	0,053	0,003	0,056
<b>Oceano Límpido</b>	0,069	0,08	0,15
<b>Oceano costeiro</b>	0,088	0,216	0,305
<b>Enseada turva</b>	0,295	1,875	2,17

Tabela 2: Valores típicos do coeficiente de absorção  $a(\lambda)$ , dispersão  $b(\lambda)$  e atenuação  $c(\lambda)$

Fonte: adaptado de (B. M. Cochenour et al., [2008](#)).

Em resumo, a água do mar é uma mistura de água e vários elementos químicos e materiais<sup>13</sup>, que efetivamente podem induzir a variação do índice de refração no canal. Com efeito, isso causará a atenuação do feixe de propagação da luz (causado pela absorção e o espalhamento) e, com a turbulência subaquática, afetará o desempenho do sistema UWOC. Essa análise preliminar dos diferentes tipos de água ou canais de comunicação ótica é fundamental nesse trabalho, visto que o protótipo que se pretende desenvolver será testado em diferentes canais de comunicação.

### 3.3. Configuração da ligação ótica

Conforme as discussões nos capítulos anteriores, em comparação com a onda acústica e a comunicação em RF, a comunicação ótica submarina tem as vantagens de alta taxa de dados, baixa latência e reduzido consumo de energia. Apesar disso, ela está sujeita à severa atenuação na água, limitando, assim, o alcance de transmissão a algumas dezenas de metros. Contudo, a comunicação ótica tem sido estudada e apresentada como uma solução promissora para as comunicações submarinas confiável e com reduzido custo.

De acordo ao que foi mencionado no subcapítulo anterior: devido à baixa taxa

---

<sup>13</sup> As substâncias comumente encontradas na água do mar são: a clorofila, materiais orgânicos e inorgânicos dissolvidos e sedimentos. Devido à presença desses materiais, o meio apresenta diferentes turbidez.

de dispersão, o feixe de luz tem as características de alta diretividade quando se propaga em água límpida. Na prática, essa propriedade torna desafiadora o alinhamento das ligações óticas submarinas entre o transmissor e o recetor. Na verdade, o desalinhamento inevitavelmente ocorrerá em sistemas subaquáticos, especialmente durante a comunicação com plataformas móveis que podem afetar seriamente a transmissão e recepção dos dados. Além disso, o campo de visão relativo do recetor aumenta o impacto do desalinhamento do feixe no desempenho do sistema UWOC.

Em (Zeng et al., [2017](#)), são apresentadas as configurações de ligação entre o transmissor e o recetor. Já em (Andrade et al., [2019](#); Herji, [2018](#)), são caracterizadas as equações para o cálculo da potência recebida no recetor em cada uma dessas configurações. Fundamentalmente, há quatro categorias essenciais para o sistema UWOC:

- a) Ligação em linha de vista direcionada ou *Point-to-point Line-Of-Sight* (LOS);
- b) Ligação de luz difusa ou *Diffused LOS*;
- c) Ligação retro-refletiva ou *retro-reflector-based LOS*;
- d) Ligação sem linha de vista ou *Non-Line-Of-Sight* (NLOS).

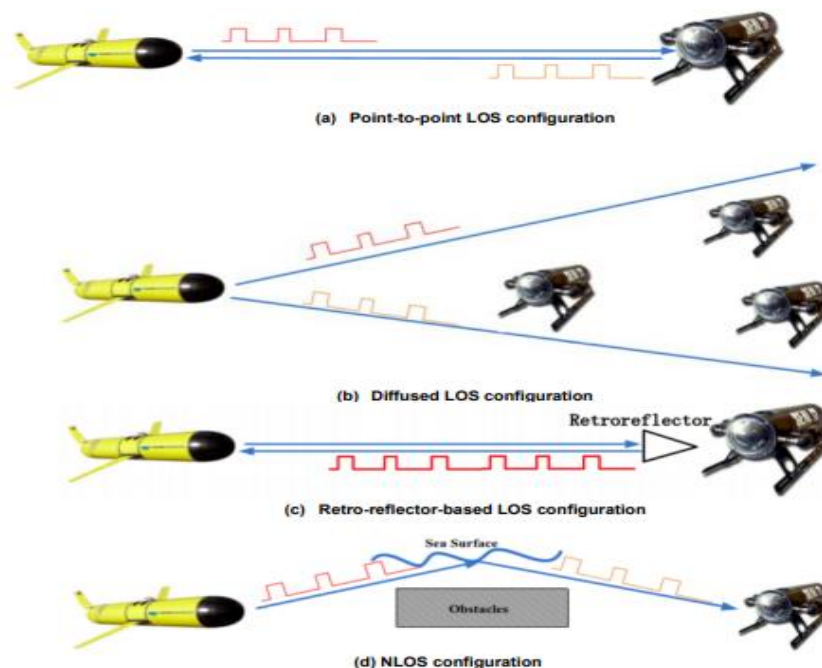


Figura 14: Configurações de ligação entre o transmissor-recetor no sistema UWOC

Fonte: extraído de (Zeng et al., [2017](#)).

a) Ligação em linha de vista direcionada: caracteriza o modo de configuração de ligação mais comumente utilizado no sistema UWOC. Aqui, o transmissor e o recetor estão alinhados e o transmissor direciona um sinal de feixe estreito para o recetor. A fonte de luz comumente usada na configuração LOS é o LASER, que se caracteriza por seu ângulo de divergência estreito. A sua aplicação tem como finalidade limitar o desempenho do sistema num ambiente turbulento. Caso contrário, poderá se tornar um problema quando o transmissor e o recetor são nós não estacionários (como, AUVs e ROVs). Para esses veículos, é essencial projetar mecanismo de alinhamento robusto para manter o transmissor e o recetor alinhado. A implementação dessa configuração é adequada quando temos o transmissor e o recetor no fundo do oceano. Apesar disso, mesmo em oceanos límpidos e com alinhamento perfeito, existem grandes hipóteses de desalinhamento devido à existência da vida marinha ou outro obstáculo. A Figura 15 apresenta a configuração geométrica de uma ligação em linha de vista direcionada ou *Point-to-point-Line-Of-Sight* (LOS):

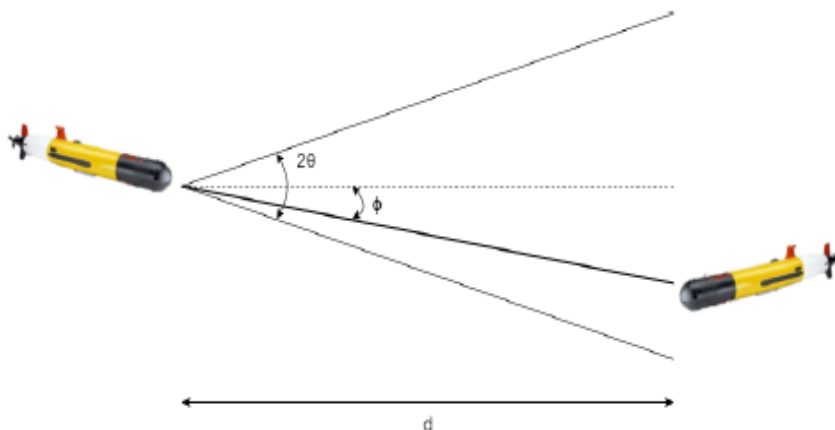


Figura 15: Configuração geométrica da ligação LOS entre AUVs

Fonte: extraído de (Herji, [2018](#)).

b) Ligação de luz difusa: este sistema aplica luz difusa e tipicamente tem como fonte ótica LEDs de alta potência com um elevado ângulo de divergência, de modo a transmitir sinais óticos de um nó para vários nós, conforme mostrado na Figura 14b. Ao contrário da configuração anterior, este método não requer o alinhamento preciso necessário na ligação LOS. No entanto, as ligações baseadas em luz difusa terão maior atenuação, porque a luz cobre uma área maior e, assim, interage mais com a água e as suas partículas.

c) Ligação retro-refletiva: esta configuração é adequada para sistemas UWOC *full-duplex* onde os sensores subaquáticos têm baixa potência. Ao modular a ligação retrorrefletora (tipicamente no recetor), a luz transmitida é refletida de volta pelo retrorrefletor modulado. Nesse processo, as informações enviadas do retrorrefletor para o transceptor serão codificadas na luz refletida. Uma limitação desta configuração deve-se ao facto do retroespalhamento do sinal ótico transmitido interferir no sinal refletido, degradando, assim, a relação sinal-ruído do sistema (SNR) e a taxa de erro de *bit* (BER). A Figura 16 apresenta a configuração geométrica de uma ligação retro-refletiva ou *retro-refletor-based* LOS:

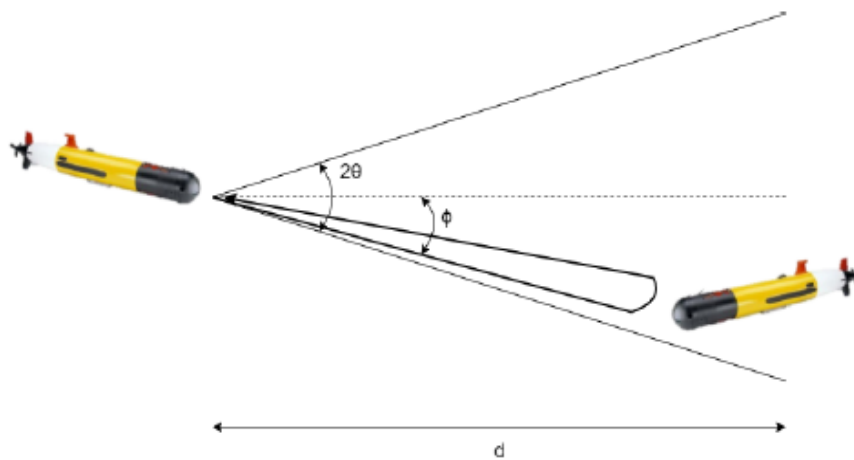


Figura 16: Configuração geométrica da ligação retro-refletiva entre AUVs

Fonte: extraído de (Herji, [2018](#)).

d) Ligação sem linha de vista: este modo de ligação supera a restrição de alinhamento existente na ligação LOS, o que nem sempre é viável em sistemas reais. Nesse sistema, o transmissor projeta o feixe de luz para a superfície do mar (ou seja, a separação água-ar é utilizado como um refletor difuso), com um ângulo de incidência maior do que o ângulo crítico. Por outro lado, o recetor fica de frente para a superfície do mar numa direção quase paralela à luz refletida para garantir a receção do sinal. O maior desafio presente nessa configuração consiste no facto da superfície do mar estar condicionada pelo vento ou outras fontes de turbulência. Com efeito, esses fenómenos indesejáveis, poderão causar a dispersão do sinal. A Figura 17 apresenta a configuração geométrica de uma ligação em linha sem linha de vista ou *Non-Line-Of-Sight* (NLOS):

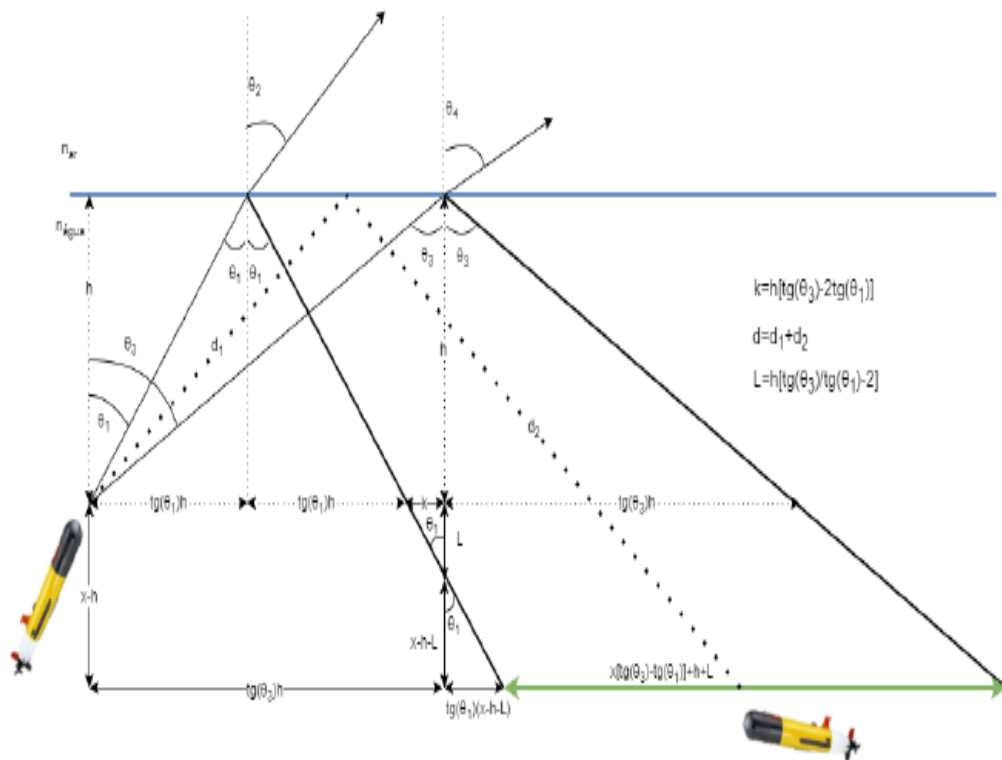


Figura 17: Configuração geométrica da ligação NLOS entre AUVs

Fonte: extraído de (Herji, [2018](#)).

### 3.4. Técnica de Modulação digital do sinal

Este subcapítulo iniciar-se-á com uma breve definição do que é e para que serve a modulação. Serão estudados alguns conceitos fundamentais inerentes a modulação de um sinal. Posteriormente, várias técnicas de modulação digital implementadas no sistema UWOC serão sucintamente apresentadas. Este subcapítulo está longe de ser abrangente, portanto, as vantagens e limitações de cada esquema de modulação não serão aqui estudadas. Por fim, será discutida a técnica de modulação implementada neste trabalho. As técnicas de modulação do canal UWOC têm atraído muita atenção nos últimos anos devido à sua capacidade de impactar consideravelmente o desempenho do sistema UWOC. Sucintamente, a modulação pode ser definida como um processo em que os dados a serem transmitidos numa comunicação são modificados (em amplitude, frequência ou fase) a fim de serem transmitidos com sucesso. Com efeito, o processo de codificação do canal UWOC afetará a largura de banda e a “magnitude” do sinal transmitido.

### 3.4.1. Alguns parâmetros de mérito das comunicações digitais

Quando se aborda sobre a modulação digital, alguns parâmetros importantes devem ser definidos e levados em consideração:

- a) Comunicação digital;
  - b) Eficiência espectral;
  - c) Taxa de erro de *bit* (BER) e função de erro;
  - d) Relação sinal/ruído (SNR).
- a) Comunicação digital: usando a lógica digital, várias categorias de operações que não são realizáveis por contrapartes analógicas podem ser implementados e alguns problemas de canal, como erros de transmissão ou limitações de largura de banda, podem ser resolvidos. Essencialmente, a lógica digital é usada para tornar as transmissões mais eficientes e confiáveis.
- b) Eficiência espectral: consiste na capacidade que um esquema de modulação possui para acomodar dados numa largura de banda limitada, i.e., reflete quão eficientemente é utilizada a largura de banda alocada. Em outras palavras, é um fator de qualidade para a modulação. Este fator nada mais é do que a relação entre a taxa de *bits* e a largura de banda. Esta é uma quantidade adimensional. Quanto maior for esse número, mais eficiente será a ocupação da largura de banda. As técnicas de modulação digital são geralmente caracterizadas por sua eficiência espectral, definida pela seguinte equação:

$$\eta = \frac{R_b}{B} \quad (11)$$

Onde:  $\eta$  – Corresponde a eficiência espectral;  $R_b$  – Corresponde ao ritmo binário, ou debito binário [*bps*];  $B$  – Corresponde a largura de banda ocupada pelo lobo principal do espectro [*Hz*].

- $\eta \geq 1$ : Técnica de modulação espectralmente eficiente;
- $\eta < 1$ : Técnica de modulação eficiente em termos de potência.

c) Taxa de erro de *bit* (BER): a razão de erro de *bit* (também denominado por BER) consiste no número de *bits* recebidos com o valor errado dividido pelo número total de *bits* transmitidos durante um intervalo de tempo específico. A taxa de erro de *bit* é uma medida de desempenho adimensional, geralmente expressa como uma percentagem. Esse valor é um parâmetro muito importante, pois, para uma transmissão efetiva, esse número deve ser mantido num nível muito baixo, caso contrário a transmissão será afetada pelo número de erros.

$$\text{BER} \approx \frac{\text{Número de bits com erros}}{\text{Número total de bits}} \quad (12)$$

d) Relação sinal/ruído (SNR): descreve a razão entre a potência do sinal e a potência do ruído. Em outras palavras, é uma medida da relação sinal/ruído de um sistema de comunicação digital. É usado principalmente para avaliar a “força” do sinal recebido. A sua unidade é geralmente expressa em decibéis (*dB*). Além disso, uma proporção maior que 0 *dB* ou maior que 1, significa mais sinal do que ruído.

Por que a relação sinal/ruído é importante? Conforme mencionado nos capítulos anteriores, o sistema UWOC é suscetível às interferências, algumas inevitáveis durante o processo de transmissão e recepção dos dados. Apesar disso, estamos interessados que o sinal (informação) que pretendemos transmitir, esteja com tolerância estreita para erros, ainda que durante o processo de comunicação haja outros sinais interrompendo o sinal desejado. Novamente, isso tornará a tarefa do recetor mais desafiadora para decifrar o sinal desejado.

Em resumo, é isso que torna importante ter um elevado valor SNR nos sistemas de comunicação. Além disso, em alguns casos, isso também pode significar a diferença no funcionamento ou não do dispositivo e, em todos os casos, afetar o desempenho da comunicação entre o transmissor e o recetor.

É fundamental que o dispositivo consiga distinguir os sinais aplicados como informações autênticas de qualquer ruído de fundo ou sinais no espectro de luz visível.

### 3.4.2. Modulação OOK

A modulação digital oferece maior capacidade de informação, maior segurança de dados e melhor qualidade na comunicação. Existem muitas categorias de técnicas de modulação digital e as suas combinações.

A modulação de um sinal é um conceito muito importante em eletrônica e telecomunicações, em particular, é imprescindível à sua aplicação nos sistemas UWOC, e, nos dias atuais, existem várias técnicas que podem ser utilizadas para modular um sinal. Sucintamente são apresentadas algumas dessas técnicas:

- NRZ-L (*Non Return to Zero-Level*): utiliza dois níveis de sinal para representar 0 e 1;
- *Manchester*: as transições do sinal nem sempre ocorrem no “limite de *bit*”, mas sempre há uma transição no centro de cada *bit*;
- AMI (*Alternate Mark Inversion*): 1 - representa impulsos positivos e negativos alternados e 0 - ausência de sinal;
- *Manchester Differential*: transição no meio de cada *bit*: 1 - ausência de transição no início do *bit* e 0 - transição no início do *bit*;
- FSK - *Frequency Shift Keying*: o sinal digital modula a frequência da portadora;
- PSK - *Phase Shift Keying*: o sinal digital modula a fase da portadora;
- QAM - *Quadrature Amplitude Modulation*: uma generalização do PSK, consiste em combinar a modulação de fase com uma modulação de amplitude.

A modulação ocorre quando alguma característica do sinal de entrada é modificada com referência ao sinal da portadora. Para transmissão, os sinais digitais são geralmente preferidos em relação aos sinais analógicos. Isso ocorre porque os sinais analógicos podem ser afetados pelo ruído, distorção e interferência. Os sinais digitais têm dois níveis de tensão, ou seja, um nível alto ou um nível baixo, enquanto no caso de um sinal analógico, a tensão é contínua.

Se a amplitude da onda portadora variar em relação à amplitude do sinal da mensagem, essa categoria de modulação é denominada Modulação de Amplitude. A modulação ASK ou em inglês *Amplitude Shift Keying* é um tipo de modulação de

amplitude em que o sinal digital é representado como uma mudança na amplitude da portadora.

Considerando uma sequência binária como sinal da mensagem a ser transmitida e uma onda portadora, a Figura 18 mostra o comportamento do sinal modulado em ASK utilizando o *Software MATLAB*.

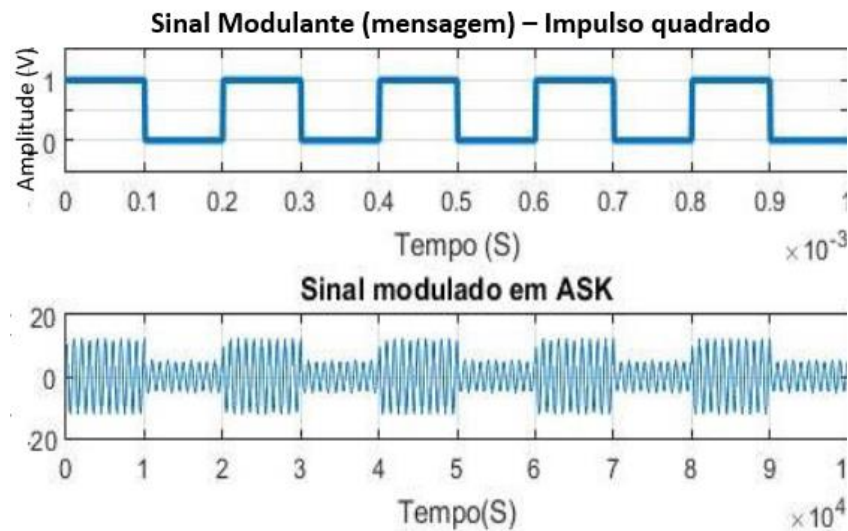


Figura 18: Modulação digital em ASK

Todavia, a modulação ASK apresenta alguns problemas, há interferência causada pelo ruído, o recetor pode não ser capaz de captar corretamente a amplitude do sinal, fazendo com que haja maior probabilidade de interferir na aplicação, o que, na prática, se reflete numa distância menor. Diante disso, surge a modulação OOK, que distingue melhor a amplitude do sinal transmitido. A modulação OOK é a maneira mais simples e comum de representar a modulação ASK e operar como uma “chave” (isto é, utilizará a presença do sinal da portadora para indicar o valor lógico 1 e a sua ausência o valor lógico 0).

A Figura 19, apresenta a modulação digital em OOK de um impulso quadrado:

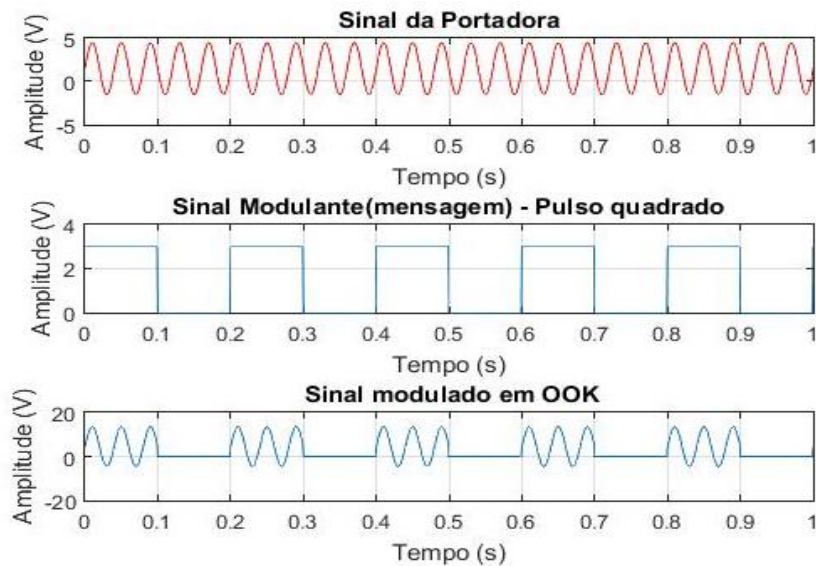


Figura 19: Modulação digital em OOK

A Tecnologia OOK simplifica bastante as dificuldades e os custos da modulação digital. Como existem dois estados, essa tecnologia se torna cada vez mais desafiadora quando o objetivo é aumentar a taxa de transmissão dos dados. No entanto, é suficiente usá-lo para controlo de LED em sistemas UWOC de baixo custo.

Como modular o LED para enviar dados e ser recebido pelo fotodetetor? Na comunicação a luz visível entre o transmissor e o recetor em inglês *Visible light communication* (VLC), a modulação OOK é o método mais simples de transmissão de um sinal. Ligar e desligar a luz é a maneira mais simples de transmitir informação. Como ilustrado na Figura 19, a modulação OOK possui dois níveis de amplitude, representando os *bits* 0 e 1 do sinal modulado. Essa técnica é fácil de implementar e pouco afetada pela não linearidade do LED porque tem apenas dois níveis de amplitude.

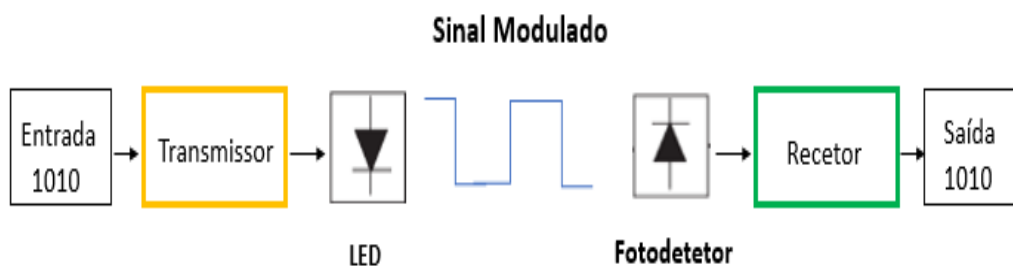


Figura 20: Canal VLC de intensidade ótica e deteção direta

Nesta dissertação, aplicou-se a modulação digital OOK. Esta implementação apresenta algumas vantagens, como baixa complexidade, baixo custo e eficiência energética (isto é, permite que o transmissor fique inativo durante a transmissão do estado lógico 0, economizando deste modo energia). Viabilizando, assim, a transmissão de *bits* através da luz do LED que na presença de circuitos apropriados facilmente podem ser decodificados.

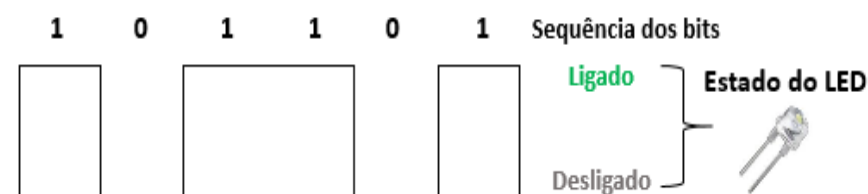


Figura 21: Estado do LED na modulação OOK

Na Figura 21, o LED é ligado ou desligado conforme os *bits* de dados sendo “1” (presença de pulso ótico) ou “0” (ausência do pulso ótico). Os conceitos apresentados nesse subcapítulo foram implementados numa série de trabalhos de pesquisas teórica e experimental sobre os sistemas UWOC (Ahmad & Green, [2012](#); Jaruwatanadilok, [2008](#)).

### 3.4.3. Cuidados e recomendações

A transmissão de dados binários requer um planeamento e dimensionamento cuidadoso do circuito transmissor e recetor, caso contrário, os *bits* serão perdidos durante o processo de comunicação e, o circuito recetor não será capaz de interpretar corretamente a mensagem original. Para tal, é essencial que ambas as partes entendam e concordam em como exatamente os dados serão enviados e recebidos. Isso ocorre porque geralmente o final da mensagem é determinado pelo número de *bytes* enviados, e não exatamente pela deteção de um carácter específico. Como alternativa, por exemplo, pode ser implementado um valor inicial para dizer quantos *bytes* se seguirão. Nos sistemas UWOC, os dados devem ser enviados além do circuito local (por exemplo, um computador), e em muitos casos, as distâncias envolvidas podem ser maiores que 10 m. Infelizmente, à medida que se aumenta a distância entre a origem de uma mensagem e o seu destino, a receção se torna cada vez mais difícil.

Na prática, a maioria das mensagens digitais têm muito mais do que alguns *bits*. Como não é prático nem económico transmitir todos os *bits* de uma extensa mensagem simultaneamente, a mensagem é dividida em partes menores e transmitida sequencialmente.

Nesta dissertação, optou-se por utilizar a comunicação série entre o transmissor e o recetor. Conforme a Figura 20 e a Figura 21, a transmissão série dos *bits* é feita enviando um *bit* de cada vez pelo canal, onde cada *bit* representa uma parte da mensagem. Em seguida, os *bits* individuais são então reagrupados no circuito recetor para formar a mensagem inicial. A fim de aumentar a confiabilidade e a robustez do sistema, alternativamente, podem ser implementados algum protocolo de comunicação série<sup>14</sup>, com o objetivo de definir a ordem e o significado dos *bits* durante a transmissão dos dados.

---

<sup>14</sup> Protocolo de comunicação série: abordado sucintamente no [capítulo 5](#).

## 4. Implementação

Este capítulo apresenta a implementação e desenvolvimento da comunicação subaquática de baixo custo. Inicialmente, é apresentada a metodologia proposta para a implementação da parte física do sistema, evidenciando as configurações e as suas restrições. Posteriormente, cada estágio que constitui os circuitos transmissor e recetor é analisado e dimensionado, os componentes eletrónicos de cada estágio são especificados e, finalmente, o protótipo final é apresentado.

Uma visão simplificada do sistema de comunicação ótica implementada neste projeto pode ser vista na Figura 22:

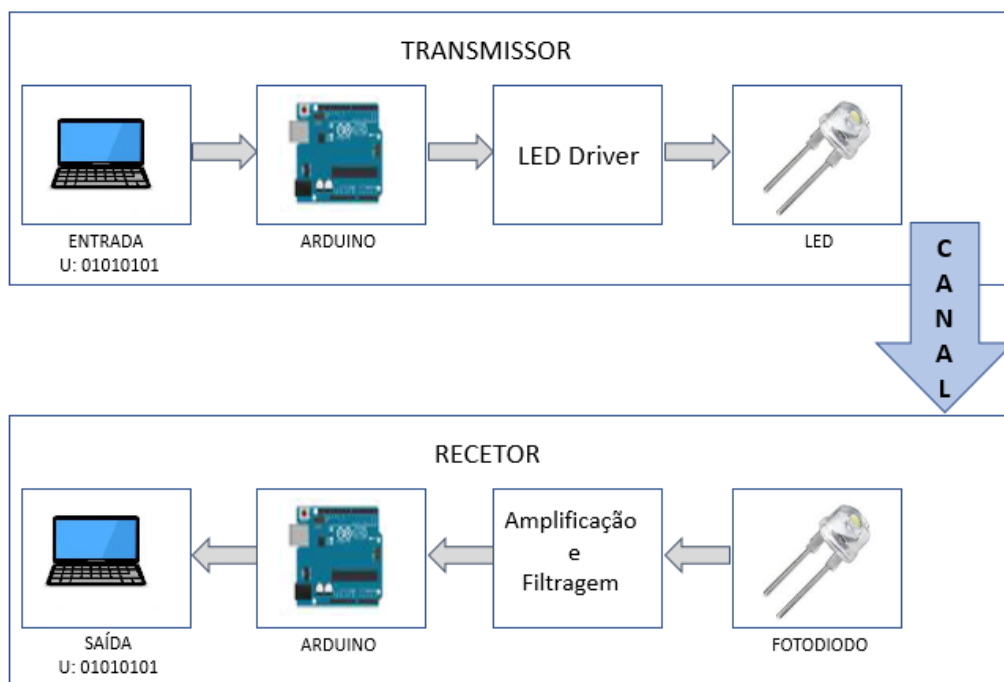


Figura 22: Visão simplificada do sistema UWOC implementado

Conforme mencionada no capítulo anterior, a modulação OOK foi escolhida como sendo o esquema de modulação para criar um sistema de comunicação simples, porém, eficaz, entre dois dispositivos ou terminais. Neste capítulo, retirou-se vantagem de um recurso disponível no esquema de modulação digital: a capacidade de reproduzir um sinal usando apenas *Software*. Em seguida, este sinal digital pode ser enviado com algum dispositivo específico controlado através de uma plataforma eletrónica denominado Arduino, simulando uma comunicação real entre dois dispositivos.

O sistema de comunicação ótica subaquática apresentada na Figura 22 consiste principalmente em duas partes, o transmissor e o recetor. O transmissor converte o sinal elétrico num sinal ótico. O sinal então passa pelo canal de transmissão sendo captado pelo recetor. O recetor deteta o sinal ótico e converte-o de volta num sinal elétrico para processamento de dados. Há uma variedade de fontes de luz e fotodetetores a serem considerados para este sistema. No entanto, optou-se por utilizar componentes de baixo custo para a fonte ótica e para o fotodetector, nomeadamente, LED e fotodíodo.

#### **4.1. Requisitos do projeto**

O estímulo para este trabalho é, recorde-se, fornecer uma comunicação robusta, com velocidade viável entre robôs subaquáticos que executam colaborativamente tarefas específicas. De modo a alcançar esse objetivo, é necessário considerar alguns requisitos do projeto, em particular que o sistema consuma pouca energia, e que funcione sem alinhamento perfeito entre o transmissor e o recetor, visto que será difícil para um robô manter a posição e a orientação devido à natureza do ambiente subaquático e a mobilidade do mesmo. Também é desejável que o sistema exija pouca ou nenhuma manutenção de longo prazo, e ter o maior alcance possível, ainda que a taxa de transmissão dos dados seja relativamente baixa.

#### **4.2. A camada física - *Hardware***

A camada física é o *Hardware* usado entre os dois módulos (transmissor e recetor), ou seja, todos os componentes elétricos e eletrónicos utilizados na implementação deste trabalho. Todas as partes da camada física são descritas em detalhe nas subsecções seguintes. Apesar disso, o [Apêndice A](#) fornece uma lista completa e detalhada dos componentes usado nos circuitos, com referência aos respetivos *datasheet*.

##### **4.2.1. Arduíno**

Sucintamente, o Arduíno é uma plataforma eletrónica de código aberto (no mundo do *Software*, código-fonte aberto indica algo que pode ser modificado por qualquer pessoa), geralmente utilizado para projetar e construir dispositivos que

interagem com o mundo real. Essa placa permite fazer operações de entrada-saída (controlar LED, motores, botões, sensores e outros componentes eletrônicos) e executar pequenos cálculos.

Comparado com outros dispositivos semelhantes, o Arduíno se destaca pelos seguintes motivos:

- É razoavelmente barato;
- Tanto a programação quanto a utilização dos pinos ocorrem num ambiente fácil de utilizar, viabilizando, assim, projetar circuitos eletrônicos complexos de uma forma bastante simples;
- Além disso, este ambiente é multiplataforma, isto é, o seu ambiente de desenvolvimento funciona em Sistemas Operativos como, *Linux*, *Mac* e *Windows*.

A placa escolhida para esse projeto foi o Arduíno *NANO*. Comparada com outras placas Arduíno, esta placa tem a vantagem de ser menor em tamanho (4,3 cm de comprimento e 1,85 cm de largura), tornando-a uma escolha ideal para projetos compactos e, conseqüentemente, para esse trabalho.

A Tabela 3 apresenta as principais especificações técnicas do Arduíno *NANO*:

<b>Microcontrolador</b>	<b>ATmega328 - NANO</b>
<b>Operating Voltage</b>	5 V
<b>Digital I/O Pins</b>	14
<b>Analog Input Pins</b>	8
<b>Maximum Allowed Current I/O Pin</b>	40 mA
<b>Clock Speed</b>	16 MHz
<b>Flash Memory</b>	32 KB
<b>EEPROM</b>	1 KB

Tabela 3: Especificações técnicas do Arduíno *NANO*

## 4.2.2. Transmissor ótico

A tarefa do transmissor é converter dados digitais em luz visível. O LED é um componente adequado porque tem uma relação relativamente linear entre a corrente e a intensidade da luz. Infelizmente, as portas do Arduino não conseguem fornecer a intensidade suficiente de corrente para tornar a intensidade da luz forte e rápido. Para contornar este problema, um transístor foi utilizado como um interruptor, o que tornou possível atingir mais rapidamente correntes maiores. Na Figura 23 é apresentado uma visão geral do circuito transmissor:

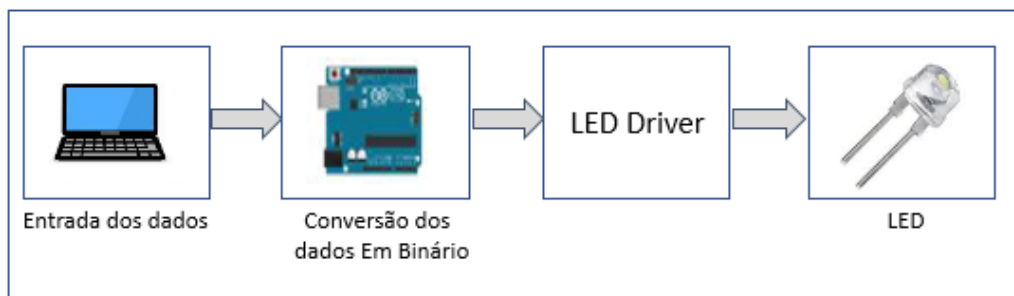


Figura 23: Visão geral do transmissor

**LED driver:** os LEDs são dispositivos controlados por corrente cujo brilho é proporcional à sua corrente direta (Figura 24). A intensidade da luz na saída tem relação linear com a corrente de alimentação.

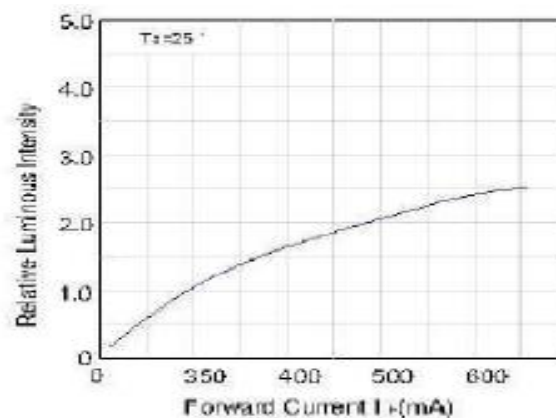


Figura 24: Relação entre a corrente direta e o brilho do LED

Fonte: folha de dados do dispositivo.

Para modular o LED (ligar e desligar) em relação aos dados binários, um circuito auxiliar necessita ser projetado. O circuito precisa fornecer corrente

suficiente para acender o LED com a intensidade necessária, porém, a corrente deve ser limitada para evitar danificá-lo. A finalidade em projetar um LED *driver* é para gerar a corrente de polarização necessária de modo a garantir que o sinal esteja sempre positivo. Todos os esquemas elétricos nesta tese foram desenhados com a utilização do *Software Multisim*. Na Figura 25 é apresentado o esquema elétrico do circuito transmissor com o LED *driver*.

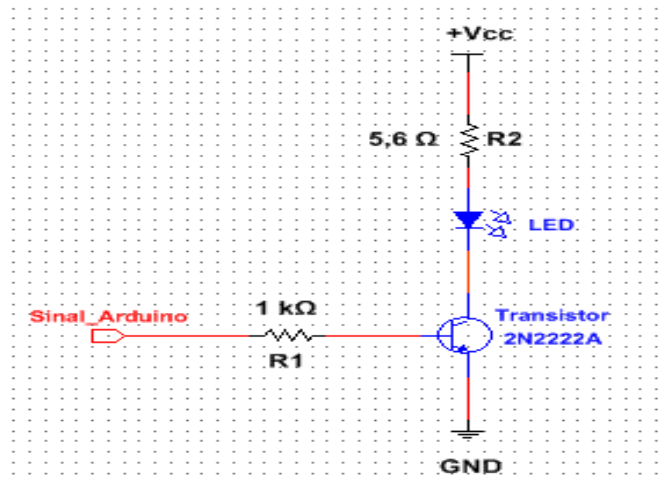


Figura 25: Esquema elétrico do circuito transmissor

Região de corte: como o emissor está conectado ao *Ground* -GND à sua tensão é  $0V$ . Assim sendo, quando a saída do Arduino estiver em  $0V$  isso fará com que a corrente de base ( $I_b$ ) seja  $0A$ , portanto, o transistor estará na condição OFF, e sem corrente fluindo através da resistência do coletor o LED não acenderá. Conforme a equação (13), a tensão de saída no coletor ( $V_c$ ) será igual a  $5V$  porque não haverá queda de tensão no LED.

$$V_c = V_{cc} - (I_c \times R_c) - V_f \quad (13)$$

onde:

$V_c$  – Corresponde a tensão no coletor ( $V$ ).

$V_{cc}$  – Corresponde a tensão da fonte de alimentação externa ( $V$ ).

$V_f$  – Corresponde a tensão mínima para acender o LED ( $V$ ).

$R_c$  – Corresponde a resistência no coletor ( $\Omega$ ).

$I_c$  – Corresponde a corrente no coletor ( $mA$ ).

Quando o Arduino fornecer 5V na sua saída, conseqüentemente a  $V_c$  maior que a tensão de base ( $V_b$ ), estará o transistor na região ativa ou saturada (porém, é desejável que o transistor funciona na região saturada, porque na região ativa direta o transistor dissipa mais potência, aquece mais). De modo a garantir que haverá  $I_c$  suficiente para ativar o transistor na região de saturação, é necessário determinar corretamente as resistências de base ( $R_1$ ) e a resistência do coletor ( $R_2$ ).

Essencialmente,  $R_1$  terá a função de limitar a corrente de base. Por ser responsável por controlar a corrente que irá fluir do coletor para o emissor, deve ser cuidadosamente selecionado para garantir que a corrente mínima no coletor possa acender o LED, e será definido com base na equação abaixo:

$$R_1 = \frac{V_{\text{arduino}} - V_{be}}{I_b} \quad (14)$$

onde:

$V_{\text{arduino}}$  – Corresponde a tensão fornecida pelo Arduino (V).

$V_{be}$  – Corresponde a tensão base emissor (V).

$I_b$  – Corresponde a corrente de base (mA).

No entanto, o valor escolhido de  $R_1$  deverá garantir que o transistor fica saturado. Por outro lado,  $R_2$  terá como função limitar a corrente do coletor. Para acender o LED com intensidade máxima, é necessária uma corrente de aproximadamente 0,7A. Entretanto, para calcular a resistência necessária de “limitação de corrente”, duas características apresentadas na [folha de dados](#) do LED devem ser consideradas: a sua corrente direta ( $I_f$ ) de 0,7A e a tensão direta ( $V_f$ ) de 3,5V. A equação (15) é usada para determinar o valor de  $R_2$ :

$$R_2 = \frac{V_{cc} - V_f}{I_f} \quad (15)$$

onde:

$I_f$  – Corresponde a corrente mínima para acender o LED (mA).

É viável que o valor dessa resistência seja selecionado considerando a menor perda possível. À vista disso, os valores encontrados experimentalmente de  $R_1$  e  $R_2$  são de  $1k\Omega$  e  $5,6\Omega$  com potências dissipadas:  $P_{R_1} = 6\text{ mW}$  e  $P_{R_2} = 41,9\text{ mW}$

respetivamente. Portanto, quando o transistor estiver a conduzir, a resistência de  $5,6 \Omega$  limitará a corrente do LED em cerca de  $66,5 \text{ mA}$ .

O transistor utilizado nesse trabalho é o 2N2222A, consiste num transistor de junção bipolar NPN usado essencialmente para aplicações de amplificação ou comutação em baixa potência, capaz de operar com corrente máxima de  $800 \text{ mA}$ .



Figura 26: Transistor 2N2222A - Metálico

Fonte: extraído do *website* da *Mauser*<sup>15</sup>.

**LED:** a primeira etapa no projeto do transmissor ótico é determinar qual a fonte de luz que será utilizada, visto que o resto do circuito transmissor será projetado para suportar a fonte de luz selecionada. Em teoria, qualquer fonte de luz pode ser usada, desde lâmpadas incandescentes até LASER, mas o tamanho, a potência e as restrições de velocidade de comutação colocada no sistema restringiram a seleção numa escolha viável: LEDs. Concisamente, consiste num dispositivo semicondutor que emite luz visível quando uma corrente elétrica passa por ele. A luz não é particularmente brilhante, mas na maioria dos LEDs é monocromático e transmitida num único comprimento de onda. O LED utilizado neste trabalho é o *3W High Power LED* de cor azul e verde. A única diferença entre ambos está no valor do comprimento:  $460 - 470 \text{ nm}$  e  $520 - 530 \text{ nm}$  respetivamente.



Figura 27: *3W High Power LED*

Fonte: extraído do *website* *Aliexpress*<sup>16</sup>

---

<sup>15</sup> [https://mauser.pt/catalog/product\\_info.php?cPath=324\\_247&products\\_id=002-0314](https://mauser.pt/catalog/product_info.php?cPath=324_247&products_id=002-0314)

<sup>16</sup> <https://pt.aliexpress.com/item/4000333136790.html?spm=a2g0o.productlist.0.0.78d12bcdOKn>

O LED foi selecionado pelos seguintes motivos:

- É classificado como um LED brilhante, podendo imitar as cores azul e verde que são as menos absorvidas pela água, desse modo será mais fácil para o fotodetector identificar os seus sinais de luz de entrada sobre o canal de transmissão;
- Está disponível nas lojas de componentes eletrônicos por um custo baixo, tornando baixo o valor do preço total do projeto;
- O seu ângulo de visão é estreito, como pode ser visto na Tabela 4 e na Figura 28, conduzindo para um feixe de luz mais focada, proporcionando, assim, melhores resultados de detecção;
- Seu espectro de emissão é concentrado na gama de comprimento de onda azul e verde, variando de valores em torno de 460 – 470 *nm* (azul) e entre 520 – 530 *nm* (verde). Recorde-se, esse intervalo de comprimento de onda corresponde ao intervalo de mínima atenuação da água do mar.



Figura 28: Padrão de Radiação do LED

Fonte: [folha de dados do dispositivo](#).

A Tabela 4 apresenta as principais especificações técnicas do *3W High Power LED* verde:

---

[hys&algo\\_pvid=755d5987-21a7-4864-a10f-cf4b660f2b13&algo\\_exp\\_id=755d5987-21a7-4864-a10f-cf4b660f2b13-40](https://www.algo.com.br/algos/pvid=755d5987-21a7-4864-a10f-cf4b660f2b13&algo_exp_id=755d5987-21a7-4864-a10f-cf4b660f2b13-40)

Items	Symbol	Min.	Typ.	Max.	Unit.
Forward Voltage	VF	3 V	-	3,8	V
Reverse Current	IR	-	-	50	$\mu A$
50% Power Angle	$2\theta_{1/2}$	110	-	140	deg
Luminous Intensity	$\phi_V$	90	-	110	lm
Recommend Forward Current	IF	-	0,7	-	A
Wave Length	$\lambda$	520	-	530	nm

Tabela 4: Características elétrica e ótica do 3W High Power LED

Os benefícios dos LEDs incluem baixo consumo de energia, pois, a maioria pode operar com fontes de alimentação proveniente das baterias e são altamente eficientes, visto que a maior parte da energia fornecida pelo LED é convertida em radiação da forma desejada com perda mínima de calor. Quando instalado apropriadamente, funciona por décadas devido à sua durabilidade, são relativamente baratos e amplamente disponíveis.

#### 4.2.3. Recetor ótico- Protótipo I

O recetor ótico é projetado para detetar a luz emitida pelo transmissor e, posteriormente, converter a luz em corrente elétrica, amplificar, filtrar e processar o sinal para restaurar a informação transmitida. Na Figura 29 é apresentado uma visão geral do circuito recetor.

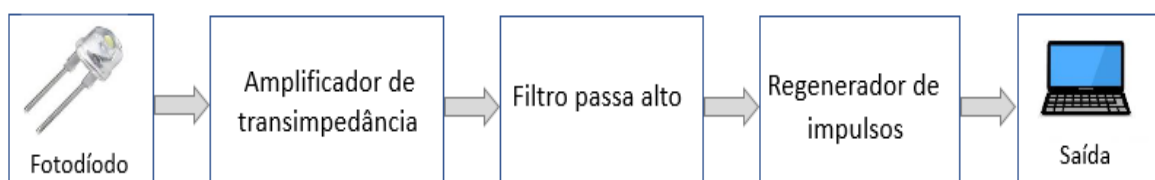


Figura 29: Visão geral do recetor

A Figura 29 apresenta uma visão geral do bloco recetor, sucintamente, o amplificador de transimpedância (TIA) terá a função de converter o sinal de corrente do fotodíodo em tensão; o filtro passa-alto irá responder à transição *on-off* ou *off-on* no sinal transmitido com impulsos; e o regenerador receberá esse sinal de impulsos de modo a reconstruir o sinal OOK novamente. Abaixo são descritos as funções e os circuitos elétricos de cada estágio:

**Fotodíodo:** consiste num semiconductor que converte a luz em corrente elétrica. Os requisitos para se seleccionar adequadamente um fotodíodo incluem tempo de resposta, sensibilidade espectral no espectro visível desejado e uma região adequada a radiação da luz transmitida.

Neste projeto, é expectável que o fotodíodo responda rapidamente a todos os fótons incidentes enviados pelo transmissor, sem introduzir ruído adicional. É preferível que seja um componente pequeno, robusto, barato e eficiente. Além disso, o tamanho da área sensível à radiação é crucial, diante disso, o fotodíodo seleccionado foi o SFH 206 K. Especialmente adequado para aplicações com comprimento de onda entre 400 - 1100 *nm* (incluem as luzes azul e verde), é bastante direcional: o ângulo estreito de  $\pm 60^\circ$  permite estender a distância de comunicação, portanto, face ao LED seleccionado, fornece uma faixa para os objetivos pretendidos.

Inicialmente foi seleccionado um fotodíodo com uma recetividade mais concentrada na gama de frequências de interesse, mas por falta de *stock* no mercado nacional foi alternativamente usado o fotodíodo SFH 206 K. A Figura 30 apresenta o fotodíodo utilizado nesse trabalho, e a Tabela 5 apresenta algumas das suas características elétrica e óticas. Apesar disso, a Figura 31 mostra as suas características direccionais:



Figura 30: Fotodíodo SFH 206 K

Fonte: extraído do website da *Mauser*<sup>17</sup>

---

<sup>17</sup> [https://mauser.pt/catalog/product\\_info.php?cPath=324\\_1127&products\\_id=017-1127](https://mauser.pt/catalog/product_info.php?cPath=324_1127&products_id=017-1127)

<b>Fotodíodo</b>	<b>SFH 206 K</b>
<b>Angle of half sensitivity</b>	$\pm 60^\circ$
<b>Spectral range of sensitivity</b>	400 - 1100 nm
<b>Wavelength of peak sensitivity</b>	850 nm
<b>Switching time</b>	$\pm 20$ ns
<b>Power dissipation</b>	150 mW

Tabela 5: Características elétrica e ótica do fotodíodo

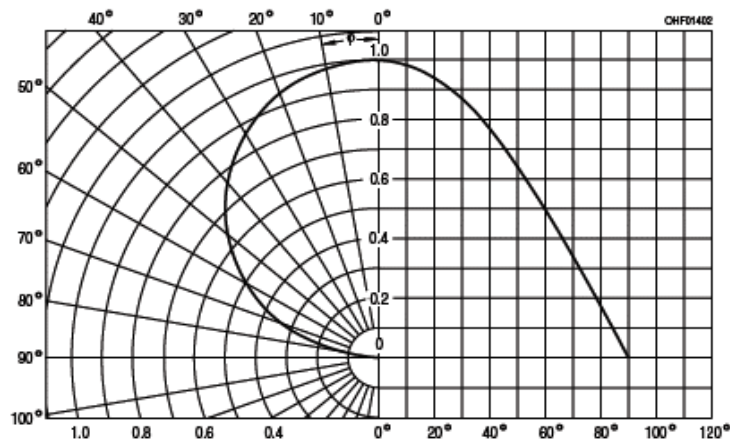


Figura 31: Características direcionais do fotodíodo

Fonte: [folha de dados do dispositivo](#).

**Amplificador de transimpedância (TIA):** a corrente do fotodíodo é geralmente convertida em tensão antes que o sinal seja amplificado. Efetivamente, a conversão de corrente em tensão corresponde a uma parte muito importante e fundamental em qualquer circuito recetor ótico, porque, se não for projetado corretamente, o circuito sofrerá com o ruído excessivo associado à luz ambiente focada no fotodetector. Além disso, muitos circuitos e instrumentos eletrônicos só podem aceitar como entrada um nível de tensão. Portanto, para aproveitar o máximo desempenho do sistema ótico recetor, esse bloco deve ser corretamente dimensionado. Após ser selecionado o fotodíodo como fotodetector, um TIA é usado para processar o sinal de corrente e convertê-lo num sinal de tensão.

Essencialmente, um AMPOP com uma resistência de realimentação ( $R3$ ) na saída é a implementação mais direta de um TIA.  $R3$  através do AMPOP converte a corrente do fotodiodo ( $I_n$ ) em uma tensão de saída ( $V_o$ ) usando a lei de Ohm. Essa resistência determina o ganho do amplificador operacional de transimpedância, por outro lado, o condensador de realimentação ( $C1$ ) é necessário para compensar a estabilidade do circuito.

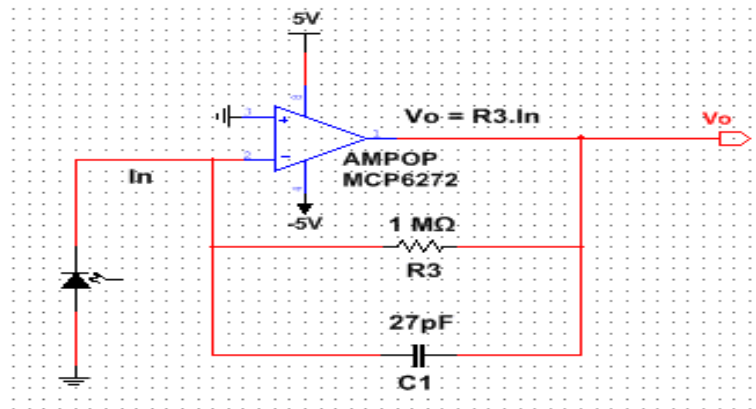


Figura 32: Esquema elétrico do amplificador de transimpedância

Se  $R3$  for muito baixa, o ganho é muito pequeno e o sistema estará sujeito a ruídos, por outro lado, se for muito elevado, o ganho é muito alto. Com base neste raciocínio e em testes de bancada escolheu-se o valor de  $1\text{ M}\Omega$  para  $R3$ , mostrando ser um bom compromisso entre alto ganho e alta largura de banda.

Para esta aplicação o ganho do TIA é importante devido ao aumento da distância entre o Tx e o Rx. O amplificador operacional (AMPOP) *Rail-to-Rail* MCP6272 foi escolhido: é de uso geral, tem largura de banda de  $2\text{ MHz}$ , é barato, funciona com níveis de tensão entre  $\pm 5\text{ V}$ , comumente usados, portanto, adequado para este projeto.

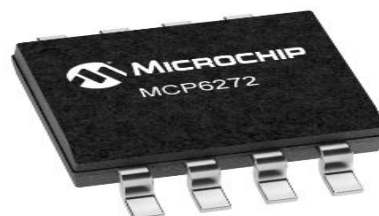


Figura 33: Amplificador Operacional *Rail-to-Rail* MCP6272

Fonte: extraído do *website* da *microchip*.<sup>18</sup>

<sup>18</sup> <https://www.microchip.com/wwwproducts/en/MCP6272>

**Filtro passivo passa-alto:** o fotodíodo converte toda a luz que atinge a sua área sensível radiante numa corrente proporcional a intensidade da mesma, incluindo todas as outras fontes indesejável de luz. As fontes de luz envolvente oscilam em diferentes frequências. Portanto, um filtro é essencial no circuito recetor. Diante disso, é incluído um filtro RC passa - alto analógico de primeira ordem com o objetivo de produzir um impulso em resposta a transição *on-off* ou *off-on* do sinal transmitido pelo meio ótico.

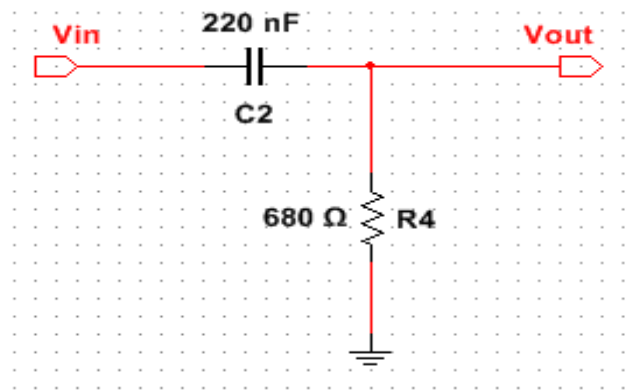


Figura 34: Esquema elétrico do filtro passivo passa-alto

Por definição, a sua frequência de corte em  $-3dB$  é dada pela expressão:

$$f_c = \frac{1}{2\pi R_4 C_2} \quad (16)$$

**Circuito regenerador de impulsos:** sucintamente, um retificador consiste num circuito que converte a corrente alternada (AC) em corrente contínua (DC). Num circuito retificador, o componente comumente usado é o díodo, a fim de retificar a corrente AC para DC. Foi introduzido o circuito retificador de precisão com um amplificador operacional para eliminar a queda de tensão no díodo retificador. O filtro passivo passa - alto apresentado anteriormente, cria impulsos (correspondentes a transição de 0 para 1 e vice-versa), e o objetivo do circuito regenerador de impulsos é recriar esse sinal digital a partir desses impulsos e, posteriormente, injetá-lo no Arduino. O circuito abaixo mostra um circuito retificador de precisão de meia onda com um AMPOP MCP6272 e díodos 1N4148:

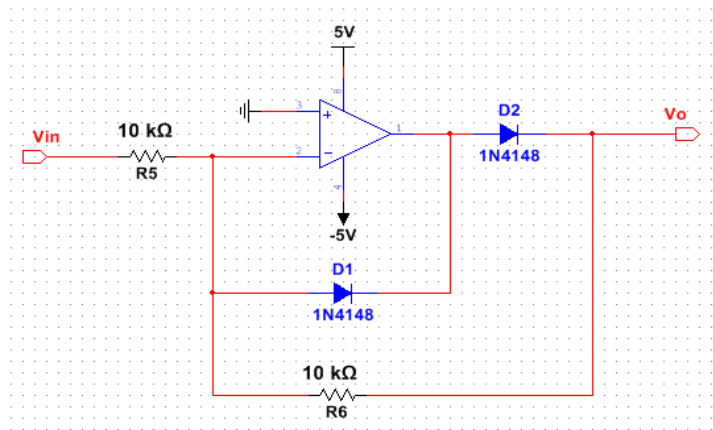


Figura 35: Circuito retificador de precisão de meia onda

Durante a implementação do circuito recetor, foi necessário amplificar o sinal de saída do filtro passa-alto e do bloco retificador de meia onda. A figura a seguir mostra o esquema elétrico completo usado no circuito recetor do primeiro protótipo, no entanto, o [Anexo I](#) fornece uma lista completa dos valores dos componentes usados na sua implementação:

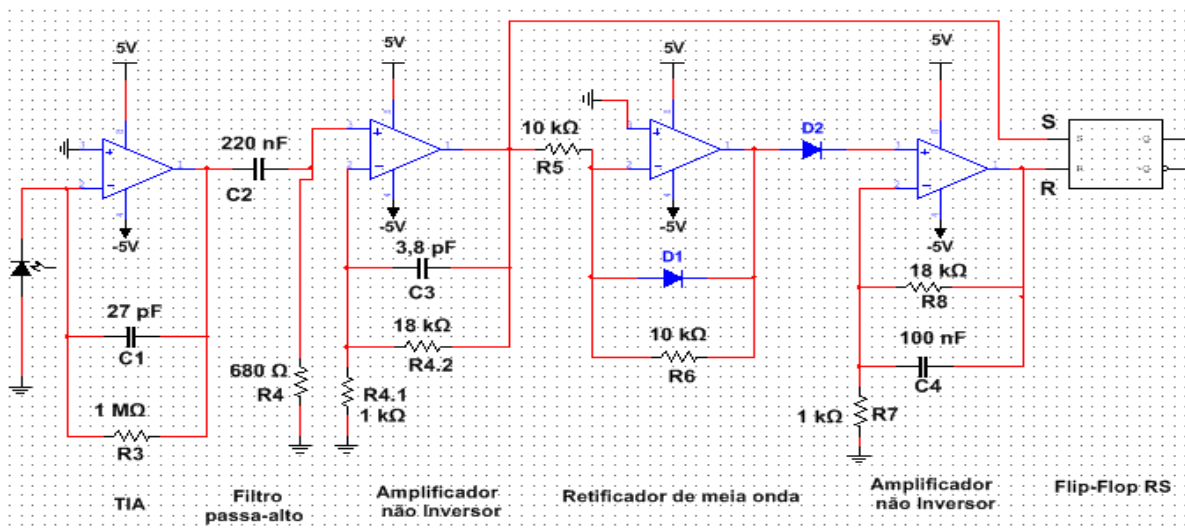


Figura 36: Esquema elétrico do circuito recetor - Protótipo I

O *flip-flop RS* é considerado um dos circuitos lógicos (sequenciais) mais simples. Essencialmente, é um dispositivo biestável capaz de memorizar um *bit*. Possui duas entradas, uma é chamada de “*SET*”, que irá definir ao dispositivo (saída = 1), e a outra entrada é o “*RESET*”, que irá definir ao dispositivo (saída = 0). A saída do dispositivo é denominada “*Q*”, que estará no nível lógico “1” ou nível lógico “0”.



Figura 37: *Flip-Flop RS CD4043BCN*

Fonte: extraído do website da *Mauser*<sup>19</sup>

Portanto, o objetivo em aplicar o regenerador de impulso e o *flip-flop RS* é para colocar os impulsos (quase) de *Dirac* proveniente do filtro passa - alto e injetá-los diretamente na linha SET do *flip-flop RS*; retificá-lo com o retificador de precisão de meia onda para converter os impulsos negativos em positivos e injetá-lo na linha *RESET*. Desse modo, os impulsos positivos fariam o SET, enquanto os impulsos negativos fariam o *RESET* do *flip-flop RS*.

Conforme apresentado na Figura 36, o sinal proveniente do filtro passivo passa-alto e do circuito retificador de meia onda são amplificados pelo amplificador não inversor com ganho 19 antes de serem injetados na linha SET e RESET do *flip-flop RS*. O objetivo é recuperar o sinal proveniente do TIA que enfraquece com o aumento da distância entre o bloco transmissor e recetor. Por fim, a saída do sinal do *flip-flop RS* é conectada a placa do Arduíno e é analisada a mensagem original no computador do bloco recetor.

Os testes de cada estágio foram conduzidos para verificar o correto funcionamento dos mesmos, de modo a se aferir se os objetivos do dimensionamento foram alcançados. Esses testes foram inicialmente realizados com a utilização de um osciloscópio e um gerador de função. O envio de uma onda quadrada no sistema facilitou a visualização do comportamento dos diferentes estágios do circuito e, visualizar como o sinal se propaga pelos respectivos componentes. A verificação final foi feita usando o sistema completo, transmissor, recetor e o *Software* (apresentado no [Apêndice B](#)). Os resultados dessas experiências serão mostrados no [capítulo 6](#).

---

<sup>19</sup> <https://eu.mouser.com/ProductDetail/ON-Semiconductor-Fairchild/CD4043BCN?qs=ucY0lxHzU762%252BjkY8GF12Q%3D%3D>

#### 4.2.4. Componentes adicionais

Os componentes utilizados para a realização do trabalho experimental foram inicialmente apresentados, nomeadamente os componentes do bloco transmissor e recetor ótico apresentado na [secção anterior](#). Além dos componentes mencionados nessa secção, outros dispositivos são utilizados, nomeadamente: duas placas de ensaio ou *Breadboard* para montagem de circuitos eletrónicos; duas baterias recarregáveis de 9V; uma placa de conversão DC de saída ajustável, cujo objetivo é fornecer no circuito uma tensão de saída regulada pura; um osciloscópio *Tektronix TDS 1002B* para se obter o gráfico correspondente do sinal em cada ponto do circuito.



Figura 38: Bateria de 9V recarregável

Fonte: extraído do [website Aliexpress](#)<sup>20</sup>



Figura 39: *Adjustable Output DC Converter Board*

Fonte: extraído do [website Amazon](#)<sup>21</sup>

---

<sup>20</sup> [Apêndice A](#)

<sup>21</sup> [Apêndice A](#)

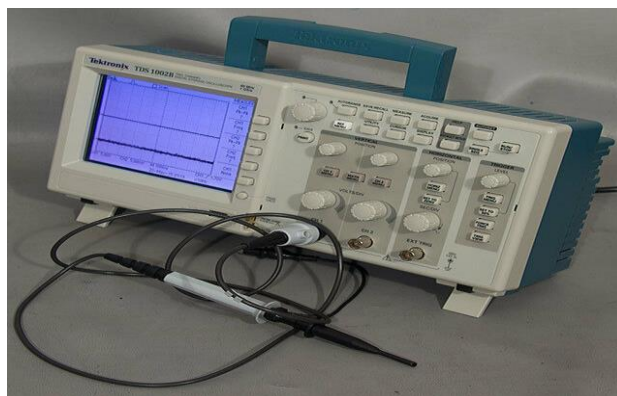


Figura 40: Osciloscópio *Tektronix TDS 1002B*

Fonte: extraído do *website ebay*<sup>22</sup>

As figuras abaixo, apresentam a montagem completa do circuito transmissor e recetor na *Breadbord*:

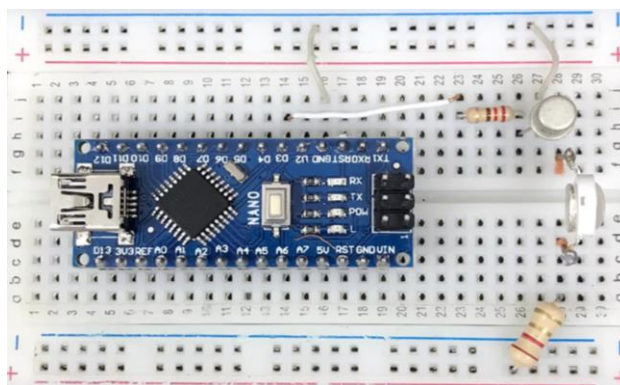


Figura 41: Montagem completa do circuito transmissor na *Breadbord*

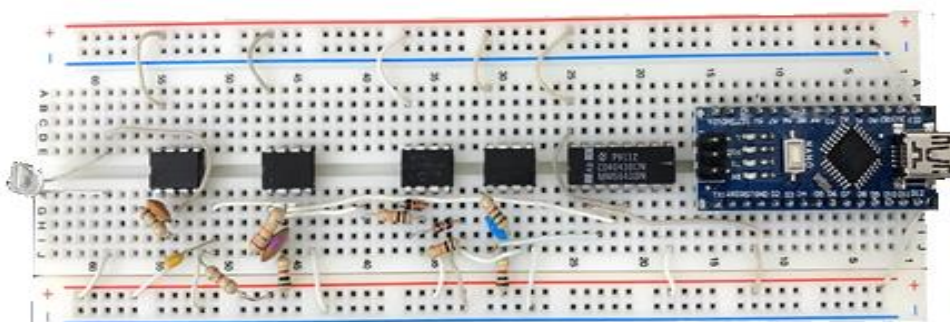


Figura 42: Montagem completa do circuito recetor na *Breadbord* – Protótipo I

<sup>22</sup> [Apêndice A](#)

### 4.3. Resumo

O sistema apresentado neste capítulo propõe a transmissão - recepção de dados de um computador para outro. Os principais componentes da conexão de comunicação ótica são a fonte de luz e o fotodetector. Circuitos adicionais, como *LED drivers* e condicionador de sinal, são baseados no desempenho da fonte de luz e do fotodetector. A Figura 25 mostra o diagrama de blocos da implementação do circuito transmissor. Os dados são inseridos no computador e o microcontrolador os converte em dados binários. Este sinal digital faz com que o LED comece a ligar - desligar, resultando na transmissão da informação. Os dados transmitidos chegam na parte recetora Figura 36, onde é detetada a presença ou ausência de luz, de seguida é feita a conversão do sinal em pulsos elétricos, posteriormente esse sinal é filtrado e amplificado. Assim, o sinal de dados é fornecido ao segundo microcontrolador para reenquadrar os *bits* e, em seguida, é enviado para a porta de comunicação série do computador recetor, e os dados são visíveis no monitor serial do Arduíno.

## 5. Validação experimental

Este capítulo irá descrever todos os testes realizados para verificar a solução implementada no [capítulo 4](#). A metodologia de teste começou com ensaios numa bancada de laboratório preparada para analisar a transmissão e receção do sinal em cada estágio dos circuitos descrito no [capítulo anterior](#). Essencialmente, existem dois cenários de teste: primeiro, será testado o protótipo ao ar livre e, em seguida, num ambiente subaquático.

### 5.1. Testes ao ar livre

O objetivo final do sistema proposto é ser avaliado na água, no entanto, a sua caracterização ao ar livre é essencial para determinar a capacidade e o desempenho num canal de transmissão menos exigente que a água. Este é o teste primário, que se destina a simular uma comunicação ótica sem fio subaquática, porém, num ambiente ao ar livre. Estes ensaios são feitos como um teste de controlo, a fim de garantir que as funções do sistema num ambiente desafiador sejam minimizadas sem perda de equipamentos físicos devido a problemas relacionados a água. Apesar disso, esses testes iniciais ao ar livre realizados na bancada de laboratório, permitem de forma conveniente: testar blocos funcionais do circuito, ajustar parâmetros dos mesmos, fazer *debug* de uma forma simples, possibilitando solucionar qualquer problema que irá surgir e, assim, redefinir os procedimentos de teste para as experiências subaquáticas subsequentes.

O teste inicial de comunicação ótica pelo ar significa que os blocos podem ser facilmente analisados durante a transmissão dos dados, ou seja, os erros na configuração física dos equipamentos, o alinhamento do transmissor e recetor e até mesmo os *Scripts* dos códigos de execução do Arduíno poderão ser corrigidos rapidamente. Inicialmente esses testes de controlo foram feitos no bloco do circuito transmissor (Tx) e recetor (Rx) sem invólucro estanque. Foi necessário somente fixar o Tx e o Rx em posições marcadas de modo a aferir a qualidade do sinal quando é alterada a distância entre eles. A taxa de transmissão (ou em inglês *baud rate*) foi definida em 300 *bps*. Esses testes iniciais mostraram-se bastantes desafiadores, como era de se esperar, a intensidade do sinal recebido é inversamente proporcional ao quadrado da distância entre o transmissor-recetor. Em suma, à medida que se

aumentava a distância entre o Tx e o Rx, tornava-se cada vez mais difícil para o circuito recetor regenerar o sinal original.

A Figura 43 apresenta o esquema completo do circuito transmissor e recetor na bancada de teste (comprimento da bancada 5 m, largura 50 cm):

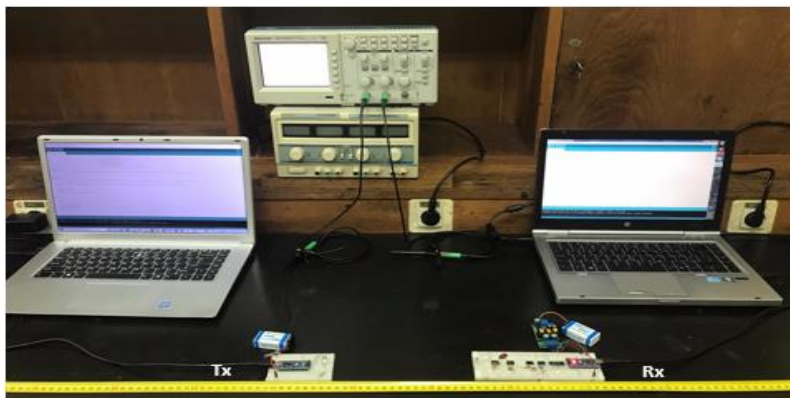


Figura 43: Montagem completa do Tx e do Rx na bancada de teste

Este protótipo foi projetado para demonstrar inicialmente a comunicação série entre dois computadores conforme mostrado na Figura 43. Basicamente, os dados elétricos do computador transmissor são convertidos em dados óticos usando LED e transmitidos pela luz. Esses dados são detetados pelo recetor, convertidos em dados elétricos pelo fotodíodo, e enviados ao computador recetor.

Uma “String” pode ser composta de muitos *bits* (para cada caracter são necessários 8 *bits*). Para transmitir um elevado número de *bits*, é necessário um método capaz de sincronizar a comunicação de modo a evitar erros de sincronização entre o Tx e o Rx. Normalmente, as informações que se pretende transmitir consistem em grupos de variáveis que precisam ser transmitidas de uma única vez. Para interpretar as informações corretamente, o recetor precisa identificar corretamente o início e o fim de cada mensagem. Tipicamente, a comunicação paralela e série são os métodos de transmissão de dados comumente utilizados entre dois equipamentos terminais de dados. No primeiro método, os *bits* são transmitidos e recebidos simultaneamente, tornando-o bastante rápido. Por outro lado, na comunicação série os *bits* são transmitidos e recebidos sequencialmente e reagrupados no circuito recetor de modo a formar *bytes* e, conseqüentemente, ser restaurada a mensagem inicial. O foco desta dissertação é a comunicação série entre o circuito transmissor e recetor.

O sistema operativo de um computador inclui uma biblioteca de portas de comunicação com protocolo padrão RS232. Essencialmente, esse protocolo converte código padrão ASCII *American Standard Code for Information Interchange* para o RS232 com uma específica taxa de transmissão. Portanto, o bloco transmissor utiliza essa biblioteca, especifica a taxa de transmissão, e transmite o texto inserido no monitor Serial do Arduíno para a porta de comunicação especificada. Visto que o *LED driver* está conectado a esta porta através da placa Arduíno, será feita a amplificação necessária da corrente e, conseqüentemente, a modulação da luz transmitida. Esse protocolo de comunicação usa um *bit* de início e um *bit* de paragem para sincronizar o sistema durante a comunicação, pois, este género de comunicação série é assíncrona, sem um sinal de *clock*, e necessita que recetor e o emissor tenham o mesmo valor de *baud rate*. Sucintamente, o formato padrão dos dados na norma RS232 é mostrado na Figura 44:

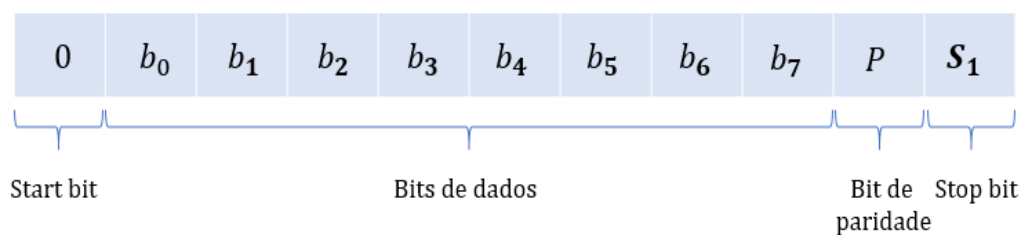


Figura 44: Formato do conjunto de dados (*data frame*) na norma RS232

Nesta dissertação, o código em Arduíno para comunicação entre o transmissor e o recetor está definido para 8 *bits* de dados, sem paridade e 1 *bit* de paragem ou *stop bit*.

### 5.1.1. Transmissão dos primeiros *bits*

Primeiramente, verificou-se a viabilidade de se transmitir *bits* entre os dois Arduínos. Para tal, foi montado o esquema apresentado na Figura 45 a uma distância inicial de 20 *cm* entre o Tx e o Rx. Nesse ensaio foi utilizado o código do [Apêndice B.1](#) e do [Apêndice B.2.2](#):

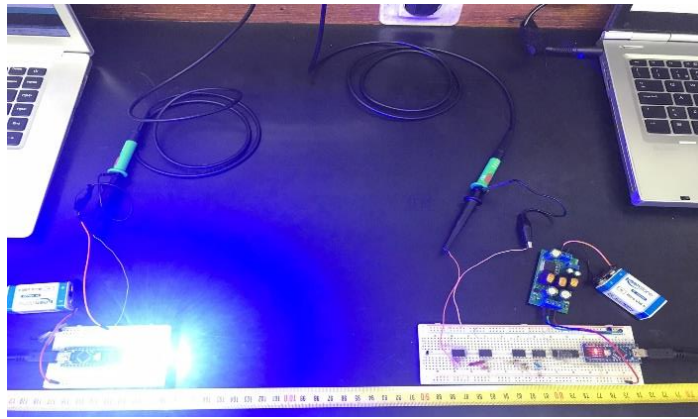


Figura 45: Configuração de teste com uma distância de 20 *cm* entre o Tx e o Rx

O caracter selecionado para a análise inicial é “h”, e a sua representação binária corresponde a: 01101000. Para configurar o teste na bancada de laboratório, colocou-se o circuito transmissor 20 *cm* de distância do circuito recetor, ambas as extremidades foram alinhadas uma em direção à outra e no mesmo plano (ver Figura 45).

A Figura 46, retirada do osciloscópio, apresenta as formas de onda do desempenho do LED e do amplificador de fotodíodo durante a transmissão do caracter e na distância mencionada. O canal 1 mostra a forma de onda do caracter que é transmitido através do LED, por outro lado, o canal 2 apresenta a saída do sinal no fotodíodo:

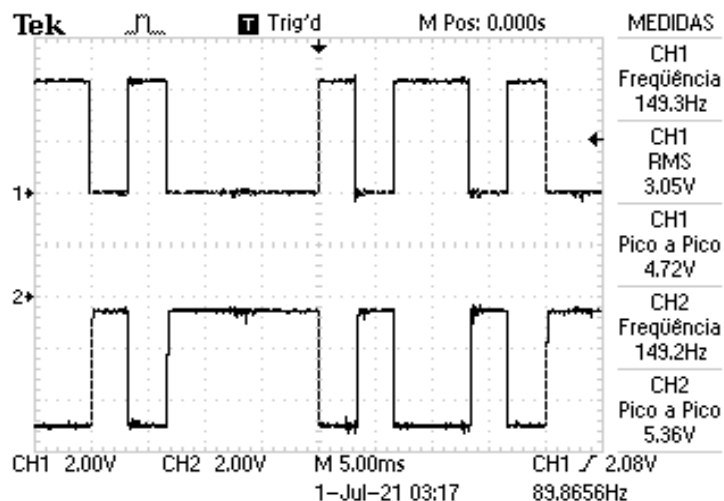


Figura 46: Formas de onda do desempenho do LED e do fotodíodo com 20 *cm* de distância entre o Tx e o Rx

Em seguida, foi feita a medição da tensão pico-a-pico em várias distâncias para se saber a que distância o recetor (fotodíodo) não conseguiria receber nenhum ou pouco sinal do transmissor (LED). Os resultados são apresentados na figura abaixo:

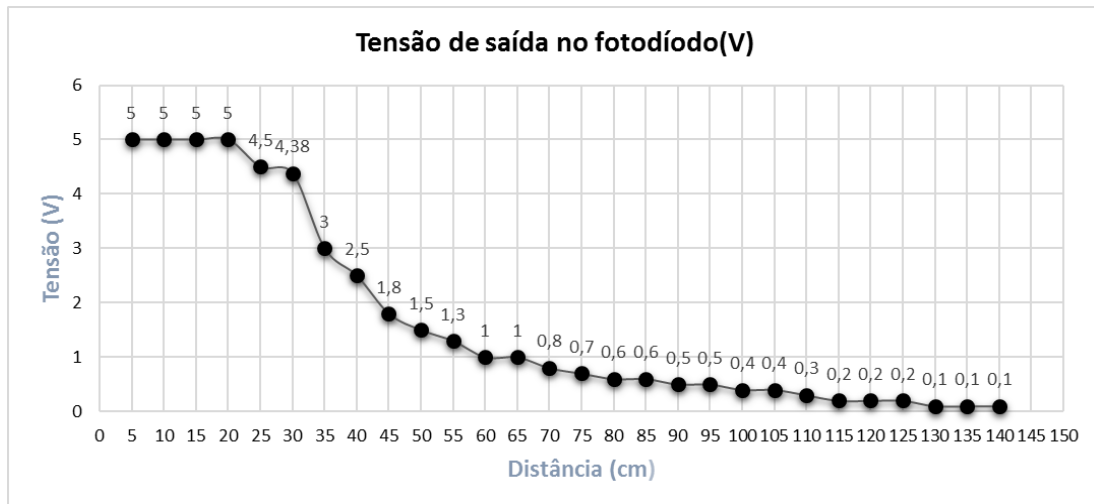
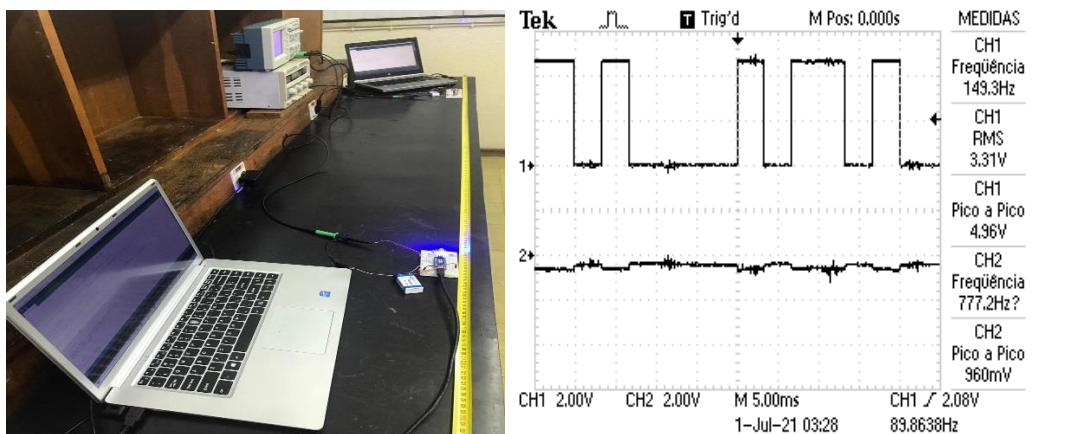


Figura 47: Relação entre a tensão pico-a-pico na saída do fotodíodo e a distância de transmissão

Os ensaios durante a transmissão dos primeiros *bits*, foram feitos até aos 1,40 m. Distâncias superiores à indicada, a saída do fotodíodo apresentou níveis de tensão muito baixo (<1000 mV):



A) Configuração de teste a 1,40 m      B) Forma de onda do TX e Rx a 1,40 m

Figura 48: Transmissão dos primeiros *bits* com uma distância de 1,4 m entre o Tx e o Rx

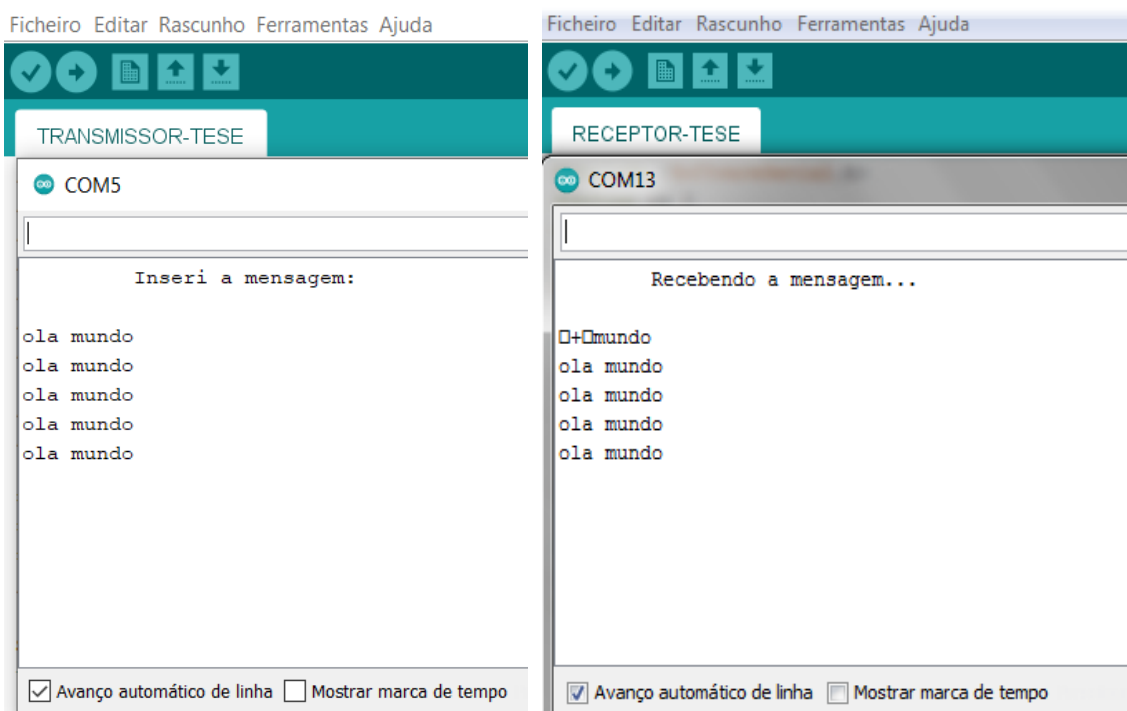
Resultados da transmissão dos primeiros *bits*: nesta primeira experiência, foi verificada à possibilidade de se transmitir um sinal entre os Arduínos. O sistema foi

capaz de enviar – receber um caracter entre o transmissor e o recetor. Portanto, o objetivo inicial foi alcançado com uma distância máxima de 1,40 m entre os blocos.

### 5.1.2. Transmissão de sequência de caracteres

Na segunda experiência, pretende-se enviar uma sequência de caracteres (ola mundo). Essencialmente, a informação é inserida a partir do monitor serial do Arduíno transmissor e, quando é pressionada a tecla “ENTER”, por intermédio da luz visível os dados inseridos são transmitidos na sequência binaria conforme o protocolo definido da comunicação assíncrona. Os testes foram realizados com diferentes alcances entre o Tx e o Rx, de modo a aferir a capacidade do sistema em detetar o sinal com o aumento da distância.

Para início de teste, foi montado o esquema apresentado na Figura 45 com a mesma distância entre o Tx e o Rx. Nesse ensaio foram utilizados os códigos do [Apêndice B.2.1](#) e [Apêndice B.2.2](#):



A) Transmissor

B) Recetor

Figura 49: Transmissão de dados entre o Tx e o Rx com uma distância de 20 cm

Posteriormente, aumentou-se a distância de teste para 70 cm, conforme pode ser observado na montagem abaixo:

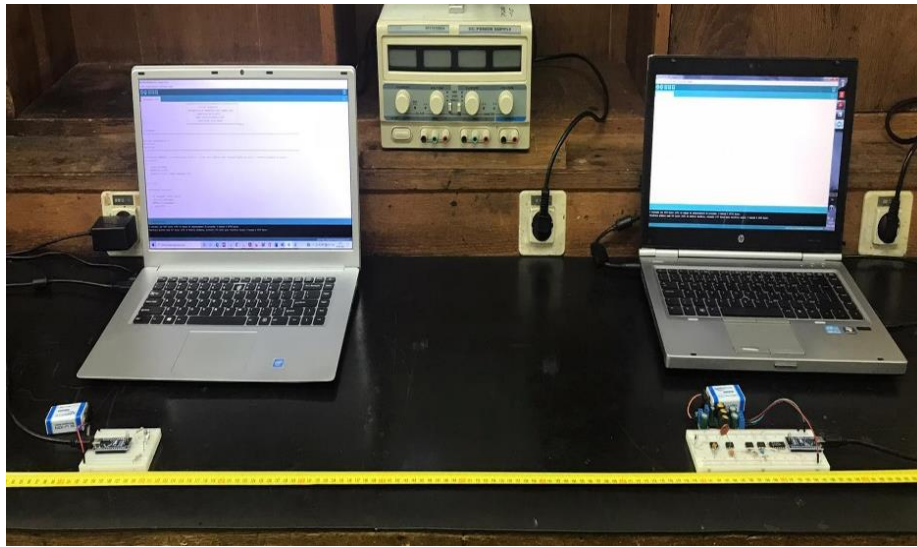
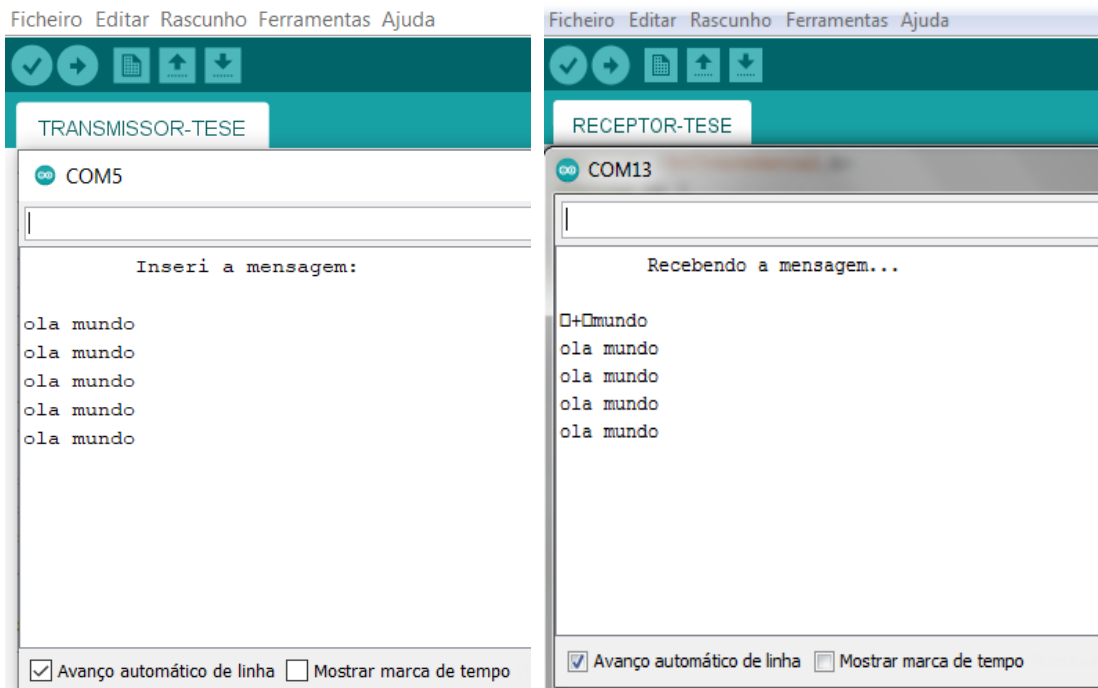


Figura 50: Configuração de teste com uma distância de 70 *cm* entre o Tx e o Rx

A saída no monitor serial do Arduino com a montagem da Figura 50 é apresentado na figura abaixo:



A) Transmissor

B) Recetor

Figura 51: Transmissão de dados entre o Tx e o Rx com uma distância de 70 *cm*

Apesar da existência do ruído ambiente durante os ensaios, até aos 1,40 *m* de distância entre o Tx e o Rx, o sistema apresentou um desempenho satisfatório durante a transmissão dos dados.

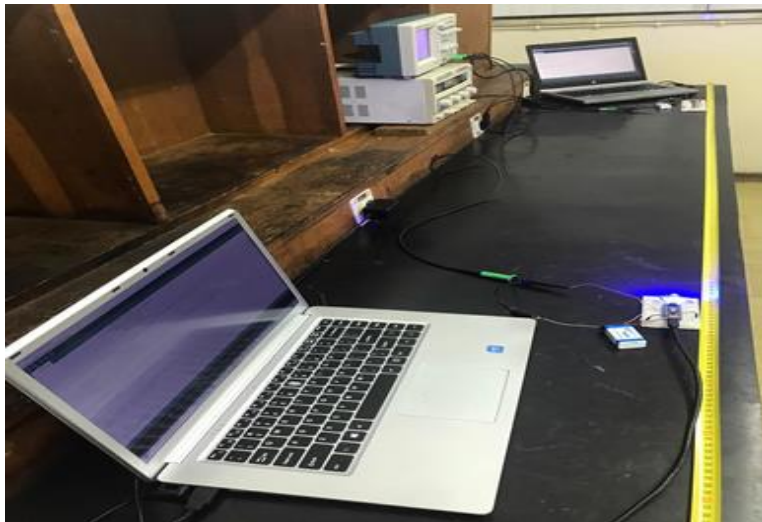
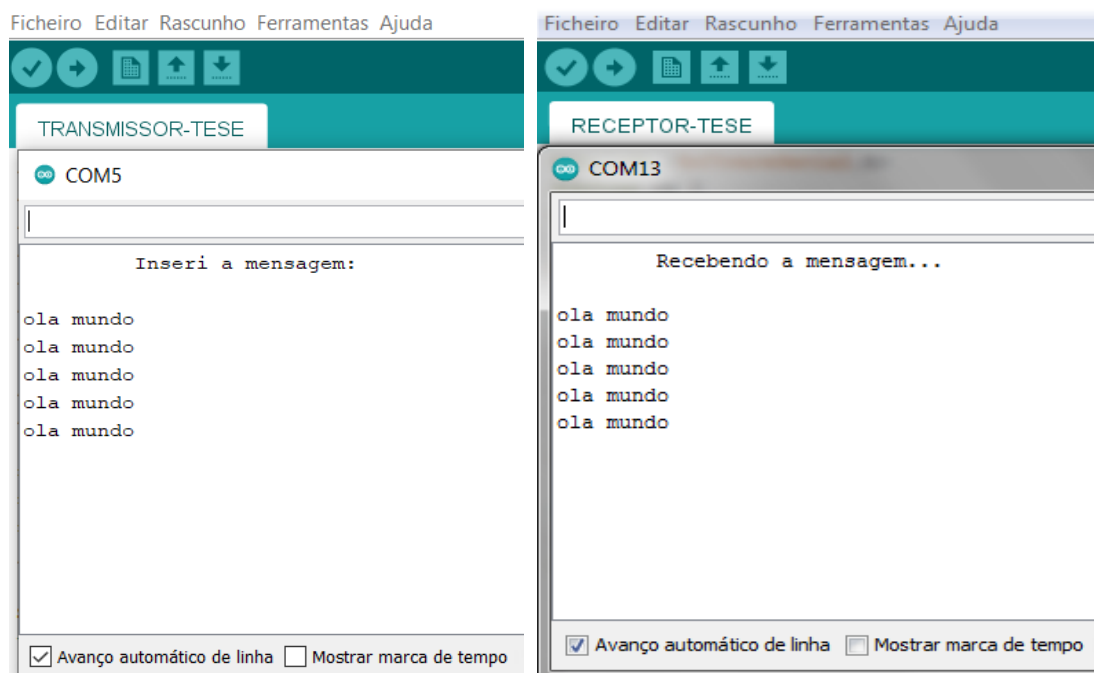


Figura 52: Configuração de teste com uma distância de 1,40 m entre o Tx e o Rx

A saída no monitor serial do Arduino com a montagem da Figura 52 é apresentado na figura abaixo:



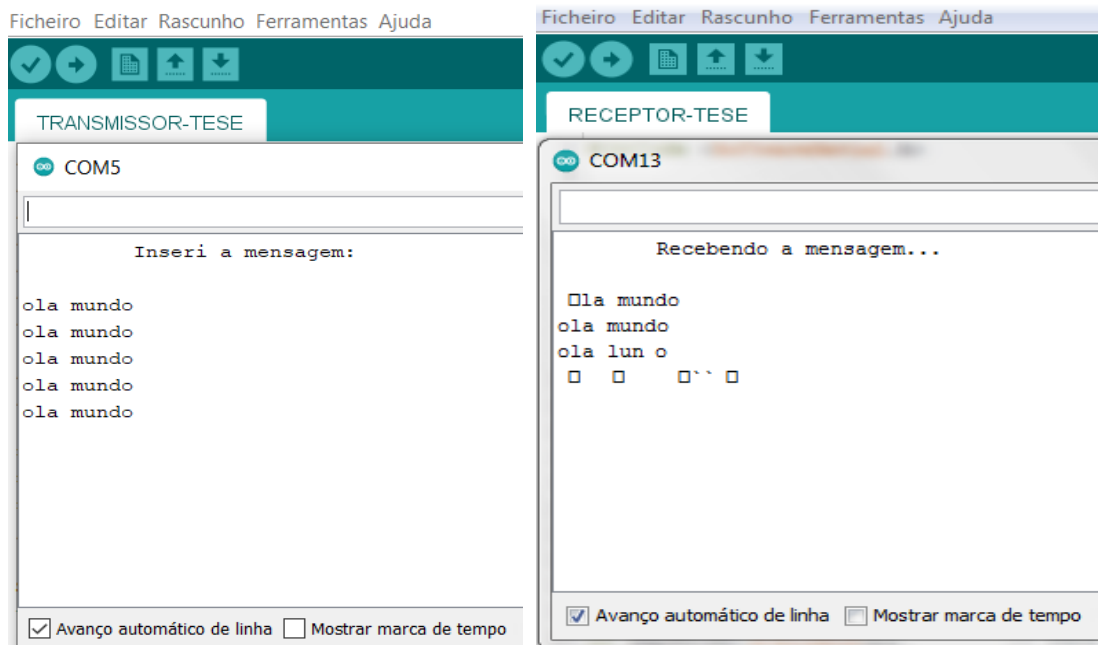
A) Transmissor

B) Recetor

Figura 53: Transmissão de dados entre o Tx e o Rx com uma distância de 1,40 m

Os testes ao ar livre começaram com uma distância inicial de 20 cm entre o transmissor e o recetor. Posteriormente, foi-se aumentando cada vez mais a distância entre os blocos e efetivamente o bloco recetor conseguiu restaurar a

mensagem original. Porém, ao se aumentar para uma distância superior a 1,40 m, o sinal elétrico do fotodíodo sofre maior atenuação e distorção, e o circuito recetor torna-se cada vez mais desafiador restaurar a informação original, conforme pode ser observado Figura 54:



A) Transmissor

B) Recetor

Figura 54: Transmissão de dados entre o Tx e o Rx com uma distância superior a 1,40 m

## 5.2. Recetor ótico – Protótipo II

A fim de se atingir uma distância maior que 1,40 m, foi necessário fazer algumas alterações nos valores dos componentes apresentados inicialmente no circuito recetor do [protótipo I](#). Diante disso, foram feitos vários testes práticos no laboratório resultando num novo filtro para o circuito recetor, isso é, o filtro ativo passa-banda de primeira ordem apresentou respostas mais adequadas com o aumento da distância entre os dois blocos. A figura a seguir apresenta à sua montagem elétrica:

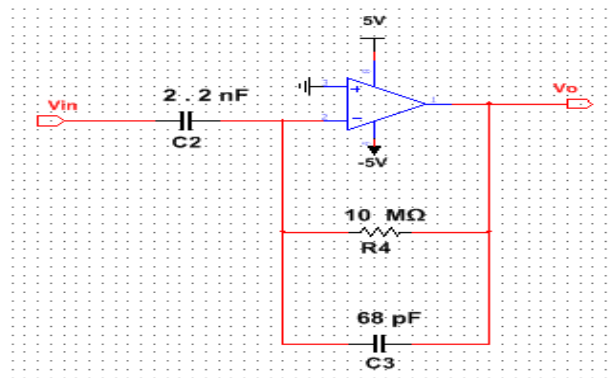


Figura 55: Filtro ativo passa-banda de primeira ordem

Apesar disso, foi necessário acrescentar um amplificador não inversor com o propósito de amplificar o sinal na saída do filtro ativo. Foram ainda efetuadas alterações nos valores de alguns componentes do circuito recetor apresentado no [protótipo I](#). A figura a seguir apresenta o diagrama elétrico completo usado no circuito recetor desse segundo protótipo, no entanto, o [Anexo II](#) fornece uma lista completa dos valores dos componentes usados na sua implementação:

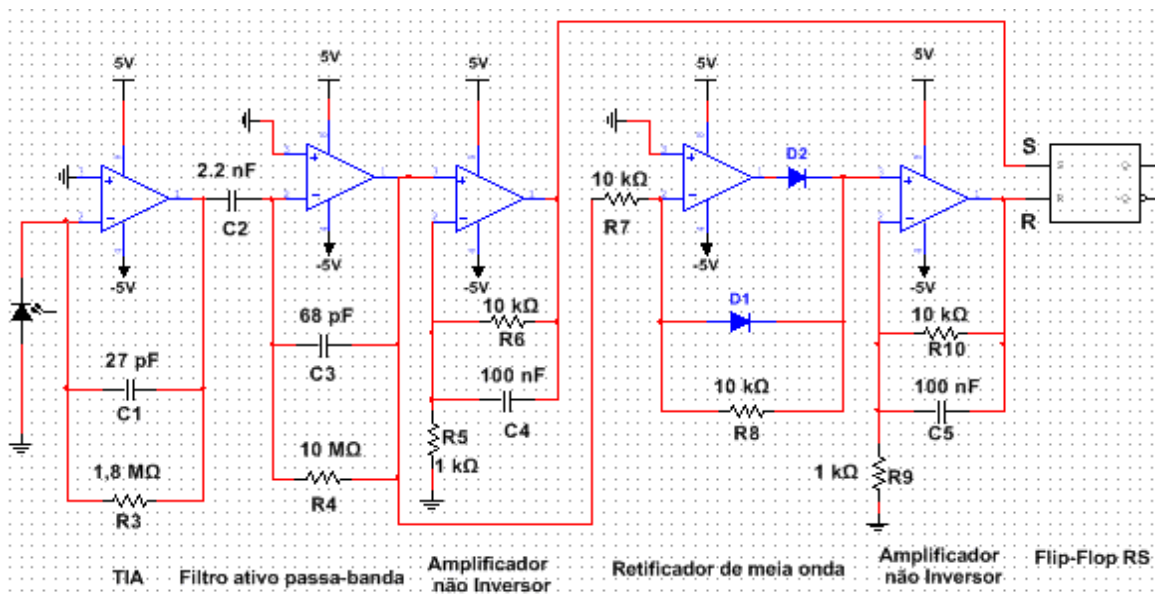


Figura 56: Esquema elétrico do circuito recetor - Protótipo II

A figura abaixo, apresenta a montagem completa do novo circuito recetor na *Breadbord*:

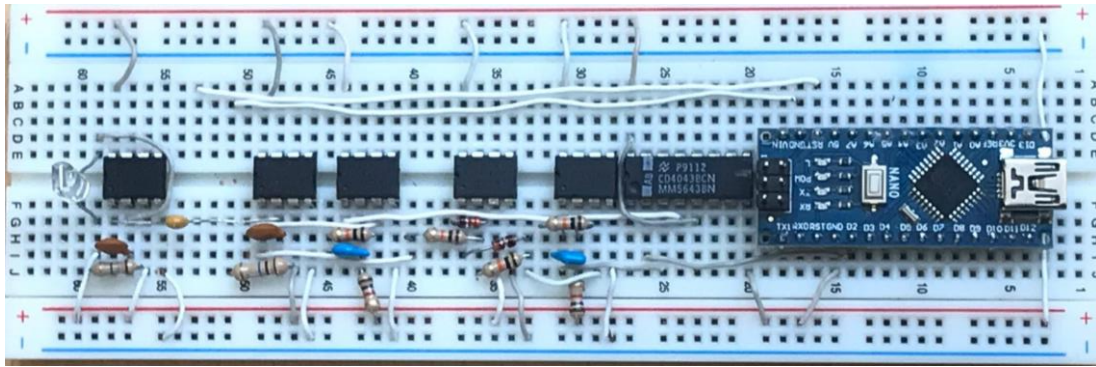


Figura 57: Montagem completa do circuito recetor na *Breadbord* – Protótipo II

Portanto, com as alterações apresentadas, o circuito recetor torna-se mais adequado para se atingir os objetivos pretendidos, pois, uma distância máxima de 4,50 m é alcançada apesar da influência de luz ambiente. As figuras abaixo, apresentam a configuração de teste na bancada do laboratório e a saída da mensagem no monitor serial do Arduíno na distância indicada:

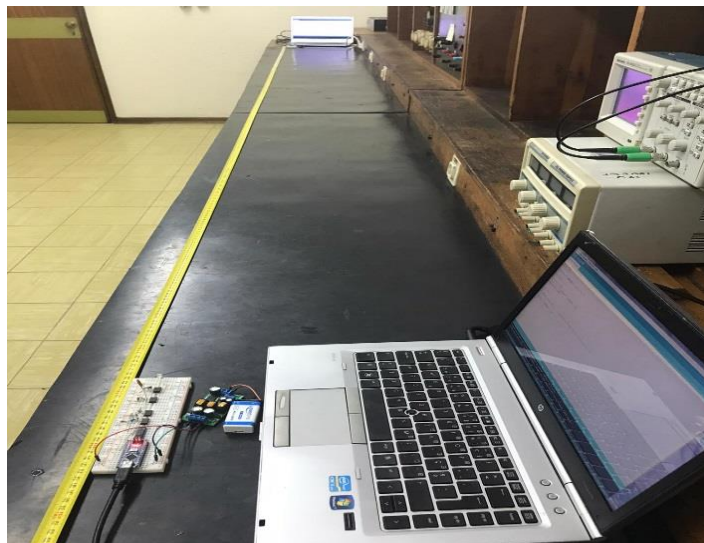
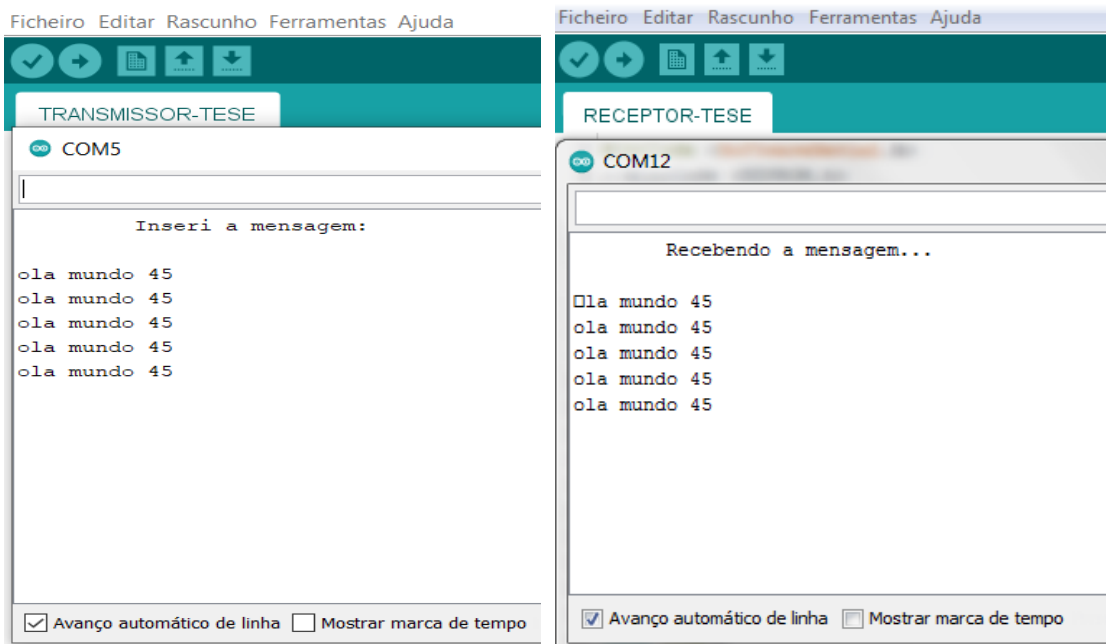


Figura 58: Configuração de teste com uma distância de 4,50 m entre o Tx e o Rx

A saída no monitor serial do Arduíno com a montagem da Figura 58 é apresentado na figura abaixo:

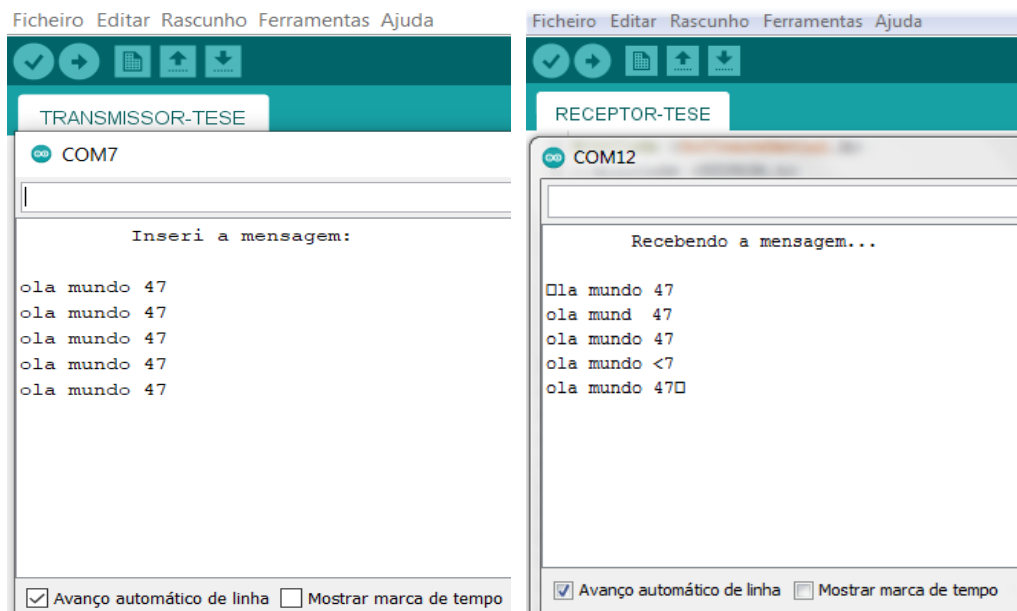


A) Transmissor

B) Recetor

Figura 59: Transmissão de dados entre o Tx e o Rx com uma distância de 4,50 m

À medida que a distância entre o Tx e o Rx aumentava, tornava-se mais desafiador para o sistema recetor reconstruir na totalidade a mensagem original. No entanto, este bloco conseguiu detetar corretamente alguns *bytes* da mensagem original com distância superior a 4,50 m, conforme mostra a figura abaixo:



A) Transmissor

B) Recetor

Figura 60: Transmissão de dados entre o Tx e o Rx com uma distância de 4,70 m

Conforme estudado na secção [2.1.4 ótica](#) o sistema ótico sem fio tem a vantagem de alta largura de banda e a vantagem de, por exemplo, estarem imunes à interferência de radiofrequência, eliminando à necessidade de se utilizar cabos entre os sistemas. No entanto, nesses sistemas óticos, o fotodetector (neste caso, o fotodíodo) pode ser exposto à forte luz ambiente, introduzindo ruído adicional em todo o bloco recetor. Lâmpadas fluorescentes e a luz natural do dia são alguns exemplos de fontes de luz comuns que causam ruído ambiente. Adicionalmente a esse ruído, o sistema recetor também é afetado pelo ruído elétrico causado pelos dois amplificadores de sinal usados no circuito recetor.

Na verdade, a qualidade do sinal recebido é um dos fatores mais importantes a se considerar quando se projeta um recetor ótico. De entre as fontes de ruído existentes no sistema de comunicação a luz visível, a luz ambiente tem um impacto negativo no sinal transmitido. Portanto, é necessário avaliar a robustez do circuito proposto diante de tal ruído, pois, o ruído geralmente causa tensão de deslocamento e distorce a forma de onda desejada do sinal transmitido.

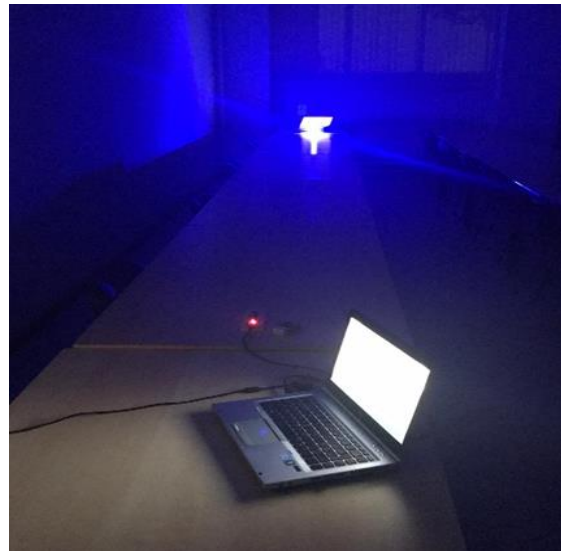
De seguida foi analisado o comportamento do sistema sem a influência da luz ambiente para avaliar a distância máxima em que o novo recetor conseguisse detetar inteiramente a mensagem original. Após a realização de alguns testes na bancada do laboratório, verificou-se que seria conveniente realizar à experiência num local<sup>23</sup> onde os blocos pudessem ficar numa distância superior à permitida pela bancada (5 m). As figuras abaixo apresentam a montagem de configuração e a saída no monitor Serial do Arduíno:

---

<sup>23</sup> Edifício de aulas da Escola Naval



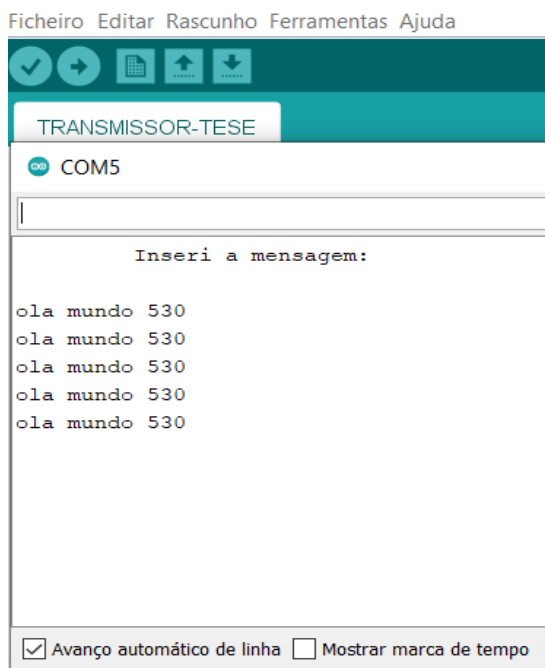
A) Com luz ambiente



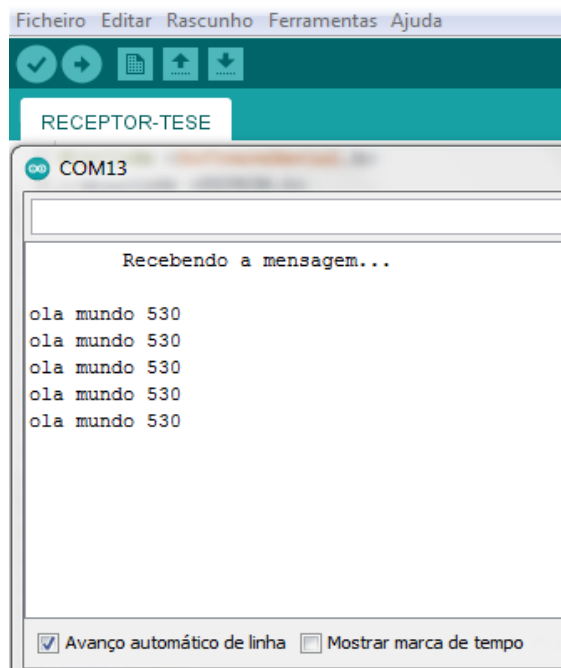
B) Sem luz ambiente

Figura 61: Configuração de teste com uma distância de 5,30 m entre o Tx e o Rx

A saída no monitor serial do Arduino com a montagem da Figura 61 é apresentado na figura abaixo:



A) Transmissor



B) Recetor

Figura 62: Transmissão de dados entre o Tx e o Rx com uma distância de 5,30 m

O recetor – protótipo II conseguiu detetar inteiramente a mensagem original até uma distância máxima de 5,30 m na ausência da luz ambiente.

Ao longo do processo de teste de bancada, foi analisado o comportamento do circuito recetor - protótipo II em detetar completamente a mensagem original quando se variava a cor do LED do bloco transmissor na gama de cores do espectro visível, isso é, os ensaios foram realizados com dois tipos diferentes de cor do LED (azul e verde). Pensou-se que seria interessante estudar a influência (se houver) das faixas de comprimento de onda da luz verde e azul. Assim sendo, a Figura 63 apresenta os resultados dos ensaios com e sem a interferência do ruído ambiente:

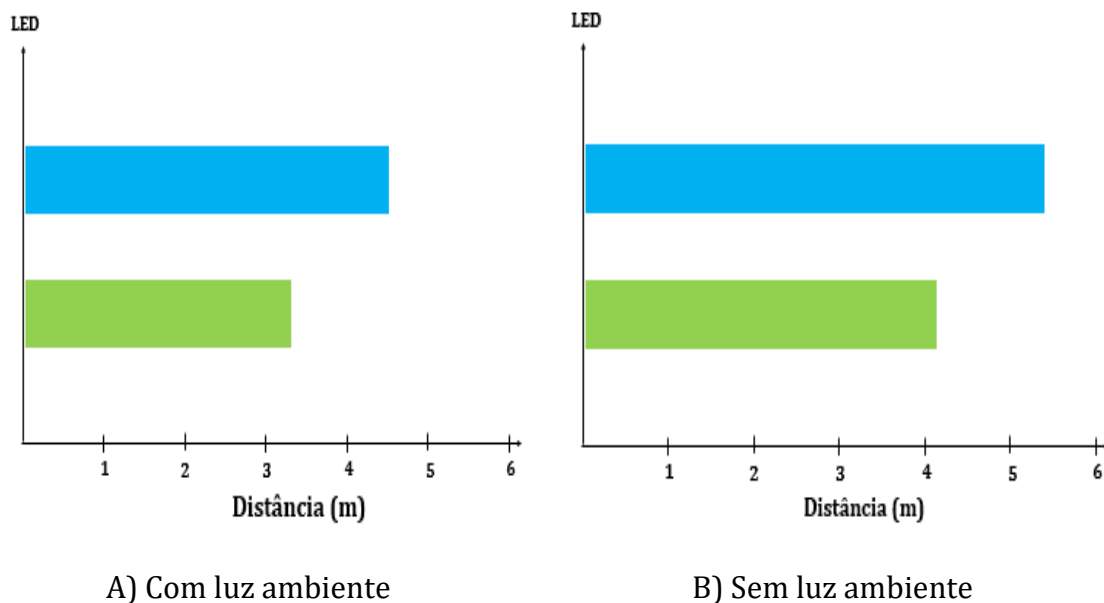


Figura 63: Resultado da comunicação ao ar livre com diferentes cores do LED

No início da transmissão dos dados, ambos os LEDs começaram com um desempenho semelhante, porém, é possível verificar na Figura 63 um melhor desempenho da luz azul na comunicação. Na presença da luz ambiente, a luz verde atingiu o seu limite em cerca de  $3,20\text{ m}$ , enquanto a luz azul atingiu um resultado ainda maior  $4,50\text{ m}$ . Por outro lado, na ausência da luz ambiente, a luz verde atingiu  $4,10\text{ m}$  e a azul  $5,30\text{ m}$ .

Em suma, a luz ambiente e os amplificadores óticos geram espontaneamente ruído ótico, que será adicionado ao sinal modulado e, conseqüentemente, degradará a qualidade do sinal transmitido. Neste caso especial, o sinal da luz de interesse proveniente do transmissor está acima de uma luz ambiente constante ou de fundo que não contém nenhuma informação. Isso é particularmente verdadeiro em sistemas de detecção ótica. Em vista disso, qualquer ruído introduzido no sistema afetará diretamente o desempenho do recetor.

## 5.3. Testes em ambiente subaquático

### 5.3.1. Impermeabilidade dos circuitos

O ambiente subaquático é bastante desafiador para as comunicações óticas, especialmente na implementação de sistemas de baixo custo, com desafios intrínsecos entre a distância e a velocidade de transmissão dos dados. Antes de impermeabilizar o sistema, era indispensável a realização dos testes de bancada num laboratório. Foi um processo iterativo que permitiu controlar variáveis externas, registar dados e, sobretudo, fazer ajustes necessários do *Hardware* – *Software* antes de testá-lo na água.

Após a realização dos testes ao ar livre, o foco centrou-se para o teste num ambiente subaquático. Esse ambiente apresentou novos desafios: a integridade física do circuito transmissor e recetor agora se tornou primordial, e a frequência de interação física com ambos os circuitos se tornaram mais limitadas durante a realização das experiências.

Visto que o teste é realizado na água, a precaução principal é assegurar que o sistema esteja totalmente à prova de água, assim sendo, é necessário garantir que os circuitos transmissor e recetor estejam totalmente impermeabilizados antes dos ensaios. Em vista disso, se utilizou bolsas impermeáveis transparentes para garantir a estanquidade dos componentes eletrónicos, conforme pode ser observado nas figuras abaixo:

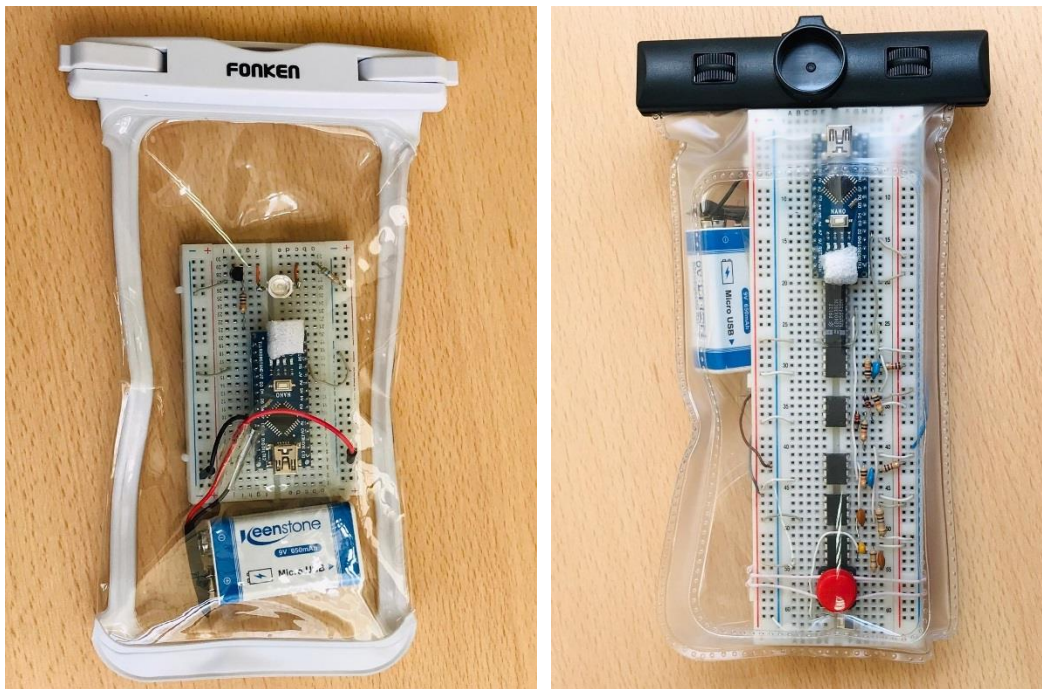


Figura 64: Bolsa estanque para impermeabilizar os circuitos

Fonte: adaptado do *website Aliexpress*<sup>24</sup>

---

<sup>24</sup>[https://pt.aliexpress.com/item/4000116432717.html?spm=a2g0o.productlist.0.0.7c7c593aLqTTWa&algo\\_pvid=b0967b78-ef9a-45b1-a612-c522777390d7&algo\\_exp\\_id=b0967b78-ef9a-45b1-](https://pt.aliexpress.com/item/4000116432717.html?spm=a2g0o.productlist.0.0.7c7c593aLqTTWa&algo_pvid=b0967b78-ef9a-45b1-a612-c522777390d7&algo_exp_id=b0967b78-ef9a-45b1-)



A) Transmissor

B) Recetor

Figura 65: Circuito transmissor e recetor dentro do suporte estanque

Conforme mostrado na Figura 65, o sistema de transmissão e recepção foram fechados num recipiente à prova de água; apesar disso, foi utilizado uma haste presa a uma base quadrada para facilitar a precisão da medicação (especialmente da profundidade) nesse tipo de ambiente. Semelhantemente aos testes ao ar livre, os resultados dessas experiências foram obtidos usando uma fita métrica e com recurso a observações visuais.



Figura 66: Suporte para estabilizar o circuito transmissor e recetor durante os testes subaquático

### 5.3.2. Metodologia de teste na água

Para a realização dos testes na água, surgiu a necessidade de transmitir os dados para o exterior de forma eficiente. Assim sendo, utilizou-se a memória não volátil EEPROM *Electrically-Erasable Programmable Read-Only Memory*. Conforme apresentado na Tabela 3, o microcontrolador Arduíno possui uma EEPROM de 1024 *bytes*, embora a capacidade de armazenamento não seja elevada, é suficiente para se alcançar o propósito desta dissertação. Portanto, a finalidade em se utilizar essa memória durante os testes subaquáticos para a transmissão dos dados no exterior, prende-se por dois motivos essenciais: primeiro, não é viável a transmissão dos dados por intermédio de fios, pois, poderia pôr em risco a estanquidade dos circuitos. O segundo motivo deve-se ao facto de não se utilizar o sinal *wireless* em virtude de as ondas de rádio serem bloqueadas pela água.

Sucintamente, a metodologia aplicada para analisar a capacidade *underwater* do sistema e a gravação dos dados na EEPROM consistiu no seguinte:

- Durante a realização de cada teste o circuito transmissor estará continuamente a transmitir o caracter: “U”;
- Através da bolsa estanque será pressionado o botão *Reset* do Arduíno recetor e conseqüentemente dar-se-á início do *Setup()* do código;
- Toda a vez que é pressionado o botão *Reset* e, estiver a ser executado o *Setup()*, o circuito recetor estará gravando numa posição de memória: quantas vezes durante 3 segundos conseguiu identificar o caracter mencionado;
- Será feita essa análise estatística em diferentes distâncias;
- Por fim, essas informações facilmente poderão ser visualizadas no monitor Serial do Arduíno após ser conectado ao computador.

Para a realização desses ensaios foram utilizados os códigos do [Apêndice C.1](#) e do [Apêndice C.2](#).

### 5.3.3. Primeiro modelo do canal de teste na água

De modo a aferir a capacidade *underwater* do sistema, foi realizado o teste no tanque de água do laboratório de Arquitetura Naval do departamento de ciência e

tecnologia da Escola Naval (EN). Esse tanque com 9,5 m de comprimento, 2,2 m de largura e 1,30 m de profundidade é revestido nas laterais com mármore possibilitando que a luz entre somente por cima. Durante a realização dos testes, o tanque continha uma altura de 1 m de água. A Figura 67 apresenta o canal de comunicação para testar o protótipo num ambiente subaquático de água doce:



Figura 67: Tanque de água utilizado para testar o sistema UWOC

O facto de o tanque de água estar num ambiente fechado com um sistema de filtragem de água doce deve produzir um coeficiente de atenuação muito próximo ao “mar límpido”. A Figura 68 ilustra o esquema da configuração entre os blocos transmissor e recetor para os testes na água:

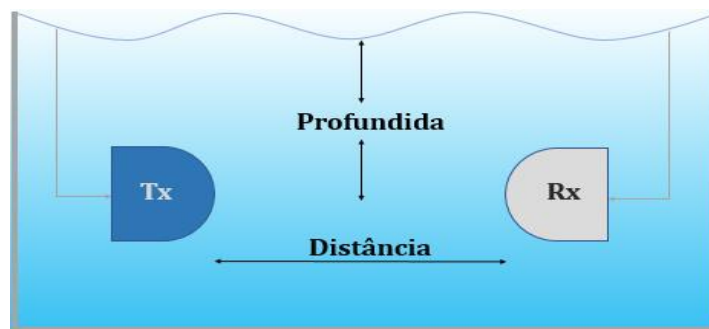
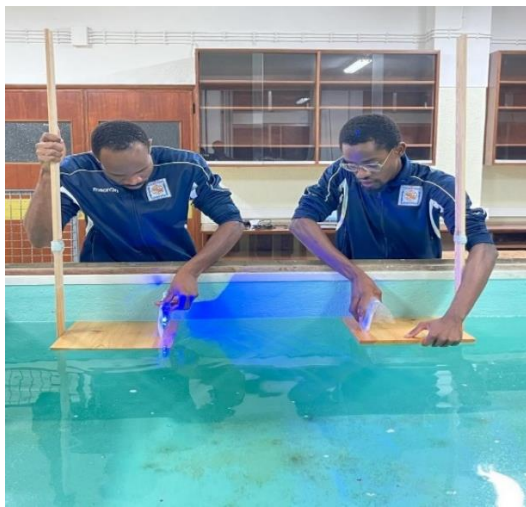


Figura 68: Esquema de montagem do bloco Tx e Rx para testar o sistema UWOC

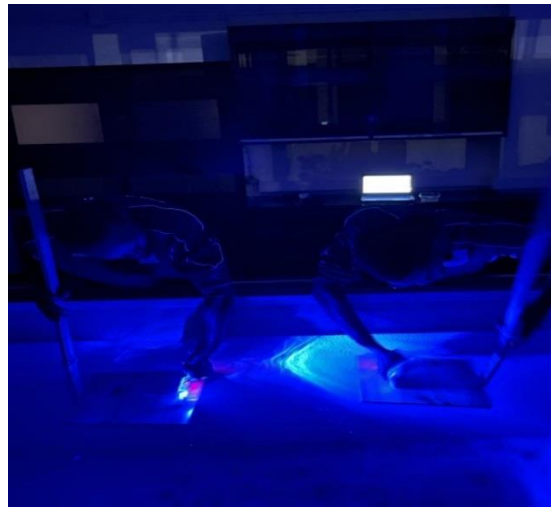
Alinhamento: dado que o Tx e o Rx foram montados e verificados a estanquidade, o alinhamento foi feito através das observações visuais. Inicialmente foi medida a distância abaixo do nível da água para garantir que cada bloco ótico estivesse na mesma profundidade. Como o recetor será afastado do transmissor, pequenos erros de alinhamento tornam-se mais óbvios, ocasionalmente, o

alinhamento é verificado e alguns reajustes são feitos para encontrar o alinhamento que pode fornecer ao recetor a potência máxima do sinal de transmissão, pois os testes foram realizados na presença e ausência da luz ambiente.

Para configurar o teste na água, ambos os blocos foram montados numa profundidade constante de 40 *cm*. Inicialmente, o transmissor e o recetor foram montados a 50 *cm* de distância, de modo que eles pudessem permanecer fixos durante a realização dos testes. Os circuitos ficaram de frente um do outro e o recetor pode ser facilmente movido para uma distância mensurável do transmissor estacionário para transmitir às várias distâncias de teste, conforme pode ser observado nas figuras abaixo:



A) Com luz ambiente



B) Sem luz ambiente



C) 4,5 *m* de distância entre o Tx - Rx



C) 5,5 *m* de distância entre o Tx - Rx

Figura 69: Montagem e teste do Tx - Rx no tanque de água da EN

Os resultados dessas experiências com e sem luz ambiente são apresentados na Figura 70 e na Figura 71, respetivamente:

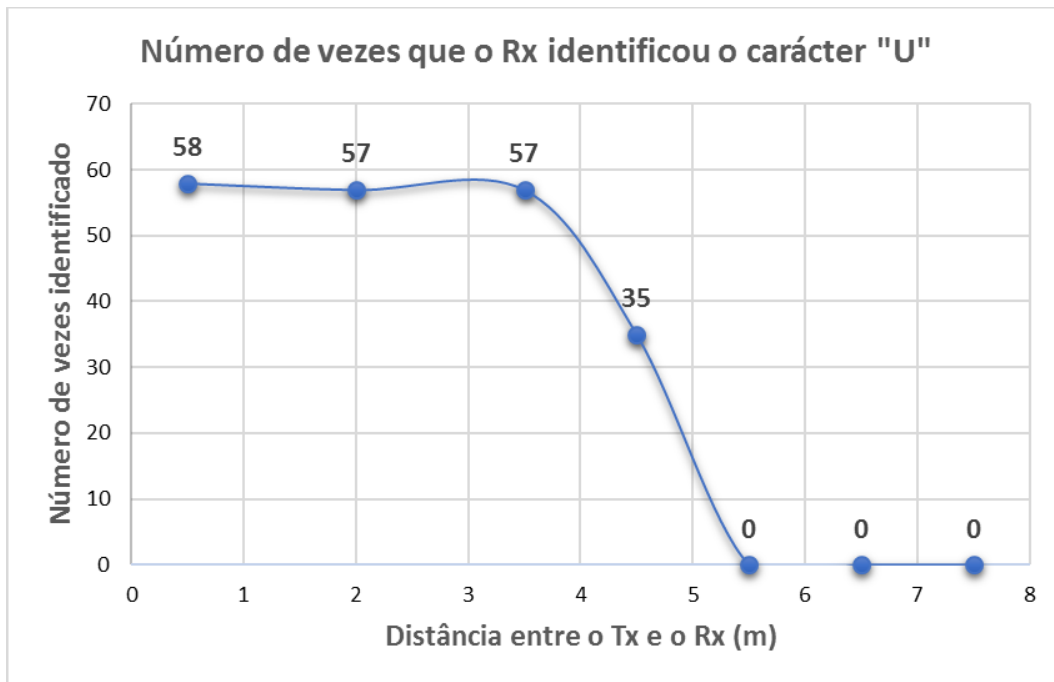


Figura 70: Número de vezes que o Rx identificou o caracter na água limpa - com luz ambiente

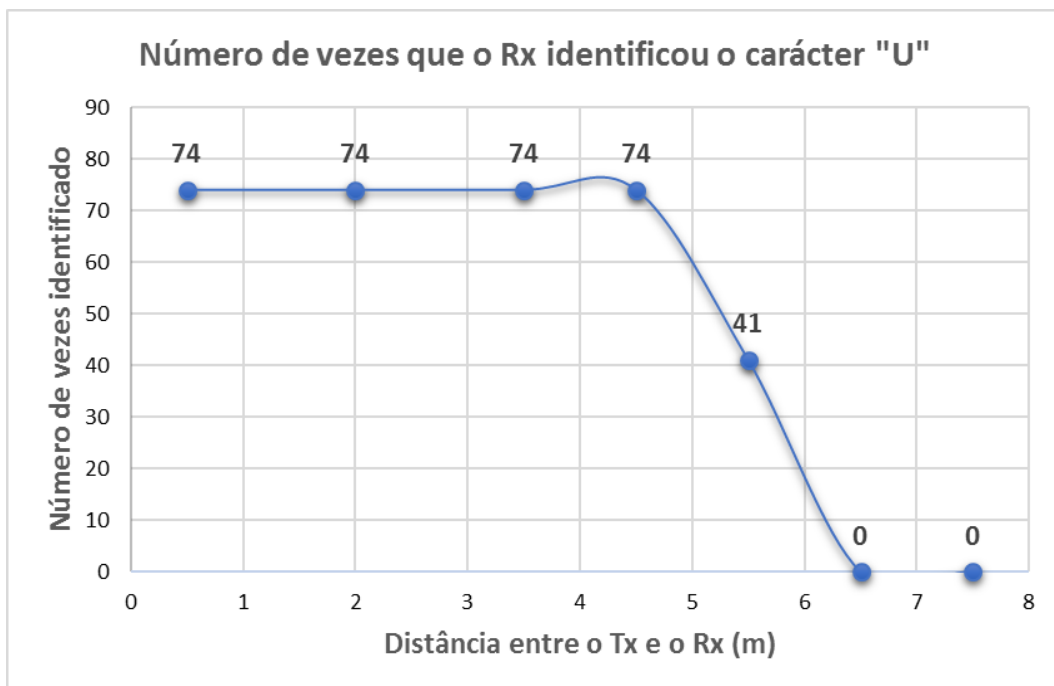


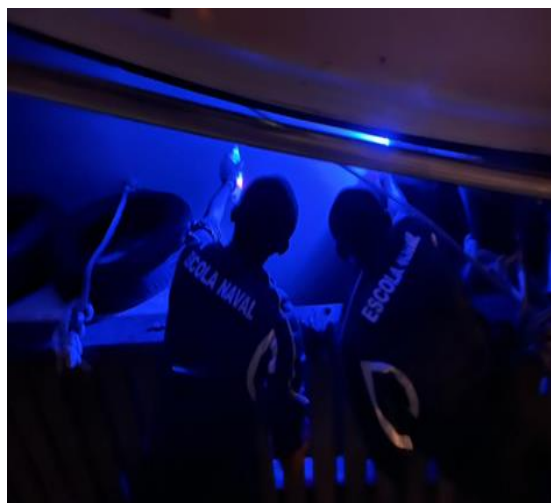
Figura 71: Número de vezes que o Rx identificou o caracter na água limpa - sem luz ambiente

### 5.3.4. Segundo modelo do canal de teste na água

O local para o teste num ambiente mais desafiador foi a doca da Base Naval de Lisboa (BNL). A experiência foi conduzida inicialmente com luz ambiente e, em seguida, realizado à noite com uma profundidade a variar entre 10–20 *cm*. Nesse cenário, o suporte apresentado na Figura 66 não foi usado, à vista disso, essa faixa do valor da profundidade foi medida por observações visuais. As distâncias dos ensaios são as mesmas utilizadas no tanque de água limpa:



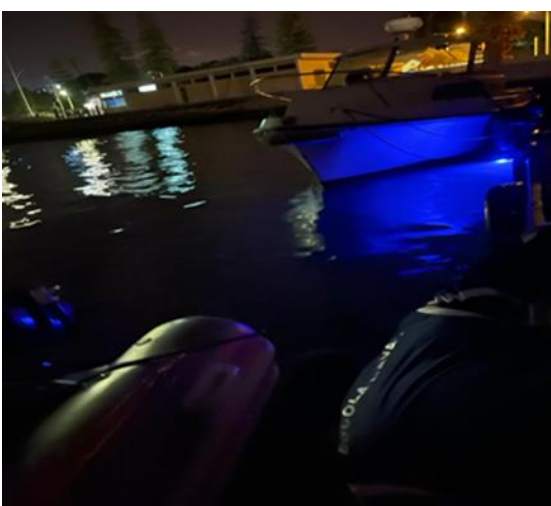
A) Base Naval de Lisboa – Cais 1



B) 50 *cm* de distância entre o Tx - Rx



C) 4,5 *m* de distância entre o Tx - Rx



C) 5,5 *m* de distância entre o Tx - Rx

Figura 72: Montagem e teste do Tx - Rx na água do mar da BNL

Apesar da distância inicial, foram feitos os ensaios com diferentes distâncias, e os resultados dessas experiências com e sem luz ambiente são apresentados na

Figura 73 e Figura 74, respetivamente:

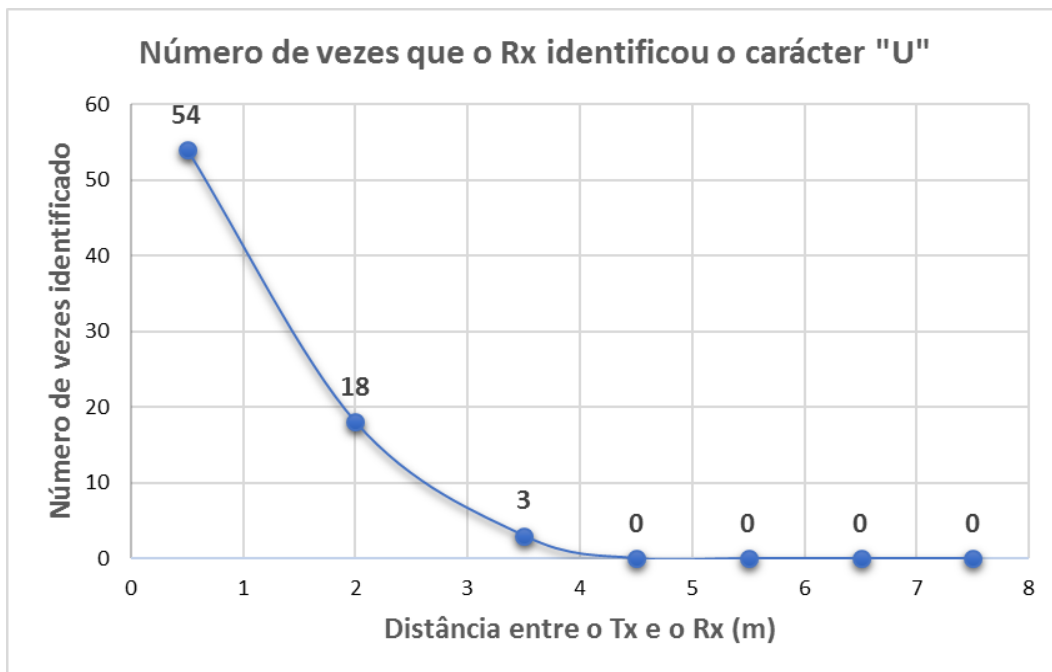


Figura 73: Número de vezes que o Rx identificou o caracter na água do mar – com luz ambiente

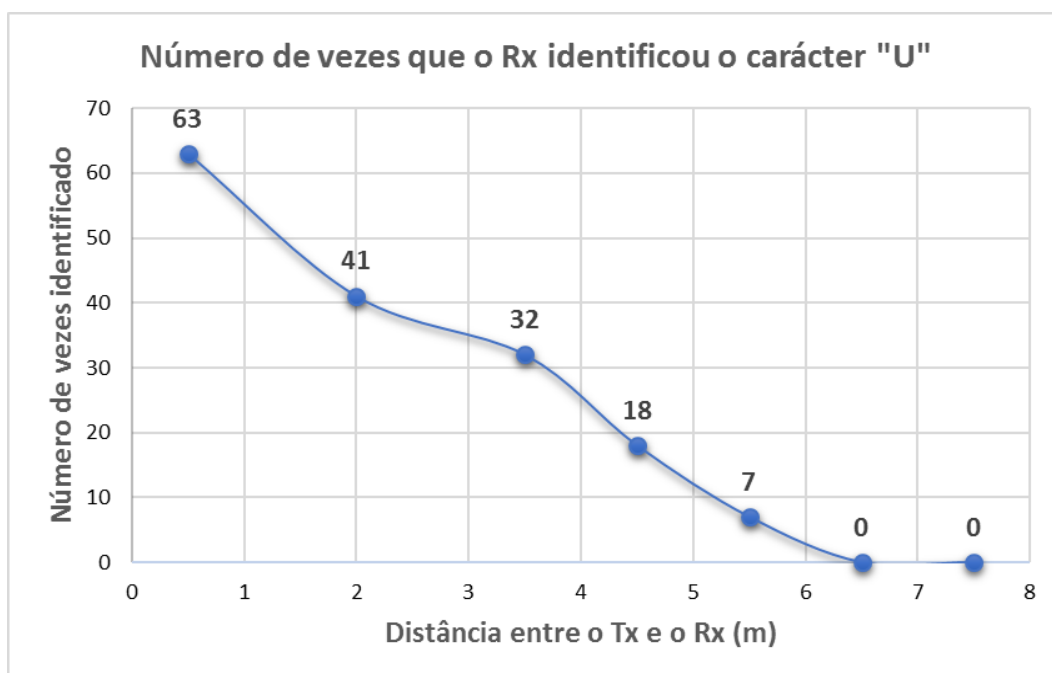


Figura 74: Número de vezes que o Rx identificou o caracter na água do mar – sem luz ambiente

Para melhor análise do desempenho e a robustez do circuito recetor quanto a identificação do caracter transmitido no meio aquático, a Figura 75 mostra a

comparação dos valores apresentados durante os testes na água limpa e turva, em relação aos testes feitos ao ar livre com o circuito transmissor e recetor totalmente impermeabilizados:

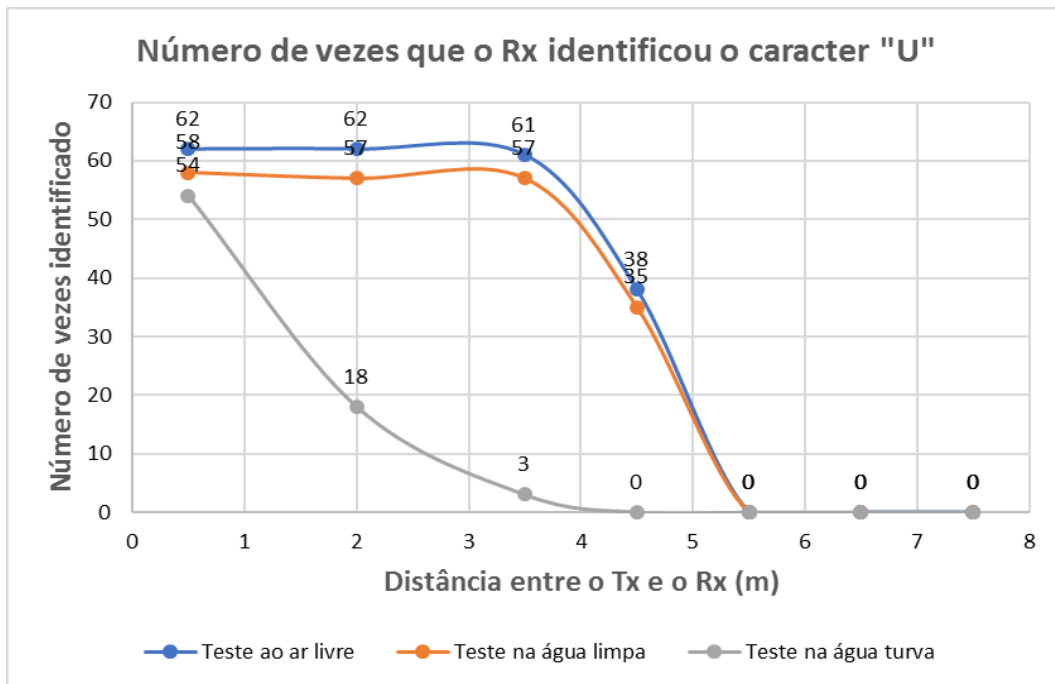


Figura 75: Comparação do número de vezes que o Rx identificou o caracter entre os diferentes canais de comunicação – com luz ambiente

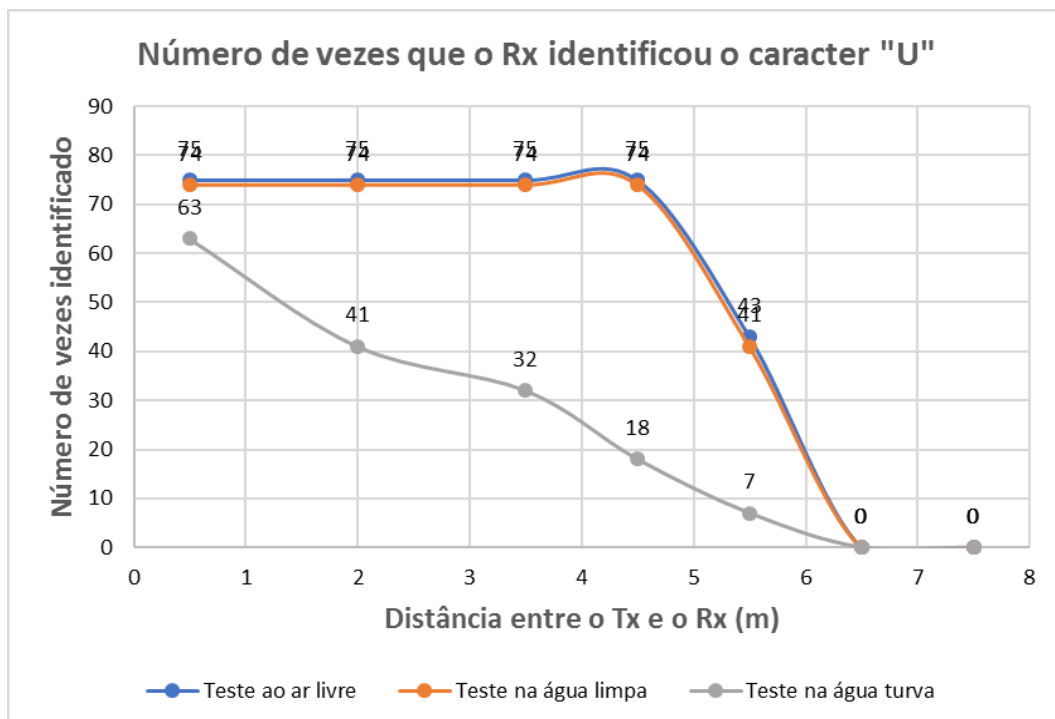


Figura 76: Comparação do número de vezes que o Rx identificou o caracter entre os diferentes canais de comunicação – sem luz ambiente

A configuração para o primeiro teste num ambiente desafiador como a água do mar envolveu inicialmente o alinhamento vertical e horizontal dos blocos transmissor e recetor. No entanto, não foi possível manter inalterável a profundidade entre ambos devido às constantes turbulências da água do mar. Apesar disso, nesse cenário, a presença da luz solar interferiu consideravelmente no circuito recetor, o que dificultou a correta distinção entre a luz emitida pelo transmissor e a luz ambiente. Quando testado na ausência da luz ambiente, o sistema teve melhor desempenho ao detetar o caracter transmitido, porém, considerando o tipo de ambiente subaquático (água turva e com constantes turbulências), o recetor não identificou o caracter com a mesma frequência que os testes realizados num cenário menos desafiador.

#### **5.4. Custo**

O objetivo desta dissertação de mestrado, era desenvolver uma infraestrutura de baixo custo suficiente para experimentalmente validar o desempenho de um sistema de comunicação ótica subaquática, de modo a adaptar à sua utilização num veículo subaquático não tripulado, mas realistas para se adaptar às condições subaquáticas. A etapa inicial desta dissertação envolveu a determinação dos equipamentos físicos e *Software* para aferir o desempenho dos protótipos apresentados. Para se seleccionar o equipamento adequado, foi feita a comparação das opções viáveis a fim de garantir que as especificações corretas fossem seleccionadas para as experiências ao ar livre e em ambiente subaquático.

Ao longo dos capítulos anteriores, foram apresentados os potenciais aspetos de um sistema de comunicação subaquática de baixo custo com ênfase nos sistemas baseados em LEDs. As decisões relativas às seleções dos equipamentos físicos foram baseadas em pesquisas anteriores, familiaridade, disponibilidade e custo.

Após se concluir o desenvolvimento final do protótipo e os respetivos testes práticos correspondentes, foi avaliado o custo de cada componente para se calcular um custo estimado do sistema UWOC - *Underwater Wireless Optical Communication* proposto:

<b>Componente</b>	<b>Custo estimado (€)</b>
2 placas Arduino Atmega328 NANO	10,30
2 Baterias de 9V recarregáveis	9,05
2 Adjustable Output DC Converter Board	9,30
2 Breadboard	6,25
1 Fotodíodo SFH 206 K	1,20
1 3W High Power LED	5,30
1 Transistor 2N2222A	2,30
1 Flip - flop RS CD4043BCN	1,20
5 AMPOP MCP6272	3,20
5 Condensadores de cerâmica	4,50
10 Resistências	1
<b>TOTAL</b>	<b>53,60</b>

Tabela 6: Custo dos componentes do protótipo

## 5.5. Resumo

Este capítulo analisou a viabilidade de estabelecer um *link* de comunicação óptica com e sem a presença da luz ambiente com base nos dimensionamentos apresentados no [capítulo 4](#). Considerando os resultados desses cálculos, foi possível estabelecer uma VLC ou *Visible Light Communication* baseada num LED de alto brilho de 3W e fotodíodo com base em fatores técnicos e ambientais. O objetivo final do protótipo desenvolvido era testá-lo na água, porém, antes disso foram realizados vários testes num ambiente menos desafiador que a água, isso é, inicialmente foram realizados os testes do sistema ao ar livre, onde foi possível efetuar todos os reajustes necessários no circuito transmissor e receptor. Quando testado ao ar livre o sistema apresentou um comportamento satisfatório, viabilizando, assim, o teste do protótipo num canal subaquático. Os testes iniciais foram realizados em água limpa, essas experiências foram conduzidas num tanque de água à temperatura ambiente com e sem luz externa, possibilitando assim avaliar o desempenho do

sistema com base na influência do ruído ambiente originado pela luz ambiente. Em seguida, foram realizados testes num ambiente mais desafiador: a água do mar.

A principal dificuldade encontrada durante as experiências realizadas de dia, seja ao ar livre como em ambiente subaquático, efetivamente foi à presença da luz do sol, sendo uma fonte de luz que interferiu no sistema limitando o desempenho do fotodetector (neste caso, o fotodiodo SFH 206 K), estimulando assim na necessidade de um sistema com boa filtragem ótica em trabalhos futuros.



## **6. Conclusão**

### **6.1. Resumo do trabalho realizado**

A aplicação da Luz visível nas comunicações é um segmento de rápido crescimento no campo da comunicação. Existem muitas vantagens e desafios práticos consideráveis no estabelecimento de uma ligação UWOC, particularmente, entre AUVs. Esta tecnologia conseguirá resolver os problemas de custo, velocidade, largura de banda e perda energética apresentada pelos atuais métodos de comunicação subaquática.

O objetivo desta dissertação centrou-se na criação e implementação de um módulo físico (transmissor e recetor) baseado em LED e fotodíodo, capaz de transmitir informação debaixo da água através da luz visível, de modo a viabilizar um sistema de comunicação de baixo custo entre AUVs. Para atingir esse objetivo, foram seguidas as seguintes etapas:

- Pesquisa preliminar sobre os desafios e restrições apresentadas nos sistemas *Underwater Wireless Optical Communication*;
- Em segundo lugar, o *layout* do sistema foi estudado e selecionado. Nesse processo, alguns circuitos foram projetados para determinar quais os componentes e os seus respetivos valores seriam necessários e convenientes de modo a provar as ideias conceituais;
- Após esses circuitos serem projetados e montados, foram realizados uma série de testes para provar os conceitos aplicados e o bom funcionamento das várias partes dos circuitos.

### **6.2. Objetivos concluídos**

Como a intensidade do sinal recebido é inversamente proporcional ao quadrado da distância entre os módulos transmissor e recetor, os estágios de amplificação e condicionador de sinal foram suficientes para permitir uma transmissão bem - sucedida em até 4,50 m com luz ambiente e 5,30 m na ausência da luz ambiente durante os testes ao ar livre. Ao testar o protótipo na água limpa e com à presença da luz ambiente, foi possível detetar 35 vezes a transmissão constante do caracter “U” até uma distância máxima de 4,5 m e 41 vezes até 5,50 m

na ausência da luz ambiente. Por outro lado, ao ser testado num ambiente com água turva, foi possível detetar 3 vezes a transmissão constante do caracter “U” até uma distância máxima de 3,5 m na presença da luz e 7 vezes até 5,50 m na ausência da luz ambiente. Usando as condições de teste, os dados puderam ser transmitidos com velocidade ou *baud rate* de 300 *bps*. Essa taxa de transmissão foi limitada nesse valor para maximizar o alcance de comunicação.

De modo a alcançar distâncias maiores, duas abordagens foram consideradas: a primeira é que o sinal proveniente do transmissor (LED) precisava de potência relativamente mais alta para enviar os dados as distâncias maiores; a segunda abordagem consistia no facto de quando a distância entre os módulos fosse superior às máximas apresentadas, o fotodetector não conseguia detetar corretamente o sinal na presença e ausência do ruído ambiente. Para tal, era necessário que o fotodíodo tivesse maior sensibilidade na gama de comprimento de onda da luz visível transmitida (440 nm – 485 nm) e, um tempo de resposta a luz visível menor que 2 ns.

Dependendo da localização, hora do dia, conteúdo orgânico e inorgânico, bem como variações temporais, a água tem propriedades óticas amplamente variáveis. A perda de energia ótica surge tanto da absorção quanto do espalhamento. A dispersão também causou um impacto negativo na comunicação, introduzindo assim a dispersão de múltiplas trajetórias no sinal. Por outro lado, as impurezas dissolvidas presentes na água incluindo as partículas orgânicas e inorgânicas influenciaram na atenuação do sinal. Todavia, no final deste projeto, foi possível enviar e receber mensagens de texto entre dois terminais dentro e fora da água por meio da luz visível.

Segundo os resultados das experiências realizadas na água, uma solução para os sistemas UWOC de baixo custo baseada em LED é suficiente para lidar com a atenuação em curta distância. Outras questões também devem ser consideradas, como o campo de visão e a faixa do espectro visível do recetor.

Portanto, comparando os objetivos iniciais do projeto com os resultados práticos obtidos, alinhado com o facto de o protótipo ter sido testado em diferentes canais de comunicação ótica, pode-se afirmar que os objetivos centrais desta dissertação foram alcançados.

### 6.3. Trabalho futuro

Esta dissertação visou explorar os atuais desenvolvimentos de um sistema de comunicação ótica subaquática com a utilização dos mais recentes desenvolvimentos da tecnologia LED a fim de obter uma solução de baixo custo ideal para implementar num veículo subaquático como, por exemplo, uma AUV ou à sua implementação como testes iniciais no projeto SABUVIS - *Swarm of Biomimetic Underwater Vehicles for Surveillance and Reconnaissance*.

A camada física e a programação introduzida neste trabalho estabelecem as bases para futuras pesquisas e melhorias desse sistema de comunicação ótica de baixo custo, especialmente para o ambiente subaquático. Embora tenha sido alcançada a implementação funcional do protótipo, ainda é possível determinar melhorias a serem adicionadas. Neste tópico, é possível delinear dois conjuntos de implementações futuras - aquelas que correspondem à melhoria da camada física e, melhorias ao nível da programação:

- Melhorar o bloco recetor para aumentar ainda mais a distância de comunicação entre o bloco transmissor e recetor;
- Implementar um sistema omnidirecional, com vários LEDs e fotodíodos, que permita a comunicação independentemente da posição e orientação dos veículos;
- Utilizar uma matriz de LEDs e fotodíodos para tornar viável a transmissão - receção de dados de maior volume, como imagens, áudio e vídeos. Além disso, fornecerá mais liberdade de movimento dos veículos autónomos, diminuindo, assim, o requisito “alinhamento” entre o transmissor e o recetor. A largura do feixe do LED é maior que a do LASER, portanto, isso reduz ainda mais a precisão de orientação necessária para se estabelecer a comunicação;
- Uma extensão seria explorar a execução de algoritmo de controlo de alinhamento, onde os transdutores seriam montados, por exemplo, em dois veículos não tripulados. O problema de controlo do alinhamento entre o bloco transmissor e recetor representa outra direção digna de exploração para trabalho futuro;
- O sistema atual não permite comunicação em modo *full-duplex*. Uma

melhoria adicional do protótipo seria torná-lo prático para esse modo de comunicação. Estudar a interferência que a luz emitida por um veículo pode ter no sinal recebido pelo mesmo. Em modo *full duplex* seria possível ao remetente da mensagem obter a confirmação do destinatário de que a mensagem foi recebida.

- Por fim, outro foco de trabalho futuro seria a realização dos testes em diferentes condições diurnas e em água com diferente turbidez, de modo a avaliar se a solução é robusta o suficiente para atender às necessidades de aplicações reais.

## 7. Lista Bibliográfica

- Ahmad, Z., & Green, R. (2012). Link design for multi-hop underwater optical wireless sensor network. *ICSNC 2012 : The Seventh International Conference on Systems and Networks Communications, c*, 65–70.  
file:///C:/Users/non/Downloads/icsnc\_2012\_3\_40\_20197.pdf
- Akyildiz, I. F., Pompili, D., & Melodia, T. (2005). Underwater acoustic sensor networks: Research challenges. *Ad Hoc Networks*, 3(3), 257–279.  
<https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2005.01.004>
- Al-Shamma'a, A. I., Shaw, A., & Saman, S. (2004). Propagation of electromagnetic waves at MHz frequencies through seawater. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 52(11), 2843–2849. <https://doi.org/10.1109/TAP.2004.834449>
- Altget, C. A. (1989). *The World ' S Largest " Radio " Station*. 1, 1–9.
- Andrade, D., Gomes, J. P., & André, P. S. (2019). Implementation of a visible light communication link: Li-Fi with smartphone detection. *PHOTOPTICS 2019 - Proceedings of the 7th International Conference on Photonics, Optics and Laser Technology*, 315–325. <https://doi.org/10.5220/0007691303150319>
- Anguita, D., Brizzolara, D., Ghio, A., & Parodi, G. (2008). Smart plankton: A nature inspired underwater wireless sensor network. *Proceedings - 4th International Conference on Natural Computation, ICNC 2008*, 7, 701–705.  
<https://doi.org/10.1109/ICNC.2008.634>
- Anguita, D., Brizzolara, D., & Parodi, G. (2010). Optical Wireless Communication for Underwater Wireless Sensor Networks: Hardware Modules and Circuits Design and Implementation. *9th WSEAS International Conference on Telecommunications and Informatics, TELE-INFO '10*, 1–8.
- Araújo, H. F. R. (2020). *Projeto e desenvolvimento de um veículo autónomo biomimético de subsuperfície* [Escola Naval].  
<https://comun.rcaap.pt/bitstream/10400.26/34174/1/511> - ASPOF EN-AEL Rocha Araújo.pdf
- Arnon, S. (2008). Underwater optical wireless communication network. *Optical Engineering*, 49(1), 1–15.  
[https://www.academia.edu/4364160/Underwater\\_optical\\_wireless\\_communication\\_network](https://www.academia.edu/4364160/Underwater_optical_wireless_communication_network)
- Atef, M., Swoboda, R., Zimmermann, H., & Member, S. (2012). *Real-Time 1.25-Gb/s Transmission Over 50-m SI-POF Using a Green Laser Diode*. 24(15), 1331–1333.  
<https://doi.org/10.1109/LPT.2012.2203119>
- Au, W. W. L., Nachtigall, P. E., & Pawloski, J. L. (1997). *Acoustic effects of the ATOC signal (75 Hz, 195 dB) on dolphins and whales*.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1121/1.419304>
- Azevedo, D. O. M. (2013). *Controlo de um Veículo Autónomo Submarino Biomimético*. Escola Naval.
- Azul, E. (2021). *ZEE Ranking - Países com maiores Zona Económica Exclusivas(ZEE)*.  
<https://www.economiaazul.pt/blogue/2021/1/13/zee-ranking-paises-com-maiores-zonas-economicas-exclusivas-zee>
- Benthos, T. (n.d.). *Benthos ATM-900 Series*. Retrieved February 22, 2021, from <http://www.teledynemarine.com/acoustic-modems/>
- Brundage, H., & Brundage, H. (2010). *Designing a wireless underwater optical communication system* [Massachusetts Institute of Technology].  
<https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/57699>
- Chancey, M. A. (2005). *Short Range Underwater Optical Communication Links*. North Carolina State University.
- Chen, Y., Pan, W. Y., Peng, H. Y., & Zhang, H. Q. (2010). The ELF/VLF field at the depth of submarine excited by satellite electropuls. *2010 9th International Symposium on Antennas Propagation and EM Theory, ISAPE 2010*, 505–508.

- <https://doi.org/10.1109/ISAPE.2010.5696513>
- Chitre, M., Shahabudeen, S., & Stojanovic, M. (2008). Underwater acoustic communications and networking: Recent advances and future challenges. *Marine Technology Society Journal*, 42(1), 103–116. <https://doi.org/10.4031/002533208786861263>
- Cochenour, B. M., Mullen, L. J., & Laux, A. E. (2008). Characterization of the beam-spread function for underwater wireless optical communications links. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 33(4), 513–521. <https://doi.org/10.1109/JOE.2008.2005341>
- Cochenour, B., Mullen, L., & Laux, A. (2007). Phase coherent digital communications for wireless optical links in turbid underwater environments. *Oceans Conference Record (IEEE)*, 1(1), 1–5. <https://doi.org/10.1109/OCEANS.2007.4449173>
- Cochenour, B., Mullen, L., Laux, A., & Curran, T. (2006). Effects of multiple scattering on the implementation of an underwater wireless optical communications link. *Oceans 2006*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/OCEANS.2006.306863>
- Cochenour, B., Mullen, L., & Muth, J. (2010). Effect of scattering albedo on attenuation and polarization of light underwater. *Optics Letters*, 35(12), 2088–2090. <https://doi.org/10.1364/ol.35.002088>
- Cossu, G., Sturniolo, A., Messa, A., Scaradozzi, D., & Ciaramella, E. (2018). Full-Fledged 10Base-T Ethernet Underwater Optical Wireless Communication System. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 36(1), 194–202. <https://doi.org/10.1109/JSAC.2017.2774702>
- Doniec, M., Detweiler, C., Vasilescu, I., & Rus, D. (2010). Using optical communication for remote underwater robot operation. *IEEE/RSJ 2010 International Conference on Intelligent Robots and Systems, IROS 2010 - Conference Proceedings*, 4017–4022. <https://doi.org/10.1109/IROS.2010.5650224>
- Doniec, M., & Rus, D. (2010). BiDirectional optical communication with AquaOptical II. *12th IEEE International Conference on Communication Systems 2010, ICCS 2010*, 390–394. <https://doi.org/10.1109/ICCS.2010.5686513>
- DSPComm. (n.d.). *AquaComm*. Retrieved February 22, 2021, from <https://www.dspcommgen2.com/aquacomm-underwater-wireless-modem/>
- Duntley, S. Q. (1963). Light in the Sea. *Journal of the Optical Society of America*, 53(2), 214–233. <https://doi.org/10.1364/josa.53.000214>
- Evologics. (2015). Modem R-Series: Underwater Acoustic Modems. *IEEE Sensors Journal*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2015.2434890>
- Frater, M. R., Ryan, M. J., & Dunbar, R. M. (2006). Electromagnetic communications within swarms of autonomous underwater vehicles. *WUWNet 2006 - Proceedings of the First ACM International Workshop on Underwater Networks, 2006*, 64–70. <https://doi.org/10.1145/1161039.1161053>
- Freitag, L., Grund, M., Singh, S., Partan, J., Koski, P., & Ball, K. (2005). The WHOI Micro-Modem: An acoustic communications and navigation system for multiple platforms. *Proceedings of MTS/IEEE OCEANS, 2005, 2005*, 1086–1092. <https://doi.org/10.1109/OCEANS.2005.1639901>
- Ghassemlooy, Z., Member, S., Arnon, S., Member, S., Uysal, M., Member, S., Xu, Z., Member, S., Cheng, J., & Member, S. (2015). *Communications-Advances and Challenges*. 33(9), 1738–1739.
- Gilbert, G. D., Stoner, T. R., & Jernigan, J. L. (1966). Underwater Experiments On The Polarization, Coherence, And Scattering Properties Of A Pulsed Blue-Green Laser. *Underwater Photo Optics I, 0007*, 8–14. <https://doi.org/10.1117/12.971001>
- Góis, P., Sreekantaswamy, N., Basavaraju, N., Rufino, M., Sebastião, L., Botelho, J., Gomes, J., & Pascoal, A. (2016). Development and validation of blue ray, an optical modem for the MEDUSA class AUVs. *3rd Underwater Communications and Networking Conference, Ucomms 2016*, 3–7. <https://doi.org/10.1109/UComms.2016.7583455>
- Grilo, C., Saldanha, F., & Calado, G. (2017). *O VALOR DOS OCEANOS*. [https://content.gulbenkian.pt/wp-content/uploads/2017/10/25113516/GulbenkianBrochura\\_ValorOceanos\\_PTweb.pdf](https://content.gulbenkian.pt/wp-content/uploads/2017/10/25113516/GulbenkianBrochura_ValorOceanos_PTweb.pdf)

- H. Kulhandjian. (2015). Inside out: Underwater communications. *2015 IEEE Underwater Technology, UT 2015*, 104–105. <https://doi.org/10.1109/UT.2015.7108234>
- H. Ochi, Y. W., & T. Shimura. (2005). *Basic Study of Underwater Acoustic Communication Using 32-Quadrature Amplitude Modulation*. 4689–4693. <https://iopscience.iop.org/article/10.1143/JJAP.44.4689>
- Han, S., Noh, Y., Lee, U., & Gerla, M. (2019). Optical-acoustic hybrid network toward real-time video streaming for mobile underwater sensors. *Ad Hoc Networks*, 83, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2018.08.020>
- Hanson, F., & Radic, S. (2008). High bandwidth underwater optical communication. *Applied Optics*, 47(2), 277–283. <https://doi.org/10.1364/AO.47.000277>
- Herji, E. A. (2018). *Desenho e estudo de um sistema de comunicação ótica subaquático Engenharia Eletrotécnica e de Computadores*. 1–122.
- Hou, R., Chen, Y., Wu, J., & Zhang, H. (2015). A Brief Survey of Optical Wireless Communication. *Conferences in Research and Practice in Information Technology Series*, 163(January), 41–50.
- Inc, L. (n.d.). *SoundLink underwater acoustic modem*. <http://offshorerental.no/wp-content/uploads/2013/08/Linkquest-underwater-modem.pdf>
- Jaruwatanadilok, S. (2008). Channel Modeling and Performance Evaluation using Vector Radiative Transfer Theory. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 26(9), 1620–1627. <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4686801>
- Jr, W. C. C. (2007). *A 1 Mbps Underwater Communication System Using a 405 nm Laser Diode and photomultiplier Tube*. North Carolina State University.
- Karp, S. (1976). Optical Communications Between Underwater and Above Surface (Satellite) Terminals. *IEEE Transactions on Communications*, 24(1), 66–81. <https://doi.org/10.1109/TCOM.1976.1093200>
- Kaushal, H., & Kaddoum, G. (2016). Underwater Optical Wireless Communication. *IEEE Access*, 4, 1518–1547. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2016.2552538>
- Lake, C. (2001). *Extremely Low Frequency Transmitter Site Clam Lake, Wisconsin*. 1–4.
- Lanbo Liu, S. Z. and J.-H. C. (2008). Prospects and problems of wireless communication for underwater sensor networks. *Wireless Communications and Mobile Computing, July 2008*, 977–994. <https://doi.org/10.1002/wcm>
- Lisboa, O. de. (2021). *MAPA PORTUGAL É MAR*. <https://www.oceanario.pt/educacao/materiais/>
- Liu, W., Xu, Z., & Yang, L. (2015). SIMO detection schemes for underwater optical wireless communication under turbulence. *Photonics Research*, 3(3), 48–53. <https://doi.org/10.1364/prj.3.000048>
- Lopes, E., & SAER. (2009). *Hypercluster da Economia do Mar - Um domínio de potencial estratégico para o desenvolvimento da economia portuguesa*.
- Maritime, K. (n.d.). *CNODE – Modem MINIS*. Retrieved February 22, 2021, from <https://www.kongsberg.com/maritime/products/Acoustics-Positioning-and-Communication/modems/cnode-minis?OpenDocument>
- Moriconi, C., & Cupertino, I. G. (2015). *Hybrid Acoustic / Optic Communications in Underwater Swarms*. 1–7.
- Mullen, L., Cochenour, B., Rabinovich, W., Mahon, R., & Muth, J. (2009). Backscatter suppression for underwater modulating retroreflector links using polarization discrimination. *Applied Optics*, 48(2), 328–337. <https://doi.org/10.1364/AO.48.000328>
- Mullen, L., Laux, A., & Cochenour, B. (2009). Propagation of modulated light in water: Implications for imaging and communications systems. *Applied Optics*, 48(14), 2607–2612. <https://doi.org/10.1364/AO.48.002607>
- Nakamura, K., Mizukoshi, I., & Hanawa, M. (2015). Optical wireless transmission of 405 nm, 1.45 Gbit/s optical IM/DD-OFDM signals through a 4.8 m underwater channel. *Optics Express*, 23(2), 1558–1566. <https://doi.org/10.1364/oe.23.001558>
- Nazar, A. M. (2020). *Fundamental Review of Current Emerging Technology in The Field of Underwater Wireless Communication*. 1–15.

- <http://ocedu.zju.edu.cn/bkspy//attachments/2020-06/01-1591779601-661787.pdf>
- Oubei, Hassan M., Duran, J. R., Janjua, B., Wang, H.-Y., Tsai, C.-T., Chi, Y.-C., Ng, T. K., Kuo, H.-C., He, J.-H., Alouini, M.-S., Lin, G.-R., & Ooi, B. S. (2015). 48 Gbit/s 16-QAM-OFDM transmission based on compact 450-nm laser for underwater wireless optical communication. *Optics Express*, 23(18), 23302. <https://doi.org/10.1364/oe.23.023302>
- Oubei, Hassan Makine, Li, C., Park, K.-H., Ng, T. K., Alouini, M.-S., & Ooi, B. S. (2015). 2.3 Gbit/s underwater wireless optical communications using directly modulated 520 nm laser diode. *Optics Express*, 23(16), 20743. <https://doi.org/10.1364/oe.23.020743>
- Pontbriand, C., Farr, N., Hansen, J., Kinsey, J. C., Pelletier, L. P., Ware, J., & Fourie, D. (2016). Wireless data harvesting using the AUV Sentry and WHOI optical modem. *OCEANS 2015 - MTS/IEEE Washington, August 2014*, 1–6. <https://doi.org/10.23919/oceans.2015.7401985>
- Regresso a Lisboa dos prisioneiros de guerra do NRP Afonso de Albuquerque*. (2012, February). [https://www.marinha.pt/conteudos\\_externos/Revista\\_Armada/PDF/2012/RA460.pdf](https://www.marinha.pt/conteudos_externos/Revista_Armada/PDF/2012/RA460.pdf)
- Saeed, N., Celik, A., Al-Naffouri, T. Y., & Alouini, M. S. (2018). Underwater optical wireless communications, networking, and localization: A survey. *ArXiv*, 1–40. <https://arxiv.org/pdf/1803.02442.pdf>
- Schill, F. S. (2007). *Distributed Communication in Swarms of Autonomous Underwater Vehicles*. July. <https://infoscience.epfl.ch/record/183533>
- Selvarasan, R., Subramani, G., Karthik, S., & Sridhar, K. (2016). *Efficient RF Transceiver System for Underwater Submarine System*. 24(May 2009), 29–32. <https://doi.org/10.5829/idosi.mejsr.2016.24.RIETMA106>
- Simpson, J. A. (2007). A 1 Mbps Underwater Communications System using LEDs and Photodiodes with Signal Processing Capability. *ReVision, Master of*. <http://repository.lib.ncsu.edu/ir/handle/1840.16/2713>
- Snow, J. B., Flatley, J. P., Freeman, D. E., Landry, M. A., Lindstrom, C. E., Longacre, J. R., & Schwartz, J. A. (1992). *Underwater propagation of high-data-rate laser communications pulses*. 1750, 419–427. <https://doi.org/10.1117/12.140670>
- Song, H. C., & Hodgkiss, W. S. (2013). *Efficient use of bandwidth for underwater acoustic communication*. 134, 905–908. <https://doi.org/https://doi.org/10.1121/1.4812762>
- Stojanovic, M. (1996). *Recent advances in high-speed underwater acoustic communications*. 21(2), 125–136.
- Tsonev, D., Videv, S., & Haas, H. (2015). Towards a 100 Gb/s visible light wireless access network. *Optics Express*, 23(2), 1627–1637. <https://doi.org/10.1364/oe.23.001627>
- Wiener, T. F., & Karp, S. (1980). The Role of Blue/Green Laser Systems in Strategic Submarine Communications. *IEEE Transactions on Communications*, 28(9), 1602–1607. <https://doi.org/10.1109/TCOM.1980.1094858>
- William Charles Cox, J. (2012). *Simulation, Modeling, and Design of Underwater Optical Communication Systems* [North Carolina State University]. <http://www.lib.ncsu.edu/resolver/1840.16/7588>
- Wu, T. C., Chi, Y. C., Wang, H. Y., Tsai, C. T., & Lin, G. R. (2017). Blue laser diode enables underwater communication at 12.4 gbps. *Scientific Reports*, 7(December 2016), 1–10. <https://doi.org/10.1038/srep40480>
- Xiaobin, S., Hong Kang, C., Kong, M., Alkhazragi, O., Guo, Y., Ouhssain, M., Weng, Y., Jones, B. H., Khee Ng, T., Ooi, B. S., Sun, X., Kang, C. H., Kong, M., Alkhazragi, O., Guo, Y., Weng, Y., Ouhssain, ) M, Jones, B. H., Ng, T. K., & Ooi, B. S. (2020). A Review on Practical Considerations and Solutions in Underwater Wireless Optical Communication. *JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY*, 38(2), 421–427. <https://doi.org/10.1109/JLT.2019.2960131>
- Xu, J., Song, Y., Yu, X., Lin, A., Kong, M., Han, J., & Deng, N. (2016). Underwater wireless transmission of high-speed QAM-OFDM signals using a compact red-light laser. *Optics*

- Express*, 24(8), 8097– 8109. <https://doi.org/10.1364/oe.24.008097>
- Yin, H., Li, Y., Xing, F., Wu, B., Zhou, Z., & Zhang, W. (2019). Hybrid acoustic, wireless optical and fiber-optic underwater cellular mobile communication networks. *International Conference on Communication Technology Proceedings, ICCT, 2019-October*, 721–726. <https://doi.org/10.1109/ICCT.2018.8599957>
- Zeng, Z. (2015). A Survey of Underwater Wireless Optical Communication. In *Solid-State Circuits Conference, 2008. ISSCC 2008. Digest of Technical Papers. IEEE International* (Issue December). <https://open.library.ubc.ca/cIRcle/collections/ubctheses/24/items/1.0220823>
- Zeng, Z., Fu, S., Zhang, H., & Cheng, J. (2017). A Survey of Underwater Optical wireless communications. *Signals and Communication Technology*, 19(1), 204–238. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-78942-2\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-319-78942-2_2)
- Zielinski, A., Yoon, Y.-H., & Wu, L. (1995). *Performance analysis of digital acoustic communication in a shallow water channel*. 2. <https://doi.org/10.1109/48.468243>



## Apêndice A – Folha de dados dos componentes usados no Tx e Rx

<b>Componente</b>	<b>Fonte</b>
<i>Atmega328 – NANO</i>	<a href="http://www.farnell.com/datasheets/1682238.pdf">http://www.farnell.com/datasheets/1682238.pdf</a>
Transistor 2N2222A	<a href="https://www.farnell.com/datasheets/296640.pdf">https://www.farnell.com/datasheets/296640.pdf</a>
<i>3W High Power LED</i>	<a href="https://foton.ua/upload/datasheet/3w/3W%20High%20Power%20LED.pdf">https://foton.ua/upload/datasheet/3w/3W%20High%20Power%20LED.pdf</a>
Fotodíodo SFH 206 K	<a href="http://www.farnell.com/datasheets/26602.pdf">http://www.farnell.com/datasheets/26602.pdf</a>
AMPOP <i>MCP6272</i>	<a href="https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/20001810G.pdf">https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/20001810G.pdf</a>
<i>Flip-flop RS CD4043BCN</i>	<a href="https://www.ti.com/product/CD4043B">https://www.ti.com/product/CD4043B</a>
Bateria de 9V	<a href="https://pt.aliexpress.com/item/4000193338971.html?spm=a2g0o.productlist.0.0.15de40d1ZDWQS8&amp;algo_pvid=6a14bc2b-5a27-4aa2-bb84-a3667da93d48&amp;algo_exp_id=6a14bc2b-5a27-4aa2-bb84-a3667da93d48-19">https://pt.aliexpress.com/item/4000193338971.html?spm=a2g0o.productlist.0.0.15de40d1ZDWQS8&amp;algo_pvid=6a14bc2b-5a27-4aa2-bb84-a3667da93d48&amp;algo_exp_id=6a14bc2b-5a27-4aa2-bb84-a3667da93d48-19</a>
<i>Adjustable Output DC Converter Board</i>	<a href="https://www.amazon.com/Davitu-Module-Board-Relay-Adjustable/dp/B08NHDRHCV">https://www.amazon.com/Davitu-Module-Board-Relay-Adjustable/dp/B08NHDRHCV</a>
Osciloscópio <i>Tektronix TDS 1002B</i>	<a href="https://www.ebay.com/p/96937765">https://www.ebay.com/p/96937765</a>



## Apêndice B – Código em Arduino usado nas experiências ao ar livre

### B.1 – Código para transmissão dos primeiros *bits*

```
1  const byte RxDadoPino = 2;    // Pino para Rx dos bits
2  const byte TxDadoPino = 3;    // Pino para Tx dos bits
3  const char *mensagem = "h";  // 01001000
4
5  #include <SoftwareSerial.h>   // Biblioteca para comm serial
6  SoftwareSerial mySerial(2, 3); //Portas digitais para RX, TX
7
8  void setup() {
9    Serial.begin(9600);        //8N2: 8 bits de dados, Sem paridade,
10                               //1 stop bit
11    mySerial.begin(300);       // Taxa de transmissão (bps)
12 }
13
14 void loop() {
15   mySerial.print(mensagem);
16 }
```

### B.2.1 – Código para transmissão dos dados

```
1  #include <SoftwareSerial.h>
2  #define rx 2
3  #define tx 3
4  SoftwareSerial XSERIAL = SoftwareSerial(rx, tx, true);
5  void setup()
6  {
7    Serial.begin(300);
8    XSERIAL.begin(300);
9    Serial.println("\t Inseri a mensagem: \n");
10 }
11
12 void loop()
13 {
14   while(Serial.available())
15   {
16     char mensagem = Serial.read();
17     Serial.print(mensagem);
18     XSERIAL.print(mensagem);
19   }
20 }
```

## B.2.2 - Código para recepção dos dados

```
1  #include <SoftwareSerial.h>
2  #define rx 2
3  #define tx 3
4
5  SoftwareSerial mySerial(2,3,true); // RX, TX
6
7  void setup()
8  {
9  Serial.begin(300);
10 Serial.println("\tRecebendo a mensagem...\n");
11 mySerial.begin(300);
12 }
13
14 void loop()
15 {
16   if (mySerial.available())
17   {
18     char saida = mySerial.read();
19     Serial.write(saida);
20   }
21 }
```

## Apêndice C – Código em Arduino usado nos ensaios dentro da água

### C.1 – Código para transmissão do caracter “U”

```
1  const byte RxDadoPino = 2;    // Pino para Rx dos bits
2  const byte TxDadoPino = 3;    // Pino para Tx dos bits
3  const char *mensagem = "U";  // 01001000
4
5  #include <SoftwareSerial.h>   // Biblioteca para comm serial
6  SoftwareSerial mySerial(2, 3); //Portas digitais para RX, TX
7
8  void setup() {
9    Serial.begin(9600);         //8N2: 8 bits de dados, Sem paridade,
10                               //1 stop bit
11    mySerial.begin(300);       // Taxa de transmissão(bps)
12 }
13
14 void loop() {
15   mySerial.print(mensagem);
16 }
```

## C.2 – Código para recepção dos dados com a EEPROM

```
1  #include <EEPROM.h>
2  #include <SoftwareSerial.h>
3  #define rx 2
4  #define tx 3
5  #define taxa_transmissao 300
6  #define posicao_contador 10 // contador ficará localizado na
7                             // posição 10 da EEPROM
8
9  SoftwareSerial mySerial(2,3,true); // RX, TX
10 void setup() {
11
12  for(int i = 0; i<1024; i++){ EEPROM.write(i,0);} // para
13 // limpar EEPROM: Somente deve ser executado uma única vez.
14
15  Serial.begin(taxa_transmissao);
16  mySerial.begin(300);
17  byte posicao = EEPROM.read(posicao_contador); // Verifica
18 // quantos bytes estão armazenados na EEPROM
19
20 // Envia o conteúdo da EEPROM pela porta série:
21  Serial.println("Conteúdo da EEPROM:");
22  for(byte i = 0; i < posicao; i++)
23  {
24    byte val = EEPROM.read(i); // Valor guardado na EEPROM na
25                                // posição i
26    Serial.print(val);
27    Serial.print(" ");
28  }
29  Serial.println("");
30
31  // Inicio do ciclo para armazenar o caracter transmitido
32  byte contagem = 0; // armazena o número de caracteres iguais
33 // que foram recebidos
34  unsigned long tempol = millis();
35  while( millis() - tempol < 3000) // para ser executado
36 //durante 3 segundos
37  {
38    char mensagem = mySerial.read();
39    if (mensagem == 'U')
40    {
41      contagem++;
42    }
43  }
44
45  EEPROM.write(contador, contagem);
46
47  contador++;
48  EEPROM.write(posicao_contador, contador);
49  Serial.write(posicao_contador);
50 }
51 void loop() {
52 }
53 }
54 }
```

## Anexo I – Lista de material do circuito recetor do protótipo I

A lista abaixo, apresenta os valores dos componentes utilizados na implementação do circuito recetor:

- Fotodíodo SFH206K;
- AMPOP MCP6272;
- Flip-Flop RS CD4043BCN;
- Díodo 1N4148;
- C1: Condensador de cerâmica de 27  $pF$ ;
- C2: Condensador de cerâmica de 220  $nF$ ;
- C3: Condensador de cerâmica de 3,8  $pF$ ;
- C4: Condensador de cerâmica de 100  $nF$ ;
- R3: Resistência de 1  $M\Omega$ ;
- R4: Resistência de 680  $\Omega$ ;
- R4.1: Resistência de 1  $k\Omega$ ;
- R4.2: Resistência de 18  $k\Omega$ ;
- R5: Resistência de 10  $k\Omega$ ;
- R6: Resistência de 10  $k\Omega$ ;
- R7: Resistência de 1  $k\Omega$ ;
- R8: Resistência de 18  $k\Omega$ .



## Anexo II – Lista de material do circuito recetor do protótipo II

A lista abaixo, apresenta os valores dos componentes utilizados na implementação do circuito recetor:

- Fotodíodo SFH206K;
- AMPOP MCP6272;
- Flip-Flop RS CD4043BCN;
- Díodo 1N4148;
- C1: Condensador de cerâmica de 27 *pF*;
- C2: Condensador de cerâmica de 2,2 *nF*;
- C3: Condensador de cerâmica de 68 *pF*;
- C4: Condensador de cerâmica de 100 *nF*;
- C5: Condensador de cerâmica de 100 *nF*;
- R3: Resistência de 1,8 *MΩ*;
- R4: Resistência de 10 *MΩ*;
- R5: Resistência de 1 *kΩ*;
- R6: Resistência de 10 *kΩ*;
- R7: Resistência de 10 *kΩ*;
- R8: Resistência de 10 *kΩ*;
- R9: Resistência de 1 *kΩ*;
- R10: Resistência de 10 *kΩ*.