

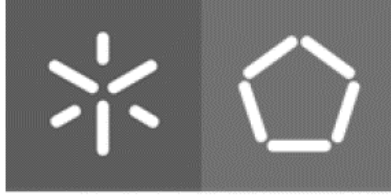


Universidade do Minho
Escola de Engenharia

João Carlos da Silva Peixoto

**Desenvolvimento de controlo
remoto para ancoragem
oceânica**

maio de 2023



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

João Carlos da Silva Peixoto

**Desenvolvimento de controlo
remoto para ancoragem
oceânica**

Dissertação de Mestrado
Engenharia Eletrónica Industrial e
Computadores

Trabalho efetuado sob a orientação do
Professor Doutor Luís Gonçalves

maio de 2023

DIREITOS DE AUTOR E CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DO TRABALHO POR TERCEIROS

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

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

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



Atribuição-NãoComercial-Compartilhalgual
CC BY-NC-SA

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

Agradecimentos

No final desta jornada que foi o curso e todo este processo de realização desta dissertação, não posso de deixar de agradecer a todos que contribuíram à sua maneira para a finalização dos mesmos.

Gostaria de começar por agradecer à minha mãe, o meu maior apoio e suporte em todas as etapas da minha vida, a pessoa que fez com que tudo isto fosse possível, e que me inspira diariamente a ser melhor. Sem todo o suporte, apoio financeiro, amor e ensinamentos nada disto teria sido possível. À minha irmã Joana, agradecer por ser a melhor amiga que podia ter, em tudo que preciso e precisar sei que esteve e estará lá sempre para mim, sem ela também nada teria sido possível.

Ao meu orientador, Dr. Luís Gonçalves, o meu maior obrigado por todo o conhecimento, paciência e ajuda em toda esta jornada, a sua experiência e o seu *know-how* foram cruciais para todo este processo e desenvolvimento académico e profissional da minha pessoa.

Gostaria de agradecer aos meus amigos que percorreram este caminho todo comigo. Ao André, David, João Rodrigo, Cachetas, Chico, Rui, Marcelo e Carolina, o meu obrigado por tudo, seja numa noite académica, seja numa noite a estudar ou a fazer trabalhos, estiveram sempre lá e levo todos estes momentos comigo para a vida. Grato por ser vosso amigo.

Finalmente ao membro mais recente do meu núcleo mais próximo, a minha namorada Diana, obrigado por a partir do momento que entraste na minha vida tornares este processo mais fácil, saber que em ti tinha sempre uma fonte de força e apoio foi uma ajuda crucial nos bons e maus momentos.

O meu maior obrigado a todos.

STATEMENT OF INTEGRITY

I hereby declare having conducted this academic work with integrity. I confirm that I have not used plagiarism or any form of undue use of information or falsification of results along the process leading to its elaboration. I further declare that I have fully acknowledged the Code of Ethical Conduct of the University of Minho.

Resumo

A presente dissertação de Mestrado está inserida no projeto ATLANTIDA, um projeto que engloba a Universidade do Minho, a Universidade do Porto e a Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, que tem como objetivo o desenvolvimento de uma plataforma de monitorização do Oceano Atlântico e a criação de ferramentas que permitam uma exploração cuidada e sustentável dos recursos marinhos.

O trabalho realizado consiste então no desenvolvimento de um controlo remoto capaz de ser utilizado em aplicações aquáticas, nomeadamente em libertadores acústicos, para permitir agilizar e automatizar o processo de libertação acústica que permite o estudo e análise de comportamentos de determinados substratos de colonização em ambiente marinho, durante largos períodos de tempo. Este é constituído por dois módulos principais: um emissor e um recetor eletrónico, sendo a comunicação feita através de dois transdutores ultrassónicos.

É realizado o estudo, dimensionamento e orientação da totalidade dos módulos com o objetivo de obter os melhores resultados possíveis. O desenvolvimento do sistema final engloba o dimensionamento de todo o *hardware* e *software* necessário para o correto funcionamento do sistema, como para a atuação dos transdutores, e para receção e processamento dos sinais recebidos.

Palavras-chave: Libertação Acústica, Comunicação Subaquática, Ancoragem Oceânica

Abstract

This Master's dissertation is part of the ATLANTIDA project, which involves the University of Minho, the University of Porto, and the University of Trás-os-Montes and Alto Douro. The project aims to develop a monitoring platform for the Atlantic Ocean and create tools that allow for careful and sustainable exploration of marine resources.

The work carried out consists of developing a remote control that can be used in aquatic applications, particularly in acoustic releasers, to streamline and automate the acoustic release process, which allows for the study and analysis of colonization substrates in marine environments for extended periods of time. The remote control is made up of two main modules: an electronic transmitter and receiver, with communication taking place through two ultrasonic transducers.

The study, sizing, and orientation of all modules are carried out with the aim of achieving the best possible results. The development of the final system includes the sizing of all necessary hardware and software for the proper functioning of the system, as well as for the operation of the transducers and the reception and processing of received signals.

Keywords: Acoustic Release, Underwater Communication, Oceanic Anchoring

Conteúdo

Lista de Figuras	ix
Lista de Tabelas	x
Glossário	x
1 Introdução	1
1.1 Enquadramento	1
1.2 Motivação	1
1.3 Objetivos	2
1.4 Aplicações	2
1.5 Organização da dissertação	3
2 Estado da Arte	4
2.1 Mercado Atual	4
2.2 Técnicas de Libertação	6
2.2.1 Motor de alto binário	6
2.2.2 <i>Link</i> fusível	6
2.2.3 Erosão Eletrolítica	7
2.3 Comunicações subaquáticas	7
2.3.1 Comunicações Óticas	8
2.3.2 Comunicações Eletromagnéticas	9
2.3.3 Comunicações Acústicas	10
2.3.4 Resumo	11
3 Fundamentos Teóricos	12
3.1 Propagação do som em meio aquático	12
3.1.1 Atraso de propagação	12
3.1.2 Atenuação	13
3.1.3 Ruído	13

3.1.4	Efeito de <i>Doppler</i>	14
3.1.5	Multi-percurso	15
3.1.6	Bolhas	15
3.2	Técnicas de modulação	15
3.2.1	Modulação Analógica	16
3.2.1.1	Modulação em Amplitude (AM)	17
3.2.1.2	Modulação em Frequência (FM)	17
3.2.1.3	Modulação em Fase (PM)	18
3.2.2	Modulação Digital	19
3.2.2.1	Modulação ASK	19
3.2.2.2	Modulação FSK	20
3.2.2.3	Modulação PSK	21
4	Desenvolvimento	22
4.1	Transdutores ultrassónicos	22
4.1.1	Características dos transdutores utilizados	22
4.1.2	Caracterização dos transdutores	23
4.1.2.1	Variações na frequência do sinal de entrada	24
4.1.2.2	Variações na distância entre emissor e recetor	25
4.1.2.3	Variações no alinhamento do emissor em relação ao recetor	26
4.1.2.4	Conclusão sobre a caracterização dos transdutores	26
4.2	Recetor eletrónico	27
4.2.1	Filtro passa-banda	27
4.2.2	PLL	29
4.2.3	Filtro passa-baixo	31
4.2.4	Comparador	33
4.3	Emissor eletrónico	35
4.3.1	Microcontrolador utilizado	36
4.3.2	Geração das ondas sinusoidais	37
4.4	Esquema completo	37
5	Testes e Resultados	39
5.1	Desmodulador	39
5.2	Comparador	42
5.3	DAC	42
5.4	Teste em Ambiente Aquático	43

6 Conclusão e Trabalho Futuro	48
6.1 Conclusão	48
6.2 Trabalho Futuro	48
Bibliography	49

Lista de Figuras

2.1	Oceano R5 da <i>iXblue</i> [7].	5
2.2	Libertador acústico produzido pela <i>Edgetech</i> [8].	5
2.3	Libertador acústico produzido pela <i>Benthos</i> [9].	6
2.4	Exemplo <i>link</i> fusível.	7
2.5	Princípio de funcionamento de um sistema ótico	8
2.6	Atenuação da radiação eletromagnética na água [15].	8
2.7	Sistema de comunicação subaquático eletromagnético.	9
3.1	Influência da distância e frequência na atenuação [19].	13
3.2	Representação do efeito de <i>Doppler</i> [19].	14
3.3	Efeito multi-percurso	15
3.4	Modulação	16
3.5	Modulação AM [26].	17
3.6	Modulação FM [26].	18
3.7	Modulação PM [26].	18
3.8	Modulação OOK[11].	20
3.9	Modulação FSK[11].	20
3.10	Modulação PSK[11].	21
4.1	Transdutores utilizados.	23
4.2	Amplificador utilizado.	23
4.3	TL081 <i>pinout</i>	24
4.4	Teste dos transdutores com amplificador implementado.	24
4.5	Variação na frequência de entrada.	25
4.6	Variação na distância entre emissor e recetor	25
4.7	Variação no alinhamento do emissor.	26
4.8	Esquema do circuito recetor.	27
4.9	Filtro passa-banda implementado.	27
4.10	LMV551 output.	28
4.11	Diagrama de Bode primeiro andar.	28

4.12	Diagrama de Bode segundo andar.	29
4.13	Sistema PLL.	29
4.14	CD4046 <i>pinout</i>	30
4.15	Relação entre as resistências e a frequência máxima e mínima.	31
4.16	Filtro passa-baixo implementado.	32
4.17	Diagrama de Bode filtro passa-baixo.	32
4.18	Comparador implementado.	34
4.19	LPV7215 output.	34
4.20	Simulação do circuito comparador, sinal amarelo representa a entrada e sinal verde a saída.	35
4.21	Microcontrolador <i>STM32F767ZI</i>	36
4.22	Esquema completo.	38
5.1	Circuito recetor completo	39
5.2	Desmodulador, sinal de entrada a azul e sinal de saída a amarelo	40
5.3	Simulação do funcionamento do VCO	40
5.4	Onda de entrada sincronizada com o VCO. A amarelo o sinal de entrada da PLL, a azul a saída do VCO e a roxo a tensão de erro, saída da PLL e entrada do VCO.	41
5.5	Saída desmodulador (sinal amarelo) sincronizada com a saída do filtro (sinal azul)	41
5.6	A azul o sinal após desmodulação, a roxo a referência de comparação e a amarelo a saída comparador	42
5.7	Sinal de saída do DAC para 39 kHz.	43
5.8	Sinal de saída do DAC para 41 kHz.	43
5.9	<i>Setup</i> dos testes dos transdutores em meio aquático	44
5.10	Sinal recebido pelo transdutor recetor	44
5.11	Sinal recebido pelo transdutor recetor com o filtro passa-banda	45
5.12	Sincronismo da PLL: A amarelo o sinal de entrada e a azul o sinal em sincronismo, gerado pelo VCO. A roxo o sinal de erro, na entrada do VCO.	46
5.13	Sinal desmodulado (amarelo) e saída filtro passa-baixo (azul)	46
5.14	Saída digital do circuito (amarelo) em resultado da comparação do sinal desmodulado e filtrado (azul) coma referência (roxo)	47

Lista de Tabelas

2.1	Taxas de transmissão de dados para sistemas de comunicações eletromagnéticos. . . .	9
2.2	Largura de banda acústica subaquática para diferentes distâncias [17].	10
2.3	Comparação para diversos fatores dos três sistemas [18].	11
3.1	Influência de diversos fatores na velocidade de propagação do som na água [21]. . . .	12
4.1	Características transdutores.	22
4.2	Saídas lógicas de um sistema PLL.	30

Glossário

AC *Alternating Current*

AM *Amplitude Modulation*

AMPOP *Amplificador Operacional*

ARR *Auto-Reload Register*

ASK *Amplitude Shift Keying*

BASK *Binary Amplitude Shift Keying*

CI *Circuito Integrado*

CPU *Central Processing Unit*

DAC *Digital Analog Converter*

DC *Direct Current*

DMA *Direct Memory Access*

FM *Frequency Modulation*

FSK *Frequency Shift Keying*

GBP *Gain Bandwidth Product*

OOK *On-Off Keying*

PLL *Phase-Locked Loop*

PM *Phase Modulation*

PSC *Prescaler Register*

PSK *Phase Shift Keying*

VCO *Voltage-Controlled Oscillator*

1. Introdução

Para aprofundar o estudo biológico dos oceanos, os biólogos necessitam de estudar e analisar diferentes amostras de teste como, por exemplo, substratos de colonização.

Por norma as amostras necessitam de largos períodos no oceano. Para serem colocadas e recolhidas é necessário recorrer a diversos recursos humanos, como mergulhadores, o que leva a custos elevados, muito tempo de trabalho e estar sujeito às condições adversas do ambiente que pode impedir tanto o mergulho como a saída das embarcações.

Para minimizar este problema é necessário o desenvolvimento e automatização de dispositivos que consigam armazenar e libertar essas amostras, para poderem surgir à superfície por flutuação e serem recolhidas diretamente para embarcações.

Neste capítulo é enquadrado o trabalho e descritas as motivações pessoais para a escolha do mesmo, são enumerados os objetivos principais e também possíveis aplicações futuras onde possa ser inserido. Por fim é feita uma breve descrição da estrutura dos restantes capítulos desta dissertação.

1.1 Enquadramento

Esta dissertação de Mestrado insere-se no projeto ATLANTIDA, um projeto multidisciplinar que engloba a Universidade do Minho, a Universidade do Porto e a Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, que visa o desenvolvimento de uma plataforma de monitorização do Oceano Atlântico e de ferramentas para a exploração sustentável dos recursos marinhos [1].

1.2 Motivação

A constante evolução da ciência e tecnologia marinha leva a um crescimento proporcional do estudo dos oceanos. Com isto a motivação para a realização deste trabalho surgiu na necessidade de recolher dados concretos para o estudo do ambiente marinho, onde o trabalho do ser humano seja sempre facilitado e todos os riscos a que este pode estar sujeito sejam minimizados.

Pretende-se então que o sistema criado consiga minimizar esses riscos e também permitir o estudo e comportamento de amostras diferentes em ambiente marinho. Com a utilização de vários dispositivos em simultâneo, além de se reduzir custos em trabalhadores, consegue-se automatizar o estudo de várias variáveis ao mesmo tempo.

Apesar deste trabalho se centrar no desenvolvimento de um dispositivo capaz de armazenar substâncias para estudo em ambiente marinho, este tipo de aparelhos poderá ser utilizado noutras áreas de estudo e não só em oceanos como, por exemplo, para a recuperação de instrumentos marinhos [2], o que torna a criação destes dispositivos, aliciente não só para a aplicação descrita.

1.3 Objetivos

O principal objetivo deste trabalho surge na necessidade de encontrar uma solução para o problema enunciado no enquadramento que passa pelo estudo, teste e elaboração de um dispositivo que automatize este processo. Uma vez colocado, o aparelho recebe um sinal e com isso liberta a amostra pretendida para poder ser recolhida à superfície.

Outro objetivo é o desenvolvimento e teste de uma técnica de libertação inovadora que possa ser controlada remotamente e também que possa ser seletiva, ou seja, vários dispositivos possam coexistir simultaneamente e libertar diferentes amostras em estudo.

Também se pretende que o equipamento funcione em ecossistemas, onde não afete, nem seja afetado por estes, nomeadamente, ao evitar a incrustação biológica esperada. O dispositivo deverá também ser concebido para ter uma autonomia de no mínimo seis meses e um baixo custo de fabrico.

1.4 Aplicações

A aplicação do trabalho realizado com esta dissertação centra-se mais em aplicações com maior foco na biologia, nomeadamente no estudo de comportamentos de determinados substratos de colonização em ambiente marinho, durante largos períodos.

Também pode ser usado noutras áreas como, por exemplo, na oceanografia, pois permite a recuperação de determinados aparelhos marítimos em zonas muito profundas, onde os instrumentos não poderiam ser recuperados por mergulho técnico.

Noutras áreas, este tipo de tecnologia pode servir para estudar a geologia do fundo dos oceanos [3], como também pode ser aplicado este conceito de libertação acústica na aquacultura, onde permite rastrear e informar sobre posicionamento de cardumes [4].

1.5 Organização da dissertação

Após ser enquadrado o problema, referidas as motivações, definidos os objetivos e possíveis aplicações deste projeto, este capítulo finaliza-se com uma visão geral da organização da dissertação que terá os seguintes capítulos:

- Capítulo 1: Introdução;
- Capítulo 2: Estado da Arte;
- Capítulo 3: Fundamentos Teóricos;
- Capítulo 4: Estudo e Desenvolvimento da Técnica de Libertação;
- Capítulo 5: Desenvolvimento do emissor e recetor eletrónicos;
- Capítulo 6: Testes e Resultados;
- Capítulo 7: Conclusões e Trabalho Futuro.

2. Estado da Arte

Os libertadores acústicos têm vindo a ganhar uma ampla adoção na engenharia marítima e também em missões militares.

Na área de monitorização e em engenharia têm sido utilizados diferentes tipos de libertadores acústicos principalmente em sistemas de recuperação marítima e em sistemas de comunicação subaquáticos. Na parte militar são módulos indispensáveis em redes de comunicação essenciais em alto mar [5].

Neste capítulo será abordado como funciona o mercado atual, desde o que existe e para que é usado, serão abordadas as técnicas de libertação mais comuns e como funcionam e também como são feitas as comunicações subaquáticas e quais os seus tipos.

2.1 Mercado Atual

Atualmente existem empresas, nomeadamente a *iXblue* em França, a *Benthos* e a *Edgetech* nos Estados Unidos da América, a *Sonardyne* no Reino Unido ou a *NGK* no Japão, com grande foco no *design* e elaboração de libertadores acústicos, que têm garantido um desempenho estável nas determinadas funções que estes aparelhos possam ter.

A *iXblue* é uma empresa com 40 anos de experiência nesta área, com provas dadas na elaboração destes dispositivos usados tanto em estudos científicos, como em trabalhos de recuperação de aparelhos de diversas empresas. Nesta empresa os aparelhos são concebidos com diferentes materiais, pesos, dimensões, baterias, com o objetivo de suportarem cargas com tamanhos e pesos diferentes e também para atuarem a várias profundidades [5][6].

O mais recente produto lançado pela *iXblue*, o *Oceano R5*, foi projetado para suportar elevadas cargas devido à sua robustez e fiabilidade, suportar uma profundidade até 6000 m, diminuir os riscos de corrosão e minimizar o atrito mecânico [7].



Figure 2.1: Oceano R5 da iXblue [7].

O libertador acústico da *Edgetech* funciona com uma frequência entre os 7 e 20 kHz, atua até uma profundidade de trabalho de 6000 m, suportando cargas eficazes de 5500 kg, onde cada bateria pode durar até 9 anos. Nestes equipamentos a unidade à superfície está equipada com um dispositivo que permite saber o estado de inclinação do aparelho, permitindo assim, ter noção do estado do processo de libertação quando a cápsula do instrumento é inundada[5][8].



Figure 2.2: Libertador acústico produzido pela *Edgetech* [8].

A *Benthos* é uma empresa americana, sendo um dos líderes mundiais no fabrico de dispositivos oceanográficos. Os libertadores acústicos produzidos por estes atuam com uma frequência situada principalmente entre os 7 e os 15 kHz, usam como técnica de libertação um motor de alto binário, suportam cargas até 5000 kg, onde as baterias têm uma duração de até 2 anos.

Nestes dispositivos a unidade à superfície da água consegue, para além de ativar ou parar o libertador, obter informações sobre distâncias de objetos com um alcance de até 10 km [5][9].



Figure 2.3: Libertador acústico produzido pela *Benthos* [9].

2.2 Técnicas de Libertação

A principal parte de qualquer libertação acústica é a sua técnica de libertação. A função desta é abrir uma parte do aparelho com o objetivo de libertar aquilo que se quer estudar para que atinja a superfície por flutuação.

O objetivo dos mecanismos de libertação é ter máxima fiabilidade, ao mesmo tempo que consigam garantir um rendimento alto para a carga em questão. Estes mecanismos podem falhar devido a diversos fenómenos como a incrustação biológica ou a corrosão provocada por fatores do ambiente marinho, como correntes oceânicas ou as ondas do mar, que podem levar à diminuição do rendimento do dispositivo ou até à destruição do mesmo.

Alguns exemplos de técnicas de libertação mais usadas pelas empresas focadas nesta área são: motor de alto binário, *link* fusível ou erosão eletrolítica.

2.2.1 Motor de alto binário

Nesta técnica um motor de corrente contínua equipado com uma caixa redutora e com alto binário, ao receber um sinal abre uma parte do dispositivo que liberta aquilo que é pretendido.

Com esta técnica é possível suportar cargas pesadas, mas como contém várias partes móveis, torna os aparelhos mais complexos e volumosos o que pode levar a maiores custos.

2.2.2 Link fusível

Neste exemplo um fio é derretido e evapora rapidamente devido a uma corrente elevada que provoca o aquecimento. Este mecanismo é mais rápido, mais compacto e como só possui uma parte móvel torna os aparelhos mais simples, contudo tem limitações nomeadamente em conseguir suportar cargas maiores, o que faz com que seja usado em aplicações menores [10].



Figure 2.4: Exemplo *link* fusível.

2.2.3 Erosão Eletrolítica

Nesta técnica um pedaço de fio de aço sofre uma erosão eletrolítica através de uma corrente contínua, onde liberta uma âncora que permite a libertação.

É um mecanismo muito simples, sem quaisquer partes móveis, mas este processo é pouco eficiente porque leva vários minutos e depende de fatores externos como a salinidade da água, o que faz com que seja usada só com cargas mais leves.

2.3 Comunicações subaquáticas

Atualmente a comunicação sem fios é algo indispensável no quotidiano da sociedade, e apesar dos oceanos cobrirem 70% do planeta Terra, a comunicação sem fios subaquática continua a ser algo por explorar em comparação com outras tecnologias. Por ser uma área ainda por explorar tem sido cada vez mais recorrentes intensas pesquisas e estudos para haver um desenvolvimento de sistemas de comunicação sem fios em ambiente aquático [11].

Essas investigações levaram então à classificação das comunicações sem fios subaquáticas em três categorias principais: comunicações óticas, comunicações por meio de ondas eletromagnéticas e comunicações acústicas.

2.3.1 Comunicações Óticas

As comunicações óticas subaquáticas foram desenvolvidas devido à necessidade de maior largura de banda na comunicação, visto que há aplicações que necessitam de altas taxas de transmissão de dados [12].

Nestes sistemas existe uma fonte de informação que envia dados, sob a forma de um sinal elétrico, para o emissor, que ao serem recebidos são convertidos num sinal ótico. Posteriormente o sinal ótico atravessa a água até ser recebido pelo recetor, que o converte novamente num sinal elétrico, sendo enviado para o seu destinatário [11].



Figure 2.5: Princípio de funcionamento de um sistema ótico

Como fontes de luz é possível ter-se vários exemplos, contudo nestes sistemas a escolha restringe-se a dois exemplos principais: díodos emissores de luz e díodos *laser*, que dependem da aplicação para a qual podem ser empregues porque ambos têm vantagens e desvantagens [14].

Também é necessário ter-se em consideração a cor da luz a ser usada, dependendo do seu comprimento de onda, o que pode ter influência na sua atenuação e desempenho em ambientes aquáticos. Na figura 2.6 é possível observar a atenuação da radiação eletromagnética, onde é possível concluir que o comprimento de onda na região do azul e do verde são melhores opções para ambientes aquáticos, visto que a atenuação é menor [15].

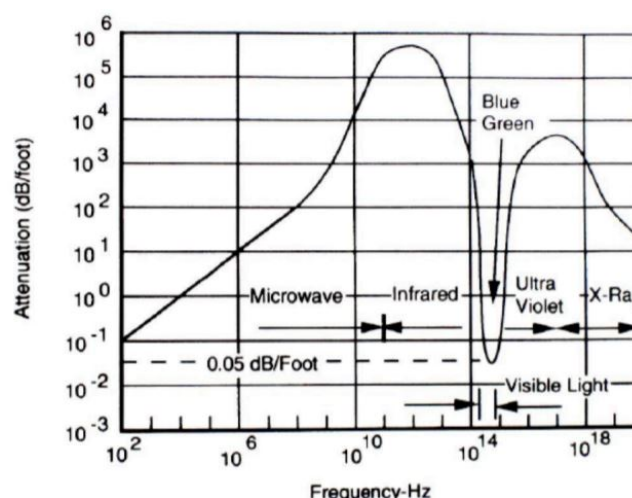


Figure 2.6: Atenuação da radiação eletromagnética na água [15].

2.3.2 Comunicações Eletromagnéticas

As comunicações eletromagnéticas, apesar de serem mais utilizadas quando o meio de transmissão é o ar, são menos utilizadas em ambiente aquático devido as várias limitações que o meio em questão tem.

Estes sistemas em ambiente marinho tem uma utilização residual porque não permitem a troca de dados. A única aplicação que usa este tipo de tecnologia é uma espécie de sino usado para chamar mergulhadores ou submarinos à superfície, para poder haver trocas de dados [11].



Figure 2.7: Sistema de comunicação subaquático eletromagnético.

Em comparação com o ar, a atenuação da onda é alta e aumenta rapidamente com a frequência. Fatores como a alta permissividade e condutividade elétrica inerentes ao meio aquático impossibilitam que haja um alcance elevado neste tipo de sistemas porque causam impactos significativos no ângulo de refração ar/água. Então, devido a estas propriedades, os sinais propagam-se de forma diferente no mar ou em água doce.

A tabela 2.1 permite provar que apesar de ambos serem em ambiente aquático, a taxa de transmissão de dados das ondas eletromagnéticas difere quando a água é doce ou salgada [11].

Distância	< 1 m	10 m	50 m	200 m	2 km	10 km
Água Salgada	até 100 Mbps	100 kbps	5 kbps	100 bps	10 bps	1 bps
Água Doce	> 100 Mbps	1 Mbps	100 kbps	1 kbps	10 bps	1 bps

Table 2.1: Taxas de transmissão de dados para sistemas de comunicações eletromagnéticos.

Com isto podemos concluir que para longas distâncias não existe diferença, mas para curtas distâncias a taxa de transmissão de dados das ondas eletromagnéticas é muito mais elevada em água doce do que em água salgada.

2.3.3 Comunicações Acústicas

Nas comunicações subaquáticas a tecnologia mais utilizada são as ondas acústicas, especialmente em longas distâncias, que tem tido um aumento significativo nas últimas décadas.

O estudo desta área começou em 1490 com *Leonardo da Vinci*, quando este tentou detetar navios ouvindo o barulho que irradiavam na água, provando assim que é possível detetar objetos utilizando a sua propagação sonora [16].

Mais tarde, em 1826, *Jean Colladon* e *Charles Sturton* continuaram este estudo medindo a velocidade de um som debaixo de água utilizando um sino e uma pistola de pólvora seca. O sino foi tocado debaixo de água em simultâneo com o tiro à superfície e ao cronometrar o intervalo entre os dois sons foi possível calcular a velocidade do som. Este teste, apesar dos instrumentos usados, foi notavelmente preciso, pois chegaram à conclusão de que a velocidade do som era de 1435 m/s, valor próximo do utilizado atualmente. Com esta experiência chegaram também à conclusão que o som viaja mais rápido na água do que no ar [16].

Os sistemas de comunicação acústicos subaquáticos foram tendo um crescimento gradual, sendo hoje a tecnologia mais utilizada na área, principalmente para longas distâncias. Atualmente são utilizados para detetar e localizar objetos, para estudar as características do ambiente e para medir a velocidade de objetos em meios aquáticos [16].

Estes sistemas são constituídos por vários componentes. Em primeiro por uma fonte de informação que envia os dados para o modulador que converte a informação, sob a forma de um sinal elétrico, em ondas acústicas através de um transdutor. Estas ondas acústicas propagam-se na água onde chegam a um recetor que volta a convertê-las num sinal elétrico. Por fim, este sinal volta a ser convertido em dados digitais por um demodulador [13].

As ligações subaquáticas de um sistema de comunicação acústico podem ser divididas consoante a distância que podem alcançar em: muito curtas, curtas, médias, longas e muito longas [17].

Ligação	Distância (km)	Largura de Banda (kHz)
Muito Longa	1000	< 1
Longa	10 – 100	2 – 5
Média	1 – 10	$\approx$ 10
Curta	0,1 – 1	20 – 50
Muito Curta	< 0,1	> 100

Table 2.2: Largura de banda acústica subaquática para diferentes distâncias [17].

2.3.4 Resumo

Ao analisar os três tipos de comunicações subaquáticas é possível concluir não haver nenhum que seja o ideal devido ao facto de cada tipo possuir características próprias que podem ser mais ou menos vantajosas para determinadas aplicações ou características do sistema a ser implementado.

Na tabela 2.3 é possível analisar e comparar os três sistemas para diversos fatores como a velocidade de resposta, a largura de banda, o tamanho das antenas ou o alcance que estes conseguem atingir [18].

Sistema	Acústico	Eletromagnético	Ótico
Velocidade (m/s)	≈ 1500	$\approx 1,5 \cdot 10^7$	$> 300 \cdot 10^6$
Largura de Banda	$\approx kHz$	$\approx MHz$	$\approx 10-150 MHz$
Tamanho da Antena	$\approx 0,1m$	$\approx 0,5m$	$\approx 0,1m$
Alcance	$\approx km$	$\approx 10m$	$\approx 10-100m$

Table 2.3: Comparação para diversos fatores dos três sistemas [18].

Analisando a tabela conclui-se que para sistemas onde seja necessária uma velocidade de transmissão maior ou quando é necessária uma alta largura de banda um sistema ótico ou um sistema eletromagnético são mais vantajosos, já quando é necessário que o alcance da comunicação subaquática seja elevado o melhor a utilizar é um acústico.

3. Fundamentos Teóricos

3.1 Propagação do som em meio aquático

O principal desafio na área das comunicações subaquáticas é a definição do canal aquático, este é sujeito a muitos problemas devido ao uso da água como meio, problemas estes que irão ocorrer sempre, sendo a única solução tentar minimizá-los [23].

A propagação do som em meio aquático é então diretamente influenciável pelos seguintes fatores:

- Atraso de propagação;
- Atenuação;
- Ruído;
- Efeito de *Doppler*;
- Multi-percurso;
- Bolhas.

3.1.1 Atraso de propagação

O som na água não se propaga instantaneamente entre 2 pontos devido a ter uma velocidade de propagação de cerca de 1500 m/s, o que faz com que demore cerca de 0,66 segundos a percorrer dois pontos distanciados por um quilómetro.

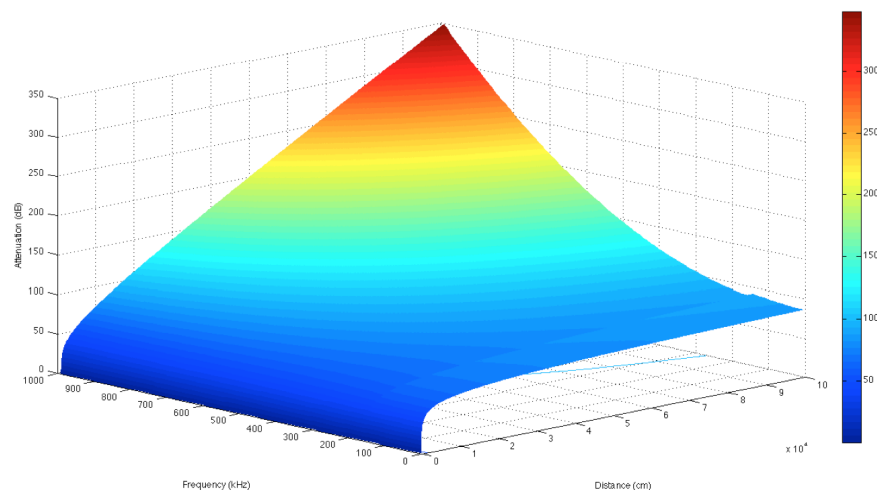
Esta velocidade de propagação do som na água é influenciada por diversos fatores, tais como, a temperatura, a salinidade e profundidade, sendo que a variação de um destes afeta diretamente o valor da velocidade [22].

Causa	Variação na velocidade de propagação do som
Temperatura	+ 4,6 m/s por graus Celsius
Salinidade	+ 1,3 m/s por ppt
Temperatura	+ 0,016 m/s por metro

Table 3.1: Influência de diversos fatores na velocidade de propagação do som na água [21].

3.1.2 Atenuação

Uma das principais propriedades de um canal subaquático é a sua atenuação, fator que está presente em todos os tipos de meios aquáticos e o seu valor é diretamente influenciável pela distância e pela frequência [19].

**Figure 3.1:** Influência da distância e frequência na atenuação [19].

É composta por três componentes: perda por absorção, na propagação e por dispersão [20].

A perda por absorção é um fenómeno onde a energia acústica é transformada em calor, sendo este fator muito importante na atenuação de um sinal devido ao coeficiente de absorção ser o principal fator na limitação da frequência máxima que pode ser utilizada num sistema subaquático [20]. Já a perda por propagação é a perda que a energia do sinal emitido sofre com o aumento da área da superfície através de onde o sinal é transmitido até ao recetor, dois possíveis exemplos são a propagação esférica e a propagação cilíndrica [20]. Finalmente, perda por dispersão é quando o sinal perde energia por ser desviado para uma superfície (normalmente a própria superfície do mar) ou devido à falta de homogeneidade do meio. É importante salientar que a dispersão é composta por fatores como a reflexão, a refração e difração [20].

3.1.3 Ruído

O ruído presente num canal acústico pode ter origem humana, pode ser proveniente de fenómenos naturais ou até ser específico a um determinado local.

O ruído produzido pelo homem é maioritariamente proveniente da atividade de máquinas e navios, conhecido por ruído antropogénico. Fenómenos como a turbulência, a chuva, ondas a rebentar, entre

outros, são exemplos de tipos de ruído presentes num ambiente subaquático. Finalmente, o ruído específico do local apenas está presente em determinados locais e pode ser comparado com ruído gaussiano, que normalmente contém várias componentes [19].

3.1.4 Efeito de Doppler

O efeito de *Doppler* é um fenómeno físico observado nas ondas quando emitidas ou refletidas por um objeto que está em movimento em relação ao observador, ou o oposto, isto é, o objeto parado em relação a um observador em movimento.

O emissor e o recetor de um sistema de comunicação subaquático estão sujeitos a movimentos causados por correntes, pelas ondas, entre outros, isto leva então à criação do efeito de *Doppler*, levando a alterações na frequência [19].

Na seguinte figura tem-se um exemplo da criação deste efeito, onde um sinal acústico desloca-se do ponto A para o B, onde a frequência de translação está representada nas ondas azuis e a frequência de difusão nas ondas negras.

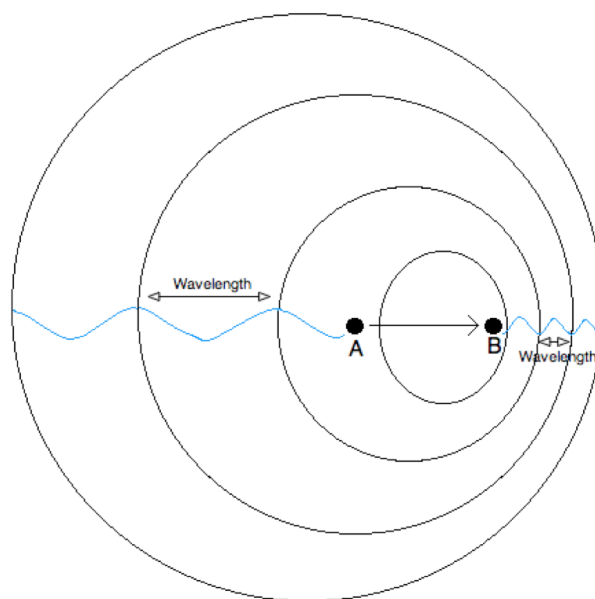


Figure 3.2: Representação do efeito de *Doppler* [19].

É então importante ter em conta este efeito em sistemas de comunicação subaquáticos porque o sistema pode ser afetado devido às alterações na velocidade do som e na derivação que o sistema está sujeito.

3.1.5 Multi-percurso

Um dos problemas mais comuns em sistemas de comunicação subaquáticos é o efeito do multi-percurso, este é um fenómeno que acontece quando os sinais acústicos chegam ao transdutor de receção a partir de mais que um trajeto, o que faz com que seja recolhido mais que um sinal e em diferentes momentos causando interferência intersimbólica [19].

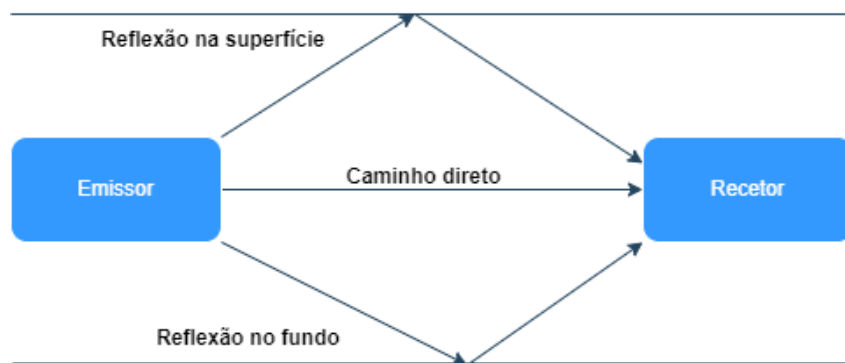


Figure 3.3: Efeito multi-percurso

Multi-percurso é principalmente o resultado da ocorrência de reflexões e refrações das ondas acústicas a serem transmitidas. A reflexão ocorre quando o sinal colide com uma superfície no oceano, chegando depois ao recetor, já a refração ocorre em sistemas de comunicação normalmente presentes a alta profundidade, o que faz com que a velocidade do som varie [19].

3.1.6 Bolhas

A interferência no sinal a transmitir causada por bolhas também é um fenómeno que influencia a propagação deste, sendo que altas frequências são mais afetadas que as baixas frequências.

As bolhas têm diversas fontes como, por exemplo, o rebentamento das ondas, e outro problema presente é que a existência de muitas bolhas juntas causa uma atenuação muito significativa no sinal acústico [19].

3.2 Técnicas de modulação

Os sinais originados pela informação não podem ser enviados diretamente através dos canais de transmissão, devido à sua forma. Então todos os sinais sofrem um processo chamado modulação. O processo de modulação consiste numa operação realizada sobre um sinal ou dados a transmitir, que irá produzir um sinal apropriado para a transmissão sobre o meio de transmissão em causa.

A escolha da técnica de modulação permite ajustar as características do sinal a ser transmitido e adaptá-lo às características do canal, com isto consegue-se afirmar que modulação é um processo que torna o decurso de uma comunicação, num determinado canal de transmissão, mais eficaz e mais robusto [19].

Muitas formas de comunicação envolvem um processo de modulação, sendo o mais comum e flagrante a fala. Quando se fala, o meio de transmissão é o ar, sendo conseguido através da geração de tons nas cordas vocais, modulando estes tons com as ações provocadas pelos músculos da boca, com isto o que o ouvido interpreta é uma onda acústica modulada [24].



Figure 3.4: Modulação

Desmodulação é o nome dado ao processo inverso da modulação, e é inevitável que este processo seja afetado pelo ruído presente e também pela distorção do sinal recebido, o que faz com que dificilmente o sinal original seja recriado na íntegra [25].

A escolha do tipo de modulação é então um aspeto crucial na especificação da ligação de transmissão, pois afeta todo o desempenho do sistema de comunicação [11].

Pode-se, de uma forma simplificada, identificar dois tipos de modulação: analógica e digital.

3.2.1 Modulação Analógica

Neste tipo de modulação a onda portadora apresenta a forma de uma onda sinusoidal, e o sinal a enviar é analógico de frequência inferior à portadora, e é enviado continuamente. Existe uma infinidade de formas de onda possíveis de serem formadas por sinais contínuos, e como se trata de um processo contínuo, a modulação analógica é conveniente para estes sinais.

Como neste tipo de modulação a onda portadora apresenta uma frequência mais elevada que qualquer componente de frequência, levando então a uma translação em frequência, onde o espectro de frequência do sinal enviado é deslocado para uma maior banda de frequências.

A onda portadora é geralmente uma senoide, dada pela seguinte expressão:

$$V_c(t) = A \cos(2\pi f_c t + \theta)$$

Onde a amplitude (A), a frequência (f_c) e a fase (θ) variam continuamente numa gama de valores.

Existem três tipos principais de modulação analógica: modulação em amplitude, em frequência e em fase.

3.2.1.1 Modulação em Amplitude (AM)

Consiste em modificar a amplitude da onda portadora para transmitir a informação em função do sinal do interesse, onde a frequência e a fase da portadora não são modificadas. Um sinal AM é sujeito a interferências elétricas, sendo este uma desvantagem em relação a outros tipos de modulação [27].

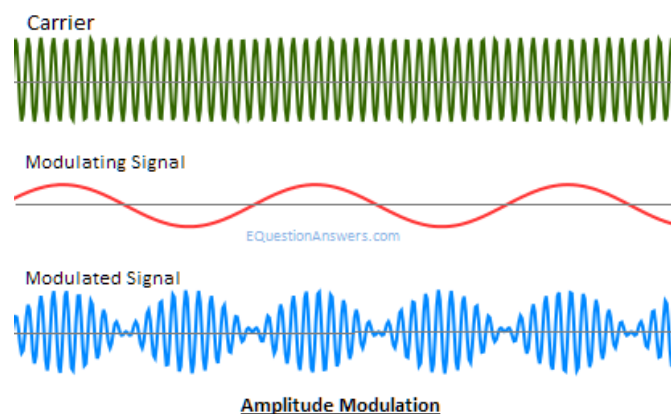


Figure 3.5: Modulação AM [26].

3.2.1.2 Modulação em Frequência (FM)

Consiste em alterar a frequência da onda portadora conforme a informação a transmitir, onde a amplitude da onda é mantida constante, sendo a frequência variada conforme as variações do sinal enviado.

Foi desenvolvida para superar as interferências que afetam a modulação em amplitude.

Um sinal FM é menos suscetível que um sinal AM a certos tipos de interferências, como, por exemplo, as causadas por temporais. Esses ruídos afetam a amplitude da onda, mas não a frequência, sendo por isso vantajoso pelo facto de a informação enviada (através da variação de frequência) permanecer virtualmente inalterada [27].

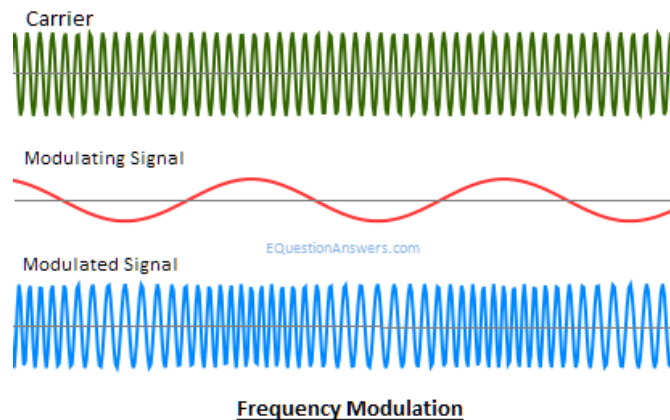


Figure 3.6: Modulação FM [26].

3.2.1.3 Modulação em Fase (PM)

Consiste em variar a fase da onda portadora consoante os dados a serem transmitidos. Quando modulado, o sinal, originalmente numa frequência única, é transformado numa faixa de frequências em torno da onda portadora, sendo que a largura desse banda depende do modo e do tipo de modulação usado.

É considerada uma variação da modulação FM, onde em vez de ser mudada a frequência da onda portadora, é mudada a fase da mesma. Como a modulação FM, também a modulação PM minimiza vários tipos de interferência na receção de um sinal, sendo por este motivo ambas usadas em conjunto [27].

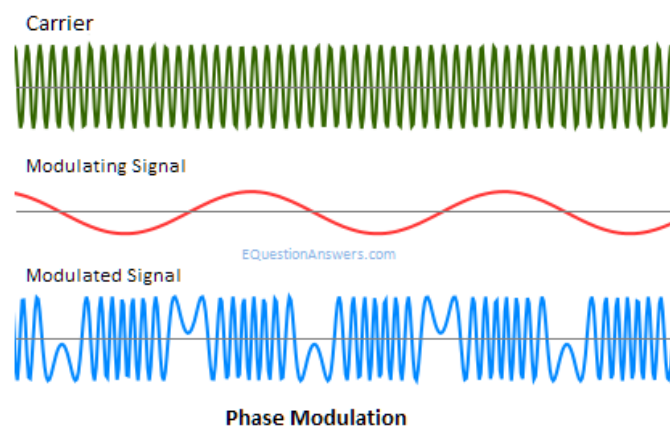


Figure 3.7: Modulação PM [26].

3.2.2 Modulação Digital

Neste tipo de modulação é utilizado uma onda portadora analógica com uma ou mais características alteradas de acordo com uma informação digital, com isto permite-se transformar sinais digitais em formas de ondas a serem transmitidas no canal de comunicação.

É caracterizada pela transmissão e detecção de uma onda em particular através de um conjunto finito de formas de onda conhecidas. A onda portadora, tal como na modulação analógica, é dada pela expressão:

$$V_c(t) = A \cos(2\pi f_c t + \theta)$$

Onde a amplitude (A), a frequência (f_c) e a fase (θ) apresentam apenas alguns valores pré-definidos.

A principal diferença entre um sistema de modulação analógico e um sistema de modulação digital é que no caso dos dados digitais a transmissão e detecção passa por uma entre um número finito de formas de onda conhecidas, enquanto nos sistemas analógicos há uma variação contínua das formas de onda, originando uma infinidade de sinais diferentes.

Apesar de atualmente existirem cada vez mais técnicas de modulação digital, existem três que se destacam: ASK (*Amplitude Shift Keying*), FSK (*Frequency Shift Keying*) e PSK (*Phase Shift Keying*).

3.2.2.1 Modulação ASK

Modulação ASK é uma técnica de modulação para sinais digitais cuja função é variar a amplitude da onda portadora consoante o sinal a transmitir. Para representar o símbolo binário 1 transmite-se um sinal com uma certa amplitude, e para representar o símbolo binário 0 altera-se o valor da amplitude, mas mantém-se o valor da frequência constante [13].

Este tipo de modulação possui dois tipos: *Binary Amplitude Shift Keying* (BASK) e *On-Off Keying* (OOK).

Na modulação BASK o sinal que se quer modular assume ou nível lógico 0, ou nível lógico 1, geralmente o sinal com menor amplitude corresponde ao nível 0 e o de maior amplitude corresponde ao nível 1.

$$ASK(t) = \begin{cases} A_1 \sin(2\pi f t + \theta), & \text{se bit} = 1 \\ A_2 \sin(2\pi f t + \theta), & \text{se bit} = 0 \end{cases}$$

Na modulação OOK, a onda portadora assume um determinado valor de tensão para o nível 1, enquanto o nível 0 assume um valor de tensão nulo, sendo por isso o índice de modulação unitário.[11]

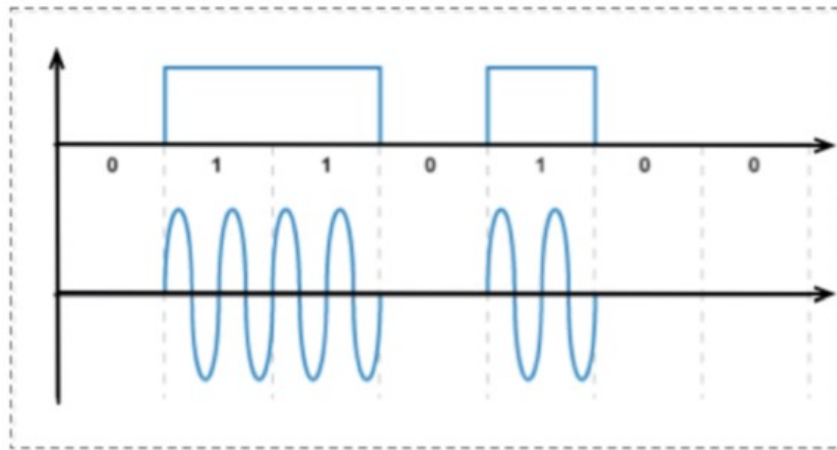


Figure 3.8: Modulação OOK[11].

3.2.2.2 Modulação FSK

A modulação FSK consiste em variar discretamente a frequência da portadora segundo o sinal a modular, com isto, a frequência a transmitir é o resultado da frequência da onda portadora.

Neste tipo de modulação os símbolos lógicos 0 e 1 distinguem-se através da transmissão de duas sinusoides com valores de frequência diferentes, sendo este um valor fixo. São produzidos então impulsos modulados a uma frequência $f1$ para cada bit 1, enquanto são também produzidos impulsos modulados a uma frequência $f0$ para cada bit 0 [25].

$$FSK(t) = \begin{cases} A \sin(2\pi f_1 t + \theta), & \text{se bit} = 1 \\ A \sin(2\pi f_0 t + \theta), & \text{se bit} = 0 \end{cases}$$

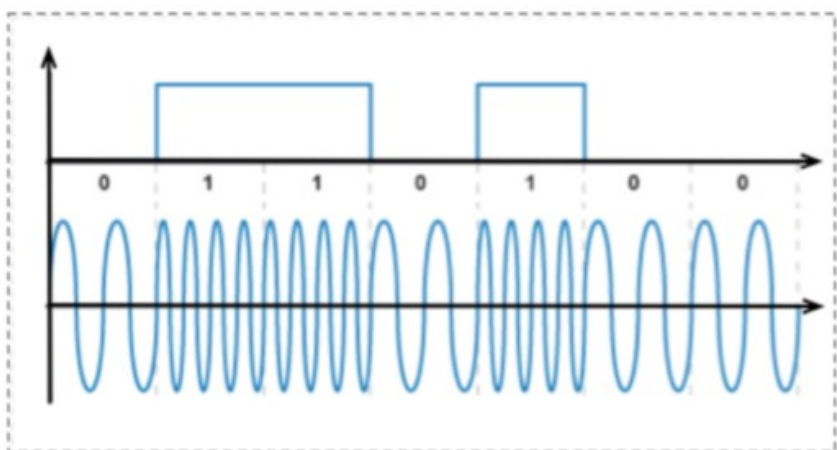


Figure 3.9: Modulação FSK[11].

3.2.2.3 Modulação PSK

A modulação PSK consiste na transmissão de dados alterando a fase do sinal da portadora conforme o sinal a modular, onde é utilizado um número finito de fases em que cada uma assume um padrão específico de bits formando um símbolo que representa a fase em questão.

Neste contexto a fase representa o ângulo de partida da onda sinusoidal, onde se inverte a fase 180° para transmitir os símbolos 0 e 1, conforme o início da sequência.[11]

$$PSK(t) = \begin{cases} A\sin(2\pi ft + \theta_1), & \text{se bit} = 1 \\ A\sin(2\pi ft + \theta_2), & \text{se bit} = 0 \end{cases}$$

Analisando a figura 3.8 é possível verificar ser usado um par de ondas sinusoidais onde apenas se diferem num deslocamento de 180°, representando assim os símbolos 1 e 0, respectivamente.

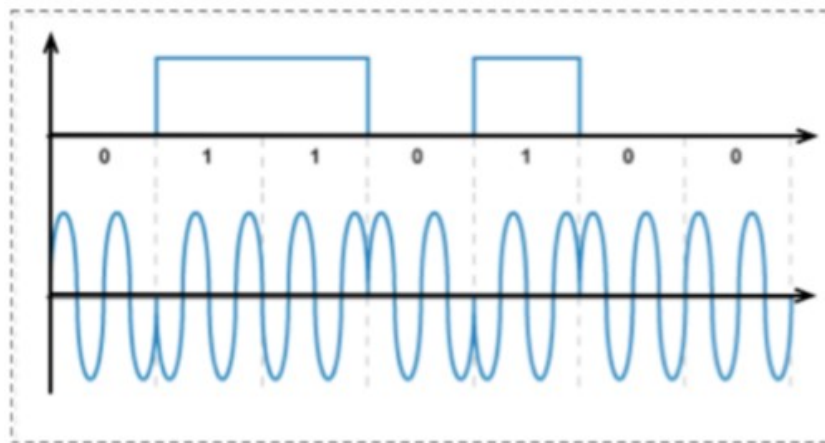


Figure 3.10: Modulação PSK[11].

4. Desenvolvimento

4.1 Transdutores ultrassônicos

Os transdutores ultrassônicos são dispositivos que transformam energia elétrica em ondas de ultrassom. Existem vários tipos de transdutores ultrassônicos, nomeadamente os piezoelétricos, os capacitivos, os eletromagnéticos, entre outros. Os mais utilizados são os piezoelétricos devido a sua ampla faixa de frequências de operação e a possibilidade de serem usados em aplicações de até dezenas de MHz. Este tipo de transdutores tem uma vasta gama de aplicações possível, nomeadamente em ramos como a pesquisa científica, na indústria, na medicina e em comunicações.

4.1.1 Características dos transdutores utilizados

Para o sistema de comunicação foram usados os transdutores *400EP18A-NBPN*, transdutores que possuem como principais características as apresentadas na tabela 1.

Frequência central	40 kHz $\pm$ 1 kHz
Ângulo de vista	85°
Transmissão	108 dB
Recepção	-80 dB

Table 4.1: Características transdutores.

Apesar de na recepção -80 dB não ser um valor muito elevado, nesta parte é mais importante a eletrónica por trás do que propriamente o recetor em si. Já na emissão o transdutor é muito importante, sendo por isso um valor de 108 dB adequado. Além disto, a frequência central é de 40 kHz, e não poderá variar mais que 1 a 2 kHz para cada lado, limitando a modulação FSK (FM) a duas frequências muito próximas, sendo isso o ideal neste caso.



Figure 4.1: Transdutores utilizados.

4.1.2 Caracterização dos transdutores

Para uma frequência de 40 kHz (frequência central presente no *datasheet*) e uma entrada de 15 V o sinal recebido pelo recetor era muito baixo, na ordem dos mV, então para solucionar este problema foi dimensionado um filtro passa-banda com ganho de 1000 para que o sinal recebido fosse ampliado, e ao mesmo tempo limitar a largura da banda para reduzir ruído.

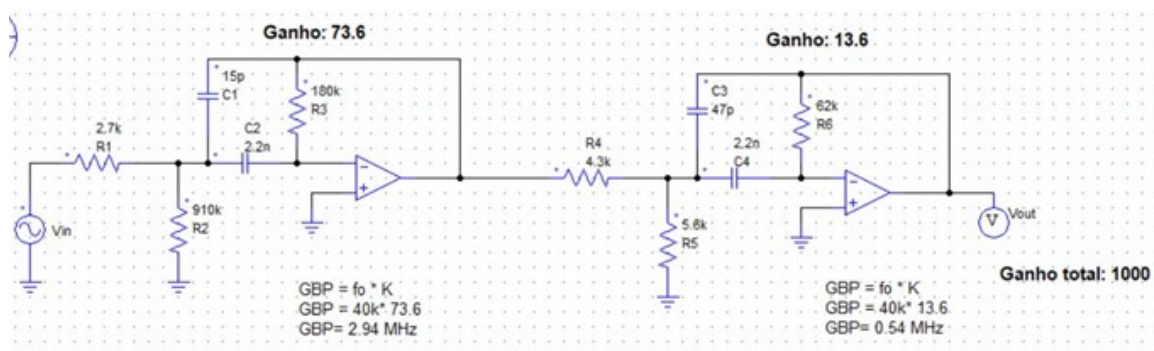


Figure 4.2: Amplificador utilizado.

Numa fase inicial, o circuito integrado utilizado foi *TL081* (figura 4.3), dado ter largura de banda suficiente ($GBP = 3\text{MHz}$) onde cada CI continha um amplificador.

TL081 Pinout

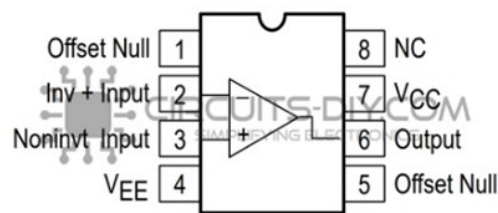


Figure 4.3: TL081 pinout.

Com isto, o primeiro teste realizado foi para uma entrada sinusoidal de 40 kHz e uma entrada de 15 Vpp, onde o emissor e o recetor estavam distanciados aproximadamente 20 cm, tendo com isto sido obtido aproximadamente 3,5 V no recetor, um resultado substancialmente melhor do obtido antes de ser implementado o amplificador, sendo possível comprovar no gráfico da figura 4.4.

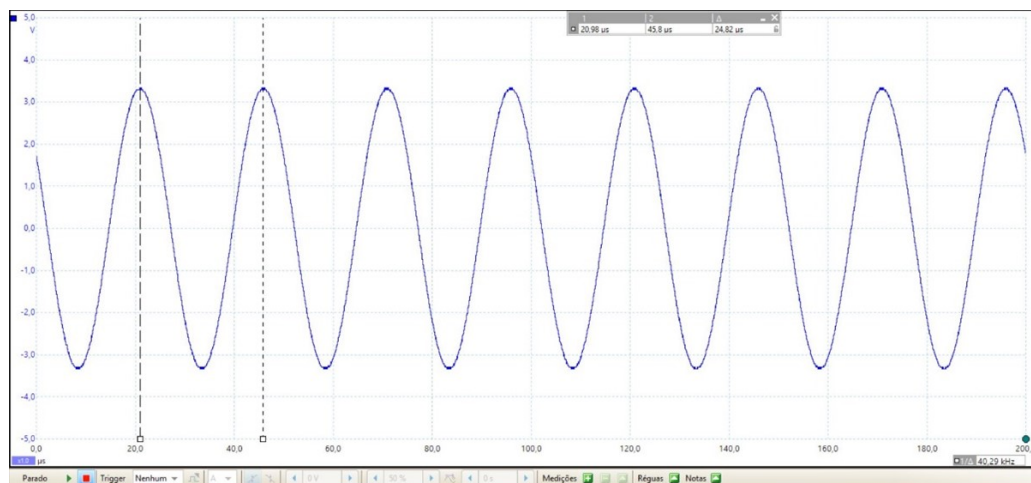


Figure 4.4: Teste dos transdutores com amplificador implementado.

Tendo o amplificador implementado, foram feitos três testes, onde se mediu a tensão do transdutor antes da amplificação, onde se variou a distância entre transdutores, a variação da frequência do sinal de entrada e o alinhamento entre emissor e recetor.

4.1.2.1 Variações na frequência do sinal de entrada

Em primeiro testou-se os resultados para variações da frequência do sinal de entrada, onde os valores testados foram de $\pm 10\%$ da frequência central dos transdutores (40 kHz), ou seja, variou-se entre 36 kHz e 44 kHz, mantendo sempre a mesma distância e alinhamento dos transdutores.

A curva obtida foi a seguinte:

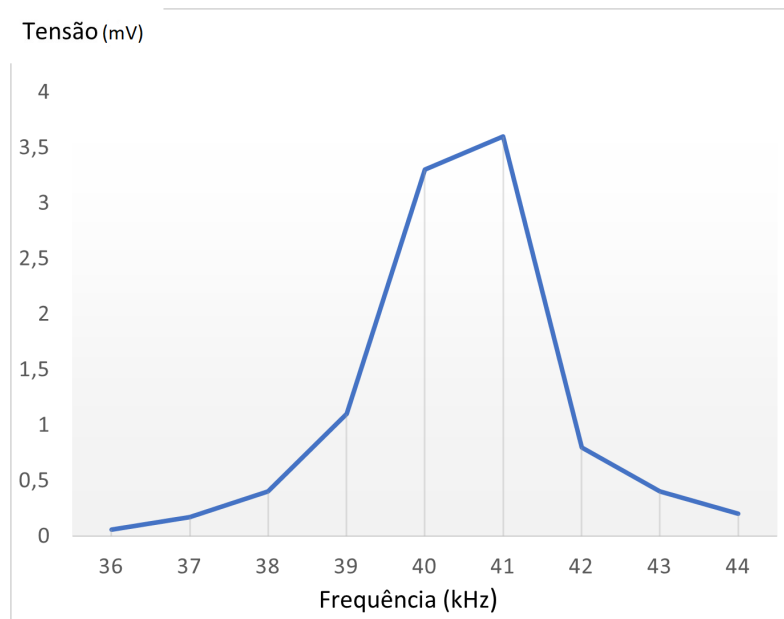


Figure 4.5: Variação na frequência de entrada.

Analisando os resultados é possível verificar que quanto mais perto a frequência do sinal de entrada está da frequência central os resultados no recetor são melhores, concluindo que os melhores valores para o sinal emissor são entre os 39 kHz e os 41 kHz, considerando uma atenuação até cerca de 1/3 relativamente ao sinal da frequência central.

4.1.2.2 Variações na distância entre emissor e recetor

O segundo teste foi feito utilizando um sinal de entrada com 41 kHz e 15 Vpp, mas desta vez variando a distância entre os transdutores, com um máximo de 1 metro entre eles e um mínimo de 5 cm, obtiveram-se os seguintes resultados:

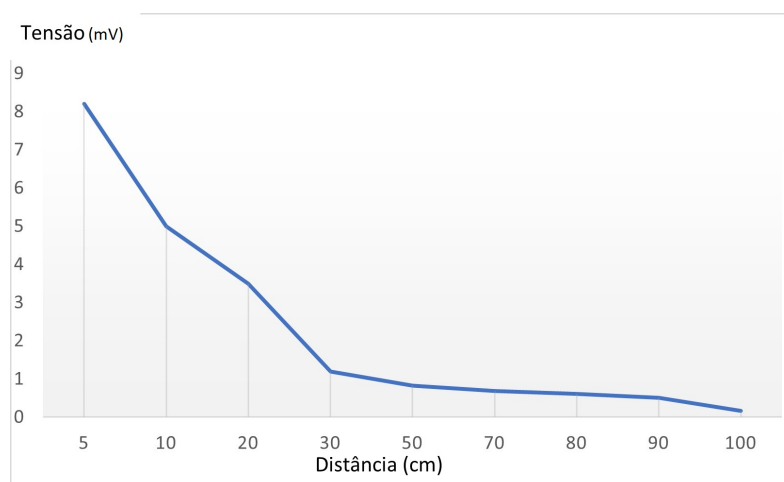


Figure 4.6: Variação na distância entre emissor e recetor

Posto isto é possível concluir, que como seria suposto, quanto mais perto o emissor está do recetor maior é o sinal recebido, ou seja, com o aumento da distância o reduz a tensão do sinal recebido.

4.1.2.3 Variações no alinhamento do emissor em relação ao recetor

Finalmente, para uma distância de 20 cm e novamente um sinal de entrada com 41 kHz e 15 Vpp testaram-se como variações no alinhamento do emissor influenciaria o sinal recebido pelo recetor. Variou-se de 15 em 15 graus, começando de -90 até 90.

Os resultados foram os seguintes:

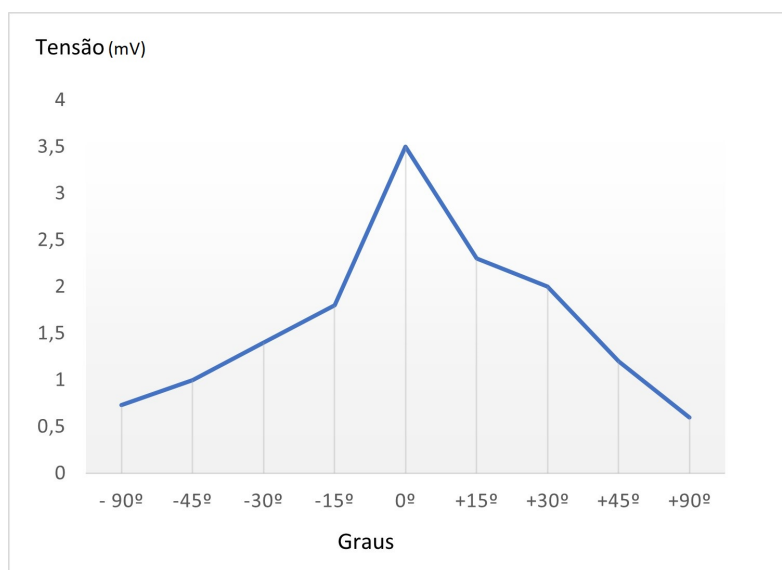


Figure 4.7: Variação no alinhamento do emissor.

Analisando o gráfico da figura, quanto mais “desalinhados” estiverem os dois transdutores menor a tensão do recetor, isto é, quando os dois transdutores estão totalmente alinhados o resultado no recetor é de cerca de 3,5 mV, sendo gráfico aproximadamente simétrico.

4.1.2.4 Conclusão sobre a caracterização dos transdutores

Com estes três testes conclui-se que para resultados melhores os transdutores devem estar o mais perto possível um do outro, o mais alinhados possível e a alimentação do emissor deve ser um sinal com frequência o mais perto possível da frequência central dos próprios transdutores, ou seja, o mais perto possível de 40 kHz. Numa modulação FSK, serão seleccionadas duas frequências próximo de 40 kHz, sendo uma ligeiramente abaixo da frequência central dos transdutores e a outra ligeiramente acima.

4.2 Recetor eletrónico

O recetor eletrónico é constituído por um filtro passa-banda, um desmodulador à base de um PLL, um filtro passa-baixo e um comparador na saída, como se verifica na figura 4.8.

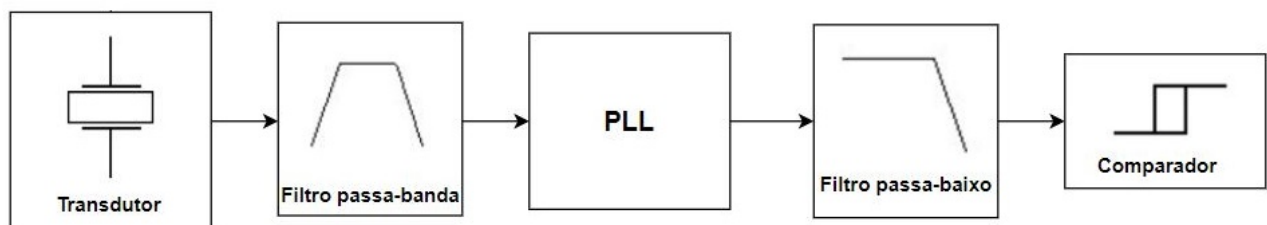


Figure 4.8: Esquema do circuito recetor.

Para facilitar a sua análise e implementação, este foi dividido pelos seus módulos, sendo implementado por partes e analisando os resultados de cada circuito individualmente.

4.2.1 Filtro passa-banda

O primeiro módulo a ser implementado no circuito recetor foi um filtro passa-banda com dois andares:

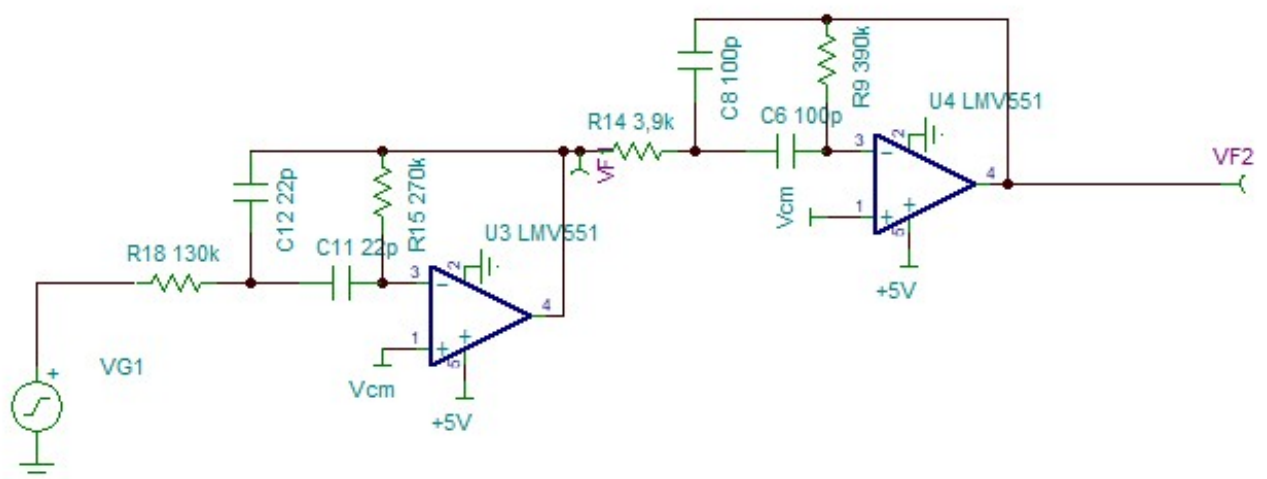


Figure 4.9: Filtro passa-banda implementado.

Para ambos os andares foi utilizado como amplificador o circuito integrado *LMV551* que foi escolhido para esta aplicação por possuir características como *ser rail to rail output* o que permite usar o intervalo

completo entre tensão de alimentação negativa e positiva, um GBP de 3 MHz, ter um consumo de $37 \mu\text{A}$, pois com isto é um amplificador com um consumo muito baixo e também por ser um AMPOP específico para alimentação com tensões baixas, nomeadamente 3 V e 5 V.

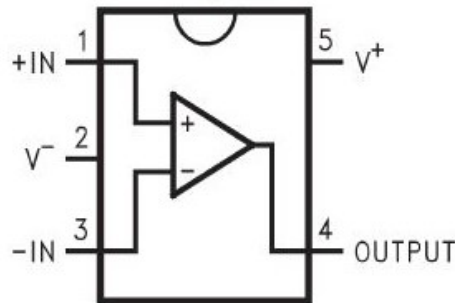


Figure 4.10: LMV551 output.

Para o dimensionamento dos componentes foi utilizada a ferramenta *online OKAWA Eletric Design*.

No primeiro andar assumindo que $C1 = C2$ e o valor dado aos condensadores foi de 22 pF sendo obtidos os valores para as resistências de 130 k Ω e 270 k Ω .

Com isto este andar possui como característica principais uma frequência central de 40 kHz (valor pretendido), um ganho de 1 (aproximadamente 0 dB) e um fator de qualidade de 0,7. O diagrama de Bode obtido foi o seguinte:

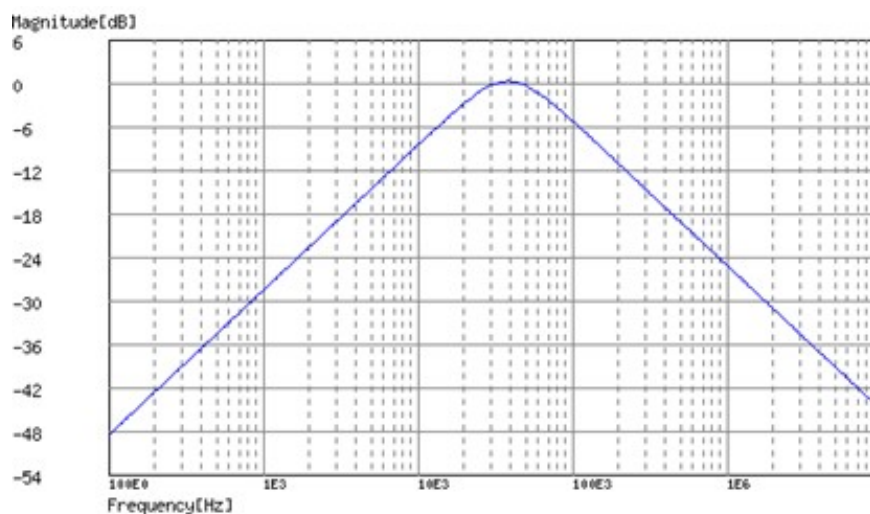


Figure 4.11: Diagrama de Bode primeiro andar.

Para o segundo andar a abordagem foi a mesma, assumindo novamente que $C1 = C2$, onde o valor dado aos condensadores foi de 100 pF, e com isto obteve-se para o valor das resistências de 3,9 k Ω e 390 k Ω . Com estes componentes este andar possui como características novamente 40 kHz como valor de

frequência central, um ganho de 50 (aproximadamente 34 dB) e um fator de qualidade de 5. O diagrama de Bode obtido foi o seguinte:

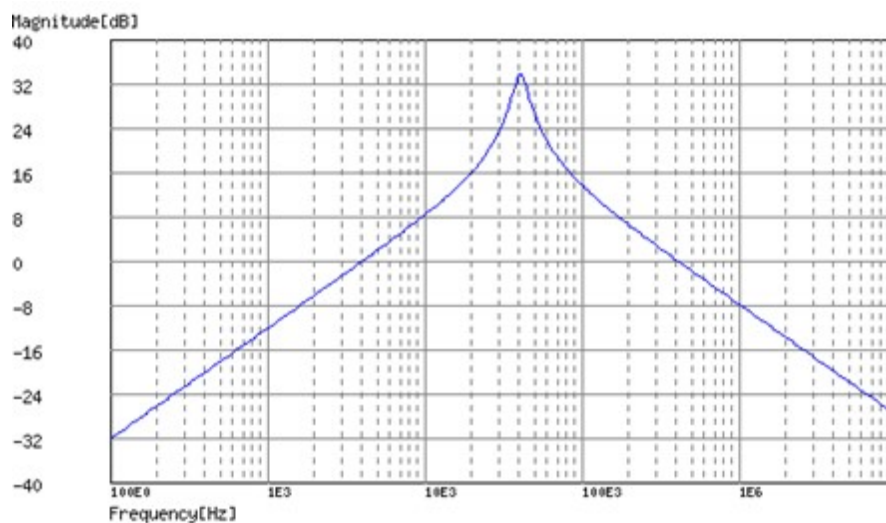


Figure 4.12: Diagrama de Bode segundo andar.

4.2.2 PLL

Um sistema PLL (*Phase-Locked Loop*) é um sistema de realimentação em que o sinal de realimentação é usado para sincronizar a frequência do sinal de saída com a frequência do sinal da entrada (sinal de referência).

Um sistema PLL é geralmente constituído por três elementos principais: um comparador de fase, um filtro passa-baixo e um VCO (*voltage-controlled oscillator*).

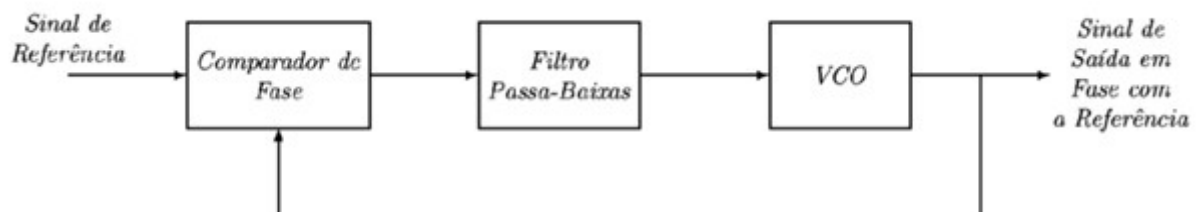


Figure 4.13: Sistema PLL.

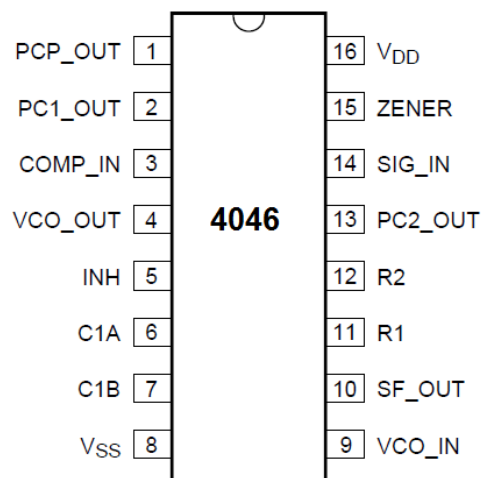
O comparador de fase fornece o sinal de erro que será a entrada do filtro passa baixo, que deteta a diferença entre o sinal de entrada e o sinal de realimentação esperado.

O VCO é o bloco que gera a saída, que também é a realimentação na entrada do PLL, pode-se então afirmar que este representa a parcela cuja frequência de saída é em função da frequência de entrada.

Sinal de entrada	Saída VCO	Comparador de fase
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

Table 4.2: Saídas lógicas de um sistema PLL.

Para realizar esta função foi utilizado o circuito integrado CD4046, que tem como *pinout*:

**Figure 4.14:** CD4046 *pinout*.

Um dos primeiros pontos a ser trabalhado foi a definição dos valores de R1 e R2 de modo para ser possível que a onda de entrada estivesse sincronizada com a saída do VCO.

Segundo o *datasheet* quanto maior a relação $R2/R1$, maior a relação f_{max}/f_{min} :

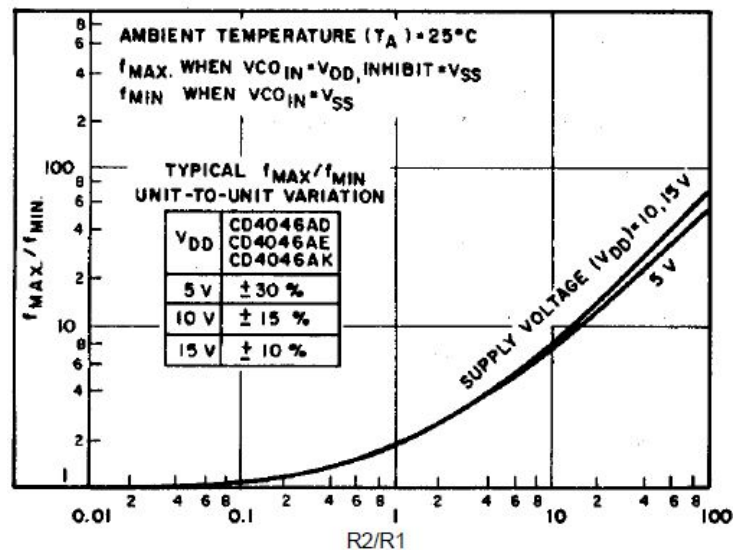


Figure 4.15: Relação entre as resistências e a frequência máxima e mínima.

Com isto obteve-se que para um $R1$ de 240 k Ω e para um $R2$ de 91 k Ω foi possível sincronizar as frequências das ondas pretendidas para um intervalo de valores entre 34 kHz a 43 kHz, intervalo este mais que suficiente para o pretendido.

Os condensadores $C1$ e $C2$ (pino 6 ($C1A$) e pino 7 ($C1B$)) da figura 4.14) são usados num circuito PLL para ajustar as frequências do oscilador de referência e do oscilador controlado. Como o objetivo é ter os dois sinais sincronizados, é importante que ambos tenham a mesma frequência, por este motivo, usou-se para ambos condensadores de 150 pF, garantindo assim a sincronização de ambos os sinais.

Finalmente, para a realimentação do VCO, foi implementado um filtro que tem como objetivo filtrar o sinal de controlo que é aplicado ao VCO, removendo qualquer componente alta frequência indesejado que possa estar presente no próprio sinal de controlo.

4.2.3 Filtro passa-baixo

Tal como no filtro passa-banda, o mesmo circuito integrado foi utilizado na implementação do filtro passa-baixo, o LMV551, pelos mesmos motivos enumerados no capítulo 4.2.1.

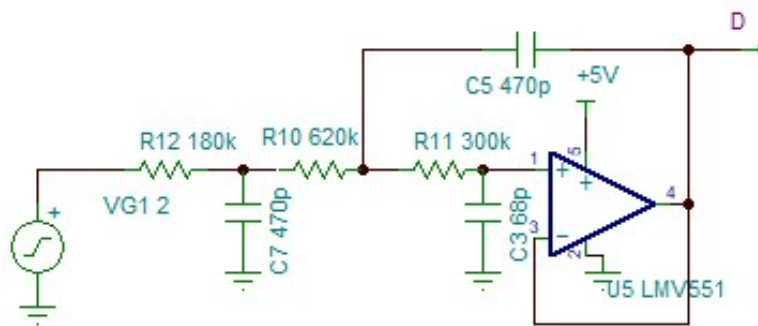


Figure 4.16: Filtro passa-baixo implementado.

No dimensionamento dos componentes foi novamente utilizada a ferramenta *OKAWA Eletric Design*. Assumindo $C1 = C2$ obteve-se os valores para as resistências de 180 k Ω , 620 k Ω e 300 k Ω e o valor de 68 pF para o terceiro condensador. Com estas características o filtro possui uma frequência de corte de aproximadamente 2 kHz, sendo possível comprovar isso através do seu diagrama de Bode:

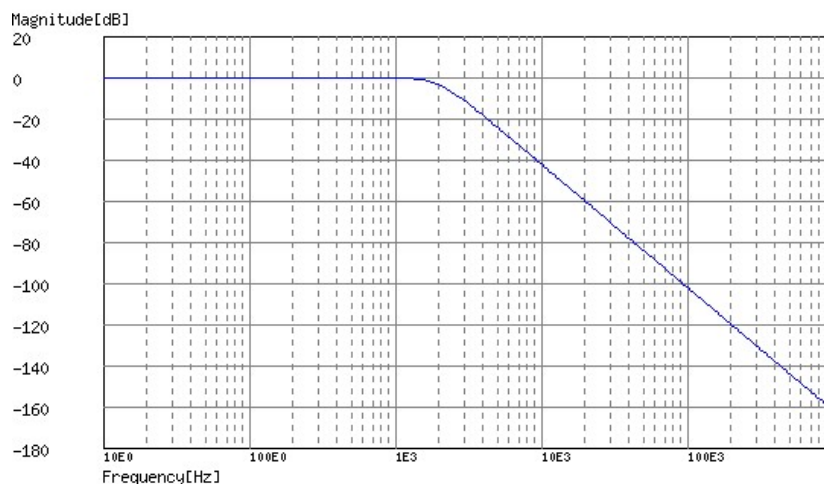
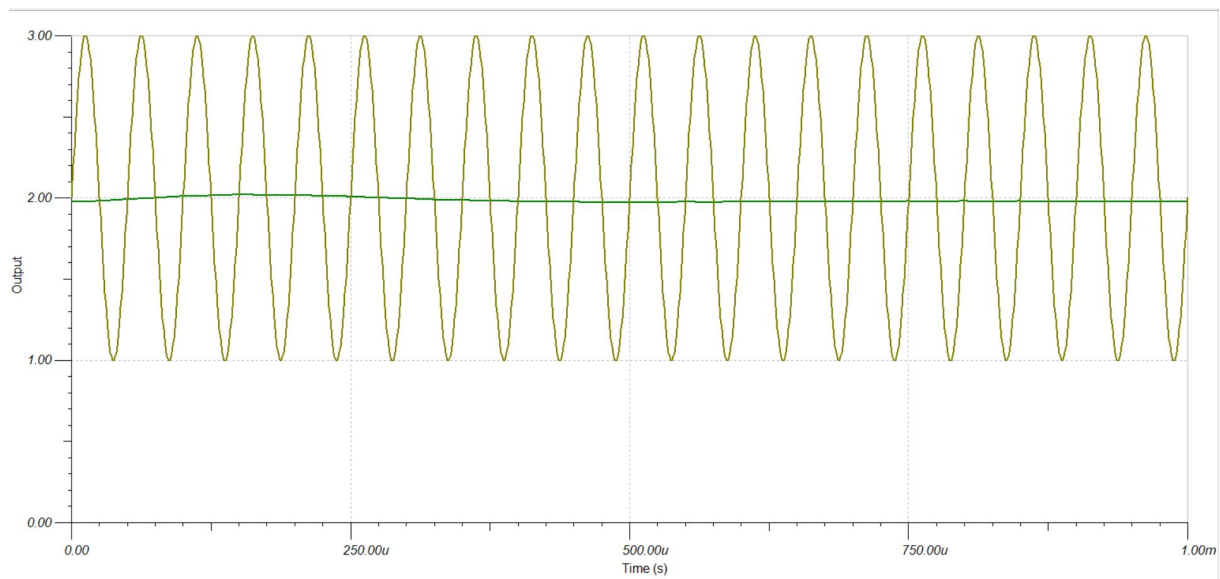
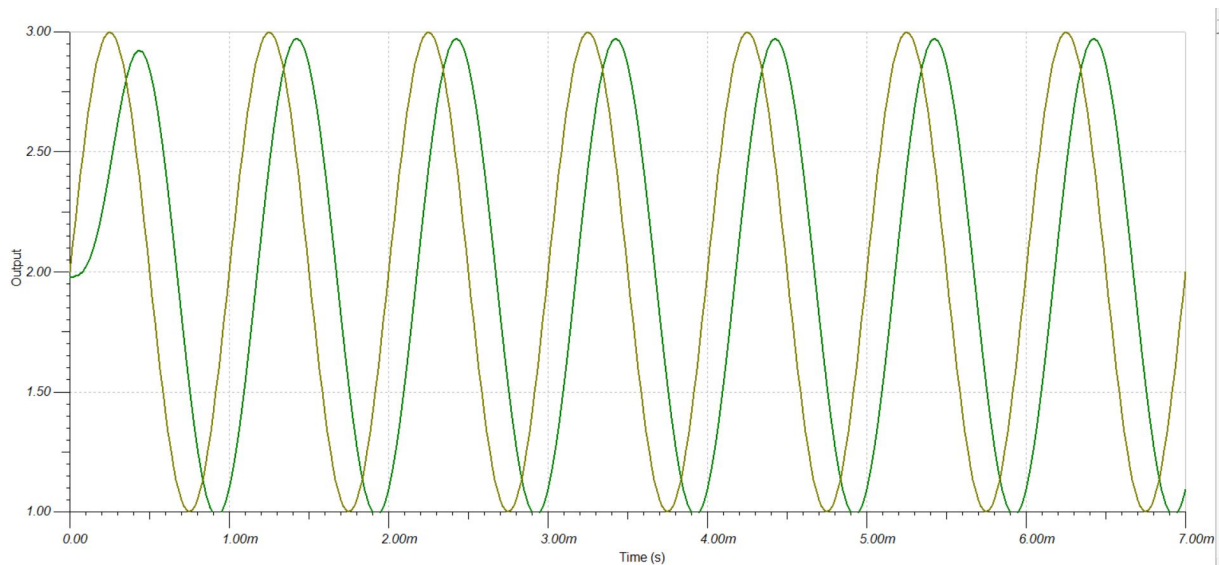


Figure 4.17: Diagrama de Bode filtro passa-baixo.

Para comprovar o seu funcionamento correto foram feitas duas simulações. A primeira com um sinal de entrada de 1 Vac, com frequência de 20 kHz, com um *offset* de 2 V, como o filtro atenua o sinal 1000 vezes, era esperado ter na saída do circuito um sinal com 2 V, com 1 mV a 20 kHz, o que se confirma quando simulado:



Na segunda simulação usou-se uma entrada de 1 V, porém com frequência de 1 kHz, na mesma com um *offset* de 2 V, simulando era esperado que o filtro deixasse passar o sinal, o que se confirma simulando:



4.2.4 Comparador

O último módulo implementado no circuito recetor foi um comparador, sendo possível verificar na figura 4.17.

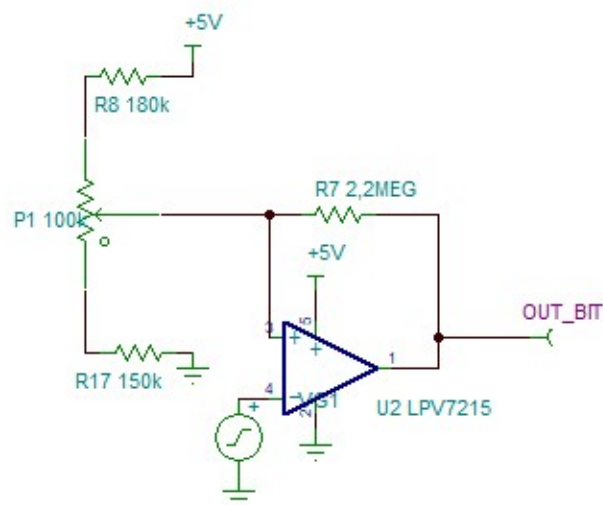


Figure 4.18: Comparador implementado.

Como amplificador neste circuito foi utilizado o integrado *LPV7215* (figura 4.19), que tal como o integrado utilizado em ambos os filtros possui algumas características que foram importantes para esta escolha como: *rail-to-rail input output*, permitindo assim usar o intervalo completo entre tensão de alimentação negativa e positiva tanto na entrada como na saída, ser projetado para operar numa larga gama de tensões de alimentação, nomeadamente de 1,8 a 5,5 V e ser um amplificador com um consumo baixíssimo, na ordem dos 580 nA.

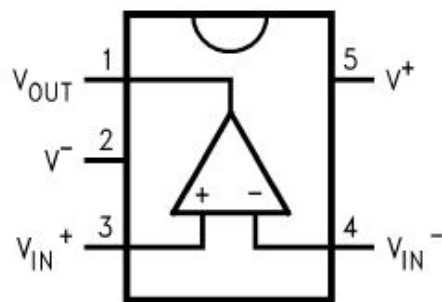


Figure 4.19: LPV7215 output.

Para evitar que o sinal de saída oscile demasiado rápido quando os valores de entrada estão próximos um do outro, foi definido que para a gama de tensões pretendida para este comparador (1,9-2,8 V) um valor de histerese de 0,2 V, e tal como nos filtros, através da ferramenta *OKAWA Eletric Design*, com estas características, obtiveram-se os valores de 180 k Ω , 100 k Ω e 150 k Ω para as três resistências conectadas à entrada não inversora, à fonte de alimentação e ao GND, componentes estes que tem como função ajudar a definir o valor de referência para a tensão na entrada não inversora e determinam a histerese do comparador.

A resistência de 2 M Ω conectada entre a entrada positiva do AMPOP e a saída do mesmo é usada para a realimentação positiva.

Para comprovar o correto funcionamento do circuito comparador, simulou-se o circuito com um sinal quadrado de entrada com 1 kHz e 1,9 V de amplitude e obteve-se o gráfico da figura 4.20.

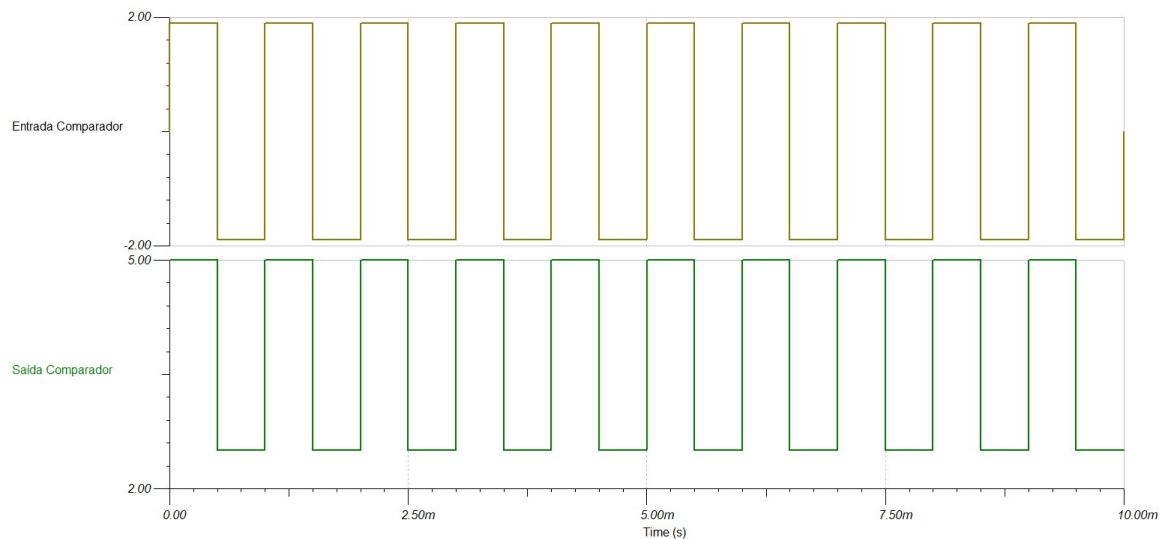


Figure 4.20: Simulação do circuito comparador, sinal amarelo representa a entrada e sinal verde a saída.

É então possível verificar o correto funcionamento do comparador através da simulação porque quando o sinal de entrada tem amplitude de 1,9 V, a saída deve mudar para 5 V quando a entrada não inversora for maior que a entrada inversora.

4.3 Emissor eletrônico

A geração do sinal sinusoidal para atuar os transdutores acústicos é proporcionada pelo DAC de um microcontrolador.

Para ser possível é necessária configuração do DAC para que a tensão de saída corresponda ao valor digital enviado, com isto é necessário armazenar os valores do sinal sinusoidal na memória do microcontrolador para posteriormente ser possível enviar para a saída do DAC.

Este processo é dividido em duas etapas: geração da tabela de valores de forma da onda sinusoidal e geração das ondas sinusoidais.

4.3.1 Microcontrolador utilizado

O microcontrolador escolhido foi a *STM32F767ZI*, que utiliza um processador *ARM Cortex M7*. Os principais motivos para esta escolha foram a familiaridade com a placa, o seu custo relativamente acessível, o facto de apresentar um bom desempenho e ser de baixo consumo (1,7-3,3 V). Com isto é possível realizar o controlo do sistema a implementar, nomeadamente na atuação para gerar as ondas sinusoidais pretendidas, assim como todo o processamento de dados inerente.

Esta placa tem como principais características possuir um extenso pinout, mais especificamente possuir 168 pinos programáveis, com acesso ao *software STM32CubeMX* que permite uma facilidade na configuração dos periféricos com necessidade de uso.

Principais especificações fundamentais neste módulo:

- 2 Mb de memória *flash*
- 4 UARTs
- Oscilador de 26 MHz
- 2 12-bit DAC

No emissor eletrónica a placa tem como função gerar os sinais sinusoidais através do seu DAC e processar e armazenar os dados adquiridos.

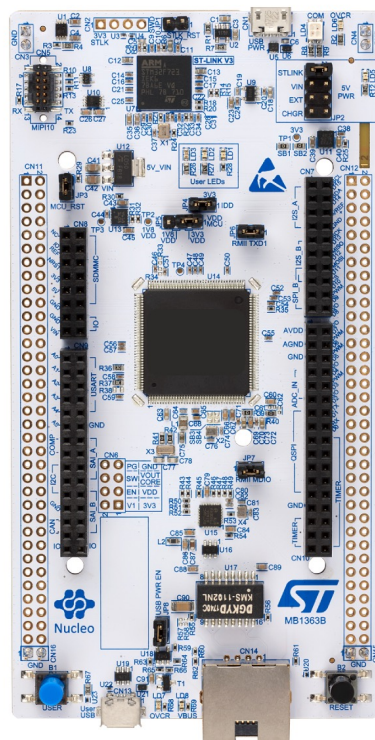


Figure 4.21: Microcontrolador *STM32F767ZI*.

4.3.2 Geração das ondas sinusoidais

Uma das principais maneiras para transferir os pontos da forma de onda alocados na memória para a saída do DAC é utilizando o CPU, contudo não é uma forma muito viável porque se trata de um método dispendioso na medida em que sobrecarga o CPU, sobrecarga o seu consumo e qualquer interrupção ou existência de funções com prioridade à geração da onda sinusoidal causam distorção na saída do sinal do DAC.

Para evitar isso utilizou-se então a unidade DMA, conjuntamente com um *timer* que periodicamente dá *trigger* à unidade DMA para mover um ponto da forma de onda para a saída do DAC. Sempre que ocorre esta transferência de um ponto, incrementa-se um *memory pointer* para ser possível mover a próxima amostra da tabela quando ocorrer o *trigger* seguinte.

Sendo assim conclui-se que este método é a melhor forma de gerar as ondas sinusoidais evitando assim a tal sobrecarga do CPU.

Foi utilizado um *timer* com compatibilidade com o DAC, neste caso o utilizado foi o *timer* 8 e através das seguintes equações foi possível calcular e gerar as frequências das ondas sinusoidais pretendidas:

$$TriggerFrequency = \frac{F_{CLK}}{(PSC + 1) \times (ARR + 1)}$$

Onde F_{CLK} é a frequência do *clock* utilizada pela *timer*, PSC o registo do *prescaler* e o ARR o registo do *auto-reload*.

$$OutWaveFrequency = \frac{TriggerFrequency}{N_s}$$

Onde *OutWaveFrequency* é a frequência da onda de saída do DAC e N_s é o número de amostras.

Posto isto, deve haver uma simbiose entre os valores do PSC, do ARR e do número de amostras para se poder maximizar a onda de saída porque uma onda sinusoidal com demasiada distorção pode ter influência negativa na atuação do transdutor dificultando a leitura do sinal a receber.

4.4 Esquema completo

Após ter-se cada módulo implementado é, assim, possível fazer o esquema de todo o processo do controlo remoto.

Desta forma, no esquemático seguinte estão representadas as várias ligações de cada módulo do sistema. Assim, o microprocessador começa por gerar sinais digitais convertidos pelo DAC sendo transmitidos pelo emissor para o transdutor recetor, posteriormente passam por um filtro passa-banda projetado para permitir que apenas o sinal modulado em frequência passe através dele. O filtro rejeita qualquer

sinal fora da faixa de frequência especificada. Em seguida é implementado um desmodulador à base de um PLL que converte o sinal modulado em frequência de volta no sinal de base original. Depois o sinal é filtrado novamente, desta vez por um filtro passa-baixo, e finalmente é usado um comparador para produzir uma saída digital.

O que pode ser visto no diagrama de blocos na figura 4.24.

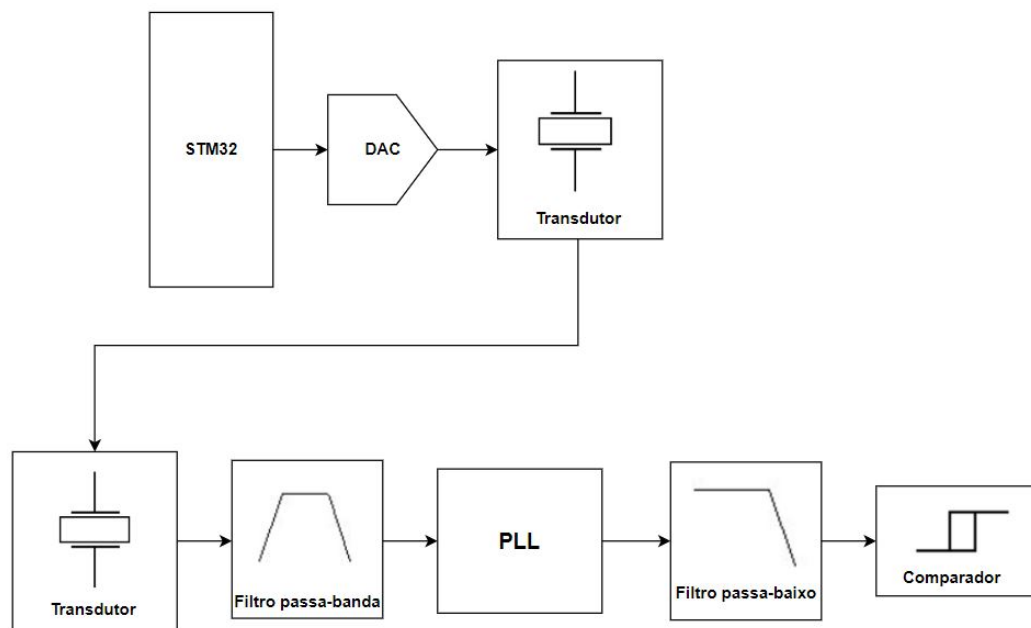


Figure 4.22: Esquema completo.

5. Testes e Resultados

Neste capítulo são apresentados os resultados do sistema desenvolvido face aos testes realizados, onde se pretende apresentar as potencialidades e o correto funcionamento de cada módulo implementado.

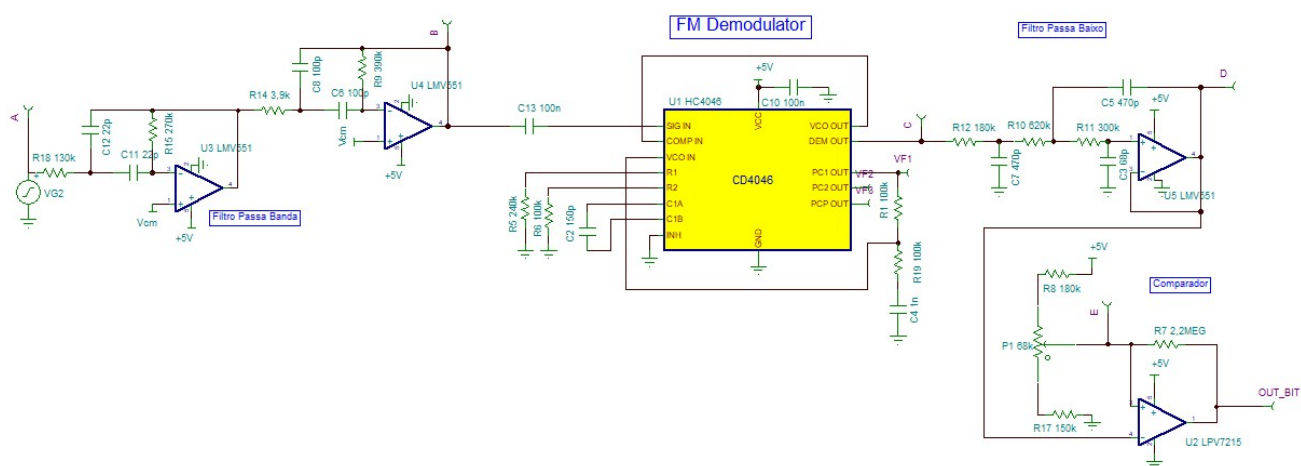


Figure 5.1: Circuito recetor completo

Apenas foram realizados os testes em laboratório, não tendo sido possível a sua realização de testes em ambiente real, nomeadamente no mar.

5.1 Desmodulador

O primeiro teste realizado foi para conferir que o desmodulador à base de um PLL estava bem implementado. Verificou-se numa primeira instância se a entrada do circuito (ponto B da figura 5.1) estava sincronizada com a saída do mesmo (ponto C da figura 5.1).

O que é possível conferir na figura 5.2, ao obter-se um sinal de saída limpo com a frequência a ser um múltiplo inteiro da frequência da onda de entrada.

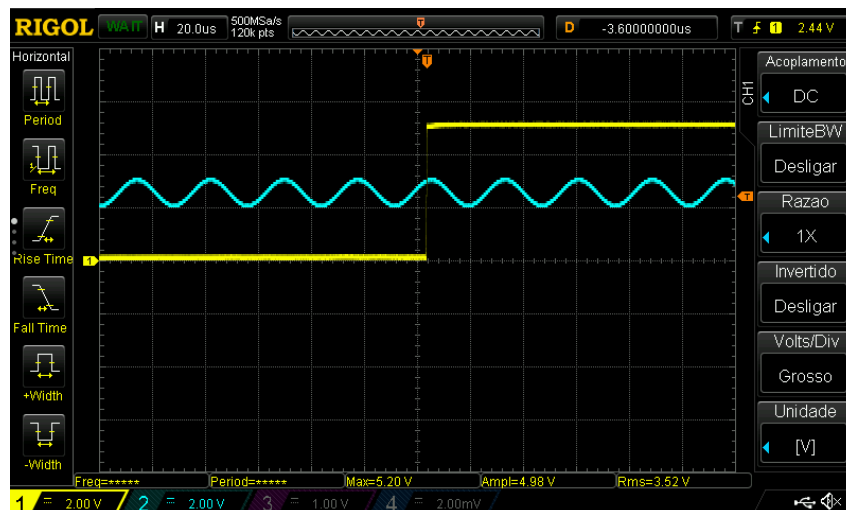


Figure 5.2: Desmodulador, sinal de entrada a azul e sinal de saída a amarelo

O VCO é um componente muito importante de um circuito PLL, pois fornece uma maneira de ajustar a frequência de saída do PLL para seguir a frequência do sinal de entrada modulado.

Para testar o correto funcionamento do VCO, foi feita primeiro uma simulação com uma entrada sinusoidal no PLL de 1,5 V, com frequência de 36 kHz e um *offset* de 2 V, sendo obtido através da simulação o sinal da figura 5.3, onde o sinal amarelo representa a entrada do PLL, o azul a saída do VCO e a violeta a entrada do VCO.

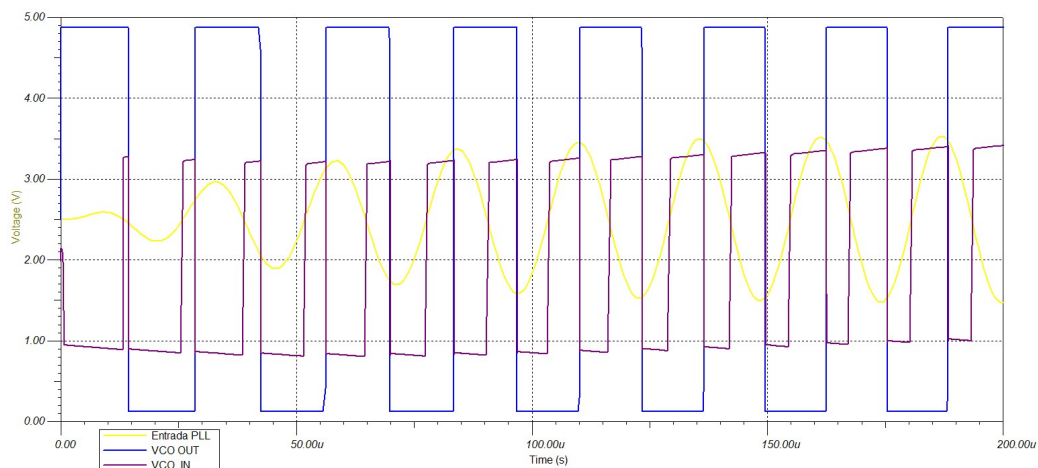


Figure 5.3: Simulação do funcionamento do VCO

Verifica-se na simulação que a PLL sincroniza a tensão gerada pelo VCO (azul) com a tensão de entrada (amarelo). Isto é conseguido com a tensão de erro (roxo) que é aplicada a tensão de entrada no VCO, gerada pela PLL. Posteriormente, testando na prática, o resultado obtido foi o seguinte:

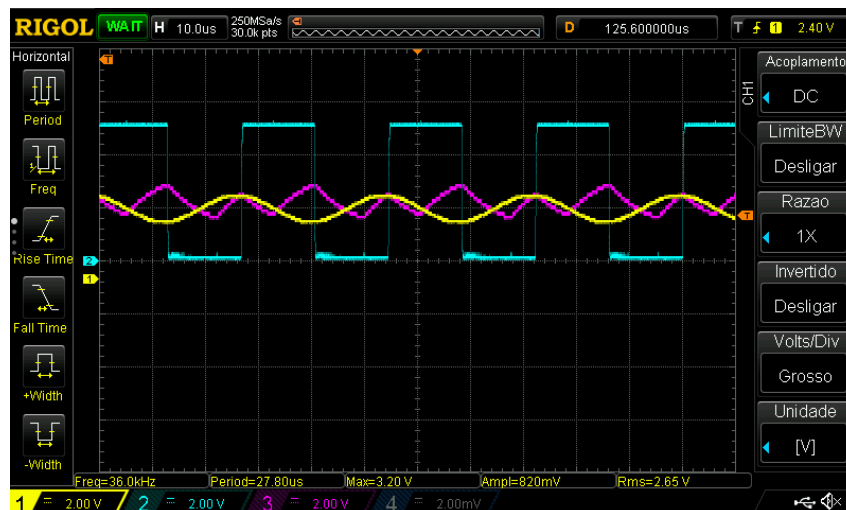


Figure 5.4: Onda de entrada sincronizada com o VCO. A amarelo o sinal de entrada da PLL, a azul a saída do VCO e a roxo a tensão de erro, saída da PLL e entrada do VCO.

Tal como na simulação, verifica-se o sincronismo entre a tensão de entrada (amarelo) e a tensão gerada pelo VCO (azul). Com isto é possível concluir que num valor dentro da gama de frequência pretendidas 35 - 42 kHz, o VCO está sincronizado com a onda entrada.

Posteriormente, com o VCO sincronizado no intervalo de frequências correto, é aplicada na entrada um sinal quadrado de 200 Hz (representando um sinal digital a 400 bps), modulado em FSK, com duas frequências, 39 kHz e 41 kHz. Cada bit tem a duração de 2,5 ms. O sinal ainda contém alguns componentes de alta frequência que precisam de ser filtrados. O filtro passa-baixo é usado para eliminar essas frequências e obter o sinal de base original. Então mediu-se a saída do filtro passa-baixo (ponto D da figura 5.1) e tal como esperado temos um sinal filtrado sincronizado com a saída do desmodulador (ponto C da figura 5.1), como é possível verificar na figura 5.5.

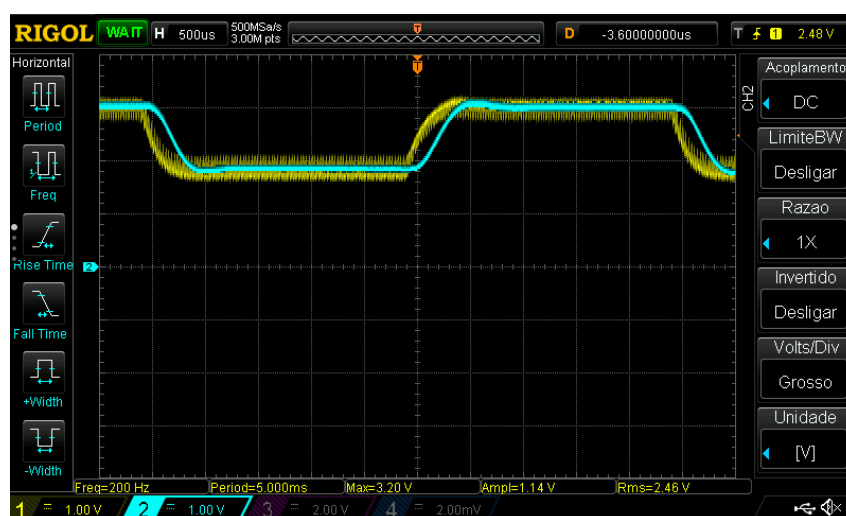


Figure 5.5: Saída desmodulador (sinal amarelo) sincronizada com a saída do filtro (sinal azul)

5.2 Comparador

Finalmente o sinal filtrado passa por um comparador, que é usado para produzir uma saída digital. O comparador compara o sinal de entrada com uma tensão de referência e produz um sinal digital de saída com base nessa comparação. Com isto a saída do comparador é o sinal modulado em frequência reconstruído original.

Neste caso, como é um comparador inversor quando sinal de saída do filtro passa-baixo (sinal azul) é positiva, o sinal de saída do comparador (sinal amarelo) tem de ser o inverso, e vice-versa, isto é garantido, podendo ser comprovado analisando os sinais da figura 5.6.

Outro ponto interessante é ver a comutação da histerese (sinal rosa) em que se comprova na prática que acompanha a mudança do sinal de saída para positivo ou negativo, sendo também possível verificar na figura 5.6.

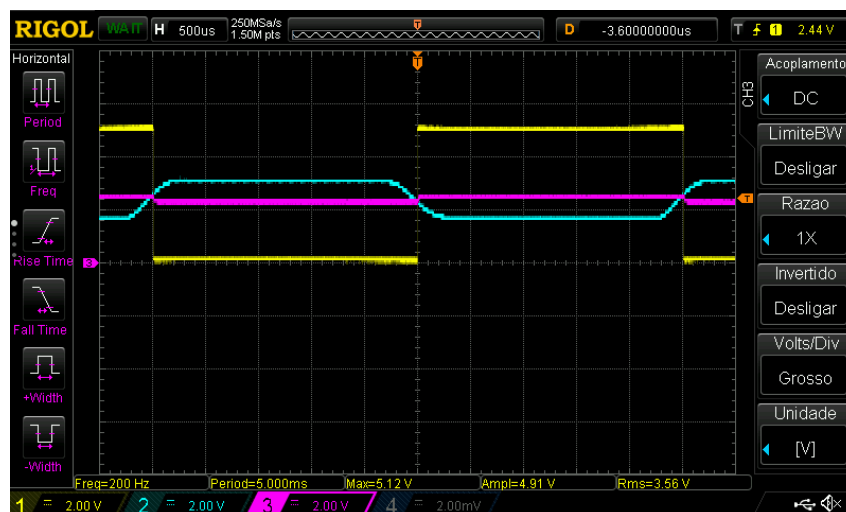


Figure 5.6: A azul o sinal após desmodulação, a roxo a referência de comparação e a amarelo a saída comparador

5.3 DAC

O primeiro módulo da geração do sinal de atuação é o DAC, onde se pretendia gerar uma onda sinusoidal de 39 kHz e outra de 41 kHz, e para se possibilitar isto foram utilizadas duas tabelas resultantes da simulação em *MatLab* (referidas no capítulo 4.4.1).

Analisando as figuras seguintes, é possível comprovar que, apesar não haver uma total exatidão, os resultados obtidos aproximam-se muito dos esperados 39,2 kHz e 40,8 kHz:

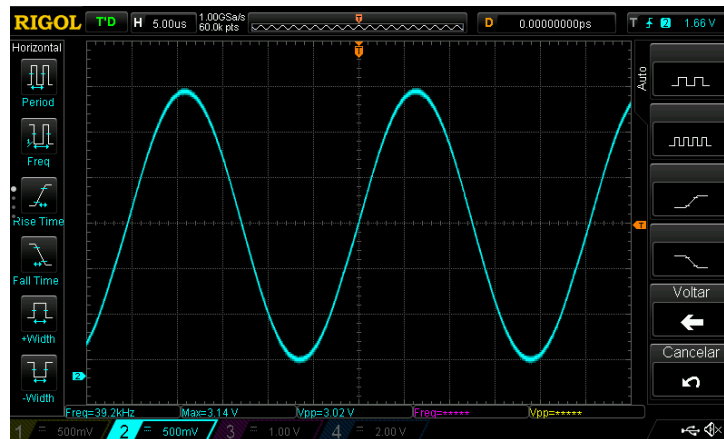


Figure 5.7: Sinal de saída do DAC para 39 kHz.

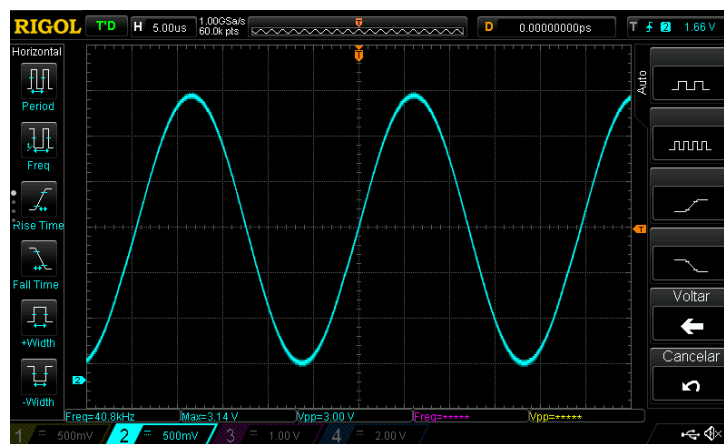


Figure 5.8: Sinal de saída do DAC para 41 kHz.

5.4 Teste em Ambiente Aquático

Após a validação de todos os módulos do circuito recetor e da implementação do emissor, foi então possível avançar para os testes em meio aquático, estes foram realizados num aquário de dimensões 130x50x40cm.

O primeiro teste realizado foi a comunicação entre transdutores, para conferir o seu correto isolamento e se a transmissão ocorria sem problemas. Ao emissor foi dado um sinal sinusoidal de 15 Vpp com 40 kHz de frequência, tendo estes a seguinte disposição:

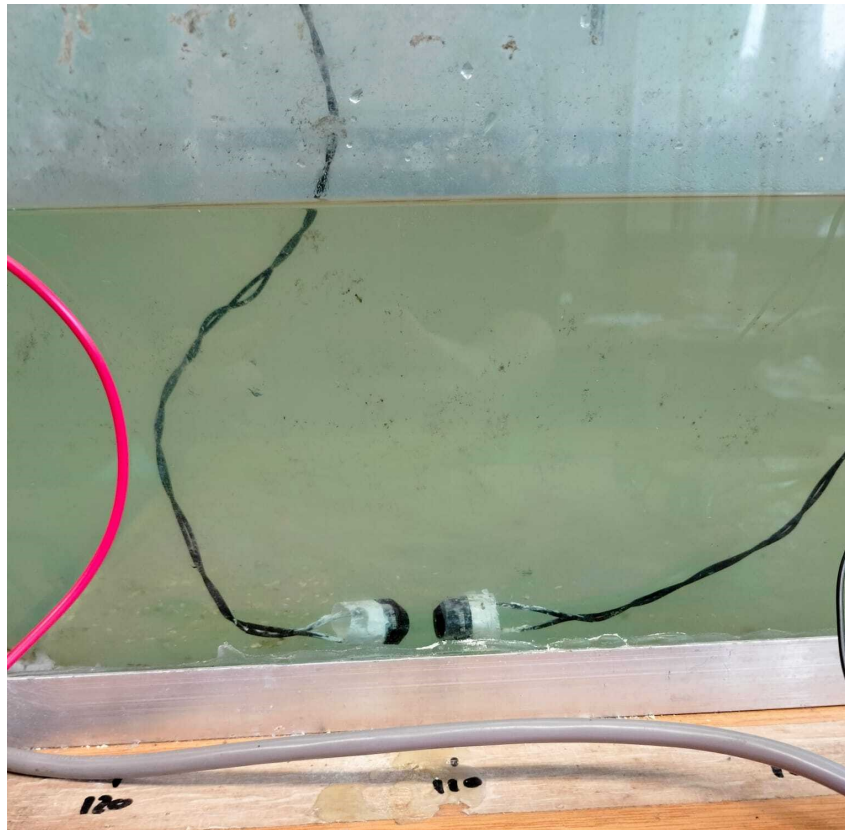


Figure 5.9: Setup dos testes dos transdutores em meio aquático

Foi então testado numa primeira instância o módulo de transmissão, para avaliar a amplitude do sinal recebido, medido diretamente no transdutor. Assim, observando os resultados da figura seguinte, o sinal confere-se que recebido tem aproximadamente 92 mVpp, com a frequência da onda a ser de 40 kHz, concluindo-se que a transmissão ocorre corretamente, comprovável pela figura 5.10.

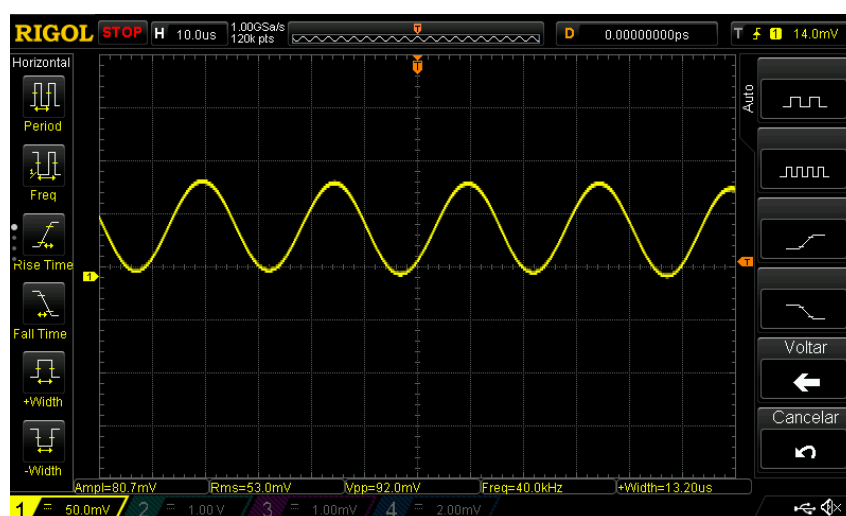


Figure 5.10: Sinal recebido pelo transdutor recetor

Posteriormente, foi se implementando módulo a módulo do circuito recetor, começando pelo filtro passa-banda.

Nos resultados esperava-se com a implementação deste primeiro módulo que o sinal fosse ampliado e o ruído presente diminuído, o que se confirmou com a obtenção de um sinal de 5 V como se pode conferir na figura seguinte:

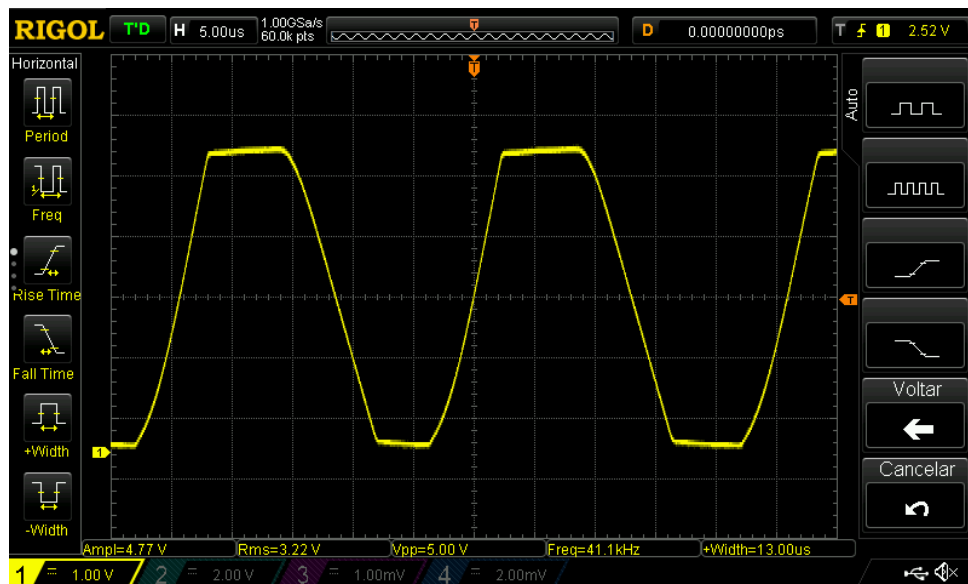


Figure 5.11: Sinal recebido pelo transdutor recetor com o filtro passa-banda

Dado a proximidade entre o recetor e o emissor, o sinal recebido atinge a saturação, após a amplificação.

Tal como os resultados obtidos fora de água foi possível confirmar que no mesmo intervalo definido, 35-42 kHz, o VCO continua em sincronismo com a onda de entrada no desmodulador, e ao analisar os resultados na saída do filtro confirma-se também o correto funcionamento, pois as componentes de alta frequência são eliminadas e obteve-se o sinal filtrado com a saída do desmodulador.

O resultado da sincronização da entrada e saída do VCO com o sinal de entrada do desmodulador é possível verificar-se na figura 5.12, já a confirmação que do correto funcionamento do filtro passa-baixo verifica-se na figura 5.13.

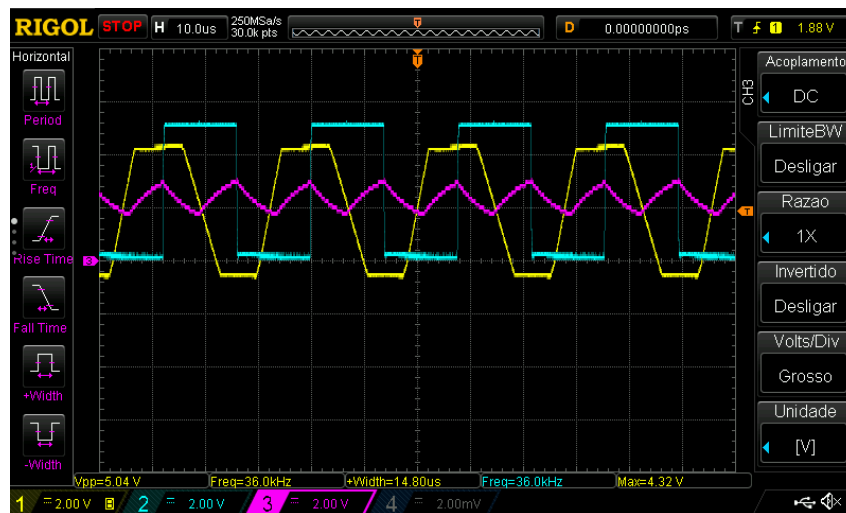


Figure 5.12: Sincronismo da PLL: A amarelo o sinal de entrada e a azul o sinal em sincronismo, gerado pelo VCO. A roxo o sinal de erro, na entrada do VCO.

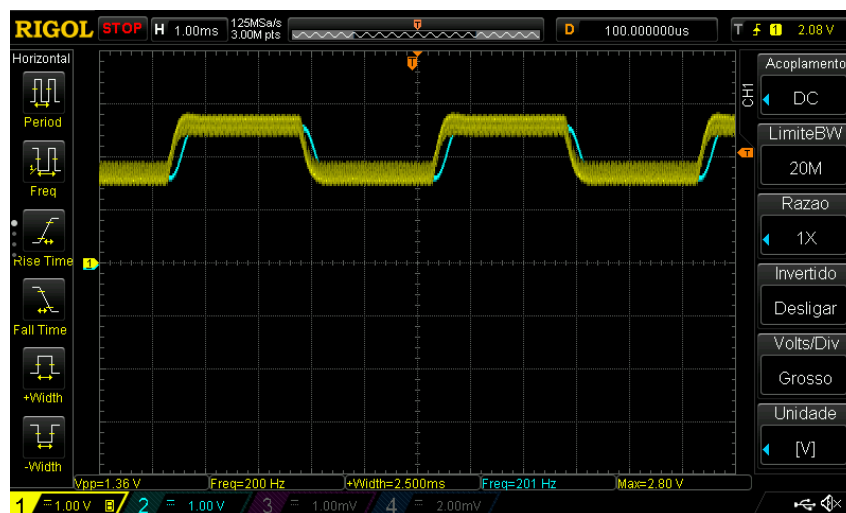


Figure 5.13: Sinal desmodulado (amarelo) e saída filtro passa-baixo (azul)

Finalmente, como foi explicado no capítulo 5.2, o comparador implementado é um comparador inversor, e os resultados obtidos em ambiente aquático foram o esperado, com os sinais a serem inversos, e o sinal de histerese a acompanhar essa comutação. Nota-se apenas uma ligeira alteração da duração de cada bit (com o bit "HIGH" ligeiramente inferior e o bit "LOW" aumentado), figura 5.14.

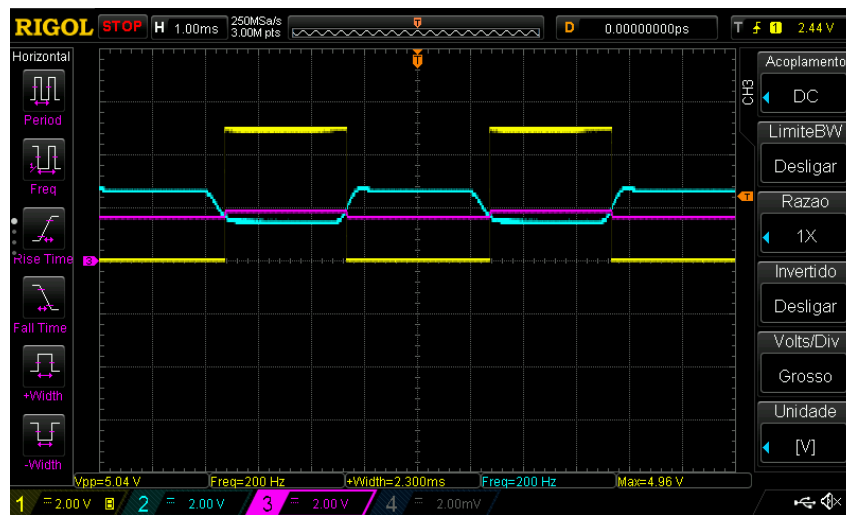


Figure 5.14: Saída digital do circuito (amarelo) em resultado da comparação do sinal desmodulado e filtrado (azul) como referência (roxo)

6. Conclusão e Trabalho Futuro

Neste capítulo final são apresentadas todas as conclusões sobre o trabalho, desde os tópicos que foram realizados com êxito, os tópicos onde as dificuldades encontradas foram maiores e todas as tarefas a serem realizadas em trabalhos futuros na área.

6.1 Conclusão

Com este projeto, foi alcançado o objetivo mínimo, mas mais importante que foi a obtenção e funcionamento de um telecomando subaquático. Embora ainda esteja numa fase muito inicial, o sistema pode ser implementado em aplicações maiores, nomeadamente nos libertadores acústicos.

Na primeira etapa, procedeu-se à caracterização dos transdutores, onde o maior obstáculo encontrado foi conseguir obter um sinal que pudesse ser lido, sendo necessário, por esse motivo, implementar um amplificador, algo que não estava no plano inicial.

No desenvolvimento do módulo de receção, surgiram as maiores dificuldades. Num determinado momento, o manuseamento de componentes tão pequenos como os que foram usados trouxe problemas, como circuitos integrados queimados ou uma maior dificuldade na implementação dos mesmos. Também surgiram complicações por nunca ter trabalhado com um desmodulador, em que compreender como gerir os dimensionamentos e a implementação do mesmo atrasaram o desenvolvimento do recetor.

Já no desenvolvimento do emissor, o maior obstáculo encontrado foi a insuficiência do clock do microcontrolador para gerar um sinal com a frequência pretendida para a atuação do transdutor emissor.

Em suma, o principal objetivo da dissertação foi alcançado, que era a possibilidade de uma comunicação rápida e eficaz em meio aquático. No entanto, faltaram ser implementadas e desenvolvidas algumas tarefas que proporcionariam um melhor desempenho a todo o sistema, algo que será abordado no capítulo seguinte.

6.2 Trabalho Futuro

Analisando o trabalho feito e os resultados obtidos é possível chegar à conclusão que vários pontos podiam ser melhorados e outras funções poderiam ter sido implementadas.

Um dos pontos que poderia ser desenvolvido seria uma melhoria nas alimentações dos circuitos, pois como os testes foram feitos em ambiente de laboratório foi sempre usado uma fonte de tensão, enquanto que o melhor seria o uso de baterias com carregadores e reguladores de tensão, juntando isto ao desenvolvimento de um PCB com o circuito todo seria algo crucial para o desenvolvimento de um protótipo pronto a ser utilizado. Também seria importante futuramente proceder à resinação de todos os circuitos, algo crucial em aplicações subaquáticas pois ajuda na proteção contra fatores como a humidade, e garante uma maior confiabilidade e durabilidade a todo o sistema. Um dos pontos em falta foi também o desenvolvimento da parte do libertador, algo que inicialmente estava no plano mas devido à complexidade não evoluiu para as etapas seguintes, sendo que futuramente é algo a implementar de modo a garantir a possibilidade de uso em aplicações de monitorização de oceanos. O *software* também é algo que pode vir a sofrer melhorias para ser mais otimizado e prático, sendo que a escolha de um microcontrolador com maior capacidade de processamento possa ser algo que ajude em tarefas futuras.

Para trabalhos futuros, seria benéfico testar o sistema como um protótipo, inicialmente em ambiente de laboratório, e depois passando para ambiente real, em rios ou mares, onde seria possível ver o funcionamento do mesmo num ambiente com condições semelhantes àquelas que seria sujeito caso fosse aplicado numa aplicação real para estudo de oceanos e vida marinha.

Bibliografia

- [1] "ATLANTIDA - Platform for the monitoring of the North Atlantic ocean and tools for the sustainable exploitation of the marine resources - cbma uminho." Available at: <https://cbma.uminho.pt/project/atlantida/#1536771724362-868564dc-bad17> (accessed Jan. 03, 2022).
- [2] "Acoustic Release Solutions." Available at: <https://www.innovasea.com/fish-tracking/products/acoustic-release-solutions/> (accessed Jan. 03, 2022).
- [3] "Ocean science and academia | aae technologies." Available at: <https://www.aaetechnologiesgroup.com/applications/ocean-science-and-academia/> (accessed Jan. 03, 2022).
- [4] "Applications - aae technologies." Available at: <https://www.aaetechnologiesgroup.com/applications/> (accessed Jan. 03, 2022).
- [5] Lin, C.-D., et al. (2021): Song Jianqiang. Journal of Physics: Conference Series, 2012(1), 012045. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2012/1/012045>
- [6] "Company | ixblue." Available at: <https://www.ixblue.com/company> (accessed Jan. 03, 2022).
- [7] "Oceano - Acoustic Releases | ixblue." Available at: <https://www.ixblue.com/products/oceano-acoustic-releases> (accessed Jan. 03, 2022).
- [8] "Model 8242XS Acoustic Release Transponder." Available at: <https://www.edgetech.com/product/model-8242xs-acoustic-release-transponder/> (accessed Jan. 03, 2022).
- [9] "SR-9100 - Acoustic Communication - Benthos." Available at: <http://www.teledynemarine.com/sr-9100?ProductLineID=9> (accessed Jan. 03, 2022).
- [10] "Acoustic Energy and Surprising Ways To Harness It (Intro To Thermoacoustics) - YouTube." Available at: https://www.youtube.com/watch?v=abswNCqnMRQ&ab_channel=NightHawkInLight (accessed Jan. 03, 2022).
- [11] L. C. da C. V. Gonçalves, "Underwater acoustic communication system: performance evaluation of digital modulation techniques," 2012, Accessed: Jan. 03, 2022. [Online]. Available at: <http://repositorium.sdum.uminho.pt/handle/1822/25726>
- [12] S. Arnon, "Underwater optical wireless communication network," Optical Engineering, vol. 49, no. 1, p. 015001, Jan. 2010, doi: 10.1117/1.3280288.

- [13] C. A. P. Oliveira, "Modem de ultrassons para comunicação subaquática a 1 Mbit/s," 2013, Accessed: Jan. 03, 2022. [Online]. Available at: <http://repositorium.sdum.uminho.pt/handle/1822/28112>
- [14] H. Brundage, "Designing a wireless underwater optical communication system," 2010, Accessed: Jan. 03, 2022. [Online]. Available at: <https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/57699>
- [15] C. Cox, "A 1 Mbps Underwater Communication System Using a 405 nm Laser Diode and Photomultiplier Tube," Master's thesis, Graduate Faculty of North Carolina State University, Department of Electrical Engineering, 2007.
- [16] "Introduction to Ocean Acoustics." Available at: <https://www.meted.ucar.edu/oceans/acoustics/navmenu.php?tab=1&page=2-0-0&type=flash> (accessed Jan. 03, 2022).
- [17] I. F. Akyildiz, D. Pompili, and T. Melodia, "State of the Art in Protocol Research for Underwater Acoustic Sensor Networks," 2006, doi: 10.1145/1161039.1161043.
- [18] L. Liu, S. Zhou, and J.-H. Cui, "Prospects and Problems of Wireless Communication for Underwater Sensor Networks," *Wireless Communications and Mobile Computing (WCMC)*, vol. 8, pp. 977-994, 2008.
- [19] Mendes, D. (2011). "A matlab/simulink model to evaluate underwater acoustic communication systems". Tese de Mestrado, Universidade do Minho, Dezembro 2011.
- [20] James Preisig. 2007. Acoustic propagation considerations for underwater acoustic communications network development. *SIGMOBILE Mob. Comput. Commun. Rev.* 11, 4 (October 2007), 2–10. <https://doi.org/10.1145/1347364.1347370>
- [21] Stern., D. B. (2008). *Underwater Sound AND THE MARINE MAMMAL ACOUSTIC ENVIRONMENT A Guide to Fundamental Principles*. U.S. Marine Mammal Commission.
- [22] M. S. Martins, J. V. G. Rocha, J. M. Tavares, V. Cabral, and S. Lanceros-Mendez, "Ultrasonic Wireless Broadband Communication System for Underwater Applications Ultrasonic Wireless Broadband Communication System for Underwater Applications Universidade do Minho Escola de Engenharia iii," 2013.
- [23] Stojanovic, M. (1999). "Underwater acoustic communication". *Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering*.
- [24] Carlson, A. (1986). *Communication Systems: "An introduction to signals and noise in electrical communication"*, 1986.
- [25] Haykin, S. (2001). "Communication Systems, 4th Edition". (I. John Wiley and Sons, Ed.), 2001.
- [26] "Analog and digital modulation in the field of Communications," Modulation, Analog modulation, Digital modulation, AM, FM, PM, ASK, FSK, PSK explained. [Online]. Available: <https://www.equestionanswers.com/notes/modulation-analog-digital.php>. [Accessed: 23-Apr-2023].
- [27] Sartori, José Carlos. (2001). "Princípios de comunicação: modulação em amplitude." 2001.