



**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
DO CEARÁ**

**CAMPUS FORTALEZA**

**DIRETORIA DE PESQUISA, PÓS-GRADUAÇÃO E INOVAÇÃO  
COORDENAÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE  
TELECOMUNICAÇÕES**

**ANDRÉ FONTES DE OLIVEIRA**

**MODELO DE SIMULAÇÃO PARA UM CANAL DE COMUNICAÇÃO  
ACÚSTICO SUBAQUÁTICO COM TRANSDUTORES  
PIEZOELÉTRICOS**

**FORTALEZA**

**2018**

ANDRÉ FONTES DE OLIVEIRA

MODELO DE SIMULAÇÃO PARA UM CANAL DE  
COMUNICAÇÃO ACÚSTICO SUBAQUÁTICO COM  
TRANSDUTORES PIEZOELÉTRICOS

Dissertação submetida à Coordenação de Pós-Graduação em Engenharia de Telecomunicações do Instituto Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Telecomunicações.

Área de concentração: Sistemas de Telecomunicações.

Orientador: Francisco José Alves de Aquino

Fortaleza  
2018





INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO CEARÁ  
COORDENAÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE  
TELECOMUNICAÇÕES

**André Fontes de Oliveira**

Esta Dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Telecomunicações, sendo aprovada pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Telecomunicações do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará e pela banca examinadora:

Orientador: Prof. Dr. Francisco José Alves de Aquino

Universidade Federal do Ceará – UFC

Prof. Dr. Daniel Xavier Gouveia

Instituto Federal do Ceará – IFCE

Prof. Dr. Alzuir Ripardo de Alexandria

Instituto Federal do Ceará – IFCE

Prof. Dr. Juan Carlos Alvarado Alcócer

Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira – UNILAB

Dedico este trabalho a minha mãe.

---

# Agradecimentos

---

A realização deste trabalho só foi possível devido ao imenso apoio de algumas pessoas, mas principalmente da minha namorada, companheira de todos os momentos e também estudante de pós-graduação, Lana Beatriz Medeiros de Mesquita. Nunca conseguirei expressar o quanto lhe sou grato por não ter poupado esforços para me ajudar, dia e noite, seja nas simulações ou no propósito do mestrado. A você dedico a minha mais sincera gratidão.

Um especial agradecimento à minha amada família. Minha mãe, Meyrilene Fontes de Oliveira, obrigado por me prover toda a base necessária para que eu pudesse crescer pessoal e profissionalmente. Ao seu lado aprendi, e continuo aprendendo, que não há dificuldade grande demais que a fé não consiga superar. Você é minha grande inspiração na vida. Meu pai, Álvaro Barros de Oliveira, obrigado por investir em mim e no meu futuro. Apenas nós dois sabemos o quanto o senhor queria que eu estudasse nesta instituição. Aos meus irmãos, Milenna Fontes de Oliveira, Álvaro Fontes de Oliveira, Andressa Fontes de Oliveira e Newton Fontes de Oliveira, obrigado a cada um de vocês que sempre acreditaram na minha capacidade e me motivam a correr atrás. Me inspiro diariamente em cada um de vocês. Minha avó, Maria José de Almeida Fontes, que representa o ser mais forte de saúde no auge dos seus 80 anos, agradeço pelo apoio e companheirismo diário.

Um agradecimento especial ao meu sogro Herculano Cisne de Mesquita e à minha sogra Zélia Maria Batista de Medeiros pelo acolhimento, suporte, companhia e paciência comigo. É uma bênção ter a amizade de vocês e saber que posso contar com ela em todos os momentos.

Ao meu orientador e professor Francisco José Alves de Aquino. Agradeço-lhe por inúmeras vezes sentar comigo para simular, para ver meu trabalho e dar feedbacks e por tantas outras contribuições técnicas e estratégicas. Pela confiança que deposita em mim, pelo respeito e pela paciência.

Aos professores participantes da banca examinadora e da banca de qualificação: Prof. Dr. Francisco José Aquino, Prof. Dr. Daniel Xavier Gouveia, Prof. Dr. Auzuir Ripardo de Alexandria e o Prof. Dr. Juan Carlos Alvarado Alcócer, pelo tempo dedicado à leitura e à elaboração de suas valiosas e indispensáveis contribuições visando ao engrandecimento deste trabalho.

À Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Telecomunicações do IFCE (PPGET), representada pelo Prof. Dr. Francisco José Aquino, pela presteza e por todo o suporte prestado durante essa importante fase.

Aos meus amigos pessoais, em especial Leonardo Salmito, Leandro Salmito, Daniel Cavalcante, Paulo Armando, que contribuíram diretamente na minha jornada acadêmica, ou indiretamente na forma de motivação ao meu contínuo progresso; Aos colegas de mestrado que fizeram parte dessa jornada e que compartilharam conhecimentos e ideias.

O desenvolvimento desta dissertação de mestrado é resultado de um projeto de Pesquisa, Desenvolvimento & Inovação (PDI) desenvolvido por alunos e professores do Instituto Federal de Educação, Ciências e Tecnologia do Ceará (IFCE) e da Universidade Federal do Ceará (UFC). A pesquisa foi realizada nos laboratórios do IFCE e no Laboratório de Telecomunicações, Ciência e Engenharia dos Materiais (LOCEM) da UFC. A pesquisa foi financiada pela ELETROSUL Centrais Elétricas S.A, a qual agradecemos pelo incentivo e recursos investidos para geração de conteúdo científico nesta forma, bem como para o estímulo à pesquisa de novas tecnologias para a área de telecomunicações. Agradecemos ao Professor V. Dmitriev da Universidade Federal do Pará (UFPA) por permitir o uso do software *COMSOL Multiphysics* e agradeço ao IFCE por permitir o uso do software *Matlab* (versão 8.1.0.604 - R2013a).

“A mente que se abre a uma nova ideia jamais voltará ao seu tamanho original”.

Albert Einstein

---

# Resumo

---

A evolução dos sistemas de comunicações para ambientes terrestres vem sendo amplamente estudado e tem se consolidado no decorrer das últimas décadas. Entretanto, as comunicações para ambientes subaquáticos ainda carecem quantitativamente de pesquisas, demandando mais estudos visando ao aprimoramento das técnicas de transmissão neste ambiente pouco explorado. Uma das técnicas que vêm chamando a atenção dos pesquisadores é a comunicação acústica subaquática onde a piezoelectricidade atua como elemento ativo dos transdutores na geração de sinais na forma de ondas acústicas que são propagadas pelo canal de comunicação. Neste tipo de comunicação, o efeito da piezoelectricidade ocorre na transmissão e recepção de um sinal acústico, onde o dispositivo que transmite o sinal é o projetor e o que recebe é o hidrofone. O objetivo geral deste trabalho é desenvolver um modelo de simulação para um canal de comunicação acústico subaquático com transdutores piezoelétricos desenvolvidos para trabalhar na frequência de operação ótima do canal. Para realizar esta simulação foram utilizados os softwares *COMSOL Multiphysics* e *Matlab/Simulink*, que juntos compuseram o modelo proposto. No primeiro software foi modelado o transdutor piezoelétrico onde foram extraídas suas principais características, como o diagrama de radiação do feixe sonoro, a variação de fase, a largura de banda de operação e a frequência de ressonância do sinal. Estas características foram utilizadas como parâmetros de entrada para a modelagem do canal de comunicação acústico subaquático realizado pelo segundo software. Este canal de comunicação é formado por blocos de atrasos de propagação, múltiplos caminhos, atenuação do meio e ruído ambiental, onde foram simulados dois cenários diferentes, com modulação e filtragem na recepção do sinal. Os resultados obtidos em ambas as modelagens, do transdutor piezoelétrico e do canal de comunicação acústico subaquático, são devidamente apresentados e discutidos ao longo desta dissertação. Como principais contribuições desta pesquisa temos que: (i) a modelagem do transdutor nos proporcionou a escolha da frequência de operação de acordo com o tipo de aplicação desejada; (ii) a flexibilidade dos cenários propostos, nos permitiu identificar e comparar os efeitos ocasionados pelo canal de comunicação, onde os sinais recebidos apresentaram características similares aos sinais originais tornando possível reconhecer a informação transmitida pelo canal. Comparamos o modelo com os trabalhos relacionados e obtivemos resultados coerentes com a literatura. O modelo proposto encontra-se

disponível à comunidade acadêmica para que seja utilizado, melhorado ou sirva como base para trabalhos futuros.

**Palavras-chave:** *Comunicação Acústica Subaquática, Piezoeletricidade, Transdutor Piezoelétrico.*

---

# Abstract

---

The evolution of communication systems for terrestrial environments has been widely studied and has consolidated over the last decades. However, communications for underwater environments still lack quantitative research, requiring more studies aimed at improving transmission techniques in this poorly explored environment. One of the techniques that come to the attention of the researchers is the underwater acoustic communication where piezoelectricity acts as an active element of the transducers in the generation of signals in the form of acoustic waves that are propagated by the communication channel. In this type of communication, the effect of piezoelectricity occurs in the transmission and reception of an acoustic signal, where the device that transmits the signal is the projector and the one that receives it is the hydrophone. The general objective of this work is to develop a simulation model for an underwater acoustic communication channel with piezoelectric transducers developed to work on the optimal channel operating frequency. In order to perform this simulation, the software COMSOL Multiphysics and Simulink were used, which together made up the proposed model. In the first software the piezoelectric transducer was modeled where its main characteristics were extracted, such as the beam radiation pattern, the phase variation, the operating bandwidth and the signal resonance frequency. These characteristics were used as input parameters for the modeling of the underwater acoustic communication channel performed by the second software. This communication channel consists of blocks of propagation delays, multiple paths, environmental attenuation and environmental noise, where two different scenarios were simulated, with modulation and filtering at the signal reception. The results obtained in both modeling, the piezoelectric transducer and the underwater acoustic communication channel are duly presented and discussed throughout this work. As main contributions of this research we have that: the modeling of the transducer has given us the choice of the operating frequency according to the type of application desired; the flexibility of the proposed scenarios has allowed us to identify and compare the effects caused by the communication channel, where the received signals present characteristics similar to those of the original signals, which enables to recognize the information transmitted by the channel. We compared the model with the related works and obtained results consistent with the literature. The proposed model is available to the academic community so it can be used, improved or to serve as a basis for future work.

**Keywords:** *Underwater Acoustics Communication, Piezoelectricity, Piezoelectric Transducer.*

---

# Sumário

---

|                                                         |            |
|---------------------------------------------------------|------------|
| <b>Lista de Figuras</b>                                 | <b>xvi</b> |
| <b>Lista de Tabelas</b>                                 | <b>xix</b> |
| <b>Lista de Símbolos</b>                                | <b>xx</b>  |
| <b>Lista de Abreviações</b>                             | <b>xxi</b> |
| <b>1 Introdução</b>                                     | <b>1</b>   |
| 1.1 Objetivos Geral e Específicos . . . . .             | 3          |
| 1.2 Produção Científica . . . . .                       | 4          |
| 1.3 Organização da Dissertação . . . . .                | 4          |
| <b>2 Fundamentação Teórica</b>                          | <b>6</b>   |
| 2.1 Piezoeletricidade . . . . .                         | 6          |
| 2.1.1 Fenômeno Piezoelétrico . . . . .                  | 7          |
| 2.1.2 Propriedades da Piezoeletricidade . . . . .       | 8          |
| 2.1.3 Materiais Piezoelétricos . . . . .                | 14         |
| 2.1.4 Aplicações Piezoelétricas . . . . .               | 18         |
| 2.2 Comunicação Subaquática . . . . .                   | 19         |
| 2.2.1 Canal Acústico Subaquático . . . . .              | 20         |
| 2.2.2 Velocidade de Propagação do Som na Água . . . . . | 20         |
| 2.2.3 Múltiplos Caminhos . . . . .                      | 23         |
| 2.2.4 Atenuação e Perdas . . . . .                      | 25         |

|          |                                                         |           |
|----------|---------------------------------------------------------|-----------|
| 2.2.5    | Ruídos . . . . .                                        | 28        |
| 2.2.6    | Largura de Banda . . . . .                              | 29        |
| 2.2.7    | Aplicações em Comunicação Subaquática . . . . .         | 29        |
| 2.3      | Modulação por Chaveamento por Amplitude (ASK) . . . . . | 30        |
| 2.4      | Trabalhos Relacionados . . . . .                        | 30        |
| 2.5      | Conclusão do Capítulo . . . . .                         | 34        |
| <b>3</b> | <b>Metodologia</b>                                      | <b>36</b> |
| 3.1      | Introdução . . . . .                                    | 36        |
| 3.2      | Modelagem do Transdutor . . . . .                       | 37        |
| 3.2.1    | Transdutor Vibrando Livrementemente . . . . .           | 38        |
| 3.2.2    | Transdutor Vibrando Dentro do Aquário . . . . .         | 40        |
| 3.3      | Modelagem do Canal de Comunicação Acústico . . . . .    | 42        |
| 3.3.1    | Organização do Cenário . . . . .                        | 43        |
| 3.3.2    | Bloco de Múltiplos Caminhos . . . . .                   | 45        |
| 3.3.3    | Bloco de Atenuação . . . . .                            | 47        |
| 3.3.4    | Bloco de Ruídos . . . . .                               | 49        |
| 3.3.5    | Filtragem do Sinal . . . . .                            | 50        |
| 3.4      | Conclusão do Capítulo . . . . .                         | 51        |
| <b>4</b> | <b>Resultados e Discussão</b>                           | <b>52</b> |
| 4.1      | Introdução . . . . .                                    | 52        |
| 4.2      | Resultados da Modelagem do Transdutor . . . . .         | 52        |
| 4.2.1    | Transdutor Vibrando Livrementemente . . . . .           | 53        |
| 4.2.2    | Transdutor Vibrando Dentro do Aquário . . . . .         | 54        |
| 4.2.3    | Comparação dos Transdutores . . . . .                   | 56        |
| 4.2.4    | Diagrama de Radiação do Transdutor . . . . .            | 57        |

|          |                                                                                                                        |           |
|----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 4.3      | Resultados da Modelagem do Canal de Comunicação . . . . .                                                              | 60        |
| 4.3.1    | Atenuação . . . . .                                                                                                    | 61        |
| 4.3.2    | Múltiplos Caminhos . . . . .                                                                                           | 63        |
| 4.3.3    | Ruídos . . . . .                                                                                                       | 63        |
| 4.3.4    | Filtragem e Recepção do Sinal . . . . .                                                                                | 65        |
| 4.3.5    | Estudo de Modulação OOK . . . . .                                                                                      | 66        |
| 4.3.6    | Simulação com Aquário Ampliado . . . . .                                                                               | 68        |
| 4.4      | Conclusão do Capítulo . . . . .                                                                                        | 71        |
| <b>5</b> | <b>Considerações Finais</b>                                                                                            | <b>73</b> |
| 5.1      | Conclusão . . . . .                                                                                                    | 73        |
| 5.2      | Trabalhos Futuros . . . . .                                                                                            | 75        |
|          | <b>Referências Bibliográficas</b>                                                                                      | <b>76</b> |
|          | <b>Apêndice A – Produção científica</b>                                                                                | <b>80</b> |
| A.1      | Artigo apresentado no ENCOM 2016 (UFC/IFCE) . . . . .                                                                  | 80        |
| A.2      | Artigo submetido e aceito para publicação na revista <i>Journal Ferroelectrics - Taylor and Francis</i> 2017 . . . . . | 80        |
|          | <b>Apêndice B – Códigos de simulação no Matlab/Simulink</b>                                                            | <b>83</b> |
| B.1      | Bloco de Múltiplos Caminhos . . . . .                                                                                  | 83        |
| B.2      | Bloco de Atenuação . . . . .                                                                                           | 85        |
| B.2.1    | Perda por Espalhamento Geométrico . . . . .                                                                            | 85        |
| B.2.2    | Perda por Absorção . . . . .                                                                                           | 86        |
| B.2.3    | Perda de Transmissão . . . . .                                                                                         | 87        |
| B.3      | Bloco de Ruídos . . . . .                                                                                              | 88        |
| B.3.1    | Ruído Ambiental . . . . .                                                                                              | 88        |
| B.3.2    | Análise da Densidade Espectral de Potência do Ruído em dB . . . . .                                                    | 89        |

|       |                                                |    |
|-------|------------------------------------------------|----|
| B.3.3 | Análise da Relação Sinal Ruído em dB . . . . . | 90 |
|-------|------------------------------------------------|----|

---

# Lista de Figuras

---

|    |                                                                                                                                                                |    |
|----|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1  | Transdutor de Langevin. . . . .                                                                                                                                | 2  |
| 2  | Efeito piezoelétrico: a) direto, entrada mecânica e saída elétrica; e b) inverso, entrada elétrica e saída mecânica. Fonte: adaptado de Vijaya (2012). . . . . | 8  |
| 3  | Árvore de classificação dos materiais dielétricos. Fonte: adaptado de Vijaya (2012). . . . .                                                                   | 15 |
| 4  | Polarização da cerâmica piezoelétrica. Fonte: adaptado de Vijaya (2012) . . . .                                                                                | 16 |
| 5  | Estrutura <i>perovskita</i> do Titanato de Cálcio ( $CaTiO_3$ ). Fonte: Multiphysics (2017). .                                                                 | 17 |
| 6  | Variação dos parâmetros ambientais em função da profundidade. Fonte: adaptado de Zhou e Wang (2014). . . . .                                                   | 21 |
| 7  | Perfil típico da velocidade do som em águas profundas. Fonte: adaptado de Zhou e Wang (2014). . . . .                                                          | 23 |
| 8  | Múltiplos caminhos do som para águas rasas. Fonte: autor. . . . .                                                                                              | 24 |
| 9  | Canal de propagação do som para: a) águas rasas e; b) águas profundas. Fonte: adaptado de Zhou e Wang (2014). . . . .                                          | 25 |
| 10 | Coeficiente de absorção, $10 \log(a(f))$ em $(dB/km)$ . Fonte: adaptado de Stojanovic e Preisig (2009). . . . .                                                | 27 |
| 11 | Modulação por chaveamento de amplitude - ASK. Fonte: adaptado de Tarouco (1998). . . . .                                                                       | 30 |
| 12 | Etapas da metodologia. Fonte: autor. . . . .                                                                                                                   | 36 |
| 13 | Ambiente do software <i>COMSOL Multiphysics</i> com seus módulos separados por grandezas físicas. . . . .                                                      | 37 |
| 14 | Três perspectivas do transdutor piezoelétrico em forma de disco. . . . .                                                                                       | 39 |
| 15 | Sistema de coordenadas da base de vetores do transdutor. . . . .                                                                                               | 39 |
| 16 | Geometria final proposta na Etapa 1. . . . .                                                                                                                   | 41 |

|    |                                                                                                                                                                     |    |
|----|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 17 | Diagrama de blocos do canal de comunicação acústico subaquático. . . . .                                                                                            | 43 |
| 18 | Sistema que representa o canal de comunicação acústico subaquático Etapa 2. .                                                                                       | 44 |
| 19 | Bloco de Múltiplos Caminhos expandido. . . . .                                                                                                                      | 46 |
| 20 | Bloco de Atenuação expandido. . . . .                                                                                                                               | 48 |
| 21 | Bloco do Ruído Ambiental expandido. . . . .                                                                                                                         | 49 |
| 22 | Bloco da filtragem do sinal. . . . .                                                                                                                                | 50 |
| 23 | Deformação mecânica do transdutor em suas frequências naturais para as frequências de: a) $16090 + 4,0667i \text{ Hz}$ e; b) $19660 + 5,0944i \text{ Hz}$ . . . . . | 53 |
| 24 | Curva de impedância e variação de fase do transdutor vibrando livremente. . . .                                                                                     | 54 |
| 25 | Curva de impedância e variação de fase do transdutor vibrando dentro do aquário. .                                                                                  | 55 |
| 26 | Curva de impedância da comparação dos transdutor vibrando livremente e dentro do aquário. . . . .                                                                   | 56 |
| 27 | Curva da variação de fase da comparação dos transdutor vibrando livremente e dentro do aquário. . . . .                                                             | 57 |
| 28 | Gráficos do diagrama de radiação do transdutor vibrando dentro do aquário nas frequência de (a) 16.080 Hz, (b) 17.000 Hz, (c) 18.000 Hz e (d) 19.000 Hz. . .        | 58 |
| 29 | Gráfico do padrão de radiação do transdutor vibrando dentro do aquário na frequência de 19.670 Hz. . . . .                                                          | 59 |
| 30 | Análise do ângulo de diretividade do transdutor piezoelétrico. . . . .                                                                                              | 59 |
| 31 | Sinal gerado pelo transdutor com frequência de 19.670 Hz. . . . .                                                                                                   | 61 |
| 32 | Sinal atenuado e atrasado. . . . .                                                                                                                                  | 62 |
| 33 | Ruído inerente do meio subaquático aplicado no sinal. . . . .                                                                                                       | 64 |
| 34 | Densidade espectral de potência do ruído em $dB$ . . . . .                                                                                                          | 65 |
| 35 | Densidade espectral de potência do sinal com o ruído em $dB$ . . . . .                                                                                              | 65 |
| 36 | Sinal filtrado. . . . .                                                                                                                                             | 66 |
| 37 | Sinal modulado gerado pelo transdutor com frequência de 19.670 Hz. . . . .                                                                                          | 67 |
| 38 | Sinal modulado filtrado. . . . .                                                                                                                                    | 67 |
| 39 | Sinal atrasado, atenuado e com ruído para o aquário ampliado. . . . .                                                                                               | 68 |

|    |                                                                                                                                  |    |
|----|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 40 | Sinal filtrado para o aquário ampliado. . . . .                                                                                  | 69 |
| 41 | Sinal modulado, atrasado, atenuado e com ruído para o aquário ampliado. . . .                                                    | 70 |
| 42 | Sinal modulado e filtrado para o aquário ampliado. . . . .                                                                       | 70 |
| 43 | Artigo apresentado no ENCOM 2016 (UFC/IFCE) . . . . .                                                                            | 81 |
| 44 | Artigo submetido e aceito para publicação na revista <i>Journal Ferroelectrics</i> -<br><i>Taylor and Francis</i> 2017 . . . . . | 82 |

---

## Lista de Tabelas

---

|   |                                                                                                                        |    |
|---|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1 | Definição dos coeficientes piezoelétricos. Fonte: adaptado de Vijaya (2012). . .                                       | 9  |
| 2 | Relação piezoelétrica para esquema de deslocamento elétrico. Fonte: adaptado de Ikeda (1990) . . . . .                 | 14 |
| 3 | Largura de banda disponível para diferentes distâncias. Fonte: adaptado de Akyildiz, Pompili e Melodia (2006). . . . . | 29 |
| 4 | Trabalhos relacionados. . . . .                                                                                        | 32 |
| 5 | Parâmetros para modelagem do transdutor. . . . .                                                                       | 40 |
| 6 | Parâmetros para modelagem do transdutor no ambiente subaquático de simulação.                                          | 41 |
| 7 | Resultados da simulação do canal de comunicação para o cenário 1. . . . .                                              | 70 |
| 8 | Resultados da simulação do canal de comunicação para o cenário 2. . . . .                                              | 71 |

---

# Lista de Símbolos

---

|            |                                           |
|------------|-------------------------------------------|
| <b>c</b>   | Rigidez elástica                          |
| <i>c</i>   | Velocidade do som na água                 |
| <b>d</b>   | Coeficiente piezoelétrico <i>d-form</i>   |
| <b>D</b>   | Densidade de carga de superfície          |
| <i>D</i>   | Profundidade                              |
| $\epsilon$ | Permissividade dielétrica                 |
| <b>E</b>   | Campo elétrico                            |
| <b>k</b>   | coeficiente de acoplamento eletromecânico |
| <i>L</i>   | Comprimento                               |
| $\partial$ | Derivada parcial                          |
| <b>P</b>   | Polarização                               |
| <b>s</b>   | Complância elástica                       |
| <i>s</i>   | Fator de navegação de embarcações         |
| <b>S</b>   | Deformação estrutural ( <i>Strain</i> )   |
| <i>S</i>   | Salinidade da água                        |
| <b>T</b>   | Tensão mecânica ( <i>Stress</i> )         |
| <i>T</i>   | Temperatura em °C                         |
| <b>V</b>   | Tensão                                    |
| <i>W</i>   | Largura                                   |

---

# Lista de Abreviações

---

|                          |                                                                                                         |
|--------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>ASK</b>               | Chaveamento por deslocamento de amplitude ( <i>Amplitude shift keying</i> )                             |
| <b>AL</b>                | Perda por absorção ( <i>Absortion loss</i> )                                                            |
| <b>BaTiO<sub>3</sub></b> | Titanato de bário                                                                                       |
| <b>CaTiO<sub>3</sub></b> | Titanato de cálcio                                                                                      |
| <b>CdS</b>               | Sulfeto de cádmio                                                                                       |
| <b>FUNCEME</b>           | Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos                                                   |
| <b>IES</b>               | Interferências entre símbolo                                                                            |
| <b>KDT</b>               | Dihidrogenofosfato de potássio                                                                          |
| <b>LiNbO<sub>3</sub></b> | Niobato de lítio                                                                                        |
| <b>LiTaO<sub>3</sub></b> | Tantalato de lítio                                                                                      |
| <b>OFDM</b>              | Multiplexação por divisão de frequência ortogonal ( <i>Orthogonal frequency-division multiplexing</i> ) |
| <b>OOK</b>               | Chaveamento liga-desliga ( <i>On-off keying</i> )                                                       |
| <b>PLZT</b>              | Lantânio dopado de PZT                                                                                  |
| <b>PMN-PT</b>            | Niobato de magnésio e chumbo com titanato de chumbo                                                     |
| <b>PVDF</b>              | Fluoreto de polivinilideno                                                                              |
| <b>PZN-PT</b>            | Niobato de zinco e chumbo com titanato de chumbo                                                        |
| <b>PZT</b>               | Titano-zirconato de chumbo                                                                              |
| <b>RF</b>                | Radiofrequência                                                                                         |
| <b>SL</b>                | Perda por espalhamento geométrico ( <i>Spreading Loss</i> )                                             |

|             |                                                          |
|-------------|----------------------------------------------------------|
| <b>ScL</b>  | Perda por espalhamento físico ( <i>Scattering loss</i> ) |
| <b>SNR</b>  | Relação sinal-ruído ( <i>Signal-to-noise ratio</i> )     |
| <b>SPL</b>  | Nível de pressão sonora ( <i>Sound pressure level</i> )  |
| <b>TeFE</b> | Tetrafluoroetileno                                       |
| <b>TL</b>   | Perda de transmissão ( <i>Transmission loss</i> )        |
| <b>TrFE</b> | Ttrifluoroetileno                                        |

# INTRODUÇÃO

---

Os avanços em sistemas de comunicação possibilitaram o surgimento de tecnologias em diversas áreas, como engenharia, computação, medicina, biologia, dentre outras. A comunicação e o sistema estabelecido dão suporte a estas áreas de acordo com suas necessidades físicas, como velocidade de comunicação e tráfego suportado. Por exemplo, plataformas utilizadas para medir a poluição de águas, segundo Li et al. (2017), necessitam de uma comunicação eficiente para suportar uma rede de sensores em meios aquáticos.

A natureza do meio utilizado na transmissão da comunicação determina o tipo e a qualidade da informação que passa por ele. Algumas das características que definem isto são a velocidade de propagação, as atenuações sofridas e os ruídos do meio. As necessidades das aplicações definem o meio ideal para propagar informações. Em se tratando de meios sem fio, houve uma evolução mais evidente na comunicação pelo ar, utilizando, por exemplo, ondas eletromagnéticas. O meio aquático para comunicação sem fio ainda é pouco explorado, mesmo sendo o meio ideal para algumas aplicações.

Dentre diversas aplicações, a comunicação subaquática pode ser utilizada para a exploração da vida marinha e dos oceanos, para mapear o leito oceânico, para a prevenção e assistência de desastres por meio de atividades sísmicas, como tsunamis e para monitoramento ambiental, Butler e Sherman (2007). Isto mostra pluralidade na utilização do meio aquático e se apresenta como uma área de estudo que pode suportar novos avanços tecnológicos, sendo escolhida neste trabalho como o meio de transmissão estudado e para o qual desenvolvemos um modelo de comunicação.

Os primeiros indícios de estudos científicos em comunicação subaquática datam do século XIV por Leonardo Da Vinci, que fez a seguinte afirmação: *“Se pararmos um navio e inserirmos um longo tubo na água e na extremidade externa desse tubo colocarmos nosso ouvido, iremos ouvir navios a uma grande distância”* Katsnelson, Petnikov e Lynch (2012).

Alguns séculos depois, em 1826, Jean Daniel Colladon e Charles-François Sturn utilizaram transdutores mecânico-acústico para realizar a primeira medição da velocidade de propagação

do som em água doce, que aconteceu no lago de Genebra na Suíça. Como resultado obtiveram uma velocidade de  $1435 \text{ m/s}$  em uma temperatura de  $8^\circ\text{C}$  e a uma distância de  $13 \text{ km}$ , que são valores bem próximos das equações existentes na literatura (BUTLER; SHERMAN, 2007).

Desde o experimento citado acima houve uma evolução significativa dos transdutores, que são dispositivos capazes de converter uma forma de energia em outra. Na história, os transdutores ganharam evidência com os experimentos dos irmãos Curie por volta de 1880. Na ocasião eles demonstraram a capacidade de gerar tensão elétrica na superfície de certos cristais quando eles eram submetidos a uma força mecânica. A esse fenômeno eles deram o nome de piezoeletricidade, mas foi apenas no ano de 1917 que foi registrada a primeira aplicação do fenômeno na engenharia. Paul Langevin desenvolveu um transdutor de ultrassom do tipo sanduíche composto de quartzo e aço que recebeu seu nome em sua homenagem Ikeda (1990). O transdutor teve aplicação imediata na detecção de submarinos inimigos motivados pelos conflitos de guerra na época e pode ser visto na Figura 1.



**Figura 1:** Transdutor de Langevin.

Os diversos tipos de transdutores se diferenciam pelo tipo de energia que convertem, por exemplo, piezoelétrico, que convertem energia mecânica em energia elétrica e vice e versa, e piroelétrico, que convertem energia térmica em energia elétrica (BUTLER; SHERMAN, 2007).

Considerando o meio aquático e os possíveis transdutores, a transmissão sem fio pode ocorrer por meio de três tipos: (i) a transmissão eletromagnética, (ii) a transmissão óptica e (iii) a transmissão acústica. A transmissão por sinal acústico é considerada uma implementação eficaz por sofrer uma menor atenuação quando são propagadas no ambiente subaquático. Comparado com as outras formas de transmissão, a baixa atenuação do som na água destaca-se como a principal vantagem, e como desvantagem destaca-se a alta latência<sup>1</sup> proporcionada pela velocidade de propagação do som na água, em torno de  $1.500 \text{ m/s}$  (VIEIRA et al., 2010).

<sup>1</sup>Latência é o tempo total que uma mensagem leva para chegar completamente ao seu destino a partir de sua origem (FOROUZAN, 2009).

Diante destas considerações, este estudo tem foco em sistemas de comunicação acústica subaquática e possui como objetivo principal, desenvolver um modelo de simulação para um canal de comunicação direcionado para esse meio utilizando transdutores piezoelétricos. Para isto, modelamos um transdutor eletroacústico constituído de material piezoelétrico capaz de gerar ondas acústicas numa frequência de operação específica almejando uma melhor eficiência na comunicação acústica subaquática. Este transdutor é utilizado em um canal de comunicação acústica subaquática que considera características do meio como temperatura, salinidade, pressão, atenuações e ruído ambiental.

Apesar da relevância, o ambiente subaquático é considerado um meio de alta complexidade para as comunicações devido a fatores que afetam a propagação das ondas acústicas como o ruído ambiental, o meio ser variante no tempo e, principalmente, a baixa velocidade de propagação do som ocasionando muita latência no enlace de comunicação (ZHOU; WANG, 2014). Estes pontos foram considerados no modelo.

O modelo proposto possui maior flexibilidade ao modelar o transdutor além do canal, pois além de modelar o canal de comunicação acústica subaquática estamos modelando os transdutores piezoelétricos ideais para esta comunicação.

A modelagem de transdutores piezoelétricos é um trabalho de alta complexidade devido à combinação das teorias físicas envolvidas (MULTIPHYSICS, 2013). Além disso, a resolução de equações diferenciais pelo método de elementos finitos, utilizadas nesta modelagem, depende de condições de contorno que exigem um alto custo computacional (XAVIER, 2005). A modelagem permite que seja feito um estudo anterior à aplicação prática deste tipo de comunicação. O trabalho de Costa et al. (2004) apresenta transdutores piezoelétricos utilizados na fabricação de equipamentos de ultrassom para área médica, o que reduz os custos na fabricação de materiais e testes de espectroscopia.

Diante destas considerações, este estudo tem foco em comunicação acústica subaquática e busca otimizar esta comunicação, modelando um cenário de transmissão utilizando transdutores piezoelétricos. No próximo subtópico apresentamos o objetivo do trabalho.

## **1.1 Objetivos Geral e Específicos**

Baseado nas motivações apresentadas, o objetivo geral deste trabalho é desenvolver um modelo de simulação para um canal de comunicação acústico subaquático com transdutores piezoelétricos desenvolvidos para trabalhar na frequência de operação ótima do canal.

Os objetivos específicos do trabalho são:

- modelar o transdutor piezoelétrico que será utilizado como projetor e hidrofone no sistema de comunicação proposto através do software *COMSOL Multiphysics*<sup>2</sup>;
- identificar as principais características do transdutor piezoelétrico, como frequência de ressonância, variação de fase e largura de banda de operação;
- identificar os aspectos relevantes para um sistema de comunicação acústica subaquática, como distância entre transmissor e receptor e frequência de operação;
- propor que o modelo esteja bem descrito e disponível à comunidade acadêmica para que seja utilizado, melhorado ou sirva como base para trabalhos futuros.

## 1.2 Produção Científica

- **OLIVEIRA, A. F.; BURGOA, B. S. R.; AQUINO, F. J. A. Estudo Simulado de um Transdutor Piezoelétrico como Projetor de um Sistema de Comunicação Acústica Subaquática.** Encontro Anual do Iecom em Comunicações, Redes e Criptografia - ENCOM, 2016, Fortaleza.
- **MAGALHÃES, A. L.; OLIVEIRA, A. F.; SALES, A. J. M.; AQUINO, F. J. A. ; GOUVEIA, D. X.; MENEZES, J. W. M.; ARAUJO, E. B.; SOMBRA, A. S. B. Fabrication and operational characteristics of step-down piezoelectric transformer based on PMN-PT ceramics.** Journal Ferroelectrics - Taylor and Francis, 2017. Situação: Aceito para publicação.
- **ALMEIDA, W. D.; OLIVEIRA, A. F.; AQUINO, F. J. A. Application of Linear and Nonlinear Equalizers in Underwater Acoustic Communication Channel.** IEEE America Latina, 2018. Situação: Em processo de submissão.

## 1.3 Organização da Dissertação

Esta dissertação é dividida em cinco capítulos, que além da introdução, conta com a seguinte estrutura: Fundamentação Teórica; Modelagem dos Transdutores e Modelagem do Canal de Comunicação Acústico Subaquático; Resultados e Discussões e por fim Conclusões e Trabalhos Futuros.

---

<sup>2</sup><https://br.comsol.com/>

Em todos os capítulos busca-se detalhar o assunto abordado de tal forma que o leitor compreenda as considerações expostas e as contribuições desta dissertação, sempre associando as ideias apresentadas ao contexto presente na literatura. A seguir apresentamos de forma resumida os próximos capítulos.

**Capítulo 2:** Este capítulo apresenta a fundamentação teórica do fenômeno da piezoeletricidade e a teoria de comunicação acústica. Em piezoeletricidade apresentamos, os tipos de efeito, suas propriedades, os principais coeficientes, as equações fundamentais e os materiais piezoelétricos. Em comunicação acústica subaquática apresentamos as características do canal, como o efeito de múltiplos caminhos, as atenuações sofridas e a largura de banda do canal. Em seguida apresentamos uma sucinta fundamentação teórica sobre modulação por chaveamento de amplitude (*Amplitude Shift Keying - ASK*) e uma busca sistemática na literatura envolvendo os princípios da revisão sistemática dos trabalhos que envolvem o tema desta dissertação.

**Capítulo 3:** A metodologia utilizada para modelar o sistema de comunicação acústico subaquático proposto na dissertação é apresentada neste capítulo. Esta metodologia é dividida em duas etapas: a primeira é a modelagem do transdutor constituído de material piezoelétrico onde as simulações foram realizadas no software *COMSOL Multiphysics*; e a segunda é a modelagem do canal de comunicação acústico subaquático que utilizou as características extraídas da etapa anterior e foi realizada no software *Matlab/Simulink*.

**Capítulo 4:** Neste capítulo, são apresentados os resultados obtidos e discussões para ambas etapas da metodologia: a modelagem do transdutor piezoelétrico e a modelagem do canal de comunicação acústico subaquático.

**Capítulo 5:** Por fim, neste capítulo apresenta-se as considerações finais do trabalho proposto, ressaltando as principais contribuições da pesquisa realizada durante este trabalho de mestrado. Além de apresentar sugestões para trabalhos futuros.

## FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

---

**D**ESCREVEMOS neste capítulo a fundamentação teórica necessária para desenvolver o modelo proposto nesta dissertação de mestrado. Primeiramente, apresentamos a Piezoeletricidade, o fenômeno e suas principais características. Além disso, apresentaremos seu conceito, um breve histórico, os tipos de efeitos piezoelétricos, os principais materiais piezoelétricos e algumas aplicações.

O segundo tópico abordado é a Comunicação Acústica Subaquática. Nesta seção apresentamos os principais conceitos da comunicação acústica subaquática, como as características do canal acústico, algumas aplicações e o transdutor como elemento ativo localizado dentro do transmissor e do receptor. Na literatura esses transdutores são nomeados como projetores e hidrofones, respectivamente. Eles são dispositivos compostos por materiais piezoelétricos, ou seja, possuem capacidade de converter a energia mecânica em elétrica ou vice-versa.

Dessa forma, é possível agregar estas duas grandes áreas de conhecimento em favor do desenvolvimento do sistema de comunicação subaquático. O conteúdo apresentado neste capítulo é de fundamental importância para compreender o modelo proposto no trabalho.

### 2.1 Piezoeletricidade

O nome piezoeletricidade é a união do prefixo “piezo”, que deriva do termo grego *piezo* e é traduzido como “pressão”, com a palavra “eletricidade” (IKEDA, 1990). Assim piezoeletricidade significa de forma ampla a eletricidade sob pressão.

Antes da revelação deste fenômeno, outro efeito teve fundamental importância na definição do efeito piezoelétrico: o efeito piroelétrico. Este efeito está relacionado à capacidade de determinados materiais cristalinos gerarem tensão elétrica quando submetidos a uma certa mudança de temperatura. Isto originou um estudo aprofundado dos cristais pelos irmãos Curie (DAHIYA; VALLE, 2012). Eles demonstraram que esses mesmos materiais cristalinos eram

capazes de gerar uma diferença de potencial elétrico em sua superfície quando submetidos a uma pressão mecânica. Neste mesmo estudo, os irmãos Curie constataram em qual direção a pressão deveria ser aplicada e em quais classes de cristal o efeito piroelétrico era esperado. Os materiais que foram estudados pelos irmãos, em ambos os efeitos, foram os cristais de quartzo e topázio (IKEDA, 1990).

Posteriormente, o francês Gabriel Lippmann previu, através de considerações da termodinâmica, o efeito piezoelétrico inverso, que é a capacidade de os materiais piezoelétricos converterem energia elétrica em energia mecânica. Esta previsão foi confirmada pelos irmãos Curie no final do ano de 1881, por meio de um experimento realizado em um cristal de quartzo (IKEDA, 1990).

O interesse em que o efeito piezoelétrico pudesse se estender para outros tipos de cristais permitiu que nos anos seguintes fossem estudados e investigados novos materiais cristalinos com as mesmas características piezoelétricas. Como resultados foram encontrados o Sal de Rochelle e o Dihidrogenofosfato de Potássio (*KDP*) (IKEDA, 1990). Há alguns cristais que apresentam os efeitos piezoelétricos direto e inverso (IKEDA, 1990). Entre estes estão o Niobato de Lítio ( $LiNbO_3$ ), o Tantalato de Lítio ( $LiTaO_3$ ), o Sulfeto de Cádmio ( $CdS$ ), o Titanato Zirconato de Chumbo (*PZT*), o Titanato de Bário ( $BaTiO_3$ ), dentre outros.

O que começou como experimentos científicos em cristais, tornou-se um fenômeno que hoje tem inúmeras aplicações comerciais. Muitas destas aplicações são exploradas na área de telecomunicações para aplicações militares e na área de saúde, para o desenvolvimento de equipamentos medicinais (BALLATO, 1996).

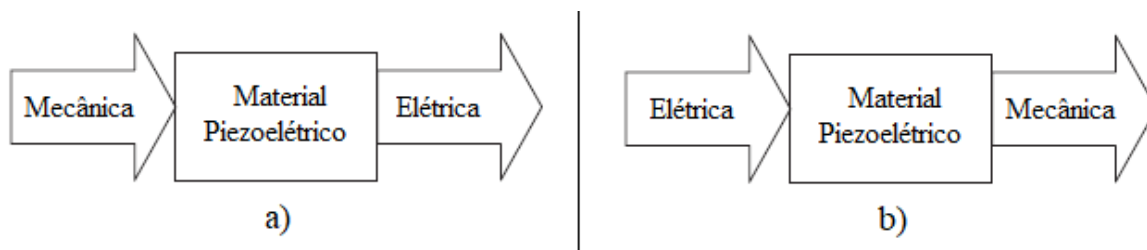
As próximas subseções apresentam a descrição do fenômeno da piezoeletricidade, as propriedades da piezoeletricidade, os tipos de materiais piezoelétricos e algumas aplicações.

### 2.1.1 Fenômeno Piezoelétrico

A piezoeletricidade é um processo de interação linear de sistemas elétricos e mecânicos (elásticos). A interação destes sistemas, também conhecidos como sistemas eletromecânicos, é fundamentada em vários conceitos como as relações constitutivas, os coeficientes de acoplamentos e as condições específicas de constantes (IKEDA, 1990).

De forma geral a piezoeletricidade é caracterizada pelo efeito piezoelétrico, que pode ser definido de duas formas: (i) o **efeito piezoelétrico direto**, que é a capacidade que um material possui de converter energia mecânica em energia elétrica; e (ii) o **efeito piezoelétrico inverso**, que é a capacidade que um material possui de converter energia elétrica em mecânica (DAHIYA;

VALLE, 2012). Na Figura 2 podemos observar uma representação de como ocorre o efeito piezoelétrico direto e inverso, respectivamente.



**Figura 2:** Efeito piezoelétrico: a) direto, entrada mecânica e saída elétrica; e b) inverso, entrada elétrica e saída mecânica. Fonte: adaptado de Vijaya (2012).

O efeito piezoelétrico direto é caracterizado por uma entrada mecânica que pode ser representada por uma **tensão mecânica** (*Stress* - **T**) ou uma **deformação estrutural** (*Strain* - **S**). Essa entrada mecânica é aplicada sobre a superfície de um material piezoelétrico, por exemplo cristal ou cerâmica, que irá produzir um diferencial de potencial elétrico na saída. Este pode ser representado na forma de **densidade de carga de superfície D** (ou **polarização P**) e **campo elétrico E** (ou **tensão V**) (VIJAYA, 2012).

O efeito piezoelétrico inverso é resultado de uma entrada elétrica onde um diferencial de potencial elétrico é aplicado sobre o material. Na saída, o material piezoelétrico sofre compressão e expansão gerando ondas mecânicas que são propagadas pelo meio que está inserido.

### 2.1.2 Propriedades da Piezoeletricidade

De acordo com o tipo de efeito piezoelétrico, direto ou inverso, os coeficientes piezoelétricos são formados pela relação entre as variáveis mecânicas e elétricas dos sinais de entrada e saída de sistemas. Estes coeficientes são responsáveis por descrever a sensibilidade das propriedades físicas de um material piezoelétrico (VIJAYA, 2012). O coeficiente piezoelétrico **d**, por exemplo, é definido pela relação da polarização com a tensão mecânica gerada em um material.

Os coeficientes piezoelétricos para os efeitos direto (representados por letras) e inverso (representados por letras com \*), assim como suas definições e unidades, são exibidos na Tabela 1. É importante ressaltar que para esta pesquisa utilizaremos a notação *d-form* que privilegia a aplicação dos coeficientes e as equações do sistema na simulação que desenvolvemos e que é apresentada nos próximos capítulos. A notação *d-form* utiliza os parâmetros da tensão mecânica **T** e do campo elétrico **E** como variáveis independentes. Estas variáveis são manipuladas

juntamente com os coeficientes piezoelétricos  $\mathbf{d}$  e  $\mathbf{d}^*$  nas equações de relação piezoelétrica que definem o fenômeno (IKEDA, 1990).

**Tabela 1:** Definição dos coeficientes piezoelétricos. Fonte: adaptado de Vijaya (2012).

| <b>Coeficientes Piezoelétricos</b> | <b>Definição</b>                                             | <b>Unidade</b> |
|------------------------------------|--------------------------------------------------------------|----------------|
| $d$                                | $\frac{\text{polarização}}{\text{tensão mecânica}}$          | $C/N$          |
| $g$                                | $\frac{\text{campo elétrico}}{\text{tensão mecânica}}$       | $V.m/N$        |
| $e$                                | $\frac{\text{polarização}}{\text{deformação estrutural}}$    | $C/m^2$        |
| $h$                                | $\frac{\text{campo elétrico}}{\text{deformação estrutural}}$ | $V/m$          |
| $d^*$                              | $\frac{\text{deformação estrutural}}{\text{campo elétrico}}$ | $m/volt$       |
| $g^*$                              | $\frac{\text{deformação estrutural}}{\text{polarização}}$    | $m^2/C$        |
| $e^*$                              | $\frac{\text{tensão mecânica}}{\text{campo elétrico}}$       | $N/V.m$        |
| $h^*$                              | $\frac{\text{tensão mecânica}}{\text{polarização}}$          | $N/C$          |

Ambos efeitos piezoelétricos direto e inverso são formados pelas relações eletromecânicas e são descritos por

$$D = dT \quad (2.1)$$

em que,  $\mathbf{D}$  é a densidade de carga de superfície gerada na saída,  $\mathbf{d}$  é o coeficiente piezoelétrico e  $\mathbf{T}$  é a tensão mecânica aplicada no material piezoelétrico, e

$$S = dE \quad (2.2)$$

em que,  $\mathbf{S}$  é a deformação estrutural gerada na saída,  $\mathbf{d}$  é o coeficiente piezoelétrico e  $\mathbf{T}$  é o campo elétrico aplicado no material piezoelétrico. O efeito piezoelétrico é um efeito transitório, que significa que o parâmetro observado não é um valor absoluto e sim a mudança no parâmetro (VIJAYA, 2012). Assim, os coeficientes piezoelétricos  $\mathbf{d}$  e  $\mathbf{d}^*$  podem ser devidamente definidos pelas derivadas parciais

$$d = \left( \frac{\partial D}{\partial T} \right)_E \quad (2.3)$$

e

$$d^* = \left( \frac{\partial S}{\partial E} \right)_T \quad (2.4)$$

Para o efeito piezoelétrico direto, uma alteração na deformação estrutural  $\partial S$  (ou tensão

mecânica  $\partial T$ ) causa uma mudança na densidade de carga  $\partial D$  (ou campo elétrico  $\partial E$ ). De forma análoga, para o efeito piezoelétrico inverso, uma alteração no campo elétrico  $\partial E$  (ou na densidade de carga  $\partial D$ ) causa uma mudança na deformação estrutural  $\partial S$  (ou tensão mecânica  $\partial T$ ) (VIJAYA, 2012).

Além dos coeficientes piezoelétricos apresentados existem outros parâmetros que pertencem às propriedades piezoelétricas, como os parâmetros elétricos e as constantes elásticas, que serão apresentados na Subseção 2.1.2 de Equações Fundamentais. A permissividade dielétrica ( $\epsilon$ ) é considerada um parâmetro elétrico, enquanto que a constante de compliância ( $s$ ) e a constante de rigidez ( $c$ ) são consideradas como constantes elásticas (IKEDA, 1990).

A seguir mostraremos as formas de interação entre estes parâmetros e o coeficiente piezoelétrico  $\mathbf{d}$ , o que caracteriza as equações fundamentais da piezoeletricidade, que podem ser expressas em forma de matrizes ou tensores.

### Coeficiente Piezoelétrico ( $\mathbf{d}$ )

Os parâmetros dielétricos, os coeficientes piezoelétricos e as constantes de elasticidade são tensores de graus específicos, 2, 3 e 4 graus, respectivamente. Apresentamos nesta subseção a descrição matemática do coeficiente piezoelétrico  $\mathbf{d}$ . As equações descritas são utilizadas para as simulações no software COMSOL realizadas nesta pesquisa. Ikeda (1990) descreve as equações piezoelétricas no formato matricial considerando a redução de notação matricial, que é uma forma simplificada para apresentação de tensores.

Os efeitos piezoelétricos direto e inverso (Equações 2.1 e 2.2) são apresentados na formação matricial em que,

$$\begin{pmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} & d_{14} & d_{15} & d_{16} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} & d_{24} & d_{25} & d_{26} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & d_{34} & d_{35} & d_{36} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{pmatrix} \quad (2.5)$$

e

$$\begin{pmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} & d_{14} & d_{15} & d_{16} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} & d_{24} & d_{25} & d_{26} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & d_{34} & d_{35} & d_{36} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{pmatrix} \quad (2.6)$$

### Coeficiente de Acoplamento Eletromecânico (**k**)

O coeficiente de acoplamento eletromecânico (**k**), também conhecido como fator de acoplamento, é responsável pela conversão de energia mecânica em energia elétrica, e vice-versa. Este coeficiente atua como um fator de qualidade do material piezoelétrico, pois ele garante de forma efetiva a conversão de energia na interação do sistema. O coeficiente **k** é descrito por

$$k^2 = \left( \frac{\text{Energia Mecânica Armazenada}}{\text{Energia Elétrica Fornecida}} \right) \quad (2.7)$$

e

$$k^2 = \left( \frac{\text{Energia Elétrica Armazenada}}{\text{Energia Mecânica Fornecida}} \right) \quad (2.8)$$

em que,  $k^2$  corresponde à relação de energia fornecida e armazenada (IKEDA, 1990).

O coeficiente de acoplamento eletromecânico (**k**) é a constante utilizada para detectar qual foi o nível de energia mecânica resultante após uma energia elétrica ter sido fornecida, o que também é válido na relação inversa.

Há diversas formas de escrever o coeficiente de acoplamento eletromecânico, como, por exemplo, em função das constantes de rigidez elástica  $c$ , compliância elástica  $s$  e da permissividade  $\epsilon$ . Utilizamos a notação do coeficiente **k** em relação à constante de permissividade  $\epsilon$  descrita por

$$1 - k^2 = \left( \frac{\epsilon^S}{\epsilon^T} \right) \quad (2.9)$$

em que, considera-se uma deformação estrutural **S** constante e uma tensão mecânica **T** constante.

Se **k** = 1 significa que a conversão será total, ou seja, toda a energia elétrica fornecida será transformada em energia mecânica. Na prática isto não é possível devido às perdas do sistema, como perdas no processo de fabricação do material piezoelétrico.

## Equações Fundamentais

A piezoeletricidade é uma interação linear entre equações elétricas e mecânicas (IKEDA, 1990). A seguir serão apresentadas as equações do sistema mecânico e as equações do sistema elétrico na forma de tensores e matrizes. Estas equações são necessárias para a compreensão da interação entre estes sistemas e são utilizadas nas simulações realizadas do presente trabalho. Não consideramos o efeito sobre sistemas térmicos, que caracterizam o efeito piroelétrico, pois está fora do escopo desta dissertação.

Os principais parâmetros dos sistemas mecânicos de interesse em materiais piezoelétricos são a constante de compliância elástica ( $s$ ) e a constante de rigidez elástica ( $c$ ). Estas duas constantes se relacionam com os dois tensores de segundo grau, tensão mecânica  $\mathbf{T}$  e deformação estrutural  $\mathbf{S}$ , formando assim tensores de quarto grau ( $ijkl$ ).

A relação mecânica apresentada no formato tensorial entre  $\mathbf{T}$ ,  $c$  e  $\mathbf{S}$  é descrita por

$$T_{ij} = c_{ijkl}S_{kl} \quad (2.10)$$

Dessa forma, a tensão mecânica  $T_{ij}$  também pode ser descrita na forma matricial por

$$\begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} & c_{15} & c_{16} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} & c_{24} & c_{25} & c_{26} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} & c_{34} & c_{35} & c_{36} \\ c_{41} & c_{42} & c_{43} & c_{44} & c_{45} & c_{46} \\ c_{51} & c_{52} & c_{53} & c_{54} & c_{55} & c_{56} \\ c_{61} & c_{62} & c_{63} & c_{64} & c_{65} & c_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

em que, a constante de rigidez elástica  $c$  é apresentada com dois índices. Este fato ocorre também devido à redução de notação matricial que está sendo utilizada.

De maneira análoga, com a redução de notação matricial dos índices do tensor  $s_{ijkl}$  chegaremos na deformação estrutural  $\mathbf{S}$  descrita por

$$S_{ij} = s_{ijkl}T_{kl} \quad (2.12)$$

em que, a deformação estrutural  $\mathbf{S}$  também pode ser descrita na forma matricial por

$$\begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & s_{13} & s_{14} & s_{15} & s_{16} \\ s_{21} & s_{22} & s_{23} & s_{24} & s_{25} & s_{26} \\ s_{31} & s_{32} & s_{33} & s_{34} & s_{35} & s_{36} \\ s_{41} & s_{42} & s_{43} & s_{44} & s_{45} & s_{46} \\ s_{51} & s_{52} & s_{53} & s_{54} & s_{55} & s_{56} \\ s_{61} & s_{62} & s_{63} & s_{64} & s_{65} & s_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

Dessa forma, se tivermos a equação de deformação estrutural  $\mathbf{S}$  conseguimos operá-la matematicamente para descobrir a equação de tensão mecânica  $\mathbf{T}$ , e vice-versa. Utilizamos nesta dissertação o sistema de equações que relaciona a constante de compliância elástica  $s$  com a tensão mecânica  $\mathbf{T}$  devido à facilidade de interação com o software *COMSOL*, no qual são projetados os transdutores piezoelétricos.

No sistema de equações elétricas temos dois tipos de variáveis, as variáveis intensivas e as variáveis extensivas. No primeiro tipo, adota-se o campo elétrico  $\mathbf{E}$  sem levar em consideração o objeto ou o material em que está sendo aplicado esse campo. Enquanto que, no segundo tipo adota-se a densidade carga de superfície  $\mathbf{D}$  (ou polarização  $P$ ).

O principal parâmetro elétrico em materiais piezoelétricos é a permissividade dielétrica  $\epsilon$ . A relação constitutiva elétrica entre esse parâmetro e os vetores  $\mathbf{D}$  e  $\mathbf{E}$  formam um tensor de segundo grau na forma tensorial e na forma matricial descrito por

$$D_i = \epsilon_{ij} E_j \quad (2.14)$$

e

$$\begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \epsilon_{11} & \epsilon_{12} & \epsilon_{13} \\ \epsilon_{21} & \epsilon_{22} & \epsilon_{23} \\ \epsilon_{31} & \epsilon_{32} & \epsilon_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

em que, consideramos nesta dissertação apenas a relação dos vetores  $\mathbf{D}$  e  $\mathbf{E}$  com o coeficiente de permissividade dielétrica  $\epsilon$ .

Nesta dissertação de mestrado apresentamos as relações fundamentais da piezoeletricidade para o formato *d-form*, que são do tipo intensivo. Esta escolha é baseada em análises práticas do som e de vibrações, como ocorre para transdutores piezoelétricos, onde é preferível que se utilize as relações que envolvem o coeficiente piezoelétrico  $\mathbf{d}$  e as variáveis independentes  $\mathbf{T}$  e  $\mathbf{E}$  (IKEDA, 1990). A relação do tipo intensiva no formato *d-form* para estas variáveis independentes são apresentadas na Tabela 2.

**Tabela 2:** Relação piezoelétrica para esquema de deslocamento elétrico. Fonte: adaptado de Ikeda (1990)

| Variável Independente | Tipo      | Relação Piezoelétrica                                               | Formato |
|-----------------------|-----------|---------------------------------------------------------------------|---------|
| S, D                  | Extensivo | $\begin{cases} T = c^D S - hD \\ E = -hS + \beta^S D \end{cases}$   | h       |
| T, E                  | Intensivo | $\begin{cases} S = s^E T + dE \\ D = dT + \epsilon^T E \end{cases}$ | d       |
| T, D                  | Misto     | $\begin{cases} S = s^D T + gD \\ E = -gT + \beta^T D \end{cases}$   | g       |
| S, E                  | Misto     | $\begin{cases} T = c^E S - eE \\ D = eS + \epsilon^S E \end{cases}$ | e       |

Devido ao fato de o fenômeno da piezoeletricidade ser apresentado por meio de vários tipos de relações e com diferentes coeficientes piezoelétricos, a escolha das equações que se deseja trabalhar deve ser feita com análises particulares e se ajustar forma com que o experimento ou estudo é realizado.

Por fim, utilizamos nesta dissertação equações do efeito piezoelétrico direto e inverso do tipo *d-form* na forma tensorial, definidos respectivamente por

$$S = s^E T + dE \quad (2.16)$$

e

$$D = dT + \epsilon^T E \quad (2.17)$$

em que,  $s^E$  é o coeficiente de compliância elástica analisada sobre à aplicação de um campo elétrico constante e  $\epsilon^T$  é a permissividade dielétrica analisada sobre tensão mecânica constante. Ambos parâmetros são usados para aplicar as características do material piezoelétrico. O principal responsável para que tenhamos as características piezoelétricas no material que iremos trabalhar é o coeficiente piezoelétrico (**d**).

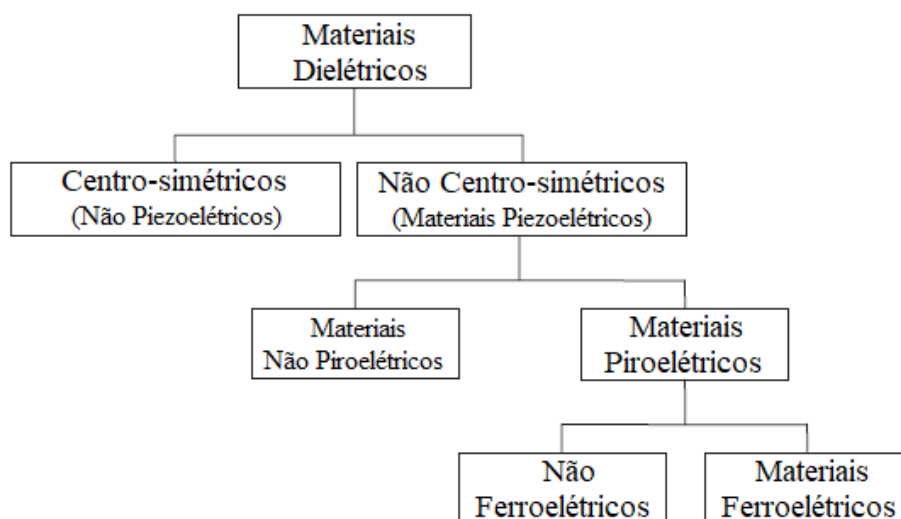
### 2.1.3 Materiais Piezoelétricos

Segundo Vijaya (2012), os materiais piezoelétricos são uma classe especial de materiais dielétricos que apresentam características de converter uma forma de energia em outra em virtude da sua estrutura cristalina não centrossimétrica. Para compreendermos melhor essa definição, precisamos ter conhecimento sobre o que significa essa estrutura cristalina e o que são os materiais dielétricos, temas que serão abordados nos próximos parágrafos.

Os dielétricos são materiais de natureza elétrica isolante suscetíveis à polarização na presença de um campo elétrico. Estes materiais possuem uma estrutura de dipolo elétrica e são classificados em dois tipos: os dielétricos polares e os dielétricos não polares (DAHIYA; VALLE, 2012). O primeiro tipo possui momento dipolar elétrico permanente e o segundo tipo não.

O dielétrico polar tem a capacidade de indução dos dipolos já em sua formação estrutural. O dielétrico não polar tem a necessidade de que seja aplicado um campo elétrico externo, separando os centros de cargas positivas e negativas, para que os dipolos elétricos sejam induzidos. O oxigênio e o nitrogênio são exemplos comuns de materiais dielétricos não polares, a água e o álcool são exemplos comuns de materiais dielétricos polares. A cerâmica está na categoria dos materiais dielétricos não polares (VIJAYA, 2012).

Os materiais ferroelétricos possuem uma polarização espontânea, isto é, sem a necessidade de um campo elétrico externo. Estes materiais também possuem a característica de polarização reversível, ou seja, a polarização espontânea pode ser revertida aplicando-se um campo elétrico externo (VIJAYA, 2012). O material ferroelétrico é um material que possui um momento de dipolo interno que tende a se alinhar com a direção próxima à do campo elétrico aplicado e, portanto, todo material ferroelétrico se torna piezoeletrico após a polarização (DAHIYA; VALLE, 2012). A Figura 3 exibe a árvore de classificação dos materiais dielétricos, piezoeletricos, piroelétricos e ferroelétricos.



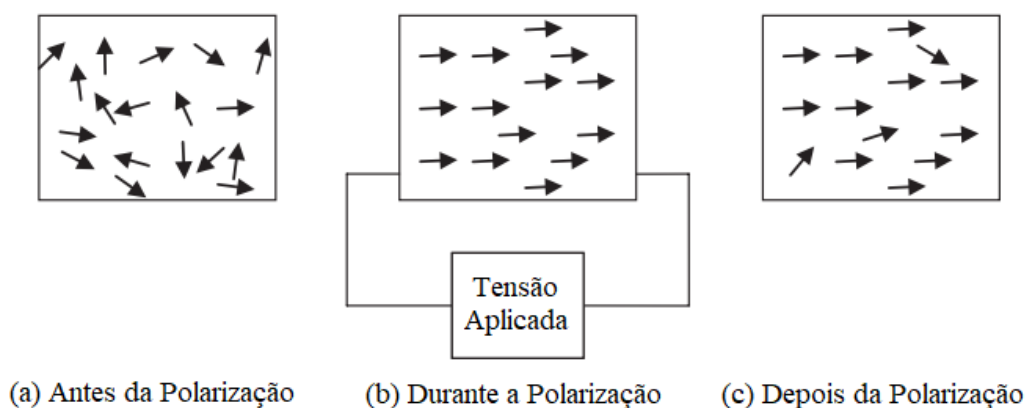
**Figura 3:** Árvore de classificação dos materiais dielétricos. Fonte: adaptado de Vijaya (2012).

### Polarização Piezoelétrica

A polarização piezoelétrica acontece a partir da criação de dipolos resultados da perturbação ocasionada pela aplicação de um campo elétrico externo em determinados materiais (VIJAYA, 2012), como cristais, cerâmicas, polímeros ou um compósito de materiais.

Cristais como o quartzo são em sua natureza piezoelétricos e possuem propriedades determinadas por suas características cristalográficas. Diferente dos cristais, as cerâmicas ferroelétricas são inicialmente isotrópicas e, uma vez que elas são polarizadas, se tornam anisotrópicas, apresentando propriedades piezoelétricas (KINO; DESILETS, 1979). Em 1947, Roberts (1947) deu início ao desenvolvimento das cerâmicas piezoelétricas ao demonstrar que o efeito piezoelétrico era gerado nas cerâmicas ferroelétrica de titanato de bário ( $BaTiO_3$ ) quando polarizadas através da aplicação de um campo elétrico.

O campo elétrico aplicado influencia uma reorganização dos centros de carga positivos e negativos dentro do material, formando dipolos que indicarão a nova direção da polarização do material. Uma representação das etapas no processo de polarização do material piezoelétrico pode ser visto na Figura 4. Note que cada seta representa um domínio piezoelétrico.



**Figura 4:** Polarização da cerâmica piezoelétrica. Fonte: adaptado de Vijaya (2012)

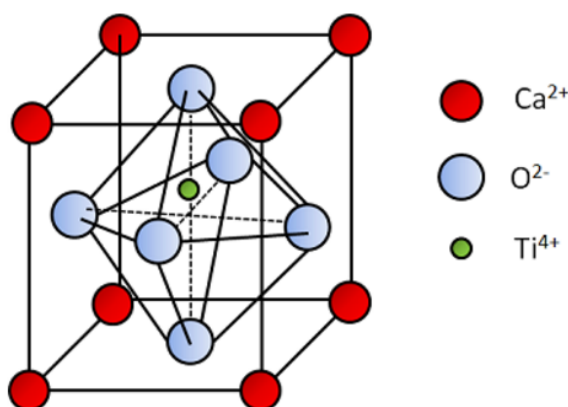
### Cerâmicas Piezoelétricas

Após larga utilização dos cristais piezoelétricos, os custos e as dificuldades de obtenção desses cristais fomentaram pesquisas por materiais sintéticos com as mesmas características piezoelétricas (VIJAYA, 2012).

Posteriormente foram realizadas pesquisas com o Titanato Zirconato de Chumbo (PZT), com o objetivo de otimizar e controlar suas propriedades eletromecânicas. Conforme Ikeda

(1990), estas pesquisas que foram realizados pela equipe da *Clevite Corporation* e produziram a série de materiais PZT(PZT-5, PZT-6, PZT-7 e PZT-8). Além do PZT, outros materiais com a mesma estrutura química foram utilizados para o mesmo fim, como o Niobato de Magnésio e Chumbo com Titanato de Chumbo (PMN-PT), o Lantânio dopado-PZT (PLZT) e o Niobato de Zinco e Chumbo com Titanato de Chumbo (PZN-PT). A partir do ano de 1980, o PZN-PT foi muito utilizado devido à descoberta de um método de polarização capaz de obter coeficientes piezoelétricos bastante elevados (TICHY; ERHART; KITTINGER, 2010).

A estrutura da cerâmica mais utilizada como elemento piezoelétrico é do tipo *perovskita*. Ela é formada por compostos cerâmicos que possuem mais que um tipo de Cátion (EIRAS, 2004). Como exemplo desse tipo de estrutura cerâmica temos o Titanato de Bário ( $BaTiO_3$ ), o Titanato Zirconato de Chumbo (PZT) e o Titanato de Cálcio ( $CaTiO_3$ ) que podem ser visto na Figura 5.



**Figura 5:** Estrutura *perovskita* do Titanato de Cálcio ( $CaTiO_3$ ). Fonte: Multiphysics (2017).

Segundo Vijaya (2012), quando comparado aos cristais piezoelétricos, as cerâmicas possuem excelentes propriedades mecânicas e piezoelétricas, têm produção mais barata, podem ser preparada por várias composições e na sua fabricação possuem uma maior variedade de formas geométricas como discos, cilindros e barras. Por outro lado, as cerâmicas têm uma dependência maior da temperatura, pois com o passar do tempo o material vai tendendo à despolarização, ou seja, a vida útil do material não é muito longa (EIRAS, 2004).

Apesar do tempo de vida útil, a cerâmica de PZT é bastante utilizada em aplicações tecnológicas, principalmente por causa do preço (TICHY; ERHART; KITTINGER, 2010). A produção de cerâmicas piezoelétricas ocorre por métodos avançados que incluem utilizar materiais ferroelétricos como grãos e um processo de prensagem em formas com a geometria desejada. Estas cerâmicas são sintetizadas em fornos a elevadas temperaturas.

A utilização de cerâmicas piezoelétricas como elemento ativo de transdutores para a aplicação em comunicação acústica subaquática é o foco desta dissertação. Em transdutores piezoelétricos ultrassônicos no formato de discos para sonares, por exemplo, materiais como as cerâmicas e os polímeros são capazes de gerar e detectar frequências dentro de uma faixa de 20 *kHz* até alguns *MHz* (FREITAS et al., 2012).

### **Outros materiais**

Outros materiais comumente utilizados como material piezoelétrico são os polímeros piezoelétricos, que foram descobertos pelo cientista Heiji Kawai. Em sua pesquisa, ele percebeu que quando tracionamos e polarizamos o Fluoreto de Polivinilideno (PVDF) ele apresenta propriedades piezoelétricas superiores ao do cristal de quartzo. Outros materiais polímeros piezoelétricos bastante utilizados e estudados são os copolímeros derivados do PVDF como o Trifluoroetileno (TrFE) e o Tetrafluoroetileno (TeFE) (EIRAS, 2004).

Devido à necessidade de se alcançar propriedades físicas específicas em um material para determinadas aplicações, houve o desenvolvimento de compósitos de materiais. Estes compósitos tem o objetivo de minimizar as desvantagens apresentadas pelos cristais, cerâmicas e polímeros quando utilizados individualmente. No entanto, o custo e demora de fabricação são uma desvantagem em se utilizar compósitos (EIRAS, 2004).

#### **2.1.4 Aplicações Piezoelétricas**

A piezoeletricidade está bastante presente no nosso cotidiano, como em telas tácteis de celulares inteligentes (*smartphones*), em mecanismos de zoom ou foco automático de câmera fotográficas digitais, em autofalantes, microfones, em cristais osciladores presentes em componentes eletrônicos (HEYWANG; LUBITZ; WERSING, 2008) e em impressoras a jato de tinta. Nas impressoras a jato de tinta, a estrutura da cabeça da impressora composta de material PZT melhorou a estabilidade das vibrações (KURASHIMA, 1999).

Desde a década de 80, grandes fabricantes automotivos utilizavam a piezoeletricidade no controle do encosto de cabeça e na suspensão dos veículos (HEYWANG; LUBITZ; WERSING, 2008). Na mesma época, concessões de patentes que envolvem captação de energia (*energy harvesting*) geram eletricidade por meio da pressão exercida nos pneus de um automóvel, distorcendo os elementos piezoelétricos e entregando essa energia ao sistema elétrico do veículo (KO, 1969).

Outras aplicações de captação de energia por meio da piezoeletricidade podem ser

encontradas em pisos inteligentes de discotecas, arquibancadas de ginásio ou estádios e autoestradas inteligentes. A energia gerada pelo material piezoelétrico estará interligada a um sistema de baterias ou da concessionária de energia local, possibilitando melhor aproveitamento dos recursos do planeta para gerar energia.

Vijaya (2012) apresenta em seu livro aplicações piezoelétricas e seu funcionamento nas aplicações voltadas para duas áreas de atuação de engenharia e de medicina. Das aplicações em engenharia, podemos encontrar a piezoeletricidade em: isqueiro a gás, sensor de pressão, acelerômetro, giroscópio, microfone, sonar, sensores táteis, captação de energia, alto falantes eletrônicos, motores piezoelétricos, brocas ultrassônicas, osciladores de cristal, transformadores piezoelétricos, e podem ser utilizadas como monitoramento de estruturas, controle de vibração e ruídos e aplicação de sensores e atuadores em sistemas inteligentes e robótica.

Das aplicações em medicina, a piezoeletricidade está presente em: monitor de pressão sanguínea, monitor de batimentos cardíacos, sensores táteis para endoscopia e instrumentos cirúrgicos invasivos mínimos, acelerômetros para monitoramento de atividades do paciente e detecção de tremores, bombas para análises biomédicas, captura de imagens de aparelhos ultrassom, e podem ser utilizados na análise de medições de densidade óssea por meio de ultrassom, remoção de células tumorais usando ultrassom, ultrassom para entrega de medicamentos, entrada de medicamentos transdérmicos introduzidos por ultrassom, cirurgia de catarata, ultrassom terapêutico para tratamento de lesões, dor muscular e fratura óssea.

## 2.2 Comunicação Subaquática

A constante evolução dos sistemas de comunicações tem proporcionado novas possibilidades de aplicações terrestres e subaquáticas, que é o tema deste trabalho. A comunicação subaquática por meio de transmissões sem fio pode acontecer por meio de três maneiras: (i) a transmissão eletromagnética, (ii) a transmissão óptica e (iii) a transmissão acústica. A seguir apresentamos vantagens e desvantagens de cada um destes tipos de transmissão.

Em transmissões sem fio por ondas eletromagnéticas ou Rádio Frequência (RF), podemos descrever a possibilidade de comunicar-se a elevadas larguras de banda como a principal vantagem. Como desvantagem, altas frequências necessárias para garantir essa banda são absorvidas rapidamente pela água dificultando a transmissão entre distâncias maiores (LEÃO, 2012). Entretanto existem aplicações nas áreas de detecção e navegação que combinam técnicas digitais modernas de compressão de sinais para a utilização dessas transmissões em altas

frequências (RHODES et al., 2007).

Em transmissões ópticas sem fio, as altas taxas de transmissão com baixo consumo de energia se destacam. Porém este tipo de transmissão possui alcance limitado, em torno de 10 a 30 metros. Isto se deve à alta absorção da luz pelo meio e rápido espalhamento da luz no meio, que ocorre mesmo quando há o perfeito alinhando entre o transmissor e receptor (VIEIRA et al., 2010).

A transmissão por sinal acústico é considerada a implementação mais eficaz por sofrer uma menor atenuação quando propagada no meio subaquático. A baixa atenuação do som na água destaca-se como a principal vantagem quando comparada com as outras formas de transmissão. Como desvantagem, destaca-se a alta latência causada pela baixa velocidade de propagação do som na água (em torno de  $1500\text{ m/s}$ ), que é menor que a velocidade de propagação da luz no ar ( $3 \times 10^8\text{ m/s}$ ) (VIEIRA et al., 2010).

### 2.2.1 Canal Acústico Subaquático

A realização da comunicação acústica no ambiente subaquático é um grande desafio devido às dificuldades impostas pelo meio e pela a baixa velocidade de propagação do som na água (ZHOU; WANG, 2014). Dificuldades, como baixa largura de banda e alto consumo de energia, são influenciadas pelas características e parâmetros ambientais como temperatura, salinidade e pressão. Estes parâmetros influenciam diretamente na velocidade de propagação do som na água.

Além das características do meio, destacamos os múltiplos caminhos percorridos pelos sinais ao longo do canal até chegar no receptor, as perdas sofridas pelos sinais durante a propagação, bem como os ruídos pertencentes ao meio. Todas essas características do canal acústico subaquático são descritas abaixo levando em consideração sua influência na transmissão acústica de sinais no meio.

### 2.2.2 Velocidade de Propagação do Som na Água

A transmissão acústica ocorre por meio da propagação de ondas sonoras. A velocidade de propagação do som na água é de aproximadamente  $1500\text{ m/s}$ , que é quatro vezes mais rápida que a velocidade de propagação do som no ar ( $343\text{ m/s}$ ) (RIBEIRO; PEDROZA; COSTA, 2011). Esse fato ocorre devido às moléculas de água estarem mais próximas umas das outras facilitando o choque entre elas ao longo da propagação de uma onda longitudinal de pressão, o que justifica a maior velocidade de propagação no meio. Entretanto, essa propagação do som

no canal de comunicação acústica é considerada baixa e bastante variável, pois depende das características físicas da água (URICK, 1983).

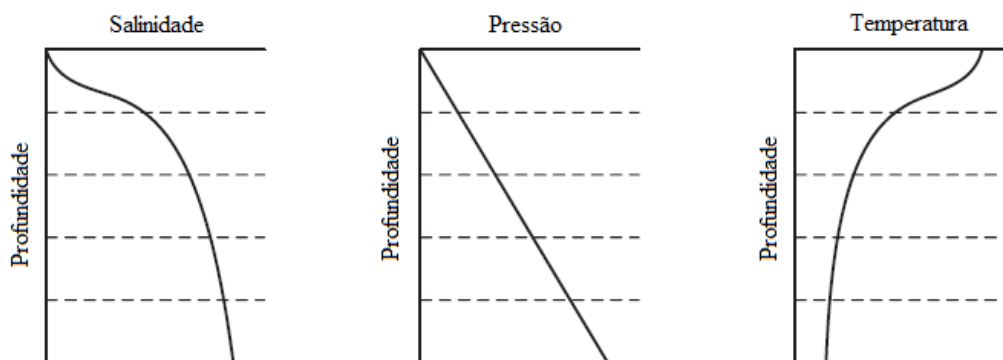
Quando comparamos a velocidade de propagação do som na água, ( $1500 \text{ m/s}$ ), com a velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas no ar ( $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ ), é possível ver uma diferença de cinco ordens de grandezas a menos. Este fato gera um alto atraso de propagação conhecido como latência (RIBEIRO; PEDROZA; COSTA, 2011).

O cálculo da velocidade de propagação do sinal acústico na água, seja água do mar ou água doce, pode ser demonstrado por diversos modelos matemáticos analíticos e semi-empíricos, como os apresentados modelos por Macêdo (2015). Nessa dissertação de mestrado, utilizamos a expressão que define a velocidade de propagação do som na água baseado-se no trabalho de Stojanovic e Preisig (2009). Esta equação é descrita por

$$c = 1448,96 + 4,591 \times T - 5,304 \times 10^{-2} \times T^2 + 2,374 \times 10^{-4} \times T^3 + 1,340 \times (S - 35) + 1,630 \times 10^{-2} \times D + 1,675 \times 10^{-7} \times D^2 - 1,025 \times 10^{-2} \times T \times (S - 35) - 7,139 \times 10^{-13} \times T \times D^3 \quad (2.18)$$

em que,  $T$  representa a temperatura,  $S$  a salinidade e  $D$  a profundidade.

Ao relacionarmos os parâmetros ambientais temperatura, salinidade, pressão e profundidade, é possível perceber a influência destes parâmetros nas características do canal acústico subaquático. A Figura 6 apresenta a variação desses parâmetros em função da profundidade no meio subaquático.



**Figura 6:** Variação dos parâmetros ambientais em função da profundidade. Fonte: adaptado de Zhou e Wang (2014).

O primeiro parâmetro é o nível de pressão que aumenta em  $1 \text{ atm}$  à medida que descemos a cada 10 metros de profundidade. Isto acontece devido à água ser mais densa que o ar. O ponto mais profundo do mar, a depressão *Challenger* está situada nas fossas das Marianas, com

aproximadamente 11 km de profundidade e o seu nível de pressão pode atingir até 1100 atm (CAMPBELL, 1998).

O segundo parâmetro ambiental que destacamos é a temperatura, que possui uma enorme capacidade de variação. Este parâmetro está intimamente relacionado com a luminosidade que incide na água. Entre 200 e 1000 metros de profundidade a luminosidade é próxima de zero e o uso de lanternas comuns iluminam apenas de 20 a 30 metros (ZHOU; WANG, 2014). A luz do sol aquece os oceanos na sua presença ou deixa de aquecer na sua ausência, o que faz com que essa variação na temperatura influencie na propagação de sinais no meio.

Por fim, como terceiro parâmetro ambiental, a salinidade está relacionada com a condutividade da água e é medida em  $g/kg$ , que equivale a partes por mil (*parts per thousand* - *ppt*). Ela é determinada através da medição da condutância que utiliza a escala da salinidade apresentada por Millero (1996). Assim, duas proporções de água com a mesma salinidade podem ter diferentes composições e possuir a mesma condutividade. Os três parâmetros apresentados variam com o tempo e influenciam diretamente na velocidade de propagação do som no ambiente subaquático, sendo fundamentais para que seja definido a velocidade de propagação do som na água.

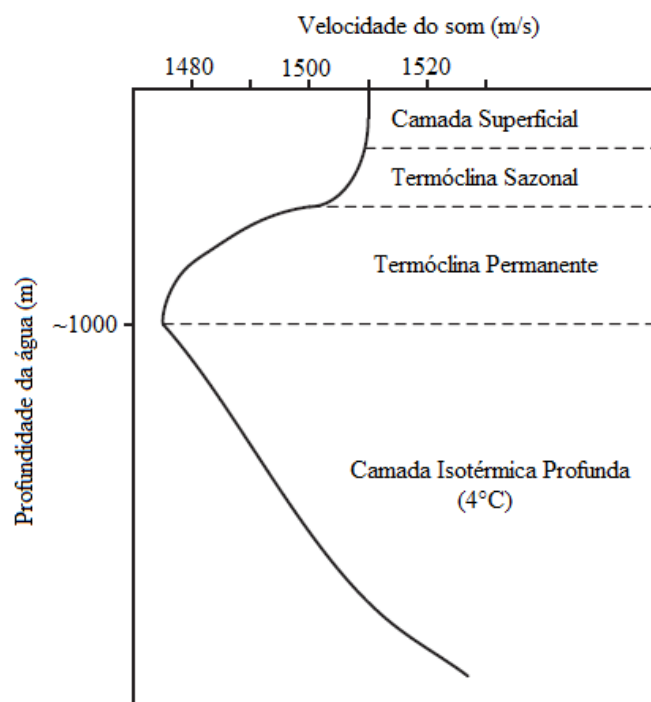
A Figura 7 apresenta o perfil típico da velocidade do som considerando a profundidade do oceano em quatro camadas: **(i) a superficial, (ii) a termoclina sazonal, (iii) a termoclina permanente e (iv) a isotérmica profunda** (ZHOU; WANG, 2014).

A **camada superficial**, também conhecida como camada de mistura, tem profundidade de até algumas dezenas de metros e recebe influências da mistura dos efeitos do vento, temperatura e salinidade, o que torna a velocidade do som mais constante.

A **camada de termoclina sazonal** e a **camada de termoclina permanente** sofrem a diminuição da temperatura da água com o a maior profundidade o que faz com que a velocidade do som atenua. A diferença entre as duas camadas se apresenta na influência das estações do ano. Na camada Termoclina Sazonal as estações do ano influenciam diretamente na temperatura, a camada Termoclina Permanente, mais profunda, sofre menos influência das estações do ano.

Na **camada isotérmica profunda**, que possui a temperatura constante em torno de  $4^{\circ}C$ , a velocidade do som aumenta com o aumento da pressão.

A seguir explicaremos outras características que influenciam na definição da velocidade de propagação de onda acústica na água. Dentre estes apresentaremos os atrasos de propagação, os múltiplos caminhos e a atenuação dos sinais.



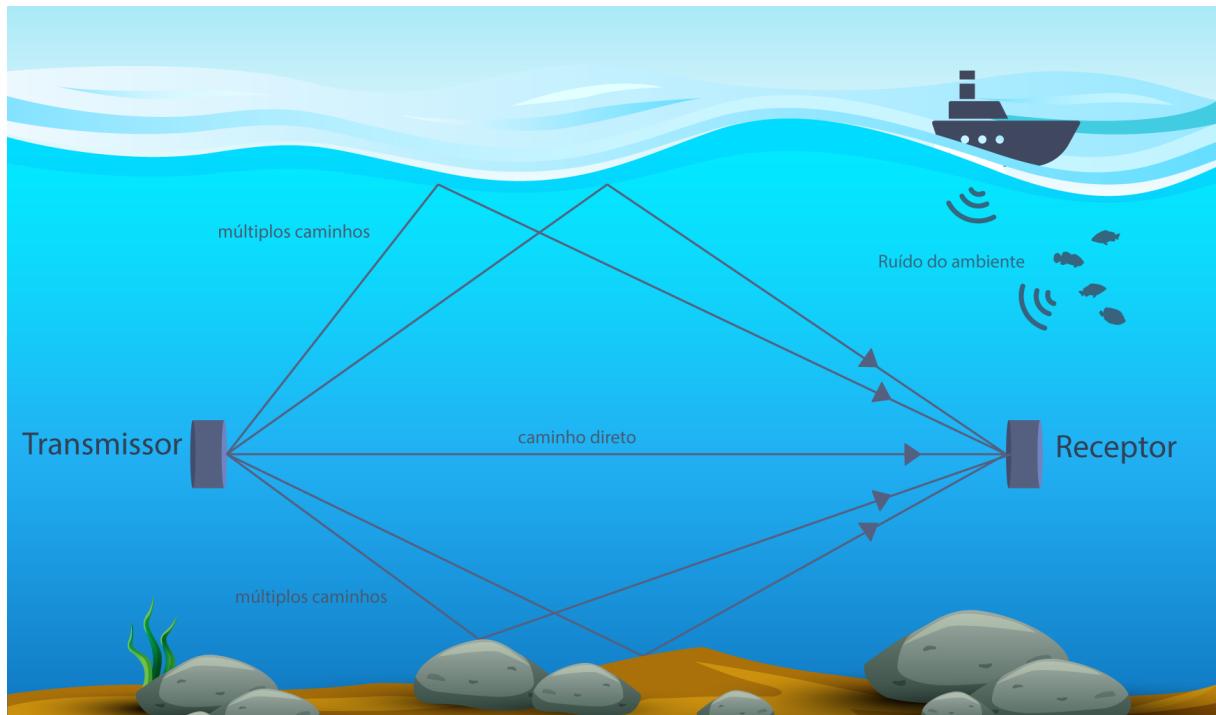
**Figura 7:** Perfil típico da velocidade do som em águas profundas. Fonte: adaptado de Zhou e Wang (2014).

### 2.2.3 Múltiplos Caminhos

Os múltiplos caminhos (ou múltiplos percursos) são fenômenos presentes na propagação de sinais em transmissões sem fio de qualquer natureza. Na propagação de ondas acústicas no meio subaquático, os múltiplos caminhos são considerados uma característica relevante (STOJANOVIC; PREISIG, 2009). Os sinais gerados no transmissor chegam no receptor por diferentes caminhos, com diferentes atrasos e atenuações. A Figura 8 apresenta os múltiplos caminhos em um cenário para propagação de ondas acústicas em águas rasas.

Como consequência dos múltiplos caminhos, o receptor detecta interferências entre símbolos (IES) recebidos (AKYILDIZ; POMPILI; MELODIA, 2005). Para minimizar estas interferências, é possível utilizar técnicas de modulação, o que torna possível a interpretação do sinal no receptor (ZHOU; WANG, 2014).

Os múltiplos caminhos ocorrem em todas as profundidades do ambiente subaquático, isto é, em águas rasas e águas profundas (KATSNELSON; PETNIKOV, 1997). Para águas rasas, os múltiplos caminhos ocorrem com maior frequência, pois o leito e a superfície do mar funcionam como um guia de ondas refletindo e direcionando os sinais acústicos ao longo do meio de propagação. Estas reflexões também ocorrem quando as ondas acústicas colidem com objetos presentes no ambiente marinho.



**Figura 8:** Múltiplos caminhos do som para águas rasas. Fonte: autor.

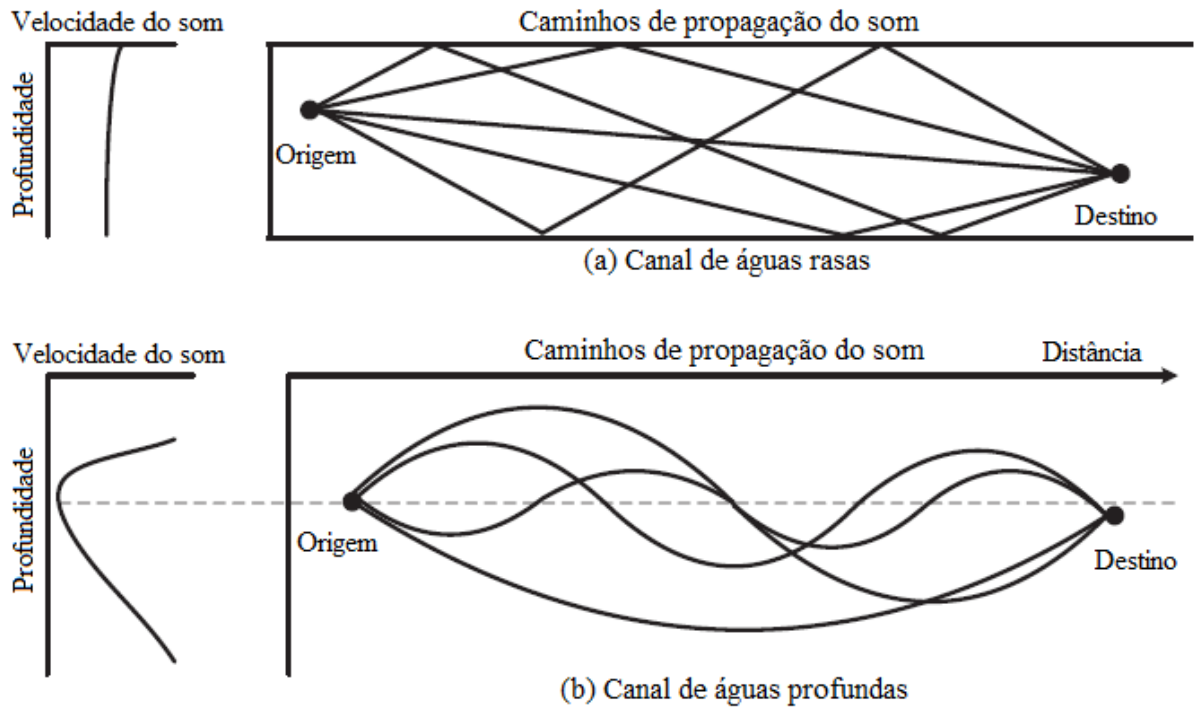
A Figura 9 mostra a relação da velocidade de propagação do som na água com a profundidade considerando os fenômenos de reflexão e refração das ondas acústicas para ambientes de águas rasas e águas profundas.

Na literatura, não existe uma definição formal que diferencie esses dois tipos de ambientes, pois é muito difícil determinar exatamente as propriedades que definem o mar “raso” e o mar “profundo”. Porém, do ponto de vista acústico, autores como Katsnelson e Petnikov (1997) definem uma região de águas rasas quando é satisfeita a relação descrita por

$$r \gg \frac{H^2}{\lambda} \quad (2.19)$$

em que,  $r$  é a distância entre a fonte e o receptor sonoro,  $H$  a profundidade do canal e  $\lambda$  o comprimento de onda sonora. Se esta relação não for satisfeita a região é definida como águas profundas.

Em sistemas de comunicação para águas profundas ocorre o efeito da refração das ondas acústicas, onde a velocidade do som muda com a profundidade, localização e a variação dos parâmetros ambientais (MARTINS, 2013).



**Figura 9:** Canal de propagação do som para: a) águas rasas e; b) águas profundas. Fonte: adaptado de Zhou e Wang (2014).

### 2.2.4 Atenuação e Perdas

A atenuação no sinal acústico cresce com o aumento da frequência de operação do transdutor e com o aumento da distância entre o projetor e hidrofone. Portanto, é necessário um equilíbrio entre essa distância e a frequência de operação do transdutor no sistemas de comunicação acústicas subaquáticas (STOJANOVIC, 2007). Ou seja, quanto maior essa distância e maior for a frequência utilizada, mais atenuação o sinal irá sofrer e, consequentemente, menor será a largura de banda de operação dessa comunicação.

As atenuações do canal subaquático são formadas por três componentes inerentes a esse meio: **(i)** a perda por absorção, **(ii)** a perda por espalhamento geométrico e **(iii)** a perda por espalhamento físico. Esses componentes são explicados com mais detalhes a seguir.

A perda por absorção (*absortion loss* -  $AL(r,f)$ ) é o processo de conversão da energia acústica em calor. Quanto maior for a frequência de operação do sinal maior será a quantidade de energia absorvida pela água. A perda por absorção ( $AL(r,f)$ ) é descrita por

$$AL(r,f) = 10\log(\alpha(f)) \times r \quad (dB) \quad (2.20)$$

em que,  $AL(r,f)$  é o coeficiente de absorção em  $km/dB$  e  $r$  é a distância em  $km$ .

As frequências acima de 100 kHz são influenciadas pela viscosidade da água, enquanto que

as frequências abaixo de 100 kHz são influenciadas pela relaxação química dos compostos ácido bórico<sup>1</sup> e sulfato de magnésio<sup>2</sup>, presentes na água do mar. Este compostos afetam frequências na faixa de 1 kHz até 100 kHz, (MARTINS et al., 2012). A relaxação química é o efeito provocado pela variação de temperatura e pressão de uma onda sonora no meio de transmissão, nesta pesquisa, a água. Em uma determinada faixa de frequência, próxima da frequência de relaxamento de um composto químico, essa diferença de pressão e temperatura provoca desequilíbrios químicos na água. O equilíbrio químico após estas reações resulta na absorção do som pelo meio de transmissão e podem gerar alteração da velocidade da onda (FALLER, 2016). Estes são os mecanismos que influenciam no coeficiente de absorção em função da frequência  $\alpha(f)$ .

Diversos modelos matemáticos descrevem o cálculo da absorção, como os que foram apresentados por Macêdo (2015). Nesta dissertação utilizamos uma abordagem simplificada do modelo de François-Garrison apresentado por Ainslie e McColm (1998), onde o são levados em consideração fatores como temperatura, profundidade, acidez (pH) e os efeitos causados pelos componentes químicos da água. O coeficiente de absorção ( $\alpha(f)$ ) expresso em  $dB/km$  é descrito por

$$\alpha(f) = \frac{0,106 (f_1 f^2) e^{(pH - \frac{8}{0,56})}}{f_1^2 + f^2} + \frac{0,52 (1 + \frac{T}{43} \frac{S}{35}) (f_2 f^2) e^{(\frac{-D}{6})}}{f_2^2 + f^2} + 0,00049 f^2 e^{-(\frac{T}{27} + \frac{D}{17})} \quad (2.21)$$

$$f_1 = 0,78 \sqrt{\left(\frac{S}{35}\right) e^{(\frac{T}{26})}}$$

$$f_2 = 42 e^{(\frac{T}{17})}$$

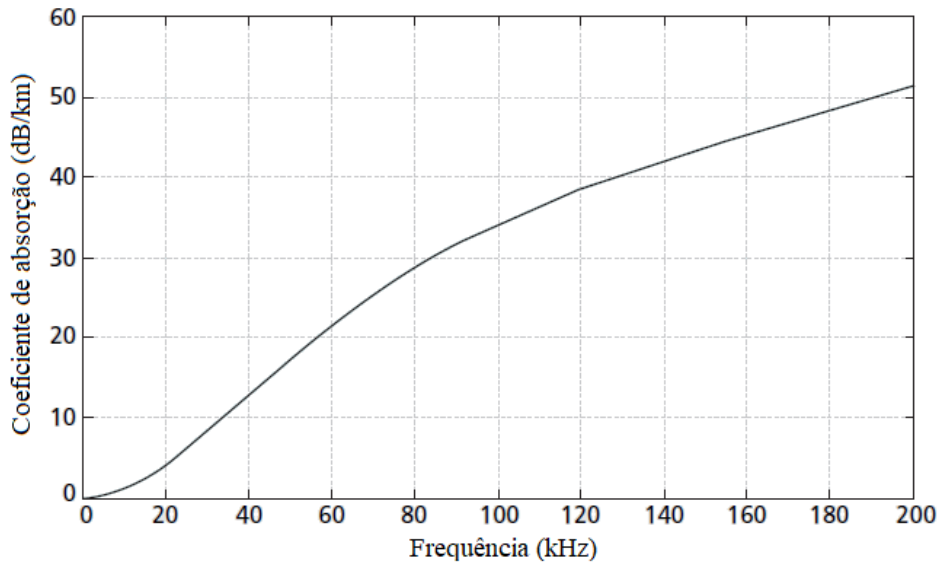
em que,  $T$  é o valor da temperatura da água em graus Celsius,  $S$  é a salinidade em partes por mil (ppt),  $D$  é a profundidade em metros,  $pH$  é a acidez da água,  $f_1$  e  $f_2$  são as frequências de relaxação química do ácido bórico e do sulfato de magnésio, respectivamente.

O valor do coeficiente de absorção ( $\alpha(f)$ ) que será calculado para o canal de comunicação deve estar de acordo com frequência do transdutor piezoelétrico, como mostra a Figura 10.

A perda por espalhamento geométrico (*spreading loss - SL*) ocorre quando o sinal de onda acústica perde energia à medida que ele se dispersa no meio de propagação, aumentando a sua área de superfície. Esse espalhamento tem uma relação logarítmica com distância e é

<sup>1</sup>Ácido bórico é um composto químico existente na forma de cristais incolores ou sob a forma de um pó branco, cuja fórmula é  $H_3BO_3$  (FRANCOIS; GARRISON, 1982)

<sup>2</sup>O sulfato de magnésio é um composto químico que contém magnésio, cuja fórmula é  $MgSO_4$  (FRANCOIS; GARRISON, 1982)



**Figura 10:** Coeficiente de absorção,  $10 \log(a(f))$  em  $(dB/km)$ . Fonte: adaptado de Stojanovic e Preisig (2009).

representado por uma equação que envolve o diâmetro do projetor (URICK, 1983). A perda por espalhamento geométrico (SL) é descrita por

$$SL = k \times 10 \log(r) \quad (dB) \quad (2.22)$$

em que,  $k$  é o fator de espalhamento e  $r$  é distância em metros.

A perda por espalhamento físico (*scattering loss*) ocorre quando a perda de energia é redirecionada na superfície devido à heterogeneidade do meio considerando a reflexão, refração e difração da onda. As perdas por reflexão, por exemplo, apresentam um caráter aleatório difícil de se modelar, em que existem apenas expressões aproximadas para perda relacionada (SOCHELEAU, 2011). Pela dificuldade de modelagem e simulação, a perda por espalhamento físico não será considerada no modelo proposto desta dissertação.

Levando em conta as considerações acima, concluímos que o cálculo da atenuação é o resultado da soma dos coeficientes de perda por espalhamento geométrico e perda por absorção. Assim, a atenuação total do sistema é descrita por

$$A(f,r) = SL + AL(r,f) \quad (2.23)$$

em que,  $A(f,r)$  é a atenuação sofrida pelo sinal que é emitido com a frequência  $f$  e a distância  $r$ ,  $SL$  é a energia perdida pelo espalhamento geométrico e  $AL(r,f)$  é o coeficiente de absorção.

### 2.2.5 Ruídos

Além dos fenômenos descritos anteriormente, que afetam diretamente na propagação da onda sonora emitida embaixo d'água, é necessário levar em consideração as interferências causadas pelo ruído ambiente existente no meio subaquático.

A maioria das fontes de ruído apresenta comportamento estatístico gaussiano, com densidade espectral de potência contínua e pode ser modelada em quatro tipos de ruídos para o meio aquático: **(i)** de turbulência, **(ii)** de navegações, **(iii)** das ondas e o **(iv)** térmico (STOJANOVIC, 2007).

O ruído de turbulência, dado pela Equação 2.24, é causado pela turbulência existente na água e influencia em frequências abaixo de 10 Hz, como é descrito em

$$10\log N_t(f) = 17 - 30\log(f) \quad (2.24)$$

em que,  $f$  é a frequência do sinal.

O ruído de navegações (em inglês *shipping*) é o termo usado para descrever o ruído causado pelos motores dos navios. Esse ruído afeta os sinais com frequências entre 10 Hz e 100 Hz e é descrito por

$$10\log N_s(f) = 40 + 20(s - 0,5) + 26\log(f) - 60\log(f + 0,03) \quad (2.25)$$

em que,  $s$  é o fator de navegação, entre 0 e 1.

O ruído das ondas é causado pelo “quebrar” das ondas. Ele afeta os sinais com frequências entre 100 Hz e 100 kHz e é descrito por

$$10\log N_w(f) = 50 + 7,5w(0,5) + 20\log(f) - 40\log(f + 0,4) \quad (2.26)$$

em que,  $w$  é a velocidade do vento.

O ruído térmico é causado pela agitação das moléculas. Esse ruído afeta as frequências acima de 100 kHz e é descrito por

$$10\log N_{th}(f) = -15 + 20\log(f) \quad (2.27)$$

Podemos concluir que cada tipo de ruído influencia frequências específicas e que o ruído total pode ser calculado pela soma de todos os ruídos considerados anteriormente.

### 2.2.6 Largura de Banda

A transmissão acústica dos equipamentos para o meio subaquático atua numa faixa de frequência de aproximadamente 30 kHz, o que resulta numa largura de banda muito limitada neste canal (VIEIRA et al., 2010). Essa largura de banda varia com o aumento da distância entre o transmissor e o receptor e com o aumento da frequência de operação do sistema de comunicação. Devido a essa largura de banda ser tão estreita, a taxa máxima de transmissão de dados em um enlace de comunicação está em torno de dezenas de kHz. A Tabela 3 apresenta a variação dos valores entre a largura de banda e a distância para o canal acústico subaquático.

**Tabela 3:** Largura de banda disponível para diferentes distâncias. Fonte: adaptado de Akyildiz, Pompili e Melodia (2006).

| -           | Distância (km) | Largura de Banda (kHz) |
|-------------|----------------|------------------------|
| Muito Longo | 1000           | < 1                    |
| Longo       | 10 - 100       | 2 - 5                  |
| Médio       | 1 - 10         | 10                     |
| Curto       | 0,1 - 1        | 20 - 50                |
| Muito Curto | < 0,1          | > 100                  |

Essa limitação de banda de frequência ocorre devido às perdas de transmissão do sinal e da atenuação sofrida ao longo do percurso no canal de comunicação. As perdas consideradas são causadas pelo espalhamento geométrico e pela absorção do som na água.

### 2.2.7 Aplicações em Comunicação Subaquática

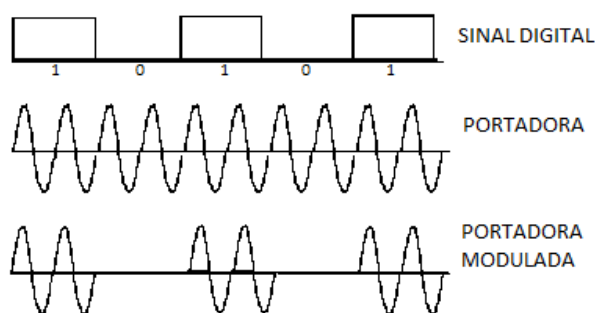
A comunicação subaquática possui várias aplicações, principalmente quando tratamos de redes de sensores aquáticos para áreas da oceanografia, biologia marinha, exploração de gás e petróleo, prevenção de variações sísmicas, monitoração de desastres ecológicos, na área militar e em atividades de pesca e lazer. De acordo com Vieira et al. (2010), cada uma destas aplicações apresenta características distintas necessitando de diferentes tipos de projetos.

Butler e Sherman (2007) citam aplicações com transdutores para comunicação subaquática para aplicações navais, como submarinos ou navios na superfície. Como exemplo destas aplicações tem-se submarinos com hidrofones para monitorar seu próprio ruído, mapeamento do leito oceânico por meio de sonar, ativação acústica de torpedos, ativação de minas acústicas, dentre outras. Todas estas aplicações requerem quantidades específicas de transdutores, com características específicas, como funcionar em determinadas faixas de frequências, potência, tamanho, peso e profundidade na água.

## 2.3 Modulação por Chaveamento por Amplitude (ASK)

As três características que definem uma onda senoidal são amplitude, frequência e fase. Ao transmitir uma mensagem entre uma fonte de informação e um usuário final separados fisicamente, o transmissor modifica o sinal de mensagem para uma forma apropriada de transmissão pelo canal. O processo de variação das características de uma onda portadora de acordo com o sinal de mensagem é chamado de modulação (HAYKIN, 2004).

Utilizaremos na simulação desta dissertação de mestrado a modulação por chaveamento de amplitude (*Amplitude Shift Keying - ASK*). Esta modulação é conhecida como chaveamento On-Off (do inglês *On-Off Keying - OOK*), que é um tipo modulação digital binária onde alguma informação é transmitida durante o bit “1” e nenhuma informação é transmitida durante o bit “0”. A Figura 11 exibe este tipo de modulação.



**Figura 11:** Modulação por chaveamento de amplitude - ASK. Fonte: adaptado de Tarouco (1998).

A modulação OOK não realiza alterações na frequência e na fase da onda portadora. Estas alterações são utilizadas na modulação por chaveamento de frequência (*Frequency Shift Keying - FSK*) e na modulação por chaveamento de fase (*Phase Shift Keying - PSK*), ambas fora do escopo desta dissertação.

O presente trabalho não busca fazer um estudo aprofundado nas técnicas de modulações existentes, pois já existem trabalhos na literatura, como em Xavier (2012), Martins et al. (2014a) e Martins et al. (2014b), que realizaram estudos de análise de modulações com ênfase em múltiplos caminhos e testes experimentais em modem desenvolvidos para comunicação acústica subaquática.

## 2.4 Trabalhos Relacionados

Além da fundamentação teórica apresentada, buscamos trabalhos que fizeram experimentos e simulações semelhantes à metodologia proposta e no contexto desta pesquisa. Para este

fim, realizamos uma busca sistemática na literatura baseada nos princípios da metodologia de revisão sistemática (DRESCH; LACERDA; ANTUNES JÚNIOR, 2015). A revisão sistemática fornece evidências sólidas e confiáveis, como consolidar resultados de estudos relevantes na área (DRESCH; LACERDA; ANTUNES JÚNIOR, 2015) que é nosso objetivo ao realizá-la.

No planejamento da busca sistemática, definimos uma base de artigos científicos para aplicar a *string*<sup>3</sup> de busca, a base Scopus<sup>4</sup>, visto que ela é considerada como o mecanismo de busca mais efetivo quando se considera outras grandes bases como ACM Digital Library e IEEE Xplore Digital Library (BURNHAM, 2006).

A *string de busca* definida contém palavras-chave relacionadas ao tema. Unindo os termos correlatos nas línguas portuguesa e inglesa, temos como resultado final a seguinte *string de busca*:

```
1 ("Underwater Communication" AND Acoustic AND Piezoelectric* AND  
2 Transducer) OR ("Comunicação Subaquática" AND Acústica AND  
3 Piezoeletric*, Transdutor)
```

Para uma busca mais eficiente utilizamos filtros da própria base científica. Os filtros utilizados são: documentos do tipo artigos de conferências e *journals*; ano de publicação de 2008 a 2018s; artigos escritos nas línguas inglesa e portuguesa; e, por fim, limitamos as áreas científicas de busca, selecionando engenharia, física, ciências da computação, ciência dos materiais, matemática e energia.

Como resultado, a busca sistemática nos retornou 46 artigos. Adicionamos manualmente 1 artigo proveniente de outra base de artigos e igualmente importante. Logo, nosso conjunto inicial teve 47 artigos dos quais filtramos para obter os trabalhos relacionados. Dentre estes trabalhos, selecionamos os que de fato se relacionavam com o objetivo da dissertação, principalmente nos aspectos de simulação envolvendo os softwares *COMSOL* e *Matlab/Simulink* e que utilizaram algum tipo de material piezoelétrico como elemento ativo dos transdutores para comunicação acústica subaquática.

Como resultado final da busca sistemática, após a seleção de artigos, obtivemos 15 artigos como trabalhos relacionados com a dissertação de mestrado proposta: (COATES, 1991; ELMASLI; KOYMEN, 2007; MARTINS et al., 2010; KUZLU et al., 2010; RIBEIRO; PEDROZA; COSTA, 2011; MARTINS et al., 2012; MARTINS et al., 2014b; MARTINS et

<sup>3</sup>string de busca é conjunto de palavras chave para pesquisar na base científica, utilizando conectores booleanos, como “AND” e “OR”.

<sup>4</sup><https://www.scopus.com/home.uri>

al., 2014a; YUN et al., 2014; MARTINS et al., 2015; NIVEDITHA et al., 2015; MARTINS et al., 2015; NOURI et al., 2016; MARTINS et al., 2017; NAIK; KEMPAIAH et al., 2018). O resultado completo dos artigos encontrados nesta busca sistemática está descrito na Tabela 4.

**Tabela 4:** Trabalhos relacionados.

| Referência                      | Assunto                                                                                                                  | Simulação      | Software                        | Experimental |
|---------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|---------------------------------|--------------|
| (COATES, 1991)                  | Projeto de <i>arrays</i> de transdutores em vários formatos para CAS.                                                    | -              | -                               | ✓            |
| (ELMASLI; KOYMEN, 2007)         | Desenvolvimento de transdutor de cerâmica para banda larga em CAS.                                                       | ✓              | <i>Simulink</i>                 | -            |
| (MARTINS et al., 2010)          | Estudo de transdutores de PZT e PVDF analisando o desempenho em comunicações de altas velocidades.                       | ✓              | <i>COMSOL</i>                   | -            |
| (KUZLU et al., 2010)            | Implementação de rede de casamento de impedância para um hidrofone específico via técnica de computação direta para CAS. | -              | -                               | ✓            |
| (RIBEIRO; PEDROZA; COSTA, 2011) | Análise de protocolos de roteamento em testes simulado e experimental para aplicação de monitoramento de redes em CAS.   | Outro software | -                               | -            |
| (MARTINS et al., 2012)          | Otimização de projetor de PZT e PVDF simulado e testado experimentalmente.                                               | ✓              | <i>COMSOL</i>                   | ✓            |
| (MARTINS et al., 2014b)         | Desenvolvimento de modem FPGA com transdutor PVDF e estudo de modulações.                                                | ✓              | <i>Simulink</i>                 | ✓            |
| (MARTINS et al., 2014a)         | Desenvolvimento de modem com PVDF e PZT para CAS com FPGA e testado com modulação OOK.                                   | ✓              | <i>Simulink</i>                 | ✓            |
| (YUN et al., 2014)              | Desenvolvimento de três tipo de transdutores de PZT4 para CAS baseado na velocidade do doppler.                          | -              | -                               | ✓            |
| (MARTINS et al., 2015)          | Estudo simulado de modulações para transdutores PZT e PVDF.                                                              | ✓              | <i>COMSOL</i> e <i>Simulink</i> | ✓            |
| (NIVEDITHA et al., 2015)        | Modelagem de um modem em CAS para hidrofone.                                                                             | Outro software | -                               | -            |
| (MARTINS et al., 2015)          | Desenvolvimento de modem acústico para CAS em aplicações de <i>streaming</i> de vídeo.                                   | -              | -                               | ✓            |
| (NOURI et al., 2016)            | Modelagem de parâmetros do transdutor em anel de PZT8.                                                                   | ✓              | <i>Simulink</i>                 | -            |
| (MARTINS et al., 2017)          | Desenvolvimento de transdutor ultrassônico PVDF de alta frequência e banda larga, com testes simulado e experimental.    | ✓              | <i>COMSOL</i>                   | ✓            |
| (NAIK; KEMPAIAH et al., 2018)   | Análise de diferentes formatos de hidrofones em CAS.                                                                     | ✓              | <i>COMSOL</i>                   | -            |

Os trabalhos selecionados utilizaram materiais piezoelétricos no contexto de comunicação acústica subaquática. Dentre estes artigos, observamos na Tabela 4 que 11 artigos são trabalhos de simulação (ELMASLI; KOYMEN, 2007; MARTINS et al., 2010; RIBEIRO; PEDROZA; COSTA, 2011; MARTINS et al., 2012; MARTINS et al., 2014b; MARTINS et al., 2014a; MARTINS et al., 2015; NIVEDITHA et al., 2015; NOURI et al., 2016; MARTINS et al., 2017; NAIK; KEMPAIAH et al., 2018), 9 são trabalhos experimentais (COATES, 1991; KUZLU et al., 2010; MARTINS et al., 2012; MARTINS et al., 2014b; MARTINS et al., 2014a; YUN et al.,

2014; MARTINS et al., 2015; MARTINS et al., 2015; MARTINS et al., 2017) e 5 trabalhos tem em sua metodologia tanto simulação quanto experimento (MARTINS et al., 2012; MARTINS et al., 2014b; MARTINS et al., 2014a; MARTINS et al., 2015; MARTINS et al., 2017). Dentre os 11 trabalhos que envolvem simulação, 5 utilizam o software *COMSOL* (MARTINS et al., 2010; MARTINS et al., 2012; MARTINS et al., 2015; MARTINS et al., 2017; NAIK; KEMPAIAH et al., 2018), 5 utilizam o software *Matlab/Simulink* (ELMASLI; KOYMEN, 2007; MARTINS et al., 2014b; MARTINS et al., 2014a; MARTINS et al., 2015; NOURI et al., 2016), os quais são utilizados nesta dissertação. O artigo (MARTINS et al., 2015) utiliza ambos softwares para desenvolver um estudo de modulações no para transdutores do tipo PZT e PVDF. 2 destes trabalhos, Ribeiro, Pedroza e Costa (2011) e Niveditha et al. (2015), utilizam outros softwares para realizar suas simulações.

Dentro da busca sistemática realizada, 7 dos artigos encontrados são do autor Martins M. S. ((MARTINS et al., 2010), (MARTINS et al., 2012), (MARTINS et al., 2014b), (MARTINS et al., 2014a), (MARTINS et al., 2015), (MARTINS et al., 2015) e (MARTINS et al., 2017)) 4 destes trabalhos envolvem simulação no software *COMSOL*, 3 no software *Matlab/Simulink*. Estes artigos compõem, em sua maioria, a pesquisa realizada pelo autor ao longo de seu doutorado Martins (2013). Neste trabalho, o autor desenvolve um sistema de comunicação acústica subaquática completo, incluindo um modelo teórico de simulação e testes experimentais. O canal acústico subaquático considerou a atenuação do sinal acústico, múltiplos caminhos, atraso de propagação, ruído em diversos ambientes e os resultados teóricos foram comparados com os experimentais. Os transdutores foram desenvolvidos com estruturas de uma e quatro camadas, operando no modo de espessura e com materiais PZT e PVDF. Ambos os transdutores tiveram seus desempenhos testados e otimizados por meio de um estudo comparativo de impedância acústica, operando com frequências entre 100 *kHz* e 1 *MHz* ao utilizarem diferentes modulações digitais, como BASK, OOK, BPSK e BFSK com portadora de 1 *MHz*. O sistema foi validado por meio da implementação de uma comunicação ponto-a-ponto bidirecional de 1 *Mbps* utilizando uma modulação OOK com uma portadora de 1 *MHz*. Os resultados encontrados por este autor representam um avanço para este tipo de comunicação e é o primeiro sistema prático a atingir velocidades de até 1 *Mbps*. Este é o principal trabalho relacionado encontrado, pois apresenta uma abordagem similar à metodologia proposta nesta dissertação de mestrado.

Vislumbrando acrescentar uma contribuição importante aos trabalhos relacionados, nosso trabalho acrescenta uma nova perspectiva de simulação da comunicação acústica subaquática, disponibiliza nosso próprio sistema de simulação em uma base de dados online e disponível para a comunidade científica e confirma resultados apresentados de pesquisas anteriores.

Todos os trabalhos encontrados confirmam a importância de estudos relacionados à comunicação acústica subaquática e analisam de diferentes formas suas características e possibilidades. Diante de todos os trabalhos, percebemos que esta área é ainda pouco explorada e que apresenta várias dificuldades ainda não resolvidas. Portanto, esperamos contribuir com o sistema simulado proposto e conteúdo aqui apresentado.

## 2.5 Conclusão do Capítulo

Apresentamos neste capítulo a fundamentação teórica necessária para desenvolver o modelo do sistema de comunicação acústica subaquática proposto nesta dissertação de mestrado. Esta fundamentação teórica foi dividida em duas grandes áreas de estudo: a piezoelectricidade e comunicações subaquáticas.

Na primeira área de estudo, apresentamos as características do fenômeno da piezoelectricidade, suas propriedades e seus tipos de efeitos (direto e inverso). Além disso, explicamos o coeficiente piezoelétrico ( $\mathbf{d}$ ) e o coeficiente de acoplamento eletromecânico ( $\mathbf{k}$ ), suas funções e as equações fundamentais da piezoelectricidade. Apresentamos também os principais materiais piezoelétricos utilizados enfatizando a cerâmica piezoelétrica de PZT, material utilizado no presente trabalho. Por fim, esclarecemos como ocorre a polarização piezoelétrica e listamos algumas aplicações piezoelectricidade.

A comunicação subaquática é a segunda área de estudo abordada nesta fundamentação teórica. Nesta seção explicamos a diferença entre os tipos de transmissão subaquática, que são a eletromagnética, a óptica e a acústica. Apresentamos as vantagens e desvantagens na forma de transmissão acústica, utilizada em nossas simulações. Em seguida, apresentamos os principais conceitos da comunicação acústica subaquática e explicamos as características do canal acústico, como a velocidade de propagação do som na água, os múltiplos caminhos de propagação do som neste meio, as atenuações e perdas e a presença do ruído ambiental. Listamos algumas áreas para aplicações de comunicações subaquáticas.

Por último, apresentamos uma sucinta fundamentação sobre a modulação utilizada nas simulações para os dois cenários propostos.

Todos estes conceitos são de fundamental importância para a modelagem do transdutor piezoelétrico, que atuará no sistema de comunicação como projetor emitindo as ondas acústicas, e para a modelagem do canal de comunicação, que é o meio subaquático onde estas ondas se propagarão até serem recebidos pelo hidrofone.

Além da fundamentação teórica apresentada, realizamos uma busca sistemática na literatura seguindo os princípios de uma revisão sistemática de trabalhos semelhantes à metodologia proposta nesta pesquisa. Encontramos 15 artigos relacionados e disponibilizamos uma tabela contendo os autores, um resumo e os parâmetros analisados nesta busca.

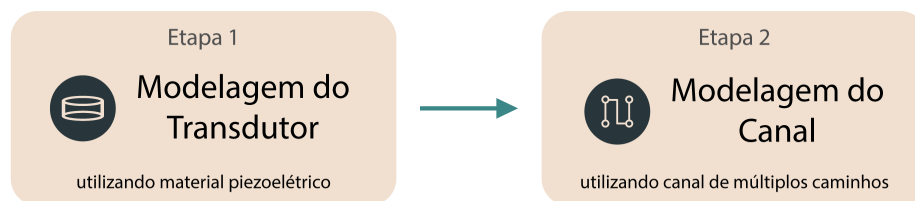
## METODOLOGIA

ESTE capítulo apresenta a metodologia utilizada para atingir o objetivo do trabalho, que busca modelar um sistema de comunicação acústica subaquática. Para realizar a simulação foram utilizados os softwares *COMSOL Multiphysics* e *Matlab/Simulink*, que juntos compuseram o modelo proposto.

### 3.1 Introdução

Neste trabalho, utilizamos a piezoelectricidade como elemento ativo dos transdutores eletroacústicos que estão localizados nas extremidades do sistema de comunicação acústica subaquática. Este sistema utiliza a água como meio de propagação das ondas acústicas que são geradas pelo projetor e detectadas pelo hidrofone.

A metodologia proposta neste trabalho foi dividida em duas etapas: (i) Etapa de Modelagem dos Transdutores e (ii) Etapa de Modelagem do Canal de Comunicação (Figura 12).



**Figura 12:** Etapas da metodologia. Fonte: autor.

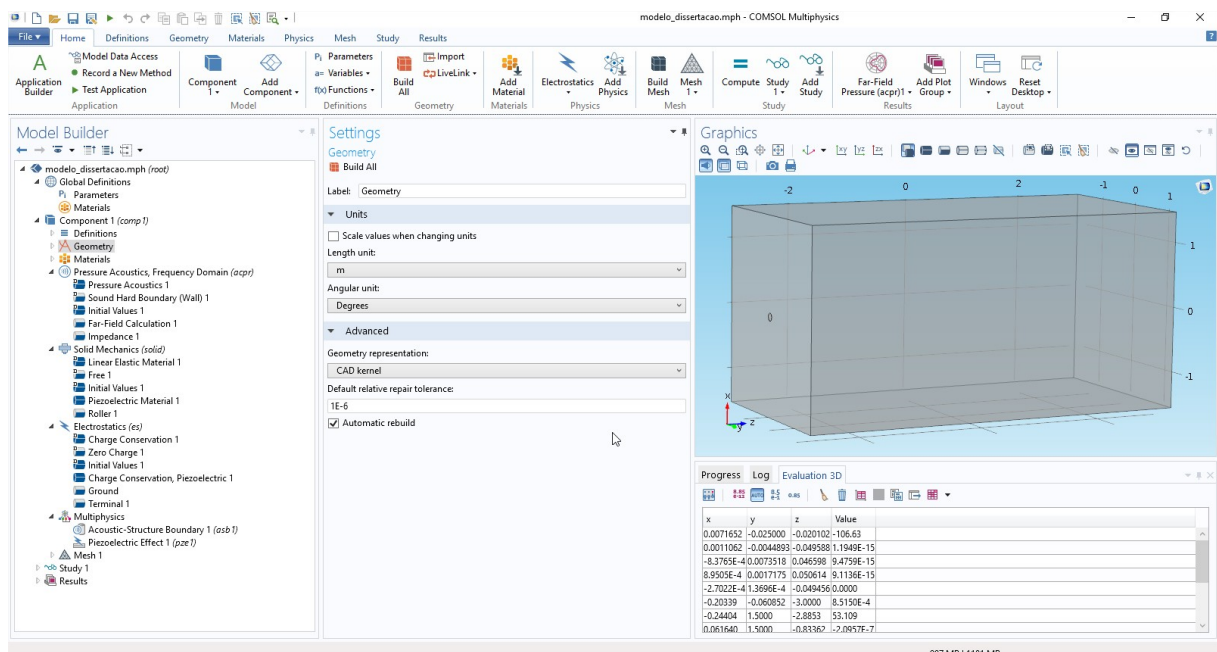
Na etapa de Modelagem dos Transdutores, foram projetados os transdutores eletroacústicos constituídos de material piezoelétrico PZT-5H e subdivididos em duas simulações complementares. A primeira simulação considera o transdutor e suas próprias características como geometria e material; a segunda simulação considera, além das próprias características do transdutor, o meio de propagação e seus parâmetros ambientais, como comprimento, largura e profundidade.

Na etapa de Modelagem do Canal de Comunicação, projetamos o canal de comunicação acústica subaquática que utilizou as características retiradas na etapa de Modelagem dos Transdutores. O canal foi projetado em blocos e subsistemas, dentre estes temos o bloco de múltiplos caminhos, o bloco de atenuação e o bloco de ruído ambiente presentes no canal de comunicação. As próximas subseções descrevem os detalhes de cada etapa desta dissertação de mestrado.

## 3.2 Modelagem do Transdutor

Nesta etapa de modelagem dos transdutores, a simulação foi realizada por meio do software *COMSOL Multiphysics*, que é um software de análise e resolução, para duas e três dimensões, de elementos finitos com várias aplicações em física e engenharia. O *COMSOL* é um software voltado para pesquisadores e técnicos simularem processos ou produtos utilizando simulações numéricas de fenômenos físicos do mundo real.

O software funciona por meio de módulos divididos por áreas físicas ou características do material, como mostra a Figura 13.



**Figura 13:** Ambiente do software *COMSOL Multiphysics* com seus módulos separados por grandezas físicas.

Foram utilizados quatro módulos nesta etapa de modelagem do transdutor: (i) o módulo de eletrostática, onde se definem as interfaces de terminal de tensão e de aterramento; (ii) o módulo de mecânica dos sólidos, onde se define o domínio que receberá o material piezoelétrico; (iii)

o módulo de multifísicas, que é responsável por unir todas as áreas de fenômenos físicos da simulação do modelo; e (iv) o módulo de acústica de pressão, principal módulo utilizado no trabalho para obter os resultados do transdutor no meio subaquático.

O objetivo dessa etapa é obter, por meio de duas simulações individuais e complementares, as características do transdutor eletroacústico vibrando livremente e vibrando dentro ambiente subaquático.

Do ponto de vista do transdutor, os resultados que esperamos obter são a frequência de ressonância, a variação de fase e a sua largura de banda de operação. Estes primeiros resultados são importantes, pois quando o transdutor opera na sua frequência de ressonância o seu desempenho é mais eficiente e o nível de pressão sonora é maximizado (BUTLER; SHERMAN, 2007).

Do ponto de vista do transdutor vibrando dentro do aquário, espera-se encontrar três gráficos: (i) o seu ângulo de diretividade, adquirido através do padrão de radiação do transdutor no meio subaquático; (ii) o nível de pressão sonora (*sound pressure level* - SPL), que é a potência ou intensidade produzida por uma fonte numa distância de referência; e (iii) a pressão acústica total dada em Pascal (Pa), que é a medição da amplitude sonora obtida através da diferença entre a pressão produzida por uma fonte e a pressão de referência no mesmo ponto (COATES, 1989).

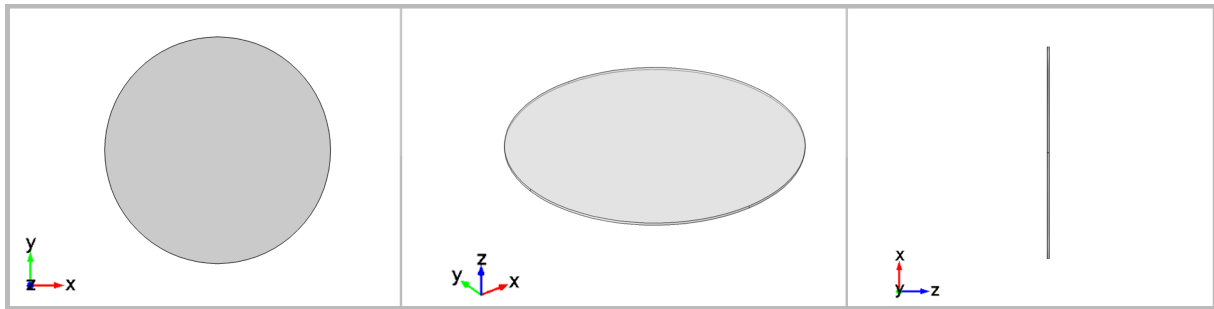
A seguir apresentamos mais detalhes das simulações para esta etapa de modelagem do transdutor eletroacústico piezoelétrico.

### 3.2.1 Transdutor Vibrando Livremente

Iniciamos simulação dos transdutores definindo no software *COMSOL* as configurações da geometria do disco (raio e altura), o tipo de material e suas propriedades e o sistema de coordenadas utilizado. Toda a teoria relacionada à materiais piezoelétricos e suas características foram apresentadas no Capítulo (2.1) de fundamentação teórica.

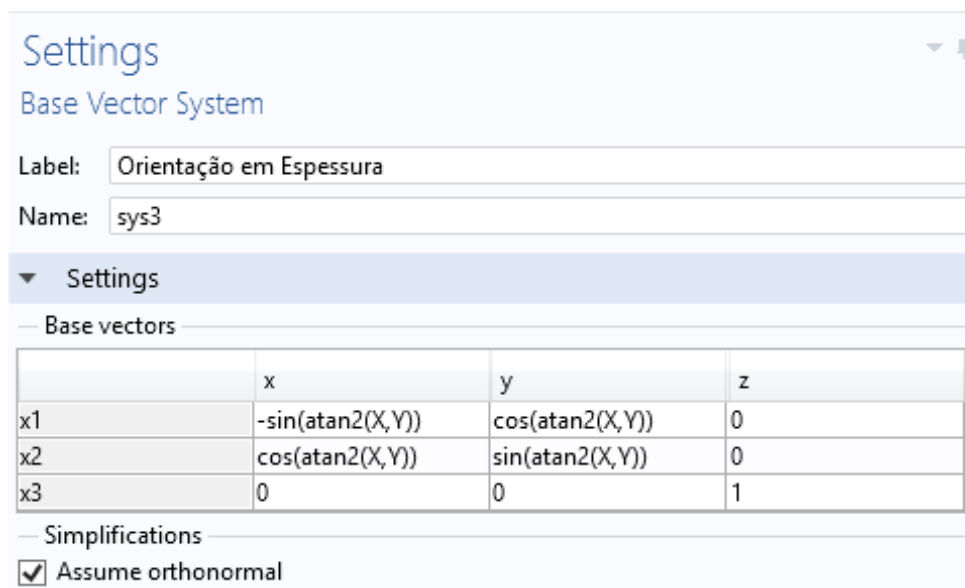
Definimos a geometria do transdutor a partir de duas condições: a primeira foi a simplicidade de projeto, com apenas uma camada do elemento ativo e; a segunda foi o baixo custo de fabricação. Logo a geometria adotada tem formato cilíndrico e possui dimensões de 1 mm de espessura e 60 mm de raio. A geometria dos transdutores utilizados no projetor e no hidrofone para este projeto é mostrada na Figura 14.

O disco piezoelétrico é polarizado na mesma direção do seu crescimento para que as



**Figura 14:** Três perspectivas do transdutor piezoelétrico em forma de disco.

vibrações ocorram no modo de espessura. Os modos de espessura e radial, são os modos de vibração mais intensos em um disco de cerâmica piezoelétrica (GUO; CAWLEY, 1991). Para modelar a polarização em espessura do disco piezoelétrico, precisamos definir o sistema de coordenadas cilíndrico por meio de uma transformação de coordenadas. No *COMSOL*, o modo de vibração em espessura é definido pela transformação de coordenadas do sistema de base de vetores apresentado na Figura 15.



**Figura 15:** Sistema de coordenadas da base de vetores do transdutor.

Esse modo de espessura é utilizado para transdutores emissores de altas frequências, enquanto que o modo de vibração radial é utilizado para transdutores emissores de baixas frequências (GUO; CAWLEY, 1991).

Quanto ao material utilizado, adotamos a cerâmica piezoelétrica de Titanato Zirconato de Chumbo (PZT) pois este material fornece uma alta impedância para o transdutor (BUTLER; SHERMAN, 2007). Na biblioteca do software *COMSOL* está disponível todos os materiais da família PZT. Utilizamos no projeto o material PZT-5H, pois ele possui a maior permissividade relativa da família PZT disponíveis no software e densidade de  $7,5 \text{ g/m}^3$ .

Colocamos na Tabela 5 todos os parâmetros utilizados na simulação da modelagem do transdutor para melhor visualização.

**Tabela 5:** Parâmetros para modelagem do transdutor.

| Transdutor            | Valor | Unidade              |
|-----------------------|-------|----------------------|
| Espessura             | 1     | [mm]                 |
| Raio                  | 60    | [mm]                 |
| Densidade do Material | 7,5   | [kg/m <sup>3</sup> ] |

Iniciamos a modelagem do transdutor com uma rápida simulação de identificação de suas frequências naturais. Este estudo de frequências naturais (em inglês *natural frequencies*) tem como objetivo identificar as frequências com que o sistema tende a oscilar na ausência de qualquer força ou energia (MULTIPHYSICS, 2013). Posteriormente, realizamos a simulação no domínio da frequência para obter as características do transdutor piezoelétrico.

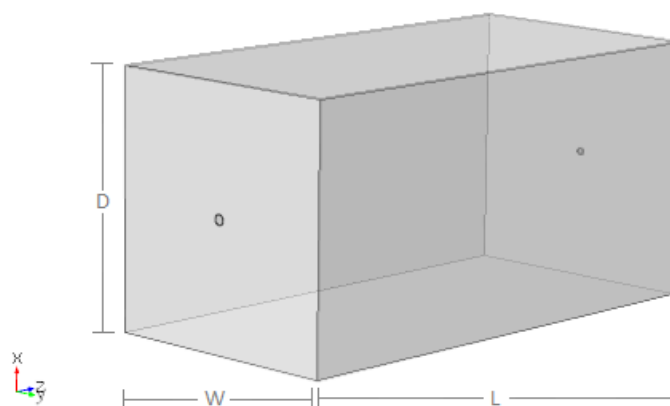
Esta simulação consiste de uma varredura no range de frequências de 1 *Hz* até 100 *kHz* almejando três resultados: (i) a deformação geométrica da peça, por meio do gráfico de *stress*; (ii) o gráfico da curva de impedância, que é composto pela frequência de ressonância e pela frequência de antirressonância; e (iii) o gráfico da variação de fase, onde pode ser visto a largura de banda do transdutor piezoelétrico. Comparamos estes resultados com os resultados da modelagem do transdutor no ambiente subaquático e serão melhor discutidos no Capítulo 4.

### 3.2.2 Transdutor Vibrando Dentro do Aquário

Na modelagem do transdutor vibrando dentro do ambiente subaquático utiliza-se um aquário para limitar o espaço entre os transdutores. O aquário simula uma parte do ambiente subaquático em que a propagação da onda acústica ocorre, logo esta simulação abrange espaços como lagos, rios ou oceanos.

A definição da geometria do aquário foi adotada para propagação de sinais acústicos em águas rasas, como em aplicações voltadas para a proteção do ambiente aquático como no monitoramento de poluição, de condições da água e, principalmente, em monitorar o efeito das atividades humanas nestes ecossistemas. O comprimento e largura do aquário são para distâncias curtas para efeito de simulação, mas podem ser alteradas no modelo proposto para representar outros cenários.

A geometria final para modelagem do transdutor no ambiente subaquático de simulação é apresentada na Figura 16. Ela é composta pelos dois transdutores piezoelétricos, projetor e hidrofone, e pelo ambiente subaquático de simulação.



**Figura 16:** Geometria final proposta na Etapa 1.

Adicionamos no software dois tipos de parâmetros que definem esta etapa. São os parâmetros da geometria do aquário como largura (W), profundidade (D) e comprimento (L), e os parâmetros ambientais do meio subaquático como temperatura (em °C), salinidade (em partes por mil - ppt) e acidez da água (pH).

Por meio destes parâmetros, obteremos como resultados, além dos mesmos resultados da simulação do transdutor vibrando livremente, o ângulo de diretividade do transdutor ( $\delta$ ), o nível de pressão sonora e a pressão acústica do sistema. Uma vez que todos os resultados encontrados aqui nesta seção serão necessários para a implementação do canal de comunicação acústico subaquático que será apresentado na subseção (3.3).

A escolha dos parâmetros ambientais do meio subaquático foi fundamentada na Equação 2.21 do coeficiente de absorção ( $\alpha(f)$ ) que integra a equação 2.20 da perda por absorção. Desta forma, a precisão nos resultados destas equações é garantida ao utilizarmos as condições oceanográficas como temperatura, salinidade, acidez e profundidade empregadas nos experimentos de Ainslie e McColm (1998).

Os parâmetros definidos para a geometria do aquário e os parâmetros ambientais do meio subaquático estão resumidos na Tabela 6.

**Tabela 6:** Parâmetros para modelagem do transdutor no ambiente subaquático de simulação.

| Aquário             | Valor | Unidade |
|---------------------|-------|---------|
| Largura (W)         | 3     | [m]     |
| Profundidade (D)    | 3     | [m]     |
| Comprimento (L)     | 6     | [m]     |
| Temperatura da água | 25    | °C      |
| Salinidade da água  | 35    | [ppt]   |
| Acidez da água      | 7,8   | [pH]    |

A simulação do modelo com o transdutor dentro do aquário ocorre similar ao transdutor livremente da seção anterior. Os transdutores recebem uma tensão elétrica que faz a peça vibrar em frequências e comprimentos de onda específicos capazes de gerar ondas acústicas. Essas ondas acústicas serão propagadas pelo meio subaquático ao longo de compressões e expansões até chegar no dispositivo receptor. Todos os resultados obtidos serão utilizados como parâmetros de entrada na modelagem do canal de comunicação subaquático que tem o seu desenvolvimento apresentado em detalhes na próxima Seção.

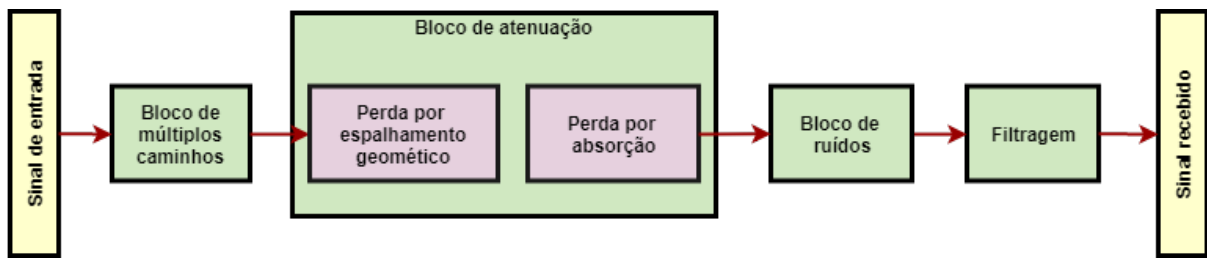
### 3.3 Modelagem do Canal de Comunicação Acústico

Nesta etapa de modelagem do canal de comunicação acústico subaquático, a simulação foi realizada através do software *Matlab/Simulink*. O *Matlab* é um software interativo de alta capacidade para cálculo numérico integrando análise numérica, cálculo com matrizes e processamento de sinais. O *Simulink* é uma ferramenta para modelagem, simulação e análise de sistemas dinâmicos. Portanto, para realizarmos esta simulação, as informações geradas na seção anterior serão inseridas como parâmetros de entrada do modelo de comunicação subaquático proposto nesta etapa.

O objetivo desta segunda etapa é projetar um canal de comunicação acústico subaquático capaz de reproduzir o ambiente subaquático. Levando-se em conta todas as informações da seção anterior somadas aos desafios do meio subaquático a propagação de sinais acústicos sofre influências de maneira positivas e negativas. Os principais fatores que podem dificultar esse tipo de propagação já foram apresentados na Seção 2.2 de fundamentação teórica.

Podemos citar algumas dificuldades do meio subaquático que são levadas em conta no desenvolvimento deste modelo como a baixa velocidade de propagação do som na água, o atraso de propagação, os múltiplos caminhos percorridos pelos sinais, as atenuações ocasionadas pelas perdas por espalhamento geométrico e por absorção e os principais tipos ruídos presente no meio, o ruído causado pela turbulência, o ruído de navegações, o ruído das ondas e o ruído térmico.

A organização do canal de comunicação subaquático implementado no software é mostrado de maneira simplificada na Figura 17.

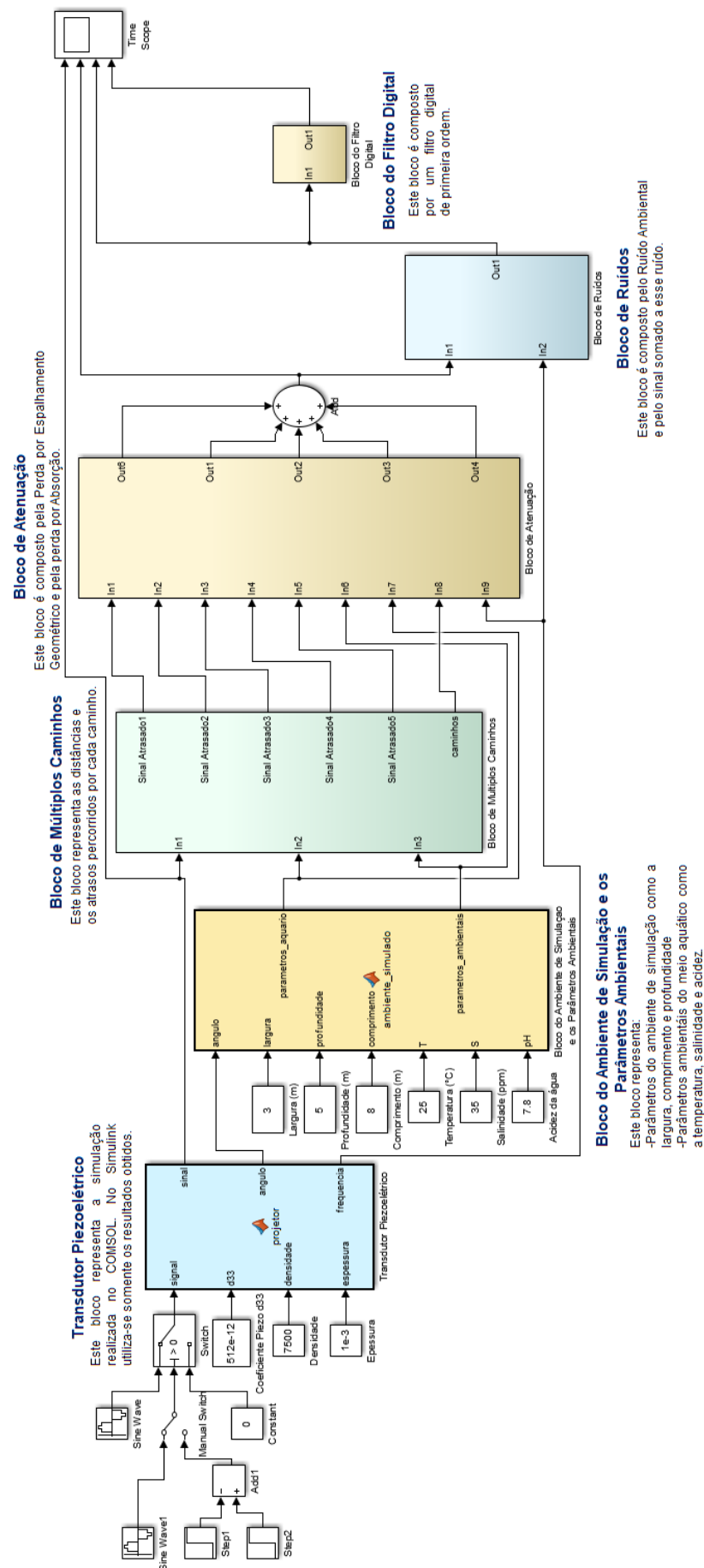


**Figura 17:** Diagrama de blocos do canal de comunicação acústico subaquático.

Apresentamos neste diagrama todos os blocos do canal de comunicação subaquático implementados no *Matlab/Simulink* por meio de equações e blocos que definem a etapa de modelagem canal de comunicação acústico subaquático e apresentamos os detalhes a seguir.

### 3.3.1 Organização do Cenário

Para a modelagem deste canal de comunicação, foi considerado um cenário configurado estaticamente, onde os transdutores estão centralizados nas paredes laterais e alinhados entre si, na geometria de paralelepípedo do aquário que simulará o ambiente subaquático como apresentado na Figura 16. Neste cenário os quatro caminhos de reflexão gerados pelo projetor são os mesmos, dado que a largura ( $W$ ) e a profundidade ( $D$ ) são iguais. O sistema do canal de comunicação acústico subaquático simulado no ambiente *Matlab/Simulink* é representado pela Figura 18.



**Figura 18:** Sistema que representa o canal de comunicação acústico subaquático Etapa 2.

No primeiro bloco da simulação do canal acústico subaquático, temos o transdutor piezoelétrico projetado na Seção 3.2. Ele fornece três informações importantes para a modelagem do canal de comunicação sendo elas o sinal acústico gerado, a sua frequência de operação (em kHz) e o ângulo de diretividade ( $\delta$ ) do transdutor. Este ângulo foi obtido através do gráfico de pressão de campo distante e representa o padrão de radiação do transdutor piezoelétrico que vai indicar no transdutor o ângulo que possui o maior ganho em decibéis (*dB*).

Em seguida, temos bloco do ambiente de simulação e os parâmetros ambientais. Nele são inseridos os parâmetros da geometria do aquário que caracterizam as dimensões físicas do ambiente subaquático de simulação como largura, profundidade e comprimento e os parâmetros ambientais que caracterizam o meio subaquático como temperatura, salinidade e acidez da água (pH), que estão organizados na Tabela 6.

Na sequência, dividimos a simulação do canal subaquático em três blocos que representam as etapas de acordo com as dificuldades que o meio proporciona. São eles o Bloco de Múltiplos Caminhos, o Bloco de Atenuação e o Bloco de Ruídos. A união desses blocos configura o cenário do modelo de simulação do canal de comunicação subaquático proposto nesta dissertação.

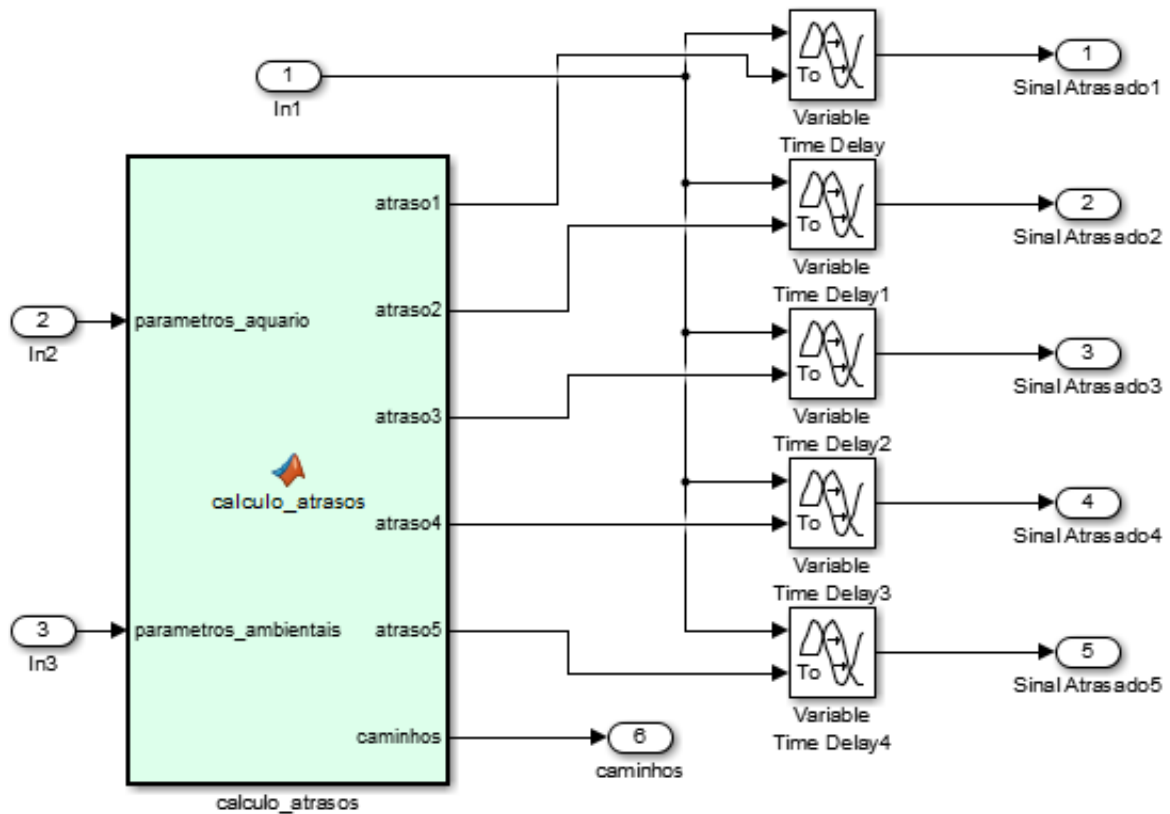
Note na Figura 18 que a influência do efeito Doppler não é mostrada na implementação do projeto, pois ele é irrelevante para o cenário proposto, em que o projetor e o hidrofone são localizados em posições fixas. Além do que o efeito Doppler não tem efeito relevante em comunicações subaquáticas para curtas distâncias (XAVIER, 2012).

O bloco que define o início da modelagem canal de comunicação acústico subaquático, onde se determinam das distâncias e os atrasos de propagação para cada sinal, será apresentado em detalhes a seguir.

### 3.3.2 Bloco de Múltiplos Caminhos

O primeiro bloco do canal de comunicação acústico subaquático se divide em dois subsistemas com o objetivo de: (i) calcular os caminhos/distâncias que cada sinal irá percorrer e (ii) calcular os atrasos de propagação de cada sinal. Após esses cálculos, o sinal do transdutor piezoelétrico e o atraso de cada sinal serão agregados para representar os múltiplos caminhos.

O bloco de múltiplos caminhos expandido sendo possível ver todos os parâmetros de entradas e como o sinal foi atrasado para percorrer cada caminho é mostrado na Figura 19.



**Figura 19:** Bloco de Múltiplos Caminhos expandido.

Para calcular os caminhos/distâncias que cada sinal irá percorrer foram necessárias as informações produzidas pelo transdutor piezoelétrico na Seção 3.3. O gráfico de padrão de radiação do transdutor é utilizado para indicar qual ângulo do transdutor tem o maior ganho.

Serão considerados cinco caminhos indicados pelo padrão de radiação e que formam os múltiplos caminhos. O caminho direto, que é por onde o transdutor irradiará as ondas acústicas com mais energia, dois caminhos que irão refletir as ondas acústicas na superfície e no fundo e mais dois caminhos que irão refletir nas laterais da frente e de trás do aquário.

As distâncias percorridas por cada caminho entre o emissor e o receptor foram encontradas após a definição da profundidade média para cada caminho, considerando que os transdutores estão localizados na metade do aquário e alinhados entre si. A profundidade média foi utilizada também para encontrar a velocidade de propagação do som na água específica de cada caminho através da Equação 2.18. Em seguida, encontramos o atraso (em segundos) específico de cada sinal para cada um dos caminhos definidos.

Na saída do Bloco de Múltiplos Caminhos, os sinais atrasados e os caminhos por onde eles irão percorrer já estão definidos. Estes serão os parâmetros de entrada do bloco seguinte que

será apresentado a seguir.

### 3.3.3 Bloco de Atenuação

O Bloco de Atenuação do canal de comunicação acústico subaquático aqui proposto é composto por duas grandes perdas, a perda por espalhamento geométrico e a perda por absorção. A soma destas perdas representa a perda de transmissão do canal de comunicação. Cada uma destas perdas representa neste bloco um subsistema. São eles o subsistema da perda por espalhamento geométrico, o subsistema da perda por absorção e o subsistema da perda de transmissão.

No primeiro subsistema, a perda por espalhamento geométrico é calculada a partir da Equação 2.22. Nesta equação o fator de espalhamento  $k$  utilizado na simulação é o fator para espalhamento cilíndrico ( $k = 1$ ), pois o cenário que estamos propondo é para propagação em águas rasas que possui seus extremos limitados pela superfície e leito do aquário.

Na entrada deste subsistema temos o sinal atrasado e o caminho que eles irão percorrer e na saída teremos estes sinais atrasados, agora também, espalhados percorrendo seus caminhos ao longo da propagação. Dessa forma, cada sinal sofrerá um espalhamento geométrico em que um valor de atenuação em decibéis ( $dB$ ) é calculado para cada caminho percorrido.

No segundo subsistema, a perda por absorção é calculada a partir da Equação 2.21 que define o coeficiente de absorção em função da frequência ( $\alpha(f)$ ). Para o modelo proposto, este coeficiente sofre influência de dois componentes químicos presentes na água do mar, o componente do ácido bórico que afeta frequências baixas de até alguns  $kHz$  definido pela Equação 2.21 e o componente do sulfato de magnésio que afeta frequências intermediárias de até  $100 kHz$  definido pela Equação 2.21. O coeficiente de absorção em função da frequência ( $\alpha(f)$ ) também de sofrer influência dos parâmetros do meio subaquáticos como temperatura, salinidade, acidez e profundidade que foram previamente definidos.

Após ser calculado o coeficiente de absorção em função da frequência ( $\alpha(f)$ ) será realizado o cálculo da perda por absorção. Este cálculo é realizado pela Equação 2.21 e assim será calculado (em  $dB$ ) o valor para cada sinal que se propagará pelos múltiplos caminhos.

O bloco de atenuação expandido onde é possível ver como estão distribuídos todos os subsistemas bem como suas entradas e saídas é representado na Figura 20.

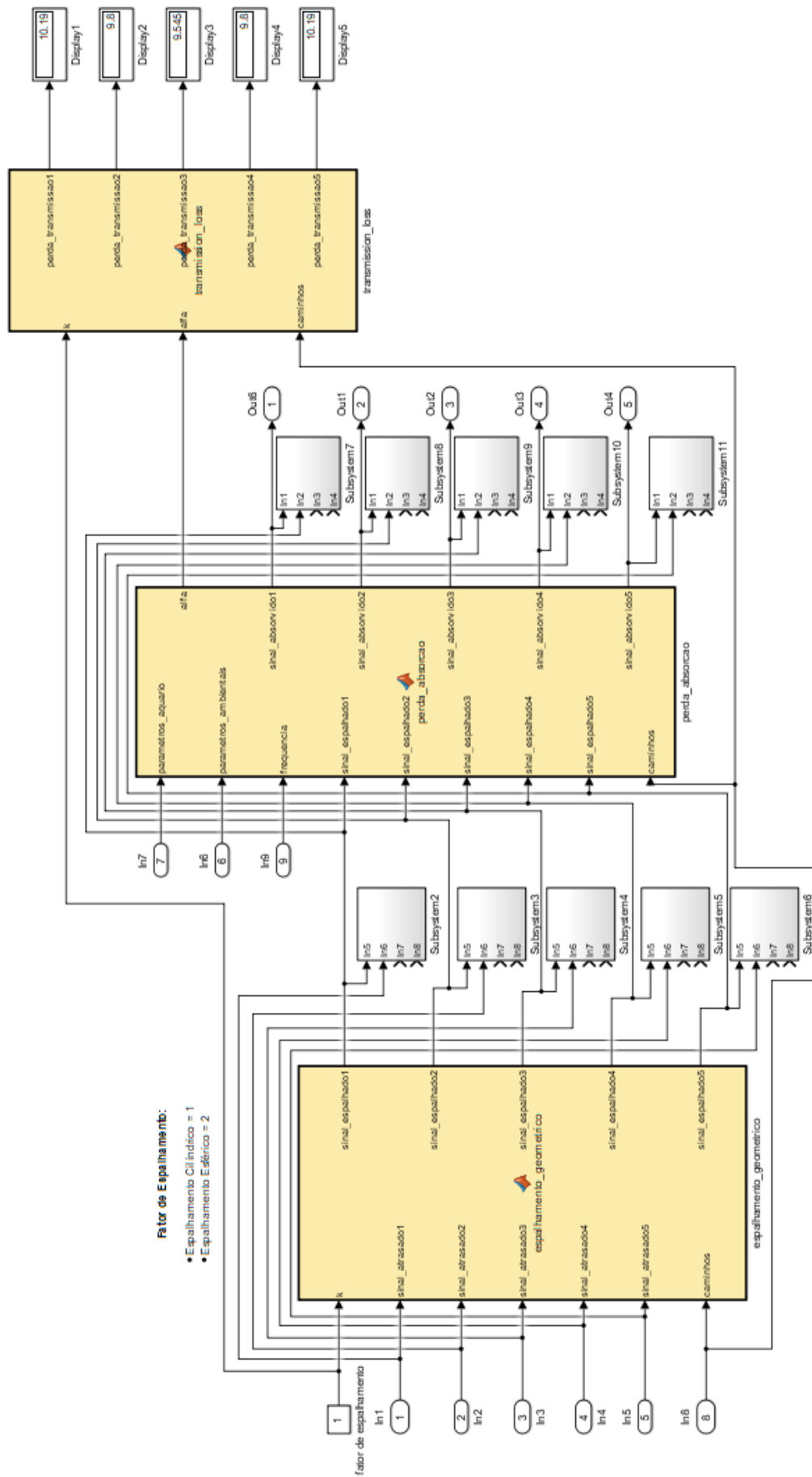


Figura 20: Bloco de Atenuação expandido.

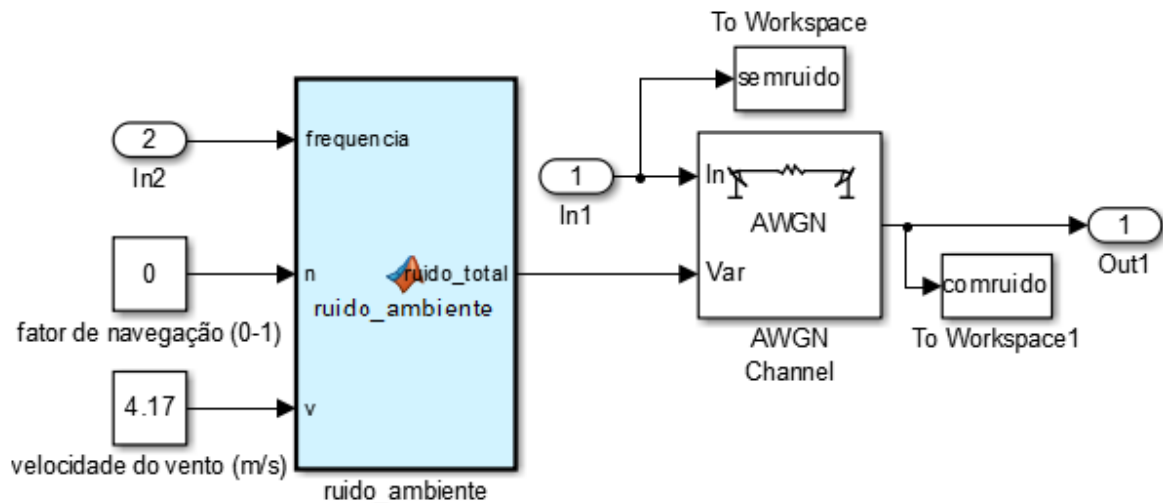
A partir das atenuações calculadas nos subsistemas de perdas por espalhamento geométrico e perda por absorção podemos encontrar a perda de transmissão do canal de comunicação. Essa perda é calculada dentro do terceiro subsistema por meio da Equação 2.23 que representa a perda sofrida por cada sinal dos múltiplos caminhos emitido em função da frequência ( $f$ ) e da distância ( $r$ ).

Na saída deste sistema, representado pelo Bloco de Atenuação, serão somados todos os caminhos para servirem como parâmetros de entrada do terceiro bloco proposto nesta dissertação que será apresentado a seguir.

### 3.3.4 Bloco de Ruídos

O Bloco de Ruídos do canal de comunicação acústico subaquático aqui proposto é composto pelo ruído ambiental que será simulado no aquário por meio de quatro tipos diferentes de ruídos. São eles o ruído de turbulência, o ruído de embarcações, o ruído das ondas e o ruído térmico. Todos esses ruídos são calculados através das Equações 2.24, 2.25, 2.26 e 2.27 em decibéis ( $dB$ ).

O bloco do ruído ambiente expandido, onde podem ser vistos os parâmetros de entrada e o ruído total gerado pelo bloco é representado pela Figura 21.



**Figura 21:** Bloco do Ruído Ambiental expandido.

Para realizar os cálculos destas equações, precisa-se definir dois fatores externos que influenciarão principalmente no ruído de navegações e no ruído das ondas. O primeiro deles é o fator de navegação que não está presente nesta simulação, pois este tipo de ruído não afeta a frequência do transdutor projetado.

Entretanto, o ruído das ondas é fortemente influenciado pelo fator vento ( $m/s$ ), que afeta frequências entre 100 e 100  $kHz$ , o que inclui a frequência do transdutor utilizado no projeto.

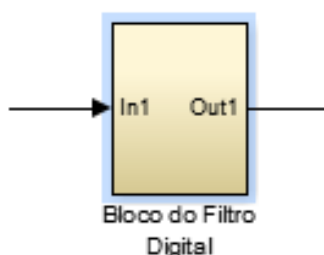
Na cidade de Fortaleza, estado do Ceará, a temporada dos ventos fortes tem seu auge nos meses de agosto e setembro chegando a ventos em média de 14  $km/h$  e 16,3  $Km/h$ , respectivamente. Isso sem considerar as rajadas de vento que podem atingir até 60  $km/h$  na faixa litorânea, segundo dados da Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos - FUNCEME (FUNCEME, 2017).

Fundamentado nisto, adotamos na simulação o valor de 4,17 ( $m/s$ ) para o fator vento. Ainda como parâmetros de entrada do Bloco de Ruídos temos o sinal gerado na saída do Bloco de Atenuação. O ruído total deste subsistema definido pelo somatório de todos os ruídos ambientais resultando em um valor em decibéis (dB).

Após cálculo do ruído ambiental, realizaremos um estudo da relação sinal ruído (*Signal-to-Noise-Ratio* - *SNR*) onde será extraído da Figura 21 os valores para o calculado a razão entre a potência do sinal acústico gerado pelo transdutor e a potência desse sinal somado ao ruído em decibéis. O cálculo será feito por meio do código *analise\_snr.m* que está disponível em *GitHub*<sup>1</sup>.

### 3.3.5 Filtragem do Sinal

O sinal gerado na saída do bloco de ruídos passa por uma filtragem que tem o objetivo de reconstituir o sinal ruidoso em seu formato original, ou o mais próximo disto. O bloco de filtragem do sinal utilizado no projeto é mostrado pela Figura 22.



**Figura 22:** Bloco da filtragem do sinal.

Este bloco é composto por um filtro digital e está representado no software por uma função de transferência de primeira ordem no tempo discreto.

<sup>1</sup> <<https://github.com/andrefonteso/CAS>>

## 3.4 Conclusão do Capítulo

A metodologia utilizada na modelagem do sistema de comunicação acústico subaquático para propagação de sinais em águas rasas foi apresentado neste capítulo. Ela foi dividida em duas etapas, uma de modelagem do transdutor piezoelétrico utilizando o *COMSOL Multiphysics* e a outra etapa de modelagem do canal de comunicação utilizando o *Matlab/Simulink*.

Na Etapa 1, foi modelado o transdutor piezoelétrico onde foi possível identificar suas características quando ele vibrava livremente e quando ele vibrava dentro do ambiente subaquático de simulação, o qual chamamos de aquário. As frequências de ressonância e antirressonância, a variação de fase e o diagrama de radiação do transdutor são as características constatadas e que foram fundamentais para a etapa seguinte onde foram utilizadas como parâmetros de entrada do canal de comunicação subaquático.

Na Etapa 2, foi modelado o canal de comunicação acústico subaquático divididos em três blocos que representam os principais desafios de comunicação no meio. São eles: (i) o bloco de Múltiplos Caminhos que teve como objetivo descobrir as distâncias e a profundidade media para cada caminho, calcular a velocidade do som na água e, conseqüentemente, encontrar os atrasos de propagação das ondas produzidas pelo transdutor piezoelétrico; (ii) o bloco de Atenuação que teve como objetivo encontrar a perda por espalhamento geométrico e a perda por absorção, ocasionando a perda de transmissão total eminente do meio subaquático; e (iii) o bloco de Ruídos que teve como objetivo de aplicar o ruído ambiental do meio sendo caracterizados como ruído de turbulência, de embarcações, das ondas e o térmico, onde cada um interfere uma faixa de frequências específica. Todos os sinais que se propagaram pelo canal acústico subaquático por meio dos múltiplos caminhos foram atrasados, espalhados, atenuados e receberam um ruído, representando o ruído ambiental do meio. Assim, na recepção do canal acústico subaquático foi implementado um filtro digital de primeira ordem, para reconstituir o sinal ruidoso de forma que seja possível identificar a informação transmitida pelo transdutor piezoelétrico.

---

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

---

NESTE capítulo apresentamos e discutimos os resultados obtidos na modelagem do transdutor piezoelétrico e os resultados obtidos na modelagem do canal de comunicação acústico subaquático. Todos os resultados adquiridos e apresentados foram obtidos a partir de simulações nos softwares *COMSOL Multiphysics* e *Matlab/Simulink*.

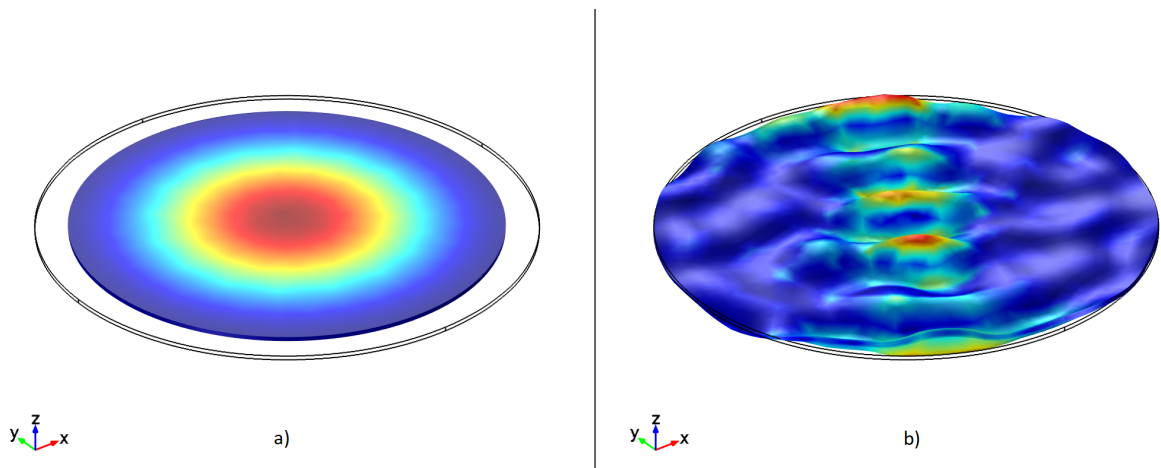
### 4.1 Introdução

Iniciamos este capítulo com os resultados das simulações da modelagem do transdutor. Nesta modelagem as simulações foram realizadas no *COMSOL Multiphysics* e foram divididas em duas etapas. A primeira simulação tem o objetivo de identificar as características do transdutor livremente, ou seja, fora do meio aquático. A segunda simulação tem como objetivo identificar as características do transdutor dentro de um aquário e de identificar a pressão acústica, o nível de pressão sonora e o diagrama de radiação do transdutor.

A segunda parte do capítulo apresenta os resultados obtidos da modelagem do canal de comunicação subaquático. Nesta modelagem as simulações foram realizadas no *Matlab/Simulink*. Os resultados obtidos na modelagem do transdutor foram utilizados na implementação do canal de comunicação para assim obter os resultados complementares e que consideram características próprias do transdutor utilizado. A seguir apresentamos os resultados das simulações realizadas.

### 4.2 Resultados da Modelagem do Transdutor

Encontramos os primeiros resultados da simulação que envolvem a modelagem do transdutor. As Figuras 23 *a)* e 23 *b)* mostram a deformação mecânica (*stress*) no transdutor piezoelétrico como resultado do estudo de suas frequências naturais (*natural frequencies*). Este estudo é responsável por identificar as frequências naturais do transdutor que oscilam na ausência de qualquer força ou campo elétrico aplicado.



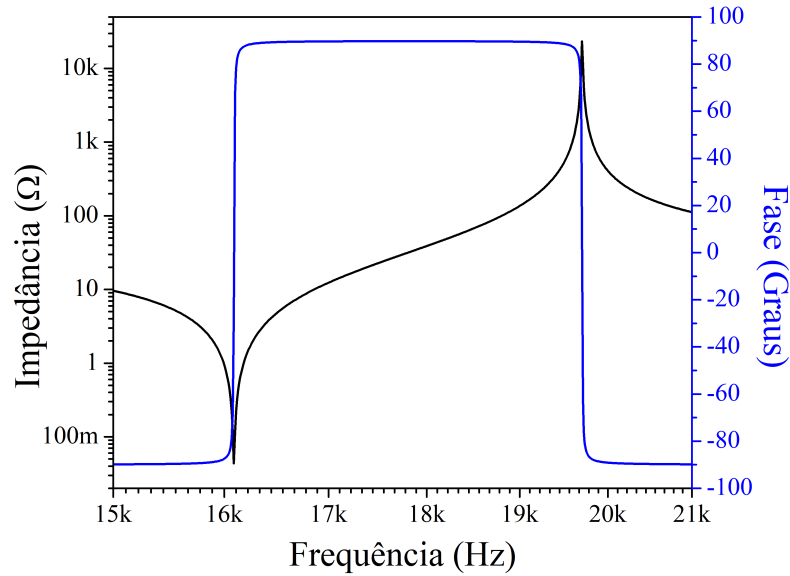
**Figura 23:** Deformação mecânica do transdutor em suas frequências naturais para as frequências de: a)  $16090 + 4,0667i \text{ Hz}$  e; b)  $19660 + 5,0944i \text{ Hz}$ .

As frequências naturais complexas do transdutor piezoelétrico foram  $16090 + 4,0667i \text{ Hz}$  e  $19660 + 5,0944i \text{ Hz}$ . A parte imaginária obtida pelos testes de simulação possui um valor desprezível comparada com a parte real das frequências naturais. Com base nisto, utilizaremos somente a parte real da frequência, sendo possível extrair as frequências naturais reais  $16.090 \text{ Hz}$  e  $19.660 \text{ Hz}$ .

Estas frequências encontradas limitaram a faixa de frequências na qual serão realizadas as simulações da modelagem do transdutor piezoelétrico. Estas simulações tiveram o objetivo de identificar suas frequências de ressonância e antirressonância. Posteriormente estas frequências foram utilizadas na simulação da modelagem do canal de comunicação subaquático.

#### 4.2.1 Transdutor Vibrando Livremente

Como resultado da simulação do transdutor vibrando livremente, realizada no domínio da frequência, surgiram diversas curvas de impedância em toda a faixa de frequência simulada, que vai desde  $1 \text{ Hz}$  até  $100 \text{ kHz}$ . Estas curvas de impedância se revelaram em vários modos de frequências diferentes. Seleccionamos a curva do primeiro modo, que é considerado o modo dominante dentre todos que surgiram. A Figura 24 é o resultado da simulação para a curva de impedância no modo dominante na faixa de frequências de  $15 \text{ kHz}$  até  $21 \text{ kHz}$ .



**Figura 24:** Curva de impedância e variação de fase do transdutor vibrando livremente.

O modo dominante é chamado assim pois é o primeiro modo onde a curva de impedância, formada pela frequência de ressonância e antirressonância, ocorre de maneira mais intensa, destacando-se bastante dos demais modos. Da mesma forma, a variação de fase se apresenta de forma bem definida, ou seja, alternando de  $-90$  a  $90$  graus.

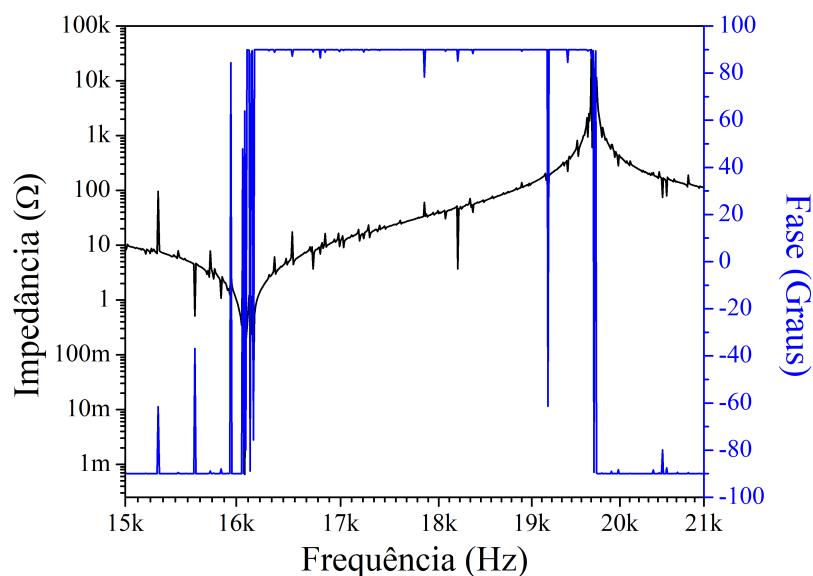
A partir da definição desta curva de impedância são determinados os valores das frequências de ressonância e antirressonância do transdutor piezoelétrico. A frequência de ressonância é de  $16.080\text{ Hz}$  e a frequência de antirressonância é de  $19.670\text{ Hz}$ , exatamente os mesmos valores encontrados na simulação anterior de frequências naturais do transdutor mostrados na Figura 23. O que nos proporciona uma largura de banda de operação de aproximadamente  $3,6\text{ kHz}$  para operação do transdutor piezoelétrico.

#### 4.2.2 Transdutor Vibrando Dentro do Aquário

Os resultados para simulação do transdutor vibrando dentro do ambiente subaquático, o aquário, foram obtidos a partir da implementação da física de pressão acústica (*pressure acoustics*) no *COMSOL* e das definições dos parâmetros do meio subaquático expostos na Tabela 6. A faixa de frequências na qual a simulação foi realizada é a mesma da simulação do transdutor vibrando livremente, variando de  $15\text{ kHz}$  até  $21\text{ kHz}$ .

Os resultados da simulação para a curva de impedância do transdutor vibrando dentro do aquário são apresentados na Figura 25. Podemos observar no eixo da frequência que, tanto

a curva de impedância como a curva de variação de fase possuem os mesmos valores da simulação anterior para a frequência de ressonância e a frequência de antirressonância, 16.080 Hz e 19.670 Hz respectivamente. Quanto ao eixo de impedância, é perceptível que ao aumentar as amplitudes destas frequências, a fase continua bem definida, assim como ocorre na simulação do transdutor vibrando livremente.



**Figura 25:** Curva de impedância e variação de fase do transdutor vibrando dentro do aquário.

A partir dos resultados desta simulação, é possível observar que existem variações desprezíveis na curva de fase e ao longo da curva de impedância do modo principal. Isto ocorre devido às frequências de ressonâncias espúrias, que são definidas como um comportamento divergente de amplitude das frequências diferentes da frequência fundamental (EIRAS, 2004). Este fato pode ser investigado em outros modelos de simulações numéricas mais apurados para encontrar o que ocasionou essas pequenas variações.

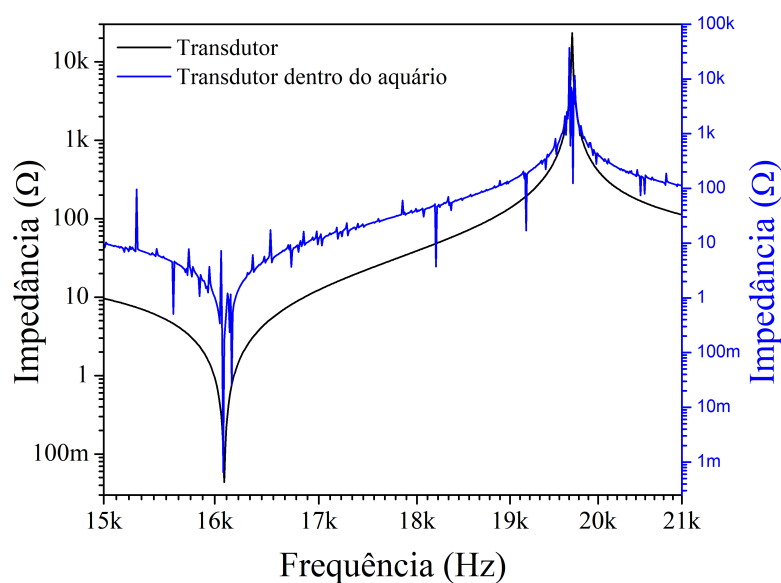
Existem modelos de simulações numéricas, como o apresentado em Xavier (2005), que minimizam os efeitos espúrios provocados por reflexões nos limites da malha numérica. Estes modelos utilizam condições de contorno não reflexíveis, porém necessitam de um aumento do número de pontos da malha resultando em um custo computacional maior. Estas soluções estão fora do escopo desta dissertação.

Em altas frequências muitos efeitos espúrios se fazem presentes em circuitos reais, podendo ser manipuláveis ao longo do eixo de frequências ou minimizadas por meio de componentes de circuitos. De fato, independente dos cuidados adotados, ressonâncias espúrias são inevitáveis (FRAGNITO, 2000).

### 4.2.3 Comparação dos Transdutores

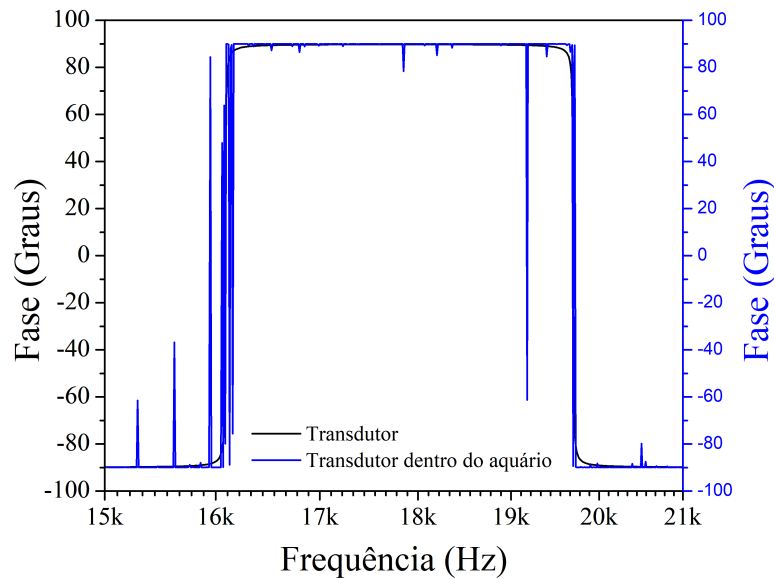
Nesta subseção comparamos os resultados encontrados nas simulações do transdutor vibrando livremente e do transdutor vibrando dentro do aquário, o meio subaquático. As Figuras 26 e 27 apresentam a curva de impedância e curva da variação de fase da comparação dos transdutor vibrando livremente e dentro do aquário, respectivamente.

Na curva de impedância dos dois transdutores mostrado na Figura 26, percebemos que, por meio do eixo horizontal, a frequência de ressonância e a frequência de antirressonância são as mesmas para ambos os transdutores. Existe uma diferença apenas no eixo vertical da impedância, onde o transdutor vibrando dentro do aquário possui uma amplitude maior na frequência de ressonância e uma amplitude menor na frequência de antirressonância que o transdutor vibrando livremente.



**Figura 26:** Curva de impedância da comparação dos transdutor vibrando livremente e dentro do aquário.

Na curva de variação de fase de ambas simulações (Figura 27), percebemos que a frequência de ressonância e a frequência de antirressonância também são as mesmas e ambos os transdutores estão com a mesma variação de fase, ou seja, elas estão completamente sobrepostas.

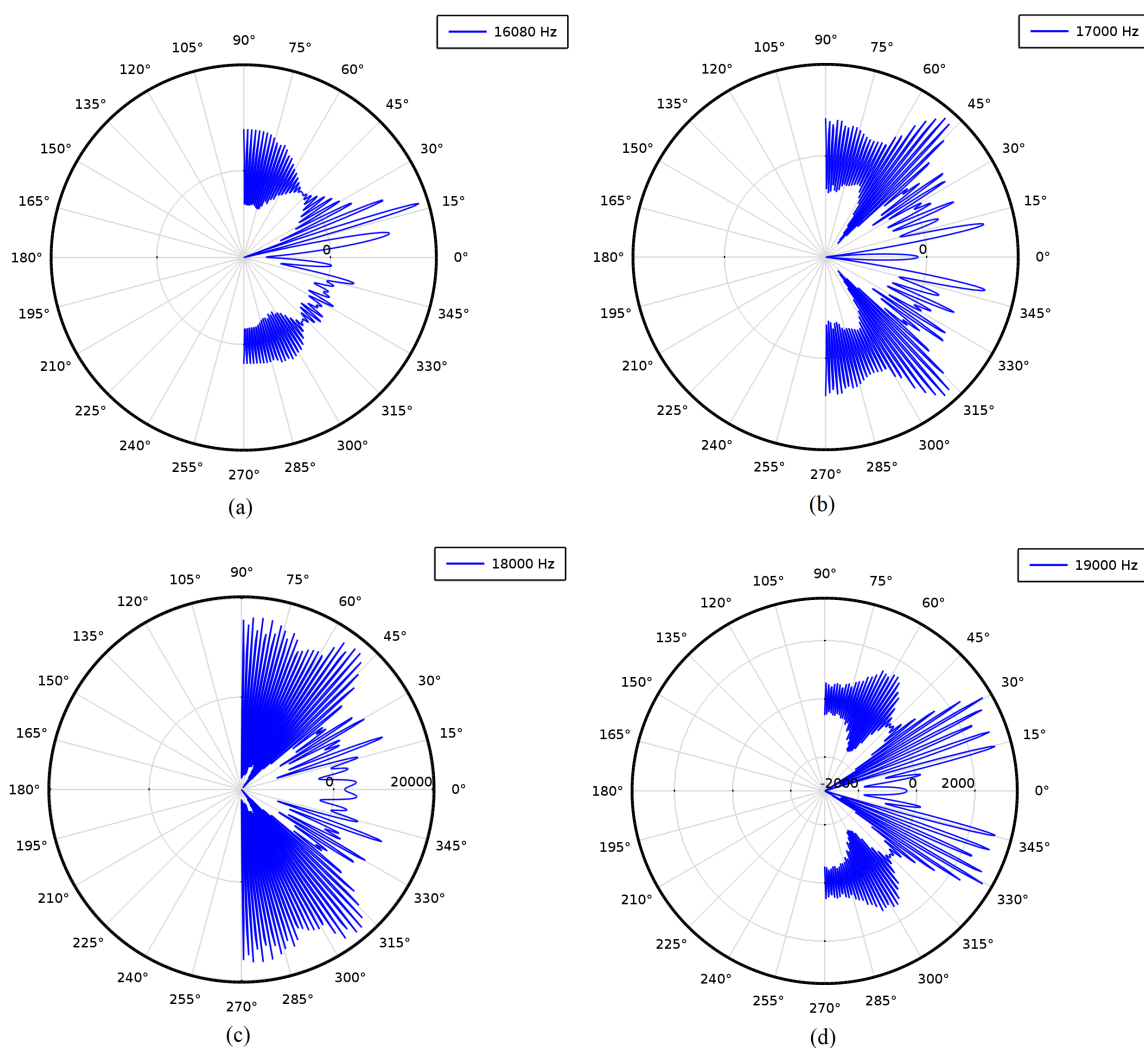


**Figura 27:** Curva da variação de fase da comparação dos transdutor vibrando livremente e dentro do aquário.

#### 4.2.4 Diagrama de Radiação do Transdutor

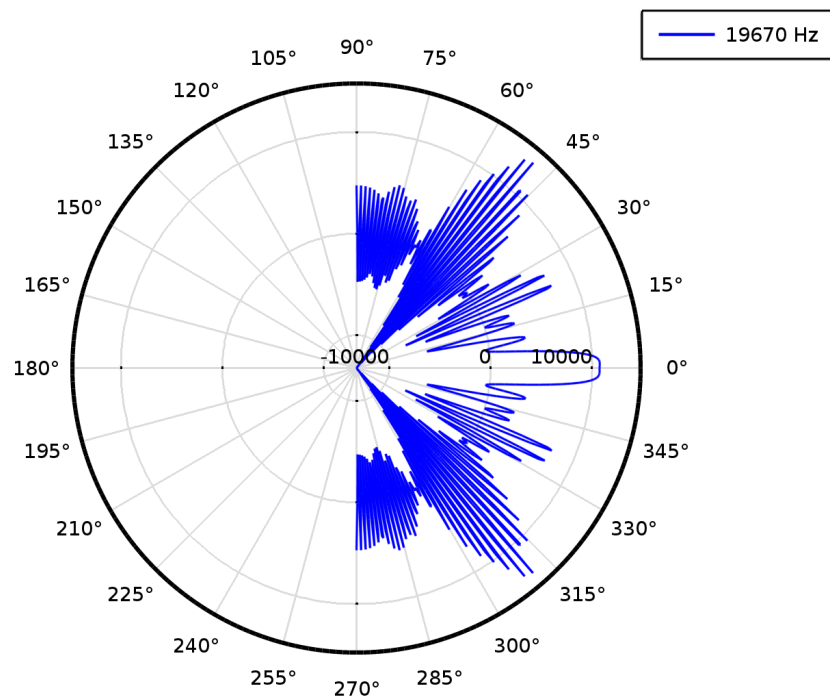
Outra característica encontrada nas simulações da modelagem do transdutor piezoelétrico foi o diagrama de radiação do transdutor. Este diagrama é importante pois indica em qual o ângulo o transdutor propaga suas ondas acústicas com o maior ganho em decibéis (dB), ou seja, são as ondas acústicas que possuem um maior alcance pois contêm mais energia.

Para fins de visualização de todo o espectro de frequência estudado, simulamos o gráfico de pressão para diversas outras frequências. O resultado apresentado na Figura 28 foi extraído do software *COMSOL* por meio do gráfico de pressão de campo distante. Estes gráficos mostram os diagramas de radiação para as frequências de a) 16.080, b) 17.000, c) 18.000 e d) 19.000 *Hz*, frequência em que o transdutor opera na sua frequência de ressonância. Em nenhuma destas frequências o transdutor apresenta diagrama de radiação com um padrão de ganho diretivo. Dessa forma, utilizando estas frequências, as ondas acústicas geradas pelo ângulo de radiação do transdutor geram diversas reflexões ao se propagarem pelo meio. Ou seja, estes diagramas de radiação não são ideais para produzir ondas acústicas com um ganho direcional orientado para o ângulo de 0 graus.



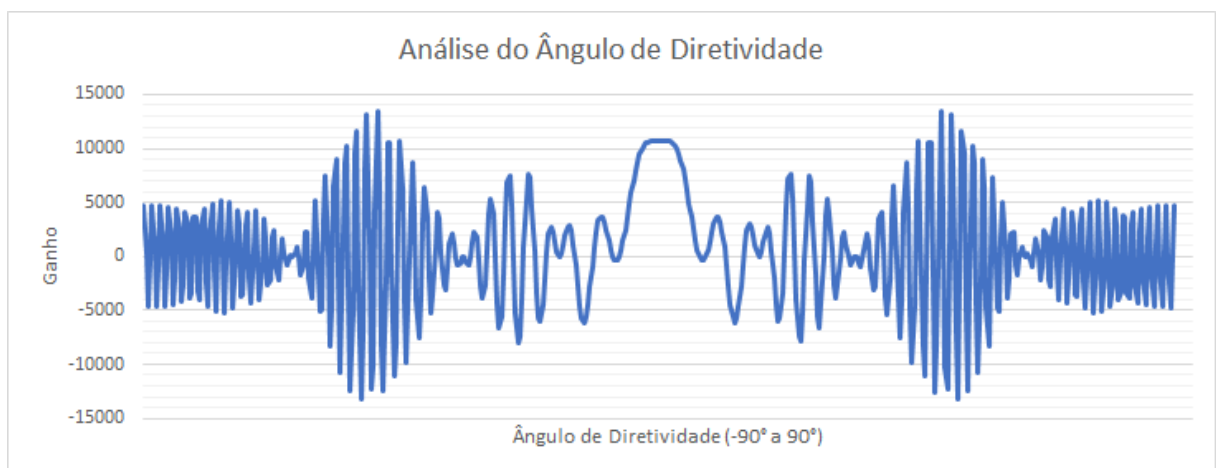
**Figura 28:** Gráficos do diagrama de radiação do transdutor vibrando dentro do aquário nas frequência de (a) 16.080 Hz, (b) 17.000 Hz, (c) 18.000 Hz e (d) 19.000 Hz.

Na Figura 29 o transdutor vibra dentro da sua frequência de ressonância 19.670  $Hz$  e possui um ganho diretivo no ângulo de 0 graus. Desta forma a propagação de campo distante das ondas acústicas com maior ganho será no caminho direto. Existem outros ângulos com ganhos razoáveis, por exemplo, ângulos entre 45 e 60 graus. Estes ângulos irão propagar sinais que serão refletidos na superfície e no fundo do aquário, que simula o meio subaquático. A propagação destes sinais refletidos e o sinal do caminho direto chegarão no receptor em tempos diferentes, ocasionando atraso de propagação dos sinais.



**Figura 29:** Gráfico do padrão de radiação do transdutor vibrando dentro do aquário na frequência de 19.670 Hz.

Após a definição do diagrama de radiação do transdutor, realizamos um estudo particular de análise do ângulo de diretividade extraído do diagrama de radiação do transdutor piezoelétrico utilizado no modelo proposto. Mostramos esse diagrama em um plano bidimensional na Figura 30.



**Figura 30:** Análise do ângulo de diretividade do transdutor piezoelétrico.

Neste estudo utilizamos um limiar inferior de 70% do ganho. Os valores acima desse limite são considerados os ângulos com ganho de diretividade aceitável por este estudo para o transdutor piezoelétrico. Valores abaixo deste limiar foram descartados.

A partir desta definição, algumas considerações para os parâmetros do aquário foram analisadas. Por exemplo, no plano tridimensional a largura (W) e a profundidade (D) possuem as mesmas dimensões e apenas o comprimento (L) possui tamanho diferente. Este comprimento (L) e o alinhamento dos transdutores entre si faz com que os sinais acústicos gerados no emissor possam serem refletidos nas laterais, fundo e superfície do aquário uma vez até chegar ao receptor.

A partir do gráfico do diagrama de radiação do transdutor piezoelétrico é possível implementar as características do canal de comunicação acústico subaquático através do bloco de múltiplos caminhos, que é considerado uma das grandes dificuldades de propagação do som em águas rasas. A seguir serão apresentados os resultados da modelagem do canal de comunicação subaquático.

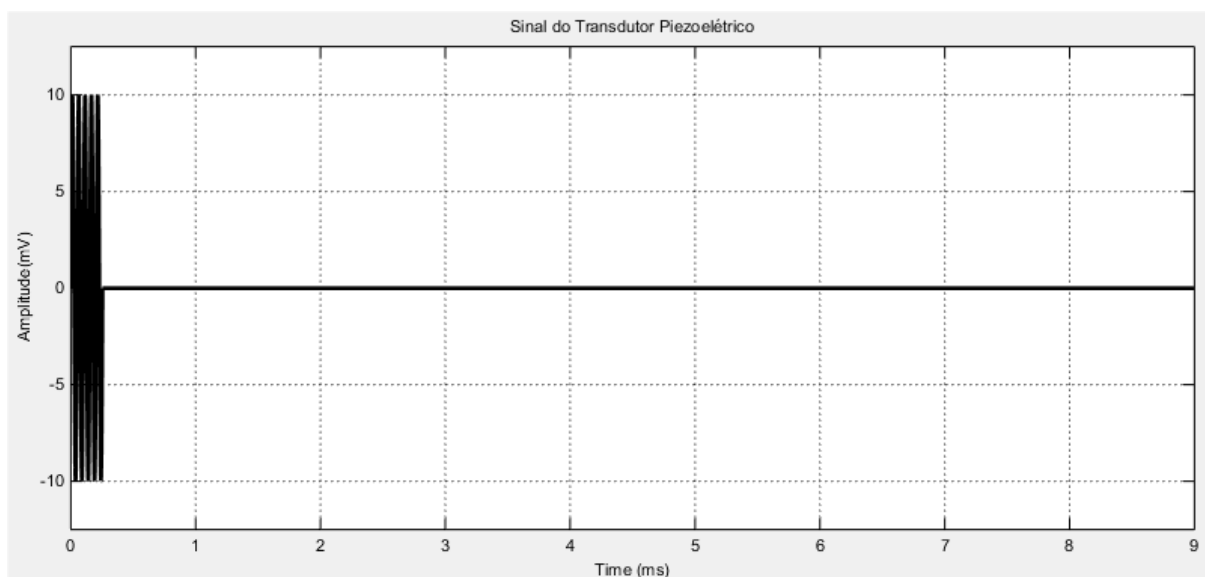
### 4.3 Resultados da Modelagem do Canal de Comunicação

Nesta seção apresentamos os resultados obtidos por meio das simulações da modelagem do canal de comunicação para o sistema de comunicação acústica subaquática proposto nesta dissertação. Disponibilizamos à comunidade acadêmica o código do modelo na plataforma *GitHub*<sup>1</sup> para que seja melhorado, utilizado ou sirva como base para trabalhos futuros.

O modelo do canal de comunicação é composto por quatro entradas. A primeira entrada é o sinal acústico gerado pelo transdutor piezoelétrico na Etapa 1 descrito no Capítulo 3. Este sinal, que pode ser visto na Figura 31, é representado no *Simulink* por um pulso senoidal de 5 ciclos e com a frequência de 19.670 *Hz* projetado pelo transdutor piezoelétrico.

---

<sup>1</sup>Código do modelo do canal de comunicação desenvolvido - *Matlab* <<https://github.com/andrefonteso/CAS>>



**Figura 31:** Sinal gerado pelo transdutor com frequência de 19.670 Hz.

A segunda entrada do sistema são as características do transdutor: diâmetro, espessura e ângulo de radiação. A terceira entrada são as características do meio subaquático como temperatura, salinidade e acidez da água e a velocidade do vento. A quarta entrada são as configurações do aquário como largura, profundidade e comprimento. Estas entradas estão sumarizadas nas Tabelas 5 e 6.

Todo os blocos que compõem este canal de comunicação estão interligados sequencialmente onde as saídas geradas em cada subsistema são utilizadas como entrada do subsistema seguinte. A seguir são exibidos os resultados de cada bloco desta parte da simulação.

### 4.3.1 Atenuação

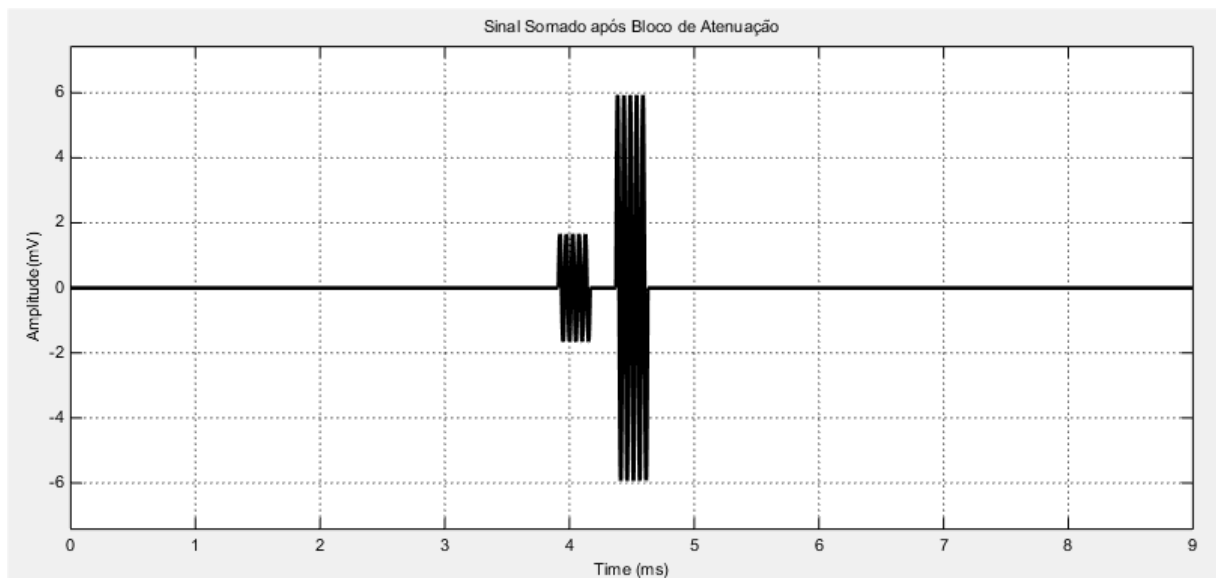
A atenuação ( $A(f,r)$ ) presente no meio subaquático é representada pela perda de transmissão (em inglês *transmission loss* -  $TL$ ). Essa perda é formada pela soma da perda por espalhamento geométrico ( $SL$ ) e perda por absorção ( $AL$ ), onde ambas são medidas em decibéis ( $dB$ ).

A perda por espalhamento geométrico ( $SL$ ) do canal de comunicação subaquático tem valores referentes aos caminhos de propagação dos sinais. O caminho direto tem perda de 7,782  $dB$  e os demais caminhos, que possuem a mesma distância, têm perda de 8,266  $dB$ . Estes valores foram calculados utilizando a Equação 2.22 e a razão normal do ganho. A razão entre potência de saída e a potência de entrada é menor que um, que configura um ganho negativo, isto é, uma perda de energia no sistema.

Para encontrar a perda por absorção ( $AL$ ) do canal de comunicação proposto foi primeiramente necessário calcular o coeficiente de absorção ( $\alpha(f)$ ) através da Equação 2.21. O valor deste coeficiente muda de acordo com a profundidade de propagação dos caminhos e também sofre influência dos componentes químicos presentes no meio subaquático que são as frequências de relaxação do ácido bórico e o sulfato de magnésio. O valor do coeficiente de absorção ( $\alpha(f)$ ) calculado para este canal de comunicação está em torno de  $1,945 \text{ dB/km}$ , mostrando-se coerente com a frequência do transdutor piezoelétrico, como pode ser visto na Figura 10 da seção 2.2 de Fundamentação Teórica.

Em seguida, após o cálculo deste coeficiente, a perda por absorção ( $AL$ ) foi calculada pela Equação 2.20 e atingiu o valor de  $0,01734 \text{ dB}$  para o caminho direto e de  $0,01938 \text{ dB}$  para os demais caminhos.

A Figura 32 mostra a atenuação que o sinal gerado pelo transdutor sofreu ao sair do bloco de atenuação do canal de comunicação. Podemos observar que cada caminho percorrido pelos sinais sofreu perdas em suas amplitudes. Essa perda de transmissão ( $TL$ ) foi calculada pela Equação 2.23 e atingiu  $8,453 \text{ dB}$  para o caminho direto e  $8,872 \text{ dB}$  para os demais caminhos. Também é possível observar que aquele pulso inicial do transdutor piezoelétrico foi dividido em dois pulsos separados por um deslocamento do tempo. Este fato acontece devido aos atrasos de propagação dos sinais ao longo do meio por diferentes caminhos. Este efeito é chamado múltiplos percursos e seus resultados são apresentados a seguir.



**Figura 32:** Sinal atenuado e atrasado.

### 4.3.2 Múltiplos Caminhos

A propagação dos sinais através dos múltiplos caminhos pode ser observada na Figura 32. Inicialmente, os sinais acústicos gerados pelo transdutor foram propagados por cinco caminhos diferentes, porém devido à simetria da geometria do aquário em relação a Largura (W) e profundidade (D), que foi adotada para que houvesse apenas uma reflexão destes sinais, as distâncias dos ângulos refletidos são as mesmas, ou seja, 6,7 metros para estes caminhos e o 6 metros para o caminho direto, que tem a distância do seu próprio comprimento (L). Como resultado, é possível perceber o sinal senoidal gerado pelo transdutor com 5 ciclos no caminho direto, porém com menor amplitude e um atraso de 3,9 (*ms*), alcançando o receptor primeiro que os sinais refletidos.

Em seguida, os sinais propagados pelos caminhos com reflexões nas laterais, superfície e fundo do aquário chegam com o atraso igual de 4,4 (*ms*). Para estes sinais ocorre o fenômeno de superposição das ondas, onde todos os sinais têm suas amplitudes somadas. Na Figura 32, podemos observar este fenômeno e a coerência no resultado analisando os valores encontrados para os atrasos de cada caminho.

Para encontrar estes resultados foi necessário definir previamente a profundidade média (*Dm*). A profundidade média foi utilizada para calcular a velocidade média de cada caminho. Ao final obtivemos três valores diferentes de profundidades: 0,8 metros para os sinais que refletem na superfície do aquário; 1,5 metros para os sinais que refletem nas laterais do aquário e um do caminho direto; e 2,3 metros para os sinais que refletem no fundo do aquário. A velocidade de propagação (*c*) dos sinais acústicos de todos os caminhos está em torno de 1534 (*m/s*). Somente a partir do cálculo dessa velocidade é que foram calculados os atrasos de propagação de cada caminho.

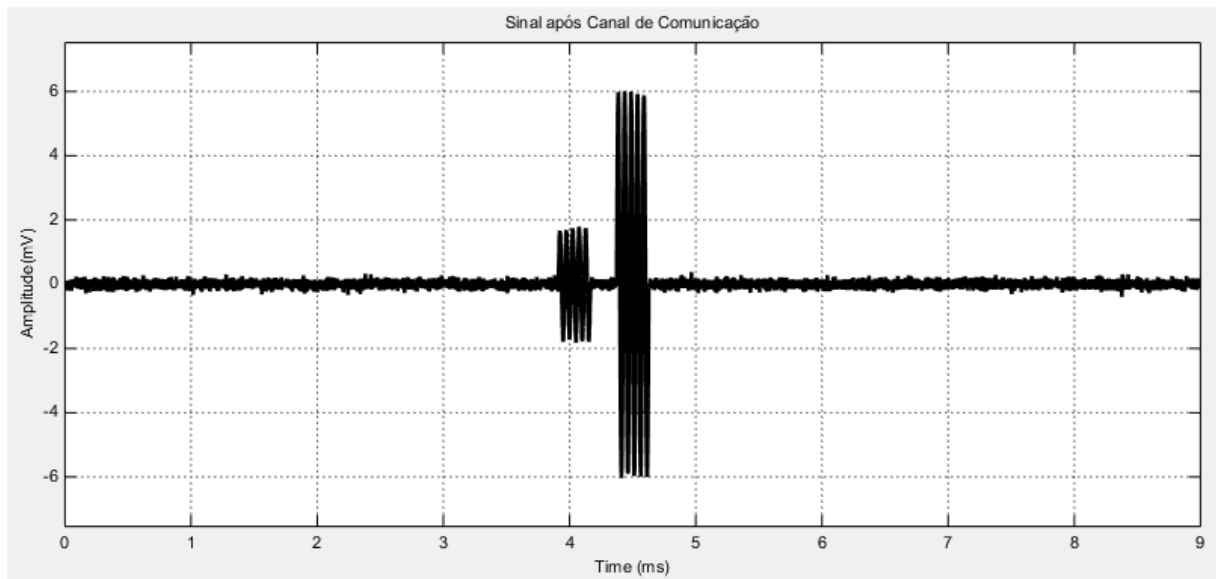
Após os cálculos das distâncias e dos seus respectivos atrasos, os sinais acústicos são propagados pelo meio, cada um em seu caminho, até chegarem ao receptor. Mas ao longo da propagação eles são expostos as interferências do meio como os ruídos que terão seus resultados apresentados a seguir.

### 4.3.3 Ruídos

Dentre os tipos de ruídos existentes no meio subaquático, o que afeta diretamente a propagação dos sinais gerados pelo transdutor piezoelétrico proposto nesta dissertação é o ruído das ondas. Este tipo de ruído interfere frequências de operação que variam de 100 *Hz* até 100 *kHz* o que inclui a frequência de operação do nosso transdutor piezoelétrico. Portanto, os

demais ruídos apresentados na Seção 2.2 não foram levados em consideração nas simulações e, conseqüentemente, nos resultados desta simulação.

Por outro lado, o ruído das ondas causa uma influência no sistema de comunicação subaquático proposto de forma mais significativa, com uma variância de 0,01. Este valor foi calculado através da Equação 2.26, que leva em consideração a velocidade dos ventos ( $m/s$ ) como parâmetro de entrada. A resposta em frequência do sinal com o ruído depois de passar por completo pelo canal de comunicação, ou seja, após sofrer atraso de propagação, atenuações do meio e com o ruído da agitação das ondas de superfície é representada Figura 33.

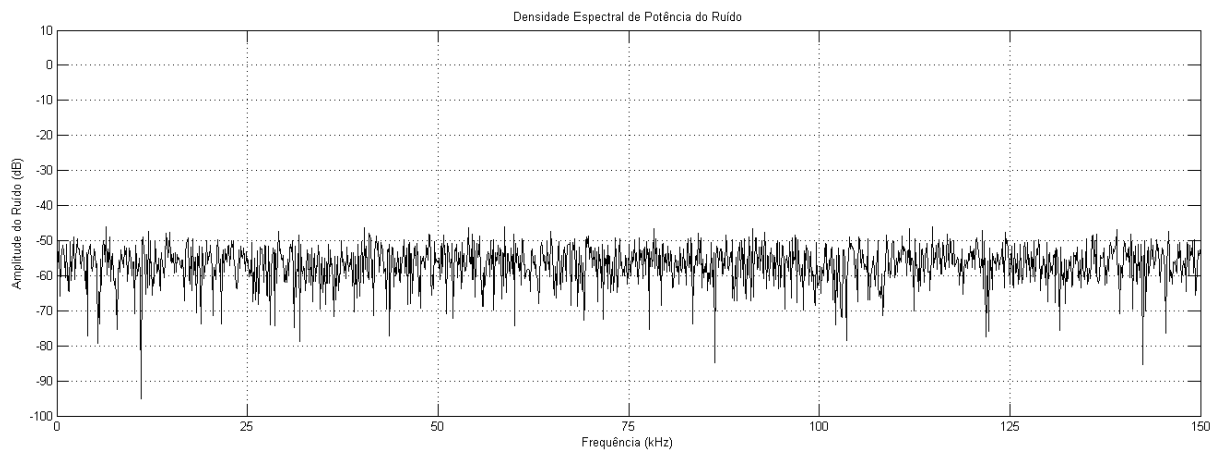


**Figura 33:** Ruído inerente do meio subaquático aplicado no sinal.

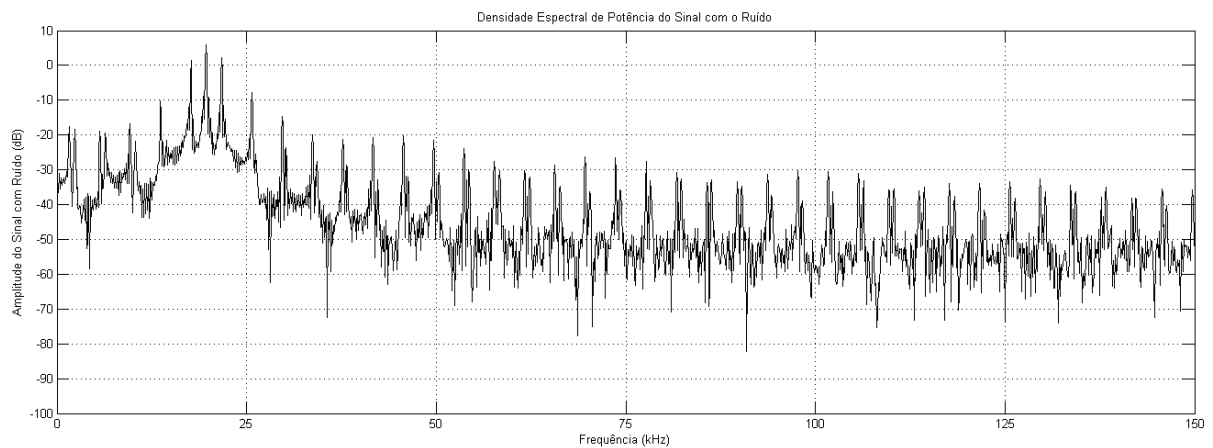
A partir da identificação dos valores de atenuação e de ruído no sistema de comunicação, foi calculado a relação sinal ruído (*Signal-to-Noise Ratio* - *SNR*) do sistema de comunicação. A *SNR* foi obtida através da razão entre a potência do sinal acústico gerado pelo transdutor e a potência do desse sinal somado ao ruído, alcançando um valor de 17,91 *dB*. Esta relação está diretamente ligada com a taxa de bits errados (do inglês *Bit Error Rate* - *BER*) do sistema, ou seja, quanto maior for a quantidade de bits errados na transmissão, menos bits de informação chegará no destino.

Para analisar a influência do ruído no sinal, calculamos a transformada rápida de Fourier (*Fast Fourier Transform* - *FFT*) no *Matlab* a uma taxa de amostragem de 1 *MHz* para obter a densidade espectral de potência (*DSP*). Os resultados da *DSP* (*dB*) em função da frequência (*kHz*) para a componente de ruído ambiental ocasionado pelas ondas de superfície e para o sinal com este ruído são mostrados nas Figuras 34 e 35.

Realizamos a simulação de análise do espectro de potência do ruído por meio do código



**Figura 34:** Densidade espectral de potência do ruído em *dB*.



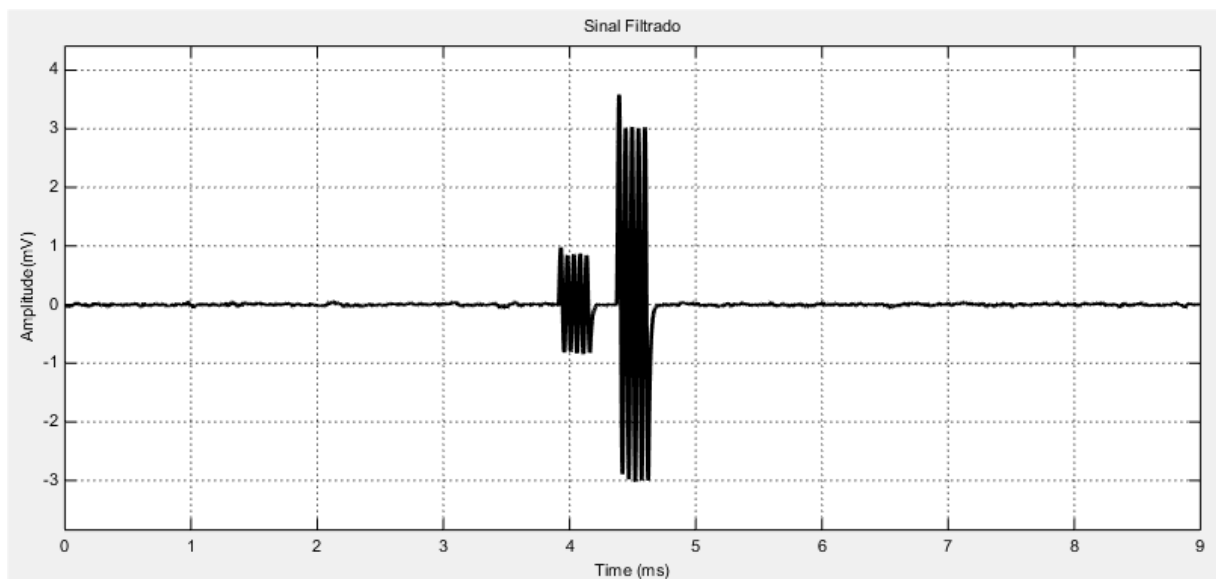
**Figura 35:** Densidade espectral de potência do sinal com o ruído em *dB*.

*analise\_espectro\_db.m* que está disponível no *GitHub*.

#### 4.3.4 Filtragem e Recepção do Sinal

Após o sinal gerado pelo transdutor piezoelétrico passar por todo o canal de comunicação acústico subaquático, onde sofreu todos os fenômenos inerentes ao meio como atraso de propagação, propagação por múltiplos caminhos, perda por espalhamento geométrico, perda por absorção e as interferências do ruído ambiental, existe a necessidade de identificar a informação que está sendo transmitida pelo sinal acústico. Para realizar essa identificação do sinal foi necessário filtrar todas as interferências que o meio atribuiu ao sinal e, para tal, foi aplicado um filtro digital de primeira ordem através do bloco de ruídos no *Simulink*.

O resultado da filtragem do sinal acústico é mostrado na Figura 36. Nela podemos observar a resposta em frequência do sinal filtrado. Após a filtragem, o sinal sofreu uma perda significativa na sua amplitude, porém ele apresenta as mesmas características do sinal original

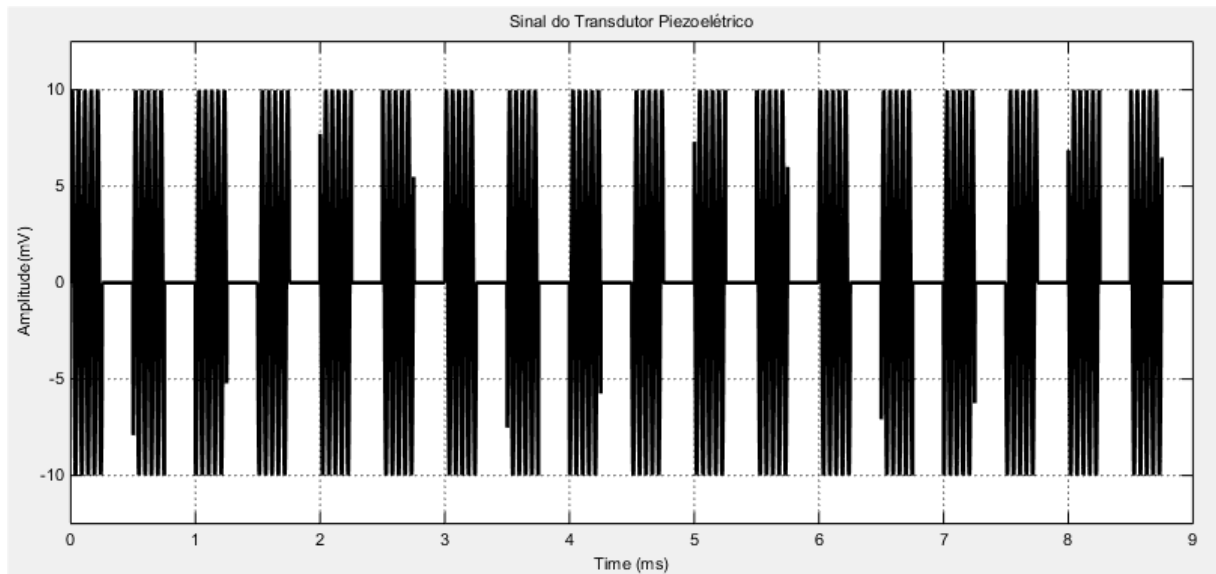


**Figura 36:** Sinal filtrado.

mantendo o atraso de propagação, a propagação por múltiplos caminhos e a coerência na sua amplitude. Assim, a informação presente no sinal é visivelmente identificável tornando viável o canal de comunicação pertencente ao sistema de comunicação acústico subaquático proposto aqui na nesta dissertação de mestrado.

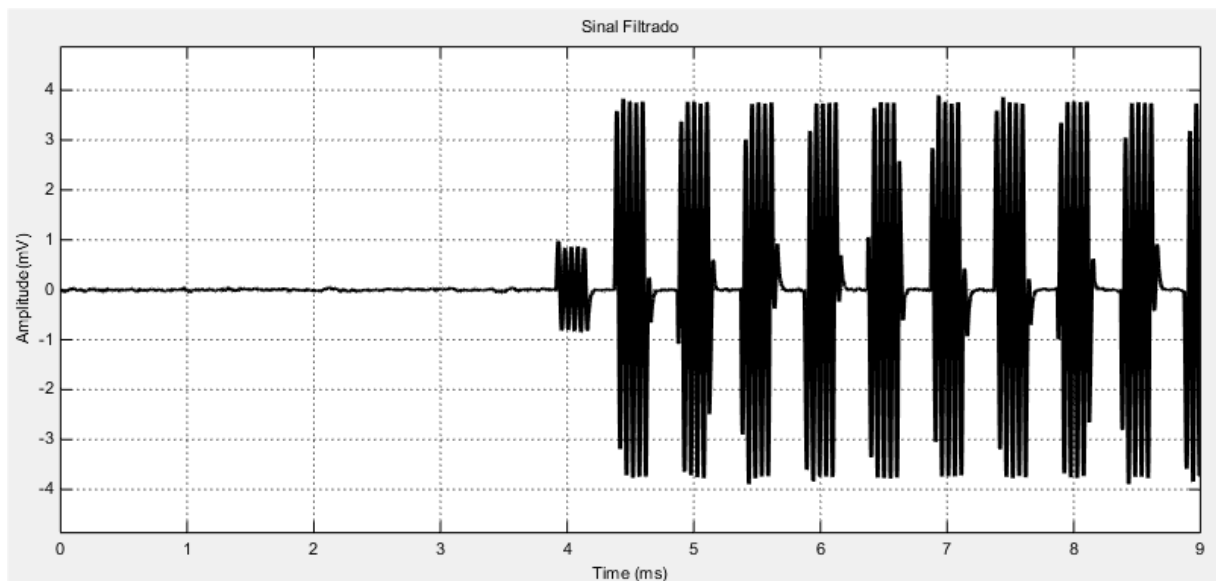
#### 4.3.5 Estudo de Modulação OOK

Os resultados encontrados para o estudo de modulação OOK partem do sinal modulado no transdutor representado pela Figura 37. Ela mostra a transmissão de uma rajada de 10 bits com níveis lógicos um e zero, alternadamente, modulados por OOK e repetidos a cada 0,5 ms a uma frequência de portadora de 19.670 Hz.



**Figura 37:** Sinal modulado gerado pelo transdutor com frequência de 19.670 Hz.

A Figura 38 é ideal para identificar o efeito que a modulação OOK causou nas ondas acústicas que se propagaram pelo canal subaquático. Podemos observar os efeitos de múltiplos caminhos, atenuação e o ruído ambiental que são inerentes ao meio subaquático simulados no cenário do aquário. Para este caso particular, na saída do canal mostra o atraso de propagação dos caminhos, onde o caminho direto tem o menor atraso e possui uma amplitude menor. Os demais caminhos tem um atraso de propagação maior e os sinais são somados resultando em uma amplitude maior.



**Figura 38:** Sinal modulado filtrado.

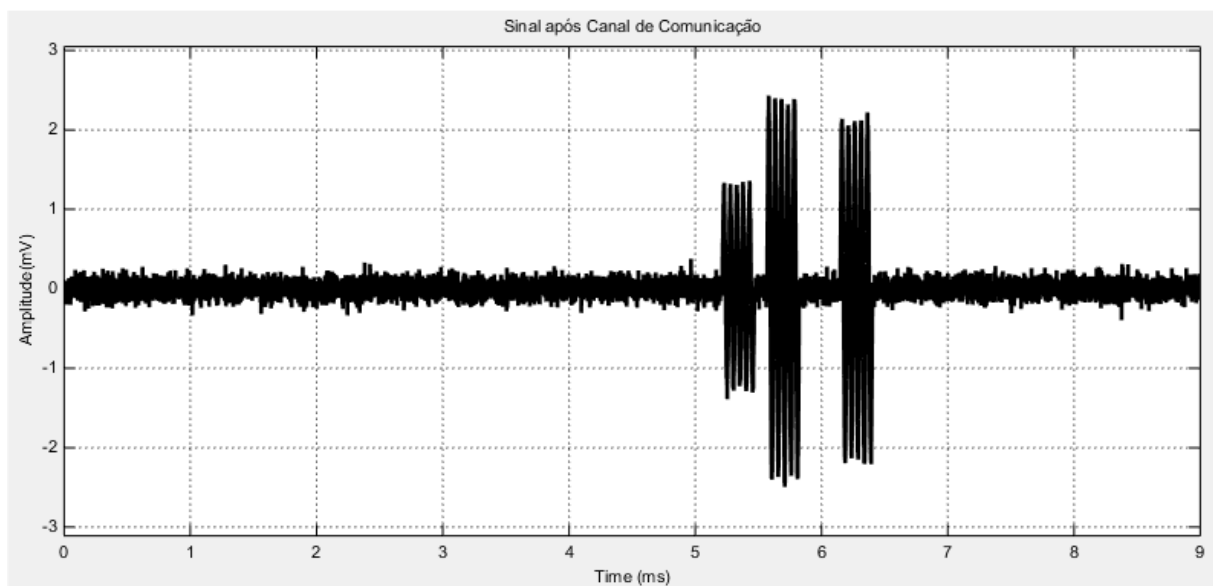
A amplitude, por sua vez, é maior do que a amplitude do sinal filtrado apresentado na Figura

36. Esse fato ocorre por causa da superposição dos sinais do caminho direto e dos caminhos refletidos ao longo da sua propagação com a modulação OOK. Entretanto, o sinal que se propaga pelos caminhos refletidos reproduz cópias destes sinais que causam interferências entre símbolos (IES). Estas interferências demandam técnicas de modulações mais avançadas como a multiplexação por divisão de frequência ortogonal (do inglês *Orthogonal frequency-division multiplexing* - OFDM) para minimizar o efeito dos múltiplos caminhos e tornar possível a identificação do sinal na recepção da transmissão.

A influência da atenuação do meio e do ruído ambiental causada na propagação do sinal acústico no canal subaquático são as mesmas apresentadas na Figura 36, onde todas as configurações do ambiente de simulação foram mantidas.

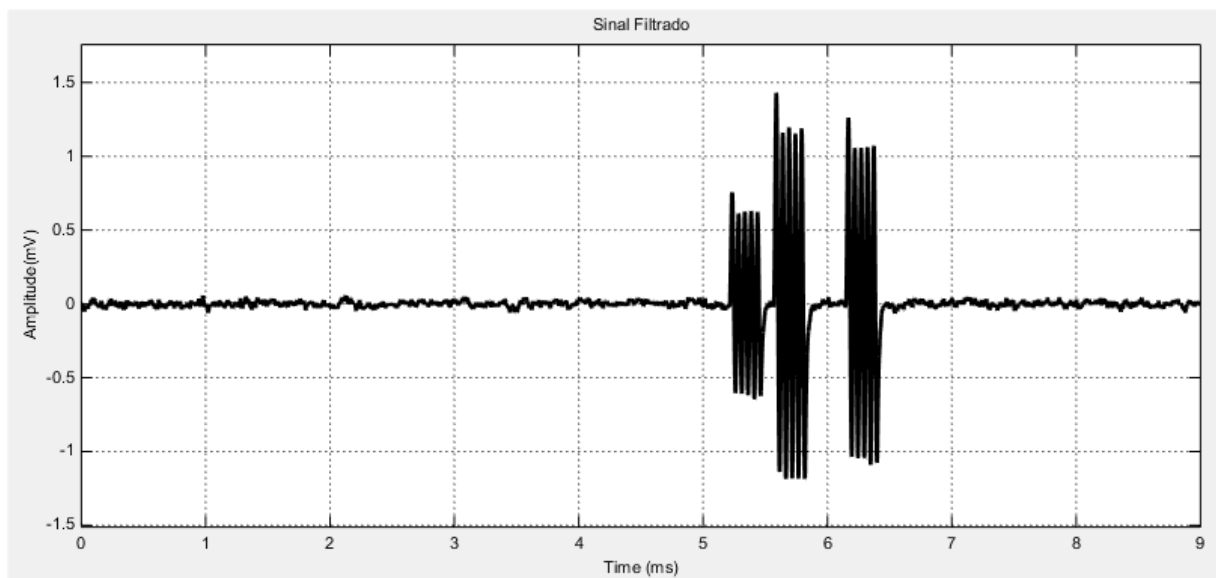
#### 4.3.6 Simulação com Aquário Ampliado

Realizamos uma nova simulação do canal comunicação subaquático com o objetivo comparar o comportamento das ondas acústicas e os efeitos do meio para um aquário com dimensões maiores. Este novo aquário possui a mesma largura (W), que é de 3 metros, enquanto que a profundidade (D) e o comprimento (L) foram alterados para 5 e 8 metros, respectivamente. As demais características do meio subaquático, como temperatura, salinidade e acidez não foram alteradas para essa nova simulação. O sinal original é o mesmo das Figuras 31 e 37 para o pulso e para o sinal modulado em OOK, ambos na mesma frequência de 19.670 Hz. A resposta em frequência do sinal na saída do canal de comunicação para o aquário ampliado é mostrado na Figura 39.



**Figura 39:** Sinal atrasado, atenuado e com ruído para o aquário ampliado.

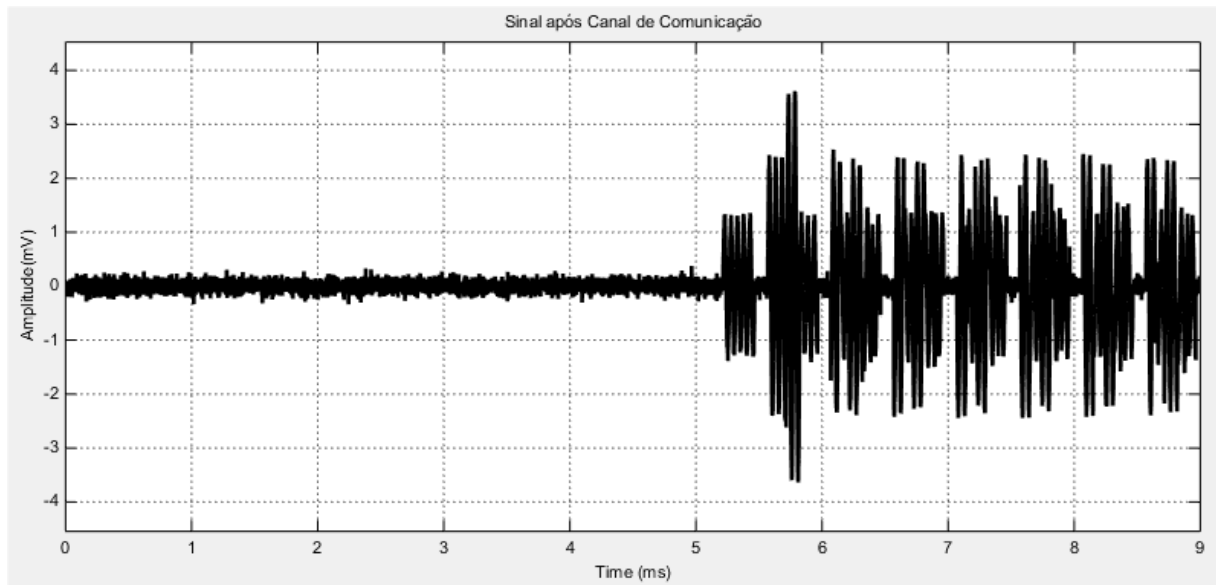
O resultado da filtragem do sinal acústico para o aquário ampliado é mostrado na Figura 40 por meio da resposta em frequência do sinal filtrado. É possível observar que o sinal, agora representado por três pulsos, foi atrasado, atenuado e recebeu o ruído do meio subaquático. O primeiro pulso é o caminho direto que chegou com atraso de  $5,2\text{ ms}$  e com atenuação de  $9,545\text{ dB}$ . O segundo pulso é referente aos sinais que refletiram nas paredes laterais do aquário que chegaram com atraso de  $5,6\text{ ms}$  e com atenuação de  $9,8\text{ dB}$ , bem próximo do caminho direto devido a profundidade média ser a mesma. O terceiro pulso são os sinais que refletiram na superfície e fundo do aquário que chegaram com atraso de  $6,1\text{ ms}$  e atenuação de  $10,19\text{ dB}$ .



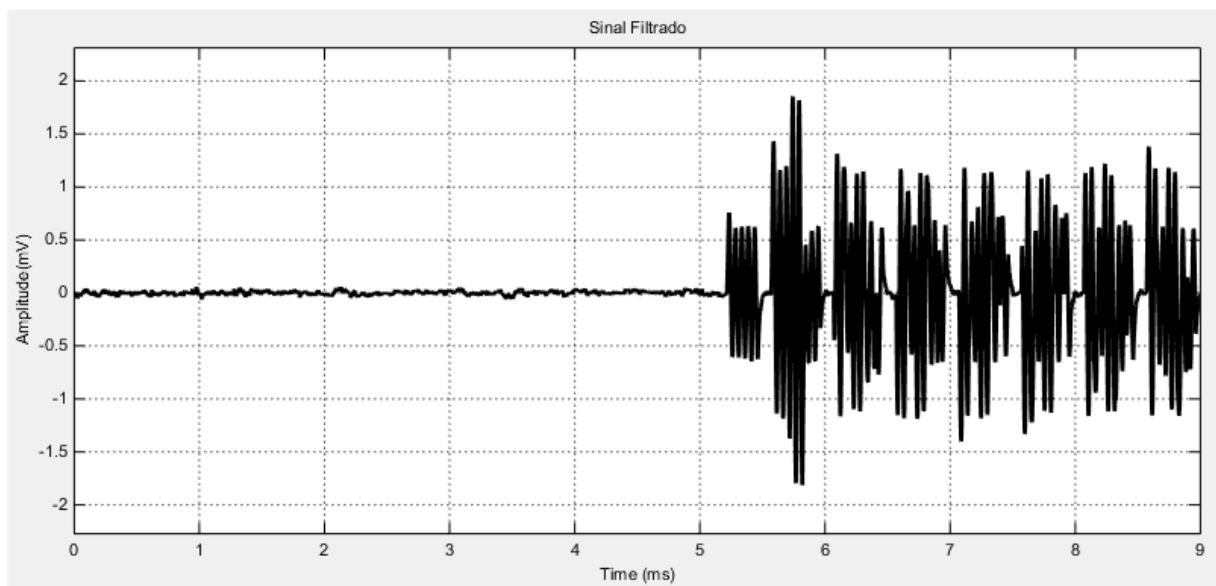
**Figura 40:** Sinal filtrado para o aquário ampliado.

Na simulação envolvendo a modulação OOK para o aquário ampliado mostrado na Figura 41, podemos observar que o primeiro pulso referente ao caminho direto está bem definido. Em contrapartida, os pulsos seguintes que propagaram-se por caminhos refletidos estão em fase criando sinais resultantes que acabam dificultando a identificação dos sinais transmitidos.

A Figura 42 mostra o sinal modulado em OOK após a filtragem. Podemos observar novamente que o fenômeno de interferências entre símbolos (IES) está presente nesta simulação por meio dos princípios de superposição e sobreposição de fase das ondas acústicas pelos sinais, exigindo modulações modernas como OFDM para possibilitar a detecção da informação presente no sinal.



**Figura 41:** Sinal modulado, atrasado, atenuado e com ruído para o aquário ampliado.



**Figura 42:** Sinal modulado e filtrado para o aquário ampliado.

Os resultados obtidos nas simulações do canal de comunicação subaquático para os dois cenários estão organizados e são mostrados na Tabela 7 e na Tabela 8, respectivamente.

**Tabela 7:** Resultados da simulação do canal de comunicação para o cenário 1.

| Blocos     | Múltiplos Caminhos |            | Atenuação (dB) |           |          | Ruído     |        |         |
|------------|--------------------|------------|----------------|-----------|----------|-----------|--------|---------|
| Caminho    | Distância (m)      | Atraso (s) | $SL$           | $AL(r,f)$ | $A(f,r)$ | Variância | SNR    | SNR OOK |
| Superfície | 6,7                | 0,0044     | 8,266          | 0,0194    | 8,872    | 0,008     | 17,916 | 29,013  |
| Lt. Atrás  | 6,7                | 0,0044     | 8,266          | 0,0194    | 8,872    | 0,008     | 17,916 | 29,013  |
| Direto     | 6,0                | 0,0039     | 7,782          | 0,0173    | 8,453    | 0,008     | 17,916 | 29,013  |
| Lt. Frente | 6,7                | 0,0044     | 8,266          | 0,0194    | 8,872    | 0,008     | 17,916 | 29,013  |
| Fundo      | 6,7                | 0,0044     | 8,266          | 0,0194    | 8,872    | 0,008     | 17,916 | 29,013  |

**Tabela 8:** Resultados da simulação do canal de comunicação para o cenário 2.

| Blocos     | Múltiplos Caminhos |            | Atenuação (dB) |           |          | Ruído     |        |         |
|------------|--------------------|------------|----------------|-----------|----------|-----------|--------|---------|
| Caminho    | Distância (m)      | Atraso (s) | $SL$           | $AL(r,f)$ | $A(f,r)$ | Variância | SNR    | SNR OOK |
| Superfície | 9,434              | 0,0061     | 9,747          | 0,0272    | 10,190   | 0,008     | 18,307 | 12,689  |
| Lt. Atrás  | 8,544              | 0,0056     | 9,317          | 0,0247    | 9,800    | 0,008     | 18,307 | 12,689  |
| Direto     | 8,000              | 0,0052     | 9,031          | 0,0231    | 9,545    | 0,008     | 18,307 | 12,689  |
| Lt. Frente | 8,544              | 0,0056     | 9,317          | 0,0247    | 9,800    | 0,008     | 18,307 | 12,689  |
| Fundo      | 9,434              | 0,0061     | 9,747          | 0,0272    | 10,190   | 0,008     | 18,307 | 12,689  |

## 4.4 Conclusão do Capítulo

Este capítulo apresentou os resultados do sistema de comunicação acústico subaquático proposto em que foram obtidos através de simulações numéricas realizadas nos softwares *COMSOL Multiphysics* e *Matlab/Simulink*. As simulações foram realizadas em duas etapas: a etapa de modelagem do transdutor piezoelétrico e a etapa de modelagem do canal de comunicação subaquático.

Podemos destacar como principais resultados encontrados na modelagem do transdutor piezoelétrico a curva de impedância, formada pela frequência de ressonância e a frequência de antirressonância nos valores de 16.080 e 19.670 *Hz*, respectivamente. Esta curva foi gerada a partir dos estudos realizados com o transdutor vibrando livremente e certificada com os estudos realizados com o transdutor vibrando dentro do aquário com todas as características do meio incluídas. Outra característica importante apresentada nesta etapa foi o diagrama de radiação do transdutor piezoelétrico da Figura 29, que indicará o ângulo em que o transdutor vai propagar as ondas acústicas com o maior ganho *dB*.

A etapa seguinte e última deste capítulo, a de construção da modelagem do canal de comunicação, iniciou com a identificação das características do transdutor piezoelétrico obtidos na Etapa anterior, pois a partir delas foi possível realizar as simulações do canal de comunicação. Os resultados foram apresentados em subseções de acordo com os blocos apresentados na modelagem do canal no *Simulink*.

No bloco de atenuação, a perda de transmissão do canal de comunicação de foi calculada e totalizou 8,453 e 8,872 *dB* para o caminho direto e para os caminhos refletidos, respectivamente. A perda de transmissão é formada pela soma das perdas por espalhamento geométrico e pela perda por absorção. A perda por espalhamento geométrico calculada foi de 7,782 e 8,266 *dB* para o caminho direto e para os caminhos refletidos, respectivamente. Os valores calculados a perda por absorção foram de 0,01734 e 0,01938 *dB* para o caminho direto e para os caminhos refletidos, respectivamente. Essa perda só pode ser calculada após o cálculo do coeficiente de absorção que foi de 1,945 *dB/km*.

No bloco de múltiplos caminhos, os sinais propagaram-se em uma velocidade média do som na água de  $1534 \text{ m/s}$ , gerando atrasos de propagação dos sinais para do caminho direto e os caminhos refletidos de 3,9 e 4,4  $\text{ms}$ , respectivamente.

Para o bloco de ruídos, foi levado em consideração no canal de comunicação apenas o ruído de agitação de superfície ou ruído das ondas. Isto porque a frequência de operação do transdutor piezoelétrico sofre influência significativa apenas para este tipo de ruído. A densidade espectral de potência para o ruído das ondas foi apresentada na Figura 34 e a variância calculada para o ruído foi de 0,01.

No bloco de filtragem e recepção do sinal podemos destacar a coerência e as características que foram mantidas pela função de transferência de primeira ordem, visto que a informação propagada pelos sinais ao longo do canal de comunicação foi sujeita a todas as interferências inerentes ao meio subaquático.

Apresentamos uma nova simulação para o canal de comunicação que envolveu um aquário ampliado com objetivo de comparar o comportamento das ondas acústicas e os efeitos do meio para esse novo cenário. A propagação dos sinais por meio dos múltiplos caminhos ficou mais evidenciado pois os sinais estavam defasados, ou seja, não apresentam fase entre si. Com o aumento das dimensões do aquário, principalmente no comprimento ( $L$ ), foi possível observar que a atenuação sofrida pelo sinal acústico também aumenta, fato exposto na amplitude dos pulsos que representam os caminhos do sinal.

Podemos observar que os dois aquários apresentam características semelhantes, onde foi mantido todos os pulsos ao longo da transmissão e torna possível a identificação do sinal transmitido pelo canal de comunicação.

Um estudo de modulação foi realizado no canal de comunicação para os dois cenários. A modulação por chaveamento de On-OFF (OOK) foi implementada. Este estudo mostra que os efeitos dos múltiplos caminhos podem causar serias dificuldades na propagação do sinal. Uma destas dificuldades são as interferências entre símbolos (IES) que demanda modulações mais robustas para diminuir estes efeitos, como é o caso de modulações OFDM. Este tipo de modulação é bastante estudado por pesquisadores, afim de atenuar estes efeitos (ZHOU; WANG, 2014).

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

---

ESTE capítulo tem por objetivo apresentar as conclusões e considerações finais acerca dos métodos propostos e dos resultados obtidos durante o desenvolvimento desta dissertação. Além disso, apresentamos as considerações finais sobre o atendimento aos objetivos descritos na introdução e a apresentação de propostas para continuidade deste trabalho.

### 5.1 Conclusão

O objetivo geral deste trabalho foi desenvolver um modelo de simulação para um canal de comunicação acústico subaquático com transdutores piezoelétricos concebidos para trabalhar na frequência de operação ótima do canal. Assim, contribuímos para essa área de pesquisa compreendendo melhor a comunicação subaquática por meio desta metodologia proposta, que pode ter suas dimensões alteradas para representar outros cenários obtendo soluções mais eficazes.

O desenvolvimento deste modelo foi dividido em duas etapas: (i) a modelagem do transdutor piezoelétrico utilizando o software *COMSOL Multiphysics* e (ii) a modelagem do canal de comunicação subaquático utilizando o software *Matlab/Simulink*.

Na Etapa 1, os objetivos incluíram modelar o transdutor piezoelétrico, que foi utilizado como projetor e hidrofone, e identificar suas principais características, como frequência de ressonância, variação de fase e o diagrama de radiação. Estas características foram identificadas no primeiro estudo para o transdutor vibrando livremente e certificadas no segundo estudo para o transdutor vibrando no ambiente subaquático. Na Etapa 2 da modelagem do canal de comunicação, os objetivos foram alcançados para um cenário com abordagem simplificada e expansível. Para identificar os aspectos relevantes do canal, utilizamos como parâmetros a distância entre o transmissor e receptor, a profundidade média e a velocidade de propagação do som para a geometria do aquário.

O transdutor piezoelétrico utilizado é constituído de cerâmica PZT-5H e possui 60 mm de

diâmetro e 1 mm de espessura. Extraímos da simulação do transdutor as curvas de módulo e fase da impedância em função da frequência. Neste contexto, encontramos a frequência de ressonância de 16.080 Hz e a frequência de antirressonância de 19.670 Hz. Na frequência de antirressonância, o diagrama de radiação do transdutor tem seu feixe de projeção direcional com maior ganho no ângulo 0 graus, considerada a frequência de operação ótima para o canal. Além deste, apresentamos outros ângulos de diretividades com ganhos acima de 70%, em que o transdutor teria melhor performance trabalhando nas frequências de ressonância.

A simulação do canal de comunicação foi realizada para dois aquários de tamanhos diferentes, para os quais foram considerados a atenuação, o ruído ambiental, o atraso de propagação e os múltiplos caminhos de propagação do sinal acústico. Com o aumento das dimensões do aquário, principalmente no comprimento (L), foi possível observar que a atenuação sofrida pelo sinal acústico também aumenta, fato exposto na amplitude dos pulsos que representam os caminhos do sinal. Com estas simulações foi possível identificar e comparar os efeitos ocasionados pelo canal de comunicação. Os sinais gerados nas saídas apresentaram características similares aos sinais originais, mesmo depois de sofrer uma perda significativa na sua amplitude e forma. Assim, foi possível reconhecer a informação presente no sinal, o que torna viável o canal de comunicação proposto.

O modelo do sistema de comunicação acústico subaquático desenvolvido nesta dissertação é baseado em um cenário real, sendo capaz de predizer os efeitos práticos. Comparamos o modelo com os trabalhos relacionados e obtivemos resultados coerentes com a literatura. Isto mostra que a metodologia aplicada produziu um trabalho robusto que confirma achados de pesquisas realizadas na área encontradas por nós na busca sistemática da Seção (2.4).

O modelo proposto está disponível à comunidade acadêmica para que seja utilizado, melhorado ou sirva como base para trabalhos futuros. Além disso, outro diferencial do nosso trabalho é a modelagem do transdutor utilizado, que foi desenvolvido para trabalhar na frequência de operação ótima do canal. Esta etapa de modelagem do transdutor proporciona a escolha da frequência de operação de acordo com o tipo de aplicação desejada.

Por fim, acreditamos que o presente trabalho cumpriu com objetivo inicial e os resultados obtidos nas simulações contribuem de forma significativa para a evolução de sistemas de comunicação acústica subaquática visando à obtenção de maiores taxas de transmissão e consequentemente melhor qualidade dos sistemas.

## 5.2 Trabalhos Futuros

A modelagem do transdutor piezoelétrico e a modelagem do canal de comunicação subaquático foram desenvolvidas para o cenário apresentado neste trabalho com sucesso utilizando uma abordagem simplificada e expansível. Porém, comparar os resultados das simulações deste trabalho com um experimento e medições reais complementariam o estudo.

Na modelagem do transdutor, a realização de simulações com outros materiais piezoelétricos são pertinentes. Estudos como Martins et al. (2012), apontam que transdutores piezoelétricos de cerâmica apresentam uma pressão sonora maior, mas com um alto consumo de energia. Enquanto que os polímeros apresentam uma pressão sonora menor com um baixo consumo de energia. Um balanceamento entre estes materiais podem levar a um material ideal para aplicação em comunicação.

A modelagem do canal de comunicação subaquático pode ser expandida pela implementação de um cenário onde os transdutores estivessem localizados de maneiras diferentes, como desalinhados entre si, por exemplo. Dessa forma, alguns sinais teriam mais reflexões que outros, ocasionando um atrasos de propagação diferente dos sinais que tivessem mais reflexões.

Outra forma de expandir o estudo da modelagem do canal de comunicação é por meio de simulações que envolvam técnicas mais modernas de modulação, resolvendo assim os problemas de interferência entre símbolos. Assim como, apresentamos como possível trabalho futuro a implementação de um filtro digital com a finalidade reduzir as interferências com maior precisão.

---

## Referências Bibliográficas

---

- AINSLIE, M. A.; MCCOLM, J. G. A simplified formula for viscous and chemical absorption in sea water. *The Journal of the Acoustical Society of America*, ASA, v. 103, n. 3, p. 1671–1672, 1998.
- AKYILDIZ, I. F.; POMPILI, D.; MELODIA, T. Underwater acoustic sensor networks: research challenges. *Ad hoc networks*, Elsevier, v. 3, n. 3, p. 257–279, 2005.
- AKYILDIZ, I. F.; POMPILI, D.; MELODIA, T. State-of-the-art in protocol research for underwater acoustic sensor networks. In: *Proceedings of the 1st ACM international workshop on Underwater networks*. New York, NY, USA: ACM, 2006. p. 7–16.
- BALLATO, A. Piezoelectricity: history and new thrusts. In: *Ultrasonics Symposium, 1996. Proceedings., 1996 IEEE*. San Antonio, TX, USA: IEEE, 1996. v. 1, p. 575–583.
- BURNHAM, J. F. Scopus database: a review. *Biomedical digital libraries*, BioMed Central, London, UK, v. 3, n. 1, p. 1, 2006.
- BUTLER, J. L.; SHERMAN, C. H. *Transducers and arrays for underwater sound*. Switzerland: Springer, 2007.
- CAMPBELL, D. *History of the Study of Marine Biology - MarineBio.org*. 1998. Disponível em: <<http://marinebio.org/oceans/history-of-marine-biology/index.aspx>>. Acesso em: 4 set. 2017.
- COATES, R. F. *Underwater acoustic systems*. Nova Jersey, USA: John Wiley & Sons, Limited, 1989.
- COATES, R. F. The design of transducers and arrays for underwater data transmission. *IEEE journal of oceanic engineering*, IEEE, v. 16, n. 1, p. 123–135, 1991.
- COSTA, E. et al. Transdutores de ultra-som: modelagem, construção e caracterização. *Sensores: Tecnologias e aplicações*, v. 1, p. 1–97, 2004.
- DAHIYA, R. S.; VALLE, M. *Robotic tactile sensing: technologies and system*. Trento, Italy: Springer Science & Business Media, 2012.
- DRESCH, A.; LACERDA, D. P.; ANTUNES JÚNIOR, J. A. V. *Design science research: método de pesquisa para avanço da ciência e tecnologia*. Porto Alegre, Brasil: Bookman Editora, 2015.
- EIRAS, J. A. *Materiais piezoelétricos*. São Paulo, Brasil: AlphaMidia Assessoria Fonográfica, 2004.

- ELMASLI, I. C.; KOYMEN, H. A wideband and a wide-beamwidth acoustic transducer design for underwater acoustic communications. In: *OCEANS 2006-Asia Pacific*. Singapore, Singapore: IEEE, 2007. p. 1–5.
- FALLER, L. D. *Relaxation phenomenon*. Encyclopædia Britannica, inc., 2016. Disponível em: <<https://www.britannica.com/science/relaxation-phenomenon>>. Acesso em: 11 jun. 2018.
- FOROUZAN, B. A. *Comunicação de dados e redes de computadores*. New York NY, USA: AMGH Editora, 2009.
- FRAGNITO, H. L. *Circuitos de Corrente Alternada Notas de Física Experimental*. São Paulo, Brasil, 2000.
- FRANCOIS, R.; GARRISON, G. Sound absorption based on ocean measurements. part ii: Boric acid contribution and equation for total absorption. *The Journal of the Acoustical Society of America*, ASA, Melville, NY, USA, v. 72, n. 6, p. 1879–1890, 1982.
- FREITAS, R. L. B. d. et al. *Fabricação, caracterização e aplicações do compósito pzt/pvdf*. Universidade Estadual Paulista (UNESP), 2012.
- FUNCEME, A. de Comunicação da. *Elevação da velocidade do vento já é percebida em julho no Ceará*. 2017. Disponível em: <<http://www.funceme.br/index.php/comunicacao/noticias/809-elevaç~ao-da-velocidade-do-vento-já-é-percebida-em-julho-no-ceará#site>>. Acesso em: 10 abr. 2018.
- GUO, N.; CAWLEY, P. Transient response of piezoelectric discs to applied voltage pulses. *Ultrasonics*, Elsevier, v. 29, n. 3, p. 208–217, 1991.
- HAYKIN, S. *Sistemas de comunicação*. Nova Jersey, EUA: John Wiley Sons, 2004.
- HEYWANG, W.; LUBITZ, K.; WERSING, W. *Piezoelectricity: evolution and future of a technology*. Berlin, Germany: Springer Science & Business Media, 2008. v. 114.
- IKEDA, T. *Fundamentals of piezoelectricity*. Oxford, Reino Unido: Oxford University Press, 1990.
- KATSNELSON, B.; PETNIKOV, V. *Propagação Acústica em Águas Rasas*. Moscou, Rússia: Academia de Ciências da Rússia, 1997.
- KATSNELSON, B.; PETNIKOV, V.; LYNCH, J. *Fundamentals of shallow water acoustics*. New York, NY, USA: Springer Science & Business Media, 2012.
- KINO, G. S.; DESILETS, C. S. Design of slotted transducer arrays with matched backings. *Ultrasonic Imaging*, Elsevier, v. 1, n. 3, p. 189–209, 1979.
- KO, W. H. *Piezoelectric energy converter for electronic implants*. USA: Google Patents, 1969. US Patent 3,456,134.
- KURASHIMA, N. *Proceedings of Machine Technical Institute Seminar*. 1999. Mechanical Engineering Laboratory - MITI.
- KUZLU, M. et al. Design of impedance matching network for b&k 8104 hydrophone via direct computational technique for underwater communication. In: *Microwave Symposium (MMS), 2010 Mediterranean*. Guzelyurt, Cyprus: IEEE, 2010. p. 399–402.

- LEÃO, J. P. C. F. *Comunicações Rádio Subaquáticas*. Dissertação (Mestrado) — Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2012.
- LI, T. et al. Automated water quality survey and evaluation using an iot platform with mobile sensor nodes. *Sensors*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 17, n. 8, p. 1735, 2017.
- MACÊDO, A. R. L. *Método para dimensionamento de rede de sensores subaquáticos para monitoramento e vigilância em redes de sensores sem fio para comunicações acústicas subaquáticas*. Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós Graduação em Engenharia de Telecomunicações - PPGET do Instituto Federal do Ceará - IFCE, 2015.
- MARTINS, M. et al. High frequency wide beam pvdf ultrasonic projector for underwater communications. In: IEEE. *OCEANS 2017*. Aberdeen, UK, 2017. p. 1–5.
- MARTINS, M. et al. Effect of the acoustic impedance in ultrasonic emitter transducers using digital modulations. *Ocean Engineering*, Elsevier, v. 100, p. 107–116, 2015.
- MARTINS, M. et al. Optimization of piezoelectric ultrasound emitter transducers for underwater communications. *Sensors and Actuators A: Physical*, Elsevier, v. 184, p. 141–148, 2012.
- MARTINS, M. et al. Comparative finite element analyses of piezoelectric ceramics and polymers at high frequency for underwater wireless communications. *Procedia Engineering*, Elsevier, v. 5, p. 99–102, 2010.
- MARTINS, M. et al. High data rate acoustic modem for underwater applications. In: *Telecommunications symposium (ITS), 2014 international*. Sao Paulo, Brazil: IEEE, 2014. p. 1–5.
- MARTINS, M. et al. Development of a 1 mbps low power acoustic modem for underwater communications. p. 2482–2485, 2014.
- MARTINS, M. S. *Ultrasonic wireless broadband communication system for underwater applications*. Tese (Doutorado) — Universidade do Minho (Portugal), 2013.
- MARTINS, M. S. et al. Underwater acoustic modem with streaming video capabilities. In: *OCEANS 2015-Genova*. Genoa, Italy: IEEE, 2015. p. 1–7.
- MILLERO, F. *Chemical Oceanography, Second Edition*. Miami, FL, USA: Taylor & Francis, 1996. (Marine Science Series).
- MULTIPHYSICS, C. *Acoustic Module-User's Guide*. Stockholm, Sweden: Version, 2013.
- MULTIPHYSICS, C. *piezoelectric materials crystal orientation poling direction*. 2017. Disponível em: <https://br.comsol.com/blogs/piezoelectric-materials-crystal-orientation-poling-direction/>. Acesso em: 18 mai. 2017.
- NAIK, M. R.; KEMPAIAH, U. et al. Directional optimization of mems piezoelectric hydrophone for underwater application. *Materials Today: Proceedings*, Elsevier, v. 5, n. 1, p. 823–829, 2018.

- NIVEDITHA, R. et al. Designing a low cost acoustic modem for underwater communication. v. 10, p. 2308–2311, 01 2015.
- NOURI, N. M. et al. Modelling and parameters study of piezoceramic parts of an electroacoustic transducers. *International Journal of Acoustics & Vibration*, v. 21, n. 1, 2016.
- RHODES, M. et al. Electromagnetic propagation in sea water and its value. In: *Military Systems.” SEAS DTC Technical Conference*. PA, USA: Citeseer, 2007.
- RIBEIRO, F. J. L.; PEDROZA, A. C.; COSTA, L. H. M. Sistema de monitoramento subaquático usando navios de suporte logístico em uma rede de sensores acústicos tolerante a atrasos e interrupções. *Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos-SBRC*, v. 2011, p. 133–146, 2011.
- ROBERTS, S. Dielectric and piezoelectric properties of barium titanate. *Phys. Rev.*, American Physical Society, v. 71, p. 890–895, 1947.
- SOCHELEAU, F.-X. *Communications acoustiques sous-marines sur canal fortement dispersif en temps et en fréquence: point de vue de la théorie de l’information*. Tese (Doutorado) — Université de Bretagne occidentale-Brest, 2011.
- STOJANOVIC, M. On the relationship between capacity and distance in an underwater acoustic communication channel. *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*, ACM, v. 11, n. 4, p. 34–43, 2007.
- STOJANOVIC, M.; PREISIG, J. Underwater acoustic communication channels: Propagation models and statistical characterization. *IEEE Communications Magazine*, IEEE, v. 47, n. 1, p. 84–89, 2009.
- TAROUÇO, L. M. R. *Modulação ASK*. Porto Alegre, RS, BRA: UFGRS, 1998. Disponível em: <<http://penta2.ufrgs.br/Alvaro/ask.html>>. Acesso em: 09 jun. 2018.
- TICHY, J.; ERHART, J.; KITTINGER, E. *Fundamentals of piezoelectric sensorics*. London, UK: Springer, 2010.
- URICK, R. J. Principles of underwater sound. McGraw Hill, New York, USA, 1983.
- VIEIRA, L. et al. Redes de sensores aquáticas. Departamento de Ciência da Computação - UFMG, Belo Horizonte, MG, Brasil, 2010.
- VIJAYA, M. *Piezoelectric materials and devices: applications in engineering and medical sciences*. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2012.
- XAVIER, B. C. *Modelos de Propagação Acústica em Águas Rasas*. 2005.
- XAVIER, J. D. M. *Modulation Analysis for an Underwater Communication Channel*. Porto, PRT: Citeseer, FEUP, 2012.
- YUN, C.-H. et al. Design and experiment of an acoustic transducer for underwater navigation. In: *OCEANS 2014-TAIPEI*. Taipei, Taiwan: IEEE, 2014. p. 1–5.
- ZHOU, S.; WANG, Z. *OFDM for underwater acoustic communications*. Nova Jersey, USA: John Wiley & Sons, 2014.

## ***APÊNDICE A – Produção científica***

**E**STA pesquisa envolveu uma extensa revisão da literatura no que diz respeito ao fenômeno da Piezoelectricidade e Comunicação Acústica Subaquática, tendo resultado em contribuições na forma de autoria e de coautoria em algumas produções científicas até o momento da defesa desta dissertação, na forma de artigos submetidos e/ou aprovados e publicados em revistas científicas de destaque internacional, os quais são listados nas próximas seções do Apêndice A.

Vale ressaltar que cada uma dessas produções teve fundamental importância para o fortalecimento da fundamentação teórica deste trabalho, tendo servido tanto para engrandecer os conhecimentos, quanto para ampliar as perspectivas do trabalho.

### **A.1 Artigo apresentado no ENCOM 2016 (UFC/IFCE)**

- Autoria no trabalho **“Estudo Simulado de um Transdutor Piezoelétrico como Projetor de um Sistema de Comunicação Acústica Subaquática”**, publicado no Encontro Anual do Iecom em Comunicações, Redes e Criptografia (ENCOM) 2016, cuja primeira página está ilustrada na Figura 43.

### **A.2 Artigo submetido e aceito para publicação na revista *Journal Ferroelectrics - Taylor and Francis* 2017**

- Coautoria no trabalho **“Fabrication and operational characteristics of step-down piezoelectric transformer based on PMN-PT ceramics”**, submetido e aceito para publicação na revista *Journal Ferroelectrics - Taylor and Francis* 2017, cuja primeira página está ilustrada na Figura 44.

ENCONTRO ANUAL DO IECOM EM COMUNICAÇÕES, REDES E CRIPTOGRAFIA - ENCOM 2016

## Estudo Simulado de um Transdutor Piezoelétrico como Projetor de um Sistema de Comunicação Acústica Subaquática

André Fontes de Oliveira, Bruno Soares Rojas Burgoa,  
Francisco José Alves de Aquino

Programa de Pós-graduação em Engenharia de Telecomunicações - PPGET,  
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará - IFCE, Fortaleza, CE 60040-531 BRA

**Resumo** - Atualmente, a piezocerâmica é considerada o material piezoelétrico mais utilizado na fabricação de transdutores para aplicações em comunicação acústica subaquática, que podem ser emissores ou receptores. Este trabalho apresenta uma simulação realizada na plataforma *COMSOL Multiphysics* que tem como objetivo identificar as características do material piezoelétrico. Tais características influenciam na atuação do material como um transdutor emissor no meio aquático.

**Palavras-chave**—Transdutores Piezoelétricos, Projetor, Piezocerâmicas, Comunicação Acústica Subaquática.

### I. INTRODUÇÃO

OS transdutores piezoelétricos são dispositivos capazes de converter energia elétrica em mecânica, chamado de efeito piezoelétrico inverso, e de converter energia mecânica em elétrica, efeito piezoelétrico direto [1]. Estes efeitos ocorrem na transmissão e recepção de um sinal em comunicação acústica subaquática. O dispositivo desta comunicação que transmite o sinal é o *projetor* e o que recebe o sinal é o *hidrofone*.

A existência de materiais que possuem propriedades piezoelétricas são considerados um grande avanço para o desenvolvimento de dispositivos para esse meio de comunicação. Esses transdutores podem ser construídos por cristais, cerâmicas, polímeros ou compósitos, em que cada um desses materiais possuem vantagens e desvantagens particulares. Em aplicações militares, os sonares utilizam frequências menores para alcançar longas distâncias. O inverso acontece para aplicações médicas, por exemplo, em exames por imagens o objetivo é maior precisão, em que altíssimas frequências são usadas para alcançar curtas distâncias [2].

O foco desse trabalho é realizar uma simulação na plataforma *COMSOL Multiphysics* para identificar características piezoelétricas do material usado no transdutor que vai atuar como emissor dentro de um sistema de comunicação acústica subaquática, em que a frequência de operação está diretamente relacionada à distância entre a fonte e o destino [3].

### II. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

#### A. Transdutor Piezoelétrico

Os primeiros materiais piezoelétricos foram descobertos em 1880 pelos irmãos Curie [4]. Eles demonstraram que certos cristais eram capazes de gerar uma tensão elétrica em sua

superfície quando submetidos a um estresse mecânico. Os custos e as dificuldades de produção desses cristais fizeram com que fossem iniciadas pesquisas por materiais sintéticos com as mesmas características piezoelétricas. A partir da década de 40 começaram a usar cerâmicas de Titanato Zirconato de Chumbo (PZT's), que apresentam melhor capacidade de polarização e maior flexibilidade de fabricação [4].

Ao aplicarmos um sinal de tensão elétrica no elemento piezoelétrico, ele é capaz de gerar ondas acústicas que se propagam melhor no meio quando apresentam uma boa profundidade de campo, diretividade dos feixes, que são influenciados pela polarização do material piezoelétrico e pelo efeito de espalhamento. A piezocerâmica é considerada a melhor opção dos materiais piezoelétricos devido às constantes de carga e de tensão piezoelétricas, ao coeficiente de acoplamento eletro-mecânico, ao fator de qualidade mecânico e dissipação elétrica, à temperatura Curie, à constante de frequência e à impedância acústica [1].

#### B. Comunicação Acústica Subaquática

O canal de comunicação acústico subaquático se diferencia das outras formas de propagação nesse meio, a eletromagnética e a óptica, pela velocidade de propagação do som na água, que é de aproximadamente  $1500\text{m/s}$ , sendo quatro vezes mais rápida que a velocidade de propagação no ar. Entretanto, essa propagação é considerada baixa e depende das características físicas do mar como pressão, densidade, temperatura e salinidade, o que torna essa velocidade variável [5]. Uma das expressões que define essa velocidade é dada pela Eq. 1 [6]:

$$c = 1449.2 + 4.6T - 0.055T^2 + 0.0029T^3 + (1.34 - 0.01T)(S - 35) + 0.06D \quad (1)$$

Em que,  $T$  representa a temperatura,  $S$  a salinidade e  $D$  a profundidade.

Para definir o canal, levamos em conta a existência de algumas características que, quando comparadas com os meios de transmissões terrestres, são completamente diferentes, sendo elas: alta latência, provocada pela velocidade de propagação do som na água, largura de banda limitada variando em relação à frequência de operação e à distância entre o emissor e receptor, ruídos, alta atenuação, desvanecimento por múltiplos caminhos e necessidade de altas potências para transmissão [7].

**Figura 43:** Artigo apresentado no ENCOM 2016 (UFC/IFCE)

## **Fabrication and operational characteristics of step-down piezoelectric transformer based on PMN-PT ceramics**

A. L. Magalhães<sup>1</sup>, A. F. Oliveira<sup>1</sup>, A. J. M. Sales<sup>2,4</sup>, F. J. A. Aquino<sup>1</sup>, D. X. Gouveia<sup>1</sup>, J. W. M. Menezes<sup>1</sup>, E. B. Araújo<sup>3\*</sup>, A. S. B. Sombra<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Federal Institute of Education, Science and Technology of Ceará, PPGET, Av. Treze de Maio 2081, 60040-531 Fortaleza – Ce, Brazil

<sup>2</sup> Department of Physics, Telecommunications and Materials Science and Engineering Laboratory (LOCEM), Federal University of Ceará, Caixa Postal 6030, 60040-531 Fortaleza – Ce, Brazil

<sup>3</sup> Department of Physics and Chemistry, São Paulo State University, 15385-000 Ilha Solteira – SP, Brazil

<sup>4</sup> Department of Physics, University of Aveiro, 3810-193 Aveiro, Portugal

### **Abstract**

A ring-type step-down piezoelectric transformer based on  $0.65\text{Pb}(\text{Mg}_{1/2}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ - $0.35\text{PbTiO}_3$  ceramic was manufactured to study its main operational characteristics through experimental measurements and numerical simulations based on the corresponding electrical equivalent circuit. The measured resonance frequency of 93.4 kHz was observed for the first vibration mode and the measured voltage gain and maximum efficiency were 0.1 and 49.3%, respectively, for the load resistance of 500  $\Omega$ . The simulated voltage gain and maximum efficiency were 44.3% and 0.1 at 733  $\Omega$ . The possible origin of the low efficiency in the studied piezoelectric transformer is discussed.

**Keywords:** Piezoelectric transformer, PMN-PT, Ceramics

**Figura 44:** Artigo submetido e aceito para publicação na revista *Journal Ferroelectrics* - Taylor and Francis 2017

## ***APÊNDICE B – Códigos de simulação no Matlab/Simulink***

Aqui serão disponibilizados os códigos utilizados na simulação do canal de comunicação acústico subaquático no *Matlab/Simulink*.

### **B.1 Bloco de Múltiplos Caminhos**

Neste bloco definimos as distâncias de cada caminho, calculamos a profundidade média, calculamos a velocidade do som na água e calculamos os atrasos de propagação para cada caminho.

```

1 function [atraso1,atraso2,atraso3,atraso4,atraso5,caminhos] =
2 calculo_atrasos(parametros_aquario,parametros_ambientais)
3 %Definir as distâncias de cada caminho do multipath;
4 %Definir a profundidade media para cada caminho do multipath;
5 %Equação para Velocidade do som na água;
6 %Atrasar o sinal de cada caminho do multipath;
7
8 %
9 % Parâmetros do aquário e do ambiente que serão utilizados no código
10 %
11
12 W = parametros_aquario(1);      %W é a largura do aquário
13 L = parametros_aquario(2);      %L é comprimento do aquário
14 D = parametros_aquario(3);      %D é a profundidade do aquário
15
16 T = parametros_ambientais(1);   %T é a temperatura da água;
17 S = parametros_ambientais(2);   %S é a salinidade da água;
18 pH = parametros_ambientais(3);  %pH é acidez da água;
19
20 %
21 % Definindo as distâncias em kilometros de cada caminho do multipath
22 % entre o emissor e o receptor

```

```

23 %
24 % distancias(1) = caminho refletido na superfície
25 % distancias(2) = caminho refletido na lateral de trás
26 % distancias(3) = caminho direto
27 % distancias(4) = caminho refletido na lateral da frente
28 % distancias(5) = caminho refletido no fundo
29 %
30
31 distancias = [0 0 0 0 0];           %em metros
32 distancias(1) = sqrt(D^2 + L^2);
33 distancias(2) = sqrt(W^2 + L^2);
34 distancias(3) = L;                  %L é comprimento do aquário
35 distancias(4) = sqrt(W^2 + L^2);
36 distancias(5) = sqrt(D^2 + L^2);
37
38 %
39 % Definindo a profundidade média(Dm) em metros para cada caminho,
40 % considerando que os transdutores estão localizados na metade do aquário
41 % e alinhados entre si.
42 %
43
44 Dm = [0 0 0 0 0];                  % em metros
45 Dm(1) = mean([D/2,0]);
46 Dm(2) = D/2;
47 Dm(3) = D/2;
48 Dm(4) = D/2;
49 Dm(5) = mean([D,D/2]);
50
51 %
52 %Equação que define a Velocidade do som na água em (m/s)
53 %
54
55 C = [0 0 0 0 0];
56 for i = 1:5 %5 caminhos
57     C(i) = 1448.96 + 4.591*T - 5.304*(10^(-2))*(T^(2))...
58           + 2.374*(10^(-4))*(T^(3)) + 1.340*(S-35) + 1.630*(10^(-2))*Dm(i)
59           ...+ 1.675*(10^(-7))*(Dm(i)^(2)) - 1.025*(10^(-2))*T*(S-35)...
60           - 7.139*(10^(-13))*T*(Dm(i)^(3));
61 end
62
63 %
64 % Definindo os atrasos em segundos para cada caminho do multipath.
65 % O atraso é descoberto através da divisão da distância em metros
66 % pela velocidade do som na água em metros/segundos.
67 %
68
69 atraso1 = distancias(1)/C(1);

```

```

70 atraso2 = distancias(2)/C(2);
71 atraso3 = distancias(3)/C(3);
72 atraso4 = distancias(4)/C(4);
73 atraso5 = distancias(5)/C(5);
74
75 caminhos = distancias;

```

## B.2 Bloco de Atenuação

Este bloco é dividido em três subsistemas: (i) perda por espalhamento geométrico, (ii) perda por absorção e (iii) perda de transmissão.

### B.2.1 Perda por Espalhamento Geométrico

```

1 function [sinal_espalhado1,sinal_espalhado2,sinal_espalhado3,...
2     sinal_espalhado4,sinal_espalhado5] = espalhamento_geometrico...
3     (k,sinal_atrasado1,sinal_atrasado2,sinal_atrasado3,...
4     sinal_atrasado4,sinal_atrasado5,caminhos)
5 % A perda por espalhamento geométrico é calculada a partir da equação da
6 % dissertação: perda_espalhamento = k * 10log(r);
7 % k = fator de espalhamento
8 % caminhos = distância em metros que o sinal percorre ao longo da
9 % propagação
10
11 % -----
12 % Equação para cálculo da perda por espalhamento geométrico
13 % (Spreading Loss)
14 % -----
15 perda_espalhamento1 = k*10*log10(caminhos(1));
16 perda_espalhamento2 = k*10*log10(caminhos(2));
17 perda_espalhamento3 = k*10*log10(caminhos(3));
18 perda_espalhamento4 = k*10*log10(caminhos(4));
19 perda_espalhamento5 = k*10*log10(caminhos(5));
20
21 % -----
22 % Equação para o espalhamento do sinal utilizando a razão normal de ganho
23 % em que G=(Pout/Pin)<1. in = sinal_atrasado*10^(perda_espalhamento/10)
24 % -----
25 sinal_espalhado1 = sinal_atrasado1.*(10^(-perda_espalhamento1/10));
26 sinal_espalhado2 = sinal_atrasado2.*(10^(-perda_espalhamento2/10));
27 sinal_espalhado3 = sinal_atrasado3.*(10^(-perda_espalhamento3/10));
28 sinal_espalhado4 = sinal_atrasado4.*(10^(-perda_espalhamento4/10));

```

```
29 sinal_espalhado5 = sinal_atrasado5.*(10^(-perda_espalhamento5/10));
```

## B.2.2 Perda por Absorção

```
1 function [alfa,sinal_absorvido1,sinal_absorvido2,sinal_absorvido3,...
2     sinal_absorvido4,sinal_absorvido5] = perda_absorcao(...
3     parametros_aquario,parametros_ambientais,frequencia,...
4     sinal_espalhado1,sinal_espalhado2,sinal_espalhado3,...
5     sinal_espalhado4,sinal_espalhado5,caminhos)
6 % Calcular o coeficiente de absorção (alfa)
7 % Calcular a perda por absorção
8 %-----
9 % Parâmetros Ambientais
10 T = parametros_ambientais(1);      % Temperatura da água
11 S = parametros_ambientais(2);      % Salinidade da água do mar
12 pH = parametros_ambientais(3);     % Acidez da água
13
14 % Parâmetro da Geometria do Aquário
15 D = parametros_aquario(3);         % Profundidade em m
16
17 %Valores dos parâmetros Para o primeiro Coeficiente de Absorção(alfa)
18 f1 = 0.78 * sqrt(S/35) * (exp(T/26)); % Ácido Bórico
19 f2 = 42 * (exp(T/17));              % Sulfato de Magnésio
20
21 %-----
22 %Equação que define Coeficiente de Absorção(alfa) para a profundidade
23 %média (Dm) em cada caminho.
24 %-----
25 frequencia = frequencia * 0.001;    %kHz
26 D = D * 0.001;                     %km
27
28 %Profundidade média do aquário
29 Dm = [0 0 0 0 0];
30 Dm(1) = mean([D/2,0]);
31 Dm(2) = D/2;
32 Dm(3) = D/2;
33 Dm(4) = D/2;
34 Dm(5) = mean([D,D/2]);
35
36 alfa = [0 0 0 0 0];
37 for i = 1:5 %5 caminhos em profundidades diferentes
38     alfa(i) = ((0.106 * (f1 * frequencia^2) * exp((pH - 8)/0.56)) / ...
39         (f1^2 + frequencia^2)) + ((0.52 * (1 + (T / 43)) * (S/35) * ...
40         (f2 * frequencia^2) * exp(-(Dm(i)/6)))/(f2^2 + frequencia^2))...
```

```

41         + (0.00049 * (frequencia^2) * (exp(-(T/27 + Dm(i)/17)))));
42 end
43
44 %-----
45 % Perda_absorção = 10log(alfa)*caminhos (km)          (dB/km)
46 %-----
47 perda_absorcao1 = 10*log10(alfa(1))*caminhos(1)*0.001;
48 perda_absorcao2 = 10*log10(alfa(2))*caminhos(2)*0.001;
49 perda_absorcao3 = 10*log10(alfa(3))*caminhos(3)*0.001;
50 perda_absorcao4 = 10*log10(alfa(4))*caminhos(4)*0.001;
51 perda_absorcao5 = 10*log10(alfa(5))*caminhos(5)*0.001;
52
53 %-----
54 % Equação para a absorção do sinal utilizando a razão normal de ganho
55 % em que  $G=(P_{out}/P_{in}) < 1$ 
56 %  $in = sinal\_espalhado * 10^{(atenuacao/10)}$ 
57 %-----
58 sinal_absorvido1 = sinal_espalhado1.*(10^(-perda_absorcao1/10));
59 sinal_absorvido2 = sinal_espalhado2.*(10^(-perda_absorcao2/10));
60 sinal_absorvido3 = sinal_espalhado3.*(10^(-perda_absorcao3/10));
61 sinal_absorvido4 = sinal_espalhado4.*(10^(-perda_absorcao4/10));
62 sinal_absorvido5 = sinal_espalhado5.*(10^(-perda_absorcao5/10));

```

### B.2.3 Perda de Transmissão

```

1 function [perda_transmissao1,perda_transmissao2,perda_transmissao3,...
2         perda_transmissao4,perda_transmissao5] = transmission_loss(k,...
3         alfa,caminhos)
4 % r = caminho = distância (m)
5 % alfa = coeficiente de absorção (dB/km)
6
7 %A equação que define a perda de transmissão para ambientes de águas
8 %rasas é dada pela expressão:
9 %TL = SL + AL (dB)
10 %-----
11 %perda_transmissao = perda_espalhamento + perda_absorcao (dB)
12 perda_transmissao1 = 10*log10(10^((k*10*log10(caminhos(1)))/10) + ...
13     10^((10*log10(alfa(1))*caminhos(1)*0.001)/10));
14 perda_transmissao2 = 10*log10(10^((k*10*log10(caminhos(2)))/10) + ...
15     10^((10*log10(alfa(2))*caminhos(2)*0.001)/10));
16 perda_transmissao3 = 10*log10(10^((k*10*log10(caminhos(3)))/10) + ...
17     10^((10*log10(alfa(3))*caminhos(3)*0.001)/10));
18 perda_transmissao4 = 10*log10(10^((k*10*log10(caminhos(4)))/10) + ...
19     10^((10*log10(alfa(4))*caminhos(4)*0.001)/10));

```

```

20 perda_transmissao5 = 10*log10(10^((k*10*log10(caminhos(5)))/10) + ...
21     10^((10*log10(alfa(5))*caminhos(5)*0.001)/10));

```

## B.3 Bloco de Ruídos

Neste bloco definimos os ruídos presente no meio subaquático, calculamos o ruído que influencia diretamente a frequência do transdutor projetado, encontramos a densidade espectral de potência desse ruído e calculamos a relação sinal ruído em decibéis.

### B.3.1 Ruído Ambiental

```

1 function ruido_total = ruido_ambiente(frequencia,n,v)
2 %
3 % Parâmetros de entrada do ruido ambiental
4 %
5 f = frequencia;           % frequência (kHz);
6 % n = inserido como constante % fator de navegação(entre 0 – 1);
7 % v = inserido como constante % velocidade do vento (m/s);
8
9 %
10 % Ruído de Turbulência definido pela Equação (dB) (influencia
11 % frequências < 10 Hz)
12 %
13 Nt = (10^((17-30*log10(f))/10));
14
15 %
16 % Ruído de Navegações definido pela Equação (dB) (influencia
17 % frequências entre 10 – 100 Hz)
18 %
19 Ns = (10^((40+(20*(n-0.5)))+(26*log10(f))-(60*log10(f+0.03)))/10));
20
21 %
22 % Ruído das Ondas ou Agitação de Superfície
23 % definido pela Equação(dB)
24 % (influencia frequências entre 100 Hz – 100 kHz)
25 %
26 Nw = (10^((50+(7.5*(v^(1/2)))+(20*log10(f))-(40*log10(f+0.4)))/10));
27
28 %
29 % Ruído Térmico definido pela Equação(dB)
30 % (influencia frequências > 100 kHz)
31 %

```

```

32 Nth = (10^((-15+20*log10(f))/10));
33
34 %-----
35 % Ruído Total definido pelo somatório de todos os ruídos ambientais (dB)
36 %-----
37 ruido_total = Nw;

```

### B.3.2 Análise da Densidade Espectral de Potência do Ruído em dB

```

1 %% Escrito por André Fontes de Oliveira em 2018
2 % Códigos de simulação do MatLab/Simulink de blocos do Simulink para
3 % Dissertação de Mestrado.
4 % "MODELO DE SIMULAÇÃO PARA UM CANAL DE COMUNICAÇÃO ACÚSTICO SUBAQUÁTICO
5 % COM TRANSDUTORES PIEZOELÉTRICOS"
6 % Mestrado em Engenharia de Telecomunicações
7 % Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Telecomunicações – PPGET
8 % Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Ceará – IFCE
9 % Orientação do Prof. Dr. Francisco José Alves de Aquino
10 %-----
11 % Esse código analisa a densidade espectral de potencia – DSP do ruído
12 % em decibéis (dB) presente no canal de comunicação do arquivo
13 % sistema_cas_oficial.slx
14 %%
15 close all
16
17 t = 1:9000;
18 sinal_sem_ruído = getdatasamples(semruído,[t]); %sinal sem ruído
19 sinal_com_ruído = getdatasamples(comruído,[t]); %sinal com ruído
20
21 L = size(t);
22 L = L(2);
23 Fs = 1/1000000; % frequência de amostragem
24 a = 10^9;
25 f = a*Fs*(0:(L/2))/L;
26
27 % Sinal sem ruído
28 Ysem = fft(sinal_sem_ruído);
29 P2 = abs(Ysem/L);
30 P1 = P2(1:L/2+1);
31 P1(2:end-1) = 2*P1(2:end-1);
32 dB=mag2db(P1);
33
34 figure
35 plot(f,dB,'k')

```

```

36 grid on
37 title('Densidade Espectral de Potência do Sinal sem o Ruído')
38 xlabel('Frequência (kHz)')
39 ylabel('Amplitude do Sinal sem Ruído (dB)')
40
41 % Só ruído
42 X = sinal_com_ruído - sinal_sem_ruído;
43
44 Yruído = fft(X);
45 P2 = abs(Yruído/L);
46 P1 = P2(1:L/2+1);
47 P1(2:end-1) = 2*P1(2:end-1);
48 dB=mag2db(P1);
49
50 figure
51 plot(f,dB,'k')
52 grid on
53 title('Densidade Espectral de Potência do Ruído')
54 xlabel('Frequência (kHz)')
55 ylabel('Amplitude do Ruído (dB)')
56
57 % Sinal com ruído
58 Ycom = fft(sinal_com_ruído);
59 P2 = abs(Ycom/L);
60 P1 = P2(1:L/2+1);
61 P1(2:end-1) = 2*P1(2:end-1);
62 dB=mag2db(P1);
63
64 figure
65 plot(f,dB,'k')
66 grid on
67 title('Densidade Espectral de Potência do Sinal com o Ruído')
68 xlabel('Frequência (kHz)')
69 ylabel('Amplitude do Sinal com Ruído (dB)')

```

### B.3.3 Análise da Relação Sinal Ruído em dB

```

1 %% Escrito por André Fontes de Oliveira em 2018
2 % Códigos de simulação do MatLab/Simulink de blocos do Simulink para
3 % Dissertação de Mestrado.
4 % "MODELO DE SIMULAÇÃO PARA UM CANAL DE COMUNICAÇÃO
5 % ACÚSTICO SUBAQUÁTICO COM TRANSDUTORES PIEZOELÉTRICOS"
6 % Mestrado em Engenharia de Telecomunicações
7 % Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Telecomunicações – PPGET

```

```
8 % Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Ceará – IFCE
9 % Orientação do Prof. Dr. Francisco José Alves de Aquino
10 %
11 % Esse código analisa a potência do sinal acústico antes de receber o
12 % ruído e a potência do sinal acústico depois de receber o ruído
13 % presente no canal de comunicação do arquivo sistema_cas_oficial.slx.
14 % A função SNR retorna a relação sinal-ruído em decibéis do sinal
15 % A relação sinal ruído (Signal-to-Noise Ratio – SNR) do sistema de
16 % comunicação retorna um valor em decibéis obtido através da razão da
17 % potência do sinal acústico gerado pelo transdutor, x, calculando a
18 % razão de sua magnitude quadrática somada à do ruído, y.
19 %%
20 close all
21
22 t = 1:9000;
23 x = getdatasamples(semruído,[t]); %valores no sinal sem ruído
24 %plot(x)
25 s = getdatasamples(comruído,[t]); %valores do sinal sem ruído
26 %figure
27 %plot(s,'r')
28
29 SNR = snr(x,s-x);
```