

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE  
ESCOLA DE ENGENHARIA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO  
EM ENGENHARIA ELÉTRICA E DE TELECOMUNICAÇÕES

SYDNEY BRAGANTINE GERMANO

Rastreamento de Feixe Ultrassônico por Triangulação  
Utilizado em Comunicação Subaquática

Niterói  
2015

# Rastreamento de Feixe Ultrassônico por Triangulação Utilizado em Comunicação Subaquática

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre.

Área de Concentração: Sistemas de Telecomunicações.

Orientador: Prof. Dr. Andrés Pablo Lopez Barbero

Co-orientador: Prof. Dr. Vinícius Nunes Henrique Silva

Niterói  
2015

Ficha Catalográfica elaborada pela Biblioteca da Escola de Engenharia da UFF

G373 Germano, Sydney Bragantine  
Rastreamento de feixe ultrassônico por triangulação  
utilizado em comunicação subaquática/Sydney Bragantine  
Germano – Niterói, RJ: [s.n], 2015  
83 fls.

Dissertação (Mestrado em Engenharia de Telecomunicações)  
– Universidade Federal Fluminense – 2015.

1. Sistema de Telecomunicações. 2. Comunicações  
Subaquáticas 3. Turbulência. I. Título

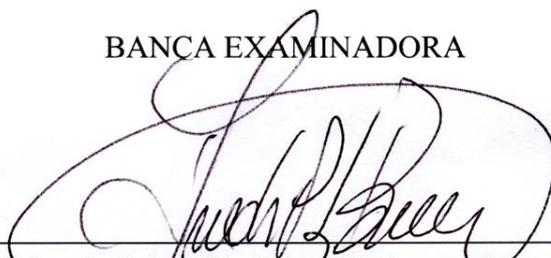
CDD 621-382

Niterói  
2015

# Rastreamento de Feixe Ultrassônico por Triangulação Utilizado em Comunicação Subaquática

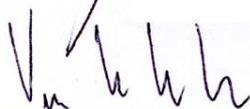
Aprovado em 29 de setembro de 2015

BANCA EXAMINADORA



---

Prof. Dr. Andrés Pablo López Barbero - Orientador  
Universidade Federal Fluminense



---

Prof. Dr. Vinícius Nunes Henrique Silva – Co-orientador  
Universidade Federal Fluminense



---

Prof. Dr. Alexandre Bessa  
Universidade Federal de Juiz de Fora

Niterói  
2015

## **DEDICATÓRIA**

*Dedico este trabalho ao Senhor Deus, aos meus familiares e amigos, aos colegas do LaCOp, aos professores e a todos os funcionários do Curso de Mestrado em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações da UFF.*

Niterói  
2015

## **AGRADECIMENTOS**

Ao meu SENHOR e DEUS, pois é Ele quem me dá forças e ânimo para vencer as batalhas da vida e para continuar a jornada pessoal e profissional.

Em particular às minhas filhas Gisele R. Germano e Vivian R. Germano, à minha esposa Maria de Fatima R. Germano e à minha mãe Therezinha B. Germano, pelo apoio incondicional, inclusive nos muitos momentos de minha ausência.

Aos meus irmãos Sérgio B. Germano e Selma G. Dibo que concorreram com seu apoio nesta jornada.

Ao Prof. Msc. Odair S. Xavier, a quem palavras não bastam para agradecer pela sua amizade incondicional.

Aos meus orientadores, Prof. Dr. Andrés Pablo L. Barbero e Prof. Dr. Vinicius N. H. da Silva, sempre dispostos a me auxiliar em todos os aspectos deste trabalho, sanando minhas dúvidas e balizando-me o caminho, sem o que não teria conseguido levar a termo com sucesso este trabalho.

A Prof. Dra. Leni Joaquim de Matos, por toda ajuda que me prestou neste período, tanto como professora quanto como coordenadora do curso.

Aos Prof. Dra. Vanessa P. R. Magri, Prof. Dr. Ricardo Olivares, Prof. MSc. Wagner S. Zanco e Prof. Dr. Ricardo M. Ribeiro, que me apoiaram e ajudaram em diversas ocasiões.

Ao Msc. Luiz Fernando da Silva, ao MSc. Gúbio de Oliveira, ao Eng. Presley X. Neto, Mestrando no LaCOP, ao Instrutor Técnico em Mecânica Pedro L. Flores, à Filóloga Regina Laura Quitete, da PUC e aos demais colegas do LaCOP, que sempre me ajudaram nas dificuldades do dia a dia e me incentivaram até aqui a prosseguir na jornada e a vencer todas as etapas deste curso de Mestrado.

Finalmente, mas não menos importante, ao Engenheiro Theógenes de O. Maia, do Centro Tecnológico do Exército, pelo seu precioso tempo e pela inestimável e desinteressada ajuda, prestada em vários pontos deste trabalho.

O autor agradece a CAPES pela bolsa auxílio e a FAPERJ pelo subsídio parcial deste trabalho.

A todos estes,

Muito Obrigado.

Niterói  
2015

# REFLEXÃO

Quanto mais estudo, mais observo o quanto ao Homem falta aprender.

João 8:32

*“Conhecereis a verdade e a Verdade vos libertará”*

Niterói  
2015

## RESUMO

As comunicações ultrassônicas submarinas, tais como as comunicações a laser no espaço livre, sofrem influências de vários fatores aleatórios que degradam o sinal transmitido e degradam a qualidade da comunicação. Entre esses fatores, o que mais se destaca é a influência que as turbulências provocam no feixe portador de informações, seja ele óptico ou acústico, pois essas promovem uma divagação direcional nesse mesmo feixe, desviando-o da direção do receptor. Busca-se aqui validar a detecção da posição espacial do ponto de maior potência de um feixe ultrassônico direcional. Para determinar-se tal posição, é lançada mão de um sistema de triangulação por sensores ultrassônicos específicos e independentes do receptor do sistema de comunicação. Buscando mostrar a validade desta hipótese, são mostrados os esforços históricos levados a efeito com o objetivo de se criar tanto conhecimento científico quanto de elaborar aplicações práticas as mais diversas para o ultrassom nos meios subaquáticos e, principalmente, nos meios submarinos. Também é mostrado o desenvolvimento teórico que norteia este trabalho, comparando-o, tanto quanto o tomando como base, para o desenvolvimento experimental, comparando e analisando, no final do trabalho, suas diferenças para decidir a validade da hipótese como prova de princípio que norteie desenvolvimentos futuros. Para realização do trabalho experimental foi definido que ele seria desenvolvido exclusivamente em condições de laboratório, admitindo-se então todas as restrições que advêm deste ambiente, desde que elas não se tornem empecilho para se obterem resultados verdadeiros.

**Palavras-chave:** Acústico, *Beam Wander*, Comunicações Subaquáticas, Comunicações Submarinas, Detecção, Engenharia Elétrica, Guiamento, Rastreamento, Óleo & Gás, ROV, Telecomunicações, Transdutor, Turbulência, Ultrassom.

## **ABSTRACT**

Underwater ultrasonic communications, such as laser Free Space Optics communications, are influenced by many random factors that degrade the transmitted signal and the quality of communication. Among these factors, what most stands out is the influence caused by turbulence in the carrier beam information, whether optical or acoustic, because it lay on a directional wandering in the same beam, deflecting it from the direction of the receiver. Here we seek to validate the detection of the spatial position of the point of greatest power of a directional ultrasonic beam. To determine this position, was used a triangulation system for tree special ultrasonic sensors, regardless of the communication system receiver. Trying to show the validity of this hypothesis, the historical efforts are shown carried out with the aim of creating both scientific knowledge and, at same time, to develop practical applications for ultrasound in underwater means and mainly in submarines means. Also shown, is the theoretical development that guides this work, comparing it as far as taking it as a basis for experimental development, comparing and analyzing, at the end of this work, their differences to decide the validity of the hypothesis as proof of principle that give direction to future developments. To carry out the experimental work, was defined that it would be developed only under laboratory conditions; taking on all restrictions arising from this environment, provided that they do not become a cumber to obtain truth results.

**Keywords:** Acoustic, Beam Wander, Detection, Electric Engineering, Guidance, Oil & Gas, ROV, Telecommunications, Transducer, Turbulence, Ultra-sound, Undersea Communications, Underwater Communications, Underwater Measurements.

# Sumário

1.	INTRODUÇÃO .....	1
1.1.	HISTÓRICO DAS COMUNICAÇÕES SUBAQUÁTICAS .....	1
1.2.	MOTIVAÇÃO .....	3
1.3.	O PROBLEMA E SUA ORIGEM .....	4
1.4.	O OBJETIVO .....	4
1.5.	ABRANGÊNCIA DA PESQUISA.....	5
1.6.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	5
1.7.	METODOLOGIA .....	6
1.8.	ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO.....	6
2.	FUNDAMENTOS TEÓRICOS .....	8
2.1.	SOM E ULTRASSOM .....	8
2.2.	ONDAS SONORAS NA ÁGUA.....	10
2.3.	A EQUAÇÃO DA ONDA .....	11
2.4.	EQUAÇÃO DA CONTINUIDADE DO FLUXO .....	12
2.5.	RELAÇÃO ENTRE A EQUAÇÃO DA ONDA E A DA CONTINUIDADE DO FLUXO .....	13
2.6.	A VELOCIDADE DO SOM (VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DA ONDA SONORA) .....	15
2.7.	ABSORÇÃO E PROPAGAÇÃO DO SOM NA ÁGUA .....	17
3.	TURBULÊNCIA SUBAQUÁTICA.....	19
3.1.	AS ORIGENS DA TURBULÊNCIA .....	19
3.2.	TÉCNICA PARA MEDIÇÃO DA TURBULÊNCIA SUBAQUÁTICA .....	21
3.3.	ANÁLISE QUALITATIVA DA TÉCNICA.....	25
3.4.	ANÁLISE QUANTITATIVA DA TÉCNICA.....	28
3.5.	DISPOSIÇÃO DOS RECEPTORES NO CONJUNTO DE TRIANGULAÇÃO .....	29
3.6.	LOCALIZAÇÃO DO FEIXE NO PLANO DOS RECEPTORES .....	31
4.	DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL .....	32
4.1.	DIFERENÇAS ENTRE TRANSDUTOR E SENSOR .....	32
4.2.	A SOLUÇÃO CONFINADA - CONSIDERAÇÕES .....	33
4.3.	TRANSDUTORES ULTRASSÔNICOS .....	33
4.4.	CAMPO IRRADIADO POR TRANSDUTORES PIEZELÉTRICOS .....	34
4.5.	CONFIGURAÇÕES E PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS .....	35

4.6.	SELEÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS TRANSDUTORES.....	39
4.6.1.	ACOPLAMENTO PRELIMINAR.....	39
4.6.2.	EXCITAÇÃO E MEDIÇÃO.....	40
4.6.3.	CARACTERIZAÇÃO BACK TO BACK.....	41
4.7.	MONTAGEM DOS SUPORTES DOS TRANSDUTORES NO RESERVATÓRIO.....	43
4.8.	POSICIONAMENTO PARA CARACTERIZAÇÃO NO RESERVATÓRIO.....	47
4.9.	RESPOSTAS DOS TRANSDUTORES.....	48
4.10.	CONFIGURAÇÃO PARA TRIANGULAÇÃO.....	53
5.	RESULTADOS.....	58
5.1.	AVALIAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	58
6.	CONCLUSÃO.....	66
6.1.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	66
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	71
8.	BIBLIOGRAFIA ADICIONAL.....	74
9.	ANEXOS.....	76
ANEXO I	76	
ANEXO II	77	
ANEXO III	78	
ANEXO IV	79	
ANEXO IV	80	
ANEXO V	81	
ANEXO VI	82	
ANEXO VII	83	

# ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1: PRIMEIRA TENTATIVA DE DETERMINAR A VELOCIDADE DO SOM NA ÁGUA .	2
FIGURA 2: REGINALD FESSENDEN E O OSCILADOR FESSENDEN.	3
FIGURA 3: PERFIL DA CURVA GAUSSIANA	4
FIGURA 4: ESCALA DE CLASSIFICAÇÃO DOS SONS.	9
FIGURA 5: VARIAÇÃO DA VELOCIDADE DO SOM NA ÁGUA COMO FUNÇÃO DA PROFUNDIDADE.	18
FIGURA 6: TURBULÊNCIA PRODUZIDA POR UM TUBO DE PITOT EM UM MEIO LÍQUIDO, COM OS FLUIDOS PORTANTE E PORTADO EM TEMPERATURAS DIFERENTES ENTRE SI.(WWW.OZENINC.COM)	20
FIGURA 7: BEAM WANDER (DIVAGAÇÃO DO FEIXE) EM RELAÇÃO A SUA DIREÇÃO ORIGINAL	21
FIGURA 8: DETERMINAÇÃO LIMITADA DA POSIÇÃO DO FEIXE USANDO SÓ UM RECEPTOR	23
FIGURA 9: DETERMINAÇÃO LIMITADA DA POSIÇÃO DO FEIXE USANDO DOIS RECEPTORES	23
FIGURA 10: DETERMINAÇÃO LIMITADA DA POSIÇÃO DO FEIXE USANDO TRÊS RECEPTORES	24
FIGURA 11: ARRANJO DOS TRANSDUTORES COM O FEIXE INCIDINDO NO CENTRO.	27
FIGURA 12: FEIXE AFASTADO DE SUA POSIÇÃO IDEAL (CENTRAL).	27
FIGURA 13: SINAIS NOS RECEPTORES ALINHADOS (ESQ.) E DESALINHADOS (DIR.)	28
FIGURA 14: LEITURA DOS VALORES MÁXIMOS DOS SINAIS DE CADA RECEPTOR.	29
FIGURA 15: VISTA INTERNA DE TRANSDUTOR PIEZELÉTRICO NORMAL.	34
FIGURA 16: FORMATO PADRÃO DO CAMPO ULTRASSÔNICO.	34
FIGURA 17: PADRÃO DE INTERFERÊNCIA NO EIXO Z EM UM TRANSDUTOR.	35
FIGURA 18: MONTAGEM DO ACOPLAMENTO BACK-TO-BACK DE TRANSDUTORES.	35
FIGURA 19: TRANSDUTOR COM GEL DE ACOPLAMENTO DA SUPERFÍCIE	36
FIGURA 20: SETUP PARA CARACTERIZAÇÃO DE TRANSDUTORES.	36
FIGURA 21: ALINHAMENTO GRAU ZERO ENTRE TRANSMISSOR E RECEPTOR.	36
FIGURA 22: CARACTERIZAÇÃO COM DESLOCAMENTO ANGULAR DO RECEPTOR.	37
FIGURA 23: CARACTERIZAÇÃO DA DIFERENÇA ENTRE SENSIBILIDADE À POLARIZAÇÃO HORIZONTAL E À VERTICAL	37
FIGURA 24: ILUSTRAÇÃO MOSTRANDO A DIFERENÇA ENTRE O DESLOCAMENTO HORIZONTAL E VERTICAL	38
FIGURA 25: TRANSDUTOR OLYMPUS A PROVA D'ÁGUA.	39
FIGURA 26: DOIS TRANSDUTORES MANTIDOS ALINHADOS POR ELOS ELÁSTICOS EM UMA GUIA E ACOPLADOS POR GEL.	40
FIGURA 27: SEQUÊNCIA DE OPERAÇÕES PARA ACOPLAMENTO BACK TO BACK DE DOIS TRANSDUTORES.	40
FIGURA 28: GERADOR DE SINAIS ARBITRÁRIOS UTILIZADO NOS EXPERIMENTOS.	40
FIGURA 29: OSCILOSCÓPIO DIGITAL UTILIZADO NOS EXPERIMENTOS.	40

FIGURA 30: TRANSDUTOR DE 500 KHZ. TABELA DE DADOS COLETADOS E RESPECTIVA CURVA. ....	41
FIGURA 31: TRANSDUTOR DE 1MHZ. TABELA DE DADOS COLETADOS E RESPECTIVA CURVA. ....	42
FIGURA 32: TRANSDUTOR DE 2,25 MHZ. TABELA DE DADOS COLETADOS E RESPECTIVA CURVA. ....	42
FIGURA 33: TRANSDUTOR DE 3,5 MHZ. TABELA DE DADOS COLETADOS E RESPECTIVA CURVA. ....	42
FIGURA 34: TRANSDUTOR DE 5 MHZ. TABELA DE DADOS COLETADOS E RESPECTIVA CURVA.....	42
FIGURA 35: CUBA DE VIDRO E APETRECHOS PARA PRESERVAÇÃO DA QUALIDADE DA ÁGUA. ....	43
FIGURA 36: CAIXA DE MADEIRA IMPERMEABILIZADA, PARA COMPORTAR MICRO ESFERAS DE VIDRO.....	44
FIGURA 37: SUPORTE PARA ALINHAMENTO DOS TRANSDUTORES. (A) MONTAGEM INICIAL DOS SUPORTES E (B), (C), (D), (E) PRÉ-ALINHAMENTO SOBRE O RESERVATÓRIO. ....	44
FIGURA 38: SUPORTE PARA ALINHAMENTO DOS TRANSDUTORES FIXADO AO RESERVATÓRIO, COM TRANSDUTORES ALINHADOS E SEPARADOS PELA DISTÂNCIA MÉDIA CALCULADA.....	46
FIGURA 39: VISTA DA ESCALA CIRCULAR GRADUADA AJUSTÁVEL E DETALHE DA ESCALA. ....	46
FIGURA 40 : A) SUPORTE ADICIONAL COM DOIS EIXOS PARALELOS PARA GARANTIR A REPETIBILIDADE DE POSICIONAMENTO DO TRANSMISSOR.....	47
FIGURA 41: POSICIONAMENTO PARA CARACTERIZAÇÃO DOS TRANSDUTORES A TRÊS DISTÂNCIAS DISTINTAS. ....	48
FIGURA 42: CURVA DE RESPOSTA NORMALIZADA DOS TRANSDUTORES DE 500 KHZ, 1 MHZ, 2,25 MHZ, 3,5 MHZ E 5 MHZ – VISTA COMPLETA DAS CURVAS, PARA ALÉM DE SEUS ÂNGULOS ÚTEIS. ....	49
FIGURA 43: CURVA DE RESPOSTA NORMALIZADA DOS TRANSDUTORES - VISUALIZAÇÃO LIMITADA A $\pm 10$ GRAUS. ....	49
FIGURA 44: RESPOSTA NATURAL, NÃO NORMALIZADA, COMPARATIVA DOS TRÊS RECEPTORES DE 500KHZ, EM TODO O RANGE DE VARIAÇÃO ANGULAR TESTADA. NOTE-SE A DIFERENÇA ENTRE OS GANHOS DOS RECEPTORES ....	50
FIGURA 45: RESPOSTAS DOS RECEPTORES $R_1$ , $R_2$ E $R_3$ NÃO NORMALIZADOS, ACENTUANDO AS DIFERENÇAS DE SEUS GANHOS E A NECESSIDADE DE EQUILIBRÁ-LOS ANTES DA NORMALIZAÇÃO. ....	51
FIGURA 46: COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS DO DESLOCAMENTO LATERAL RELATIVO E O DESLOCAMENTO ANGULAR ENTRE TRANSMISSOR E RECEPTOR (VER TABELA I) ....	52
FIGURA 47: CONVERSÃO DE ÂNGULO EM DESLOCAMENTO ....	52
FIGURA 48: DIMENSÕES DO CONJUNTO DE TRANSDUTORES. ....	53
FIGURA 49: CURVAS DE RESPOSTAS DOS RECEPTORES $R_1$ , $R_2$ E $R_3$ , COM $Z=54$ CM E $Y=4,7$ CM. ....	54
FIGURA 50: O PONTO DE EQUILÍBRIO DE DETECÇÃO DOS SENSORES NÃO COINCIDE COM O CENTRO GEOMÉTRICO DO CONJUNTO. ....	54
FIGURA 51: TRANSDUTORES DENTRO DO RESERVATÓRIO, A NOVA DISTÂNCIA. ....	55
FIGURA 52: RESPOSTAS DOS TRÊS RECEPTORES MONTADOS EM TRIÂNGULO, COM SUAS AMPLITUDES EQUALIZADAS E DISTANDO 54 CM DO TX. ....	56
FIGURA 53: RESPOSTA DOS TRÊS RECEPTORES AO DESLOCAMENTO LATERAL DO TX A 54 CM DE DISTÂNCIA DOS RECEPTORES ....	60
FIGURA 54: ZOOM NA CURVA DA FIGURA 53, PERMITINDO OBSERVAR MAIS DETALHES ....	60

FIGURA 55: GRÁFICO DA DIVAGAÇÃO DO FEIXE CONFORME O SOFTWARE MATHEMATICA. ....	61
FIGURA 56: SOLUÇÃO GRÁFICA PARA TX EM 24 CM. ....	62
FIGURA 57: SOLUÇÃO GRÁFICA PARA TX EM 28 CM. ....	62
FIGURA 58: SOLUÇÃO GRÁFICA PARA TX EM 30 CM. ....	63
FIGURA 59: SOLUÇÃO GRÁFICA PARA TX EM 33 CM. ....	63
FIGURA 60: GRÁFICO DO ERRO ENTRE AS LOCALIZAÇÕES EFETIVA E CALCULADA, PARA O CENTRO DO FEIXE .....	64
FIGURA 61: GRÁFICO DO ERRO ENTRE LOCALIZAÇÃO EFETIVA E CALCULADA PARA O CENTRO DO FEIXE EM PERCURSO RESTRITO .....	64
FIGURA 62: VALOR DE $Y_0$ TAL QUE $X_0$ ESTÁ ENTRE 30 E 34 CM. EM VERMELHO ESTÁ SUA CURVA DE TENDÊNCIA .....	65
FIGURA 63: RECEPTOR BASEADO EM PARÁBOLA E FIBRA ÓPTICA COM REDE DE BRAGG .....	68
FIGURA 64: RECEPTOR BASEADO EM FIBRA ÓPTICA E MULTIPARÁBOLA .....	68

## ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 1: TABELA NORMALIZADA DA RESPOSTA DOS TRANSDUTORES .....	76
TABELA 2: COMPARAÇÃO ENTRE DESLOCAMENTO LATERAL E ANGULAR.....	77
TABELA 3: CURVAS DE RESPOSTAS DOS RECEPTORES $R_1$ , $R_3$ E $R_2$ NORMALIZADOS.....	78
TABELA 4: VALORES DE $POI$ E $WI$ PARA UMA POSIÇÃO ESPECÍFICA DE $T$ .....	79
TABELA 5: DADOS PARA O CÁLCULO DOS VALORES DE $W$ E DOS ALCANCES DE LEITURA DOS RECEPTORES.....	80
TABELA 6: POSIÇÕES CALCULADAS PARA O CENTRO DO FEIXE E SEUS RESPECTIVOS ERROS.....	81
TABELA 7: VELOCIDADES DO SOM EM DIVERSOS MEIOS .....	82
TABELA 8: COMPRIMENTOS DE ONDA ACÚSTICA NA ÁGUA.....	82

## LISTA DE ACRÔNIMOS

$C_0$  = Ponto geométrico central do conjunto de receptores

$CW$  = Continuous Wave (sinal contínuo)

$FSO$  = Free Space Optics (Óptica no Espaço Livre)

$h$  = profundidade, em metros; (entre 0 to 8.000 m).

$P_i$  = Potência lida no receptor  $i$  para qualquer posição de  $T_x$  no eixo  $x$

$P_{0i}$  = Potência máxima detectável no ponto central do receptor  $i$

$P_{01}$  = Potência máxima detectável no ponto central do receptor 1

$P_{02}$  = Potência máxima detectável no ponto central do receptor 2

$P_{03}$  = Potência máxima detectável no ponto central do receptor 3

$R$  = Transdutor Receptor

$R_i$  = Transdutor Receptor índice  $i$

$R_1$  = Transdutor Receptor 1

$R_2$  = Transdutor Receptor 2

$R_3$  = Transdutor Receptor 3

$R$  = Coeficiente de reflexão (percentual da energia refletida)

$s$  = salinidade em partes por milhar; (entre 25e 40 partes por milhar, com maior incidência por volta de 37).

$SSC$  = Submarine Signal Company

$t$  = temperatura, em °C; (entre 2 to 30 °C).

$\tau$  = Temperatura da água, em °C;

$T$  = Período da onda e tempo

$TX$  = Transdutor Transmissor

$TX_i$  = Transdutor Transmissor índice  $i$

$TX_1$  = Transdutor Transmissor 1

$TX_2$  = Transdutor Transmissor 2

$TX_3$  = Transdutor Transmissor 3

$x_i, y_i$  = Posição do centro de  $R_i$

$x_o, y_o$  = Posição do centro do feixe de  $T$

$v$  = velocidade de propagação da onda;

$v_m$  = velocidade

$z$  = direção de propagação da onda

$z_1$  = Impedância acústica do meio 1

$z_2$  = Impedância acústica do meio 2

$\Delta\ell$  = distância percorrida pela onda;

$\Delta T$  = tempo decorrido desde o início até o término da passagem da onda.

$\lambda$  = comprimento de onda

$\rho_m$  = densidade

# 1. INTRODUÇÃO

Este Capítulo apresenta uma revisão histórica do desenvolvimento da tecnologia ultrassônica para aplicações submarinas. Aborda a motivação para a eleição do tema do trabalho, expõe o problema a ser resolvido e sua origem, explana o objetivo do trabalho, discute a solução a ser testada e a limitação de escopo do trabalho, apresenta a revisão bibliográfica e a forma como ele foi organizado.

## 1.1. Histórico das Comunicações Subaquáticas

Há cerca de 2000 anos o filósofo grego Aristóteles (384 AC a 322 AC), observou e registrou como o som se propaga sob a água (Alegre, 2003) e (Correa Junior, 2008).

No final do século XV, Leonardo Da Vinci propôs que, usando-se um tubo submerso, seria possível perceber a presença de navios que estivessem se movimentando, mesmo a longas distâncias.

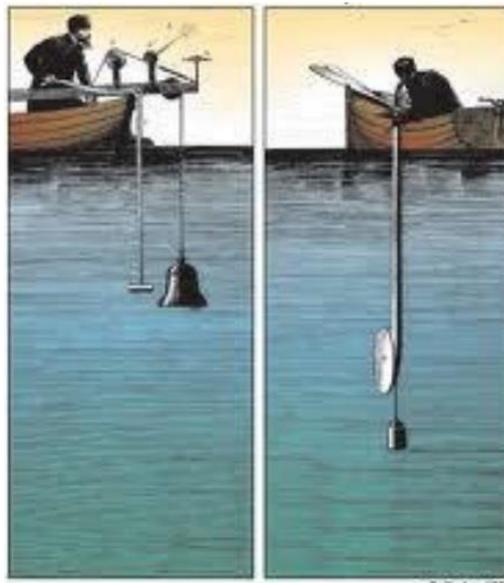
Em 1620, Marin Mersénne e Galilleu, trabalhando isoladamente, descobriram as leis que regem o comportamento das Cordas Vibrantes. Suas observações a respeito da natureza e do comportamento do som no ar e de suas então recentes medições experimentais durante os anos 1600 são hoje considerados os fundamentos da acústica (DA SILVA-1999).

Em 1687, Sir Isaac Newton, em seu trabalho intitulado “*Philosophiae Naturalis Principia mathematica*”, publicou a primeira teoria matemática sobre como o som se propaga (Donoso, José - IFSC).

Em 1743, Abbé J.A. Nollet executou, uma série de experimentos para determinar se realmente o som podia ou não se propagar através da água e então, com a cabeça submersa, conseguiu perceber o som de um tiro, de um sino, de um assobio e de um grito. Em seus experimentos ele também notou que o alarme de um relógio poderia ser percebido por um observador submerso a uma distância tal que já não podia ser ouvido no ar, demonstrando claramente que o som consegue se propagar através da água (CLAUS - 2014).

Em 1826, o físico suíço Daniel Colladon e o matemático francês Charles François Sturm conseguiram, no Lago Genebra, na Suíça, efetuar a primeira medição quantitativa da velocidade do som na água. Seguindo as sugestões de Da Vinci, colocaram um longo tubo de auscultação na água e mediram o quão rápido o som de um sino submerso se propagava através do Lago Genebra, conforme é mostrado na Figura 1. (CORREA JUNIOR - 2008). Eles usaram como referência

inicial a luz de um flash de pólvora disparado ao mesmo tempo em que o sino era tocado. Medindo o tempo entre a percepção visual do flash e a percepção auditiva do som do sino, conseguiram determinar a velocidade do som na água doce naquelas condições experimentais. Eles observaram também que a temperatura da água estava a 8 °C, determinando que, naquelas condições, a velocidade do som na água era de 1435 metros por segundo. Suas publicações também relatam os resultados obtidos por François Sulpice Beldant, para a velocidade do som na água do mar como sendo aproximadamente 1.500 m/s(DONOSO-2014), (WHO-2014), (DOSITS-2015).



**Figura 1:** Primeira tentativa de determinar a velocidade do som na água .

Em 1878 John Willian Strut, nome verdadeiro de Lord Rayleigh, foi o primeiro a formular a equação da onda, uma forma matemática de descrever ondas sonoras, que serve de base para todo trabalho em acústica. Este seu trabalho determina o início do desenvolvimento da ciência e da aplicação da acústica subaquática do século XX (STRUTT - 2015).

Em 1912, Reginald A. Fessenden propôs substituir as fontes de sinais de alerta submarinos (sinos) por geradores eletroacústicos de maior potência. Mais tarde Fessen projetou um dispositivo de Echo Ranging que se assemelhava a um autofalante de alta potência e que conseguia tanto emitir quanto detectar sons subaquáticos, sendo mais tarde apelidado de “Oscilador Fessenden” e que pode ser observado na Figura 2 (BELROSE-2009).



**Figura 2:** Reginald Fessenden e o oscilador Fessenden.

## **1.2. Motivação**

A comunicação subaquática por ultrassom pode ser estabelecida entre pontos que estejam vários quilômetros distantes entre si, elegendo esse processo como o mais adequado às comunicações entre navios ou plataformas de prospecção e exploração de petróleo, em operações submarinas em grandes profundidades tais como posicionamento de equipamentos (Schneider & Schmidt), geolocalização (Digulescu et al), controle remoto de ROVs (Remotely Operated Vehicles) e montagem ou manutenção de árvores de natal situadas nas cabeças dos poços de petróleo.

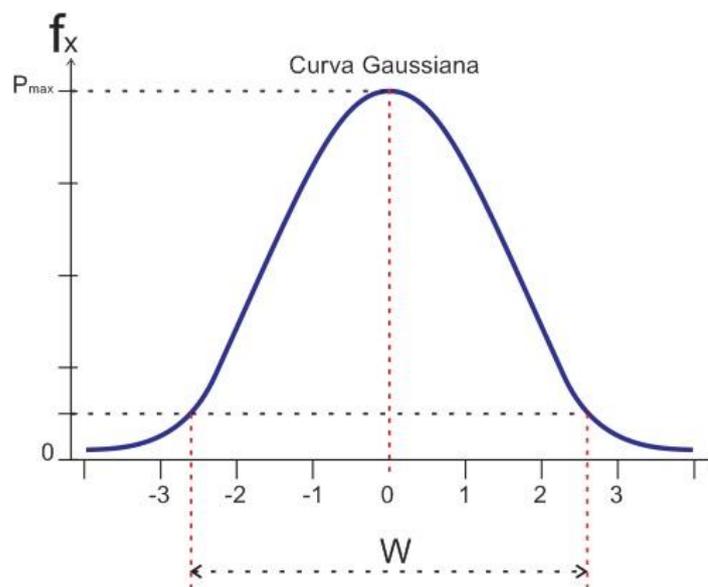
Atualmente, a comunicação subaquática por ultrassom utiliza sinais, produzidos por transdutores piezelétricos e esses sinais atuam como portadoras para informações modulantes de áudio, vídeo ou dados. Entretanto, devido à elevada diretividade que se pode obter e havendo grande distância entre os pontos comunicantes, turbulências subaquáticas de diversas origens conseguem provocar desvios aleatórios nos feixes ultrassônicos e estes reduzem a qualidade ou mesmo chegam a interromper as comunicações. O desenvolvimento de uma técnica de rastreamento em tempo real da posição do feixe ultrassônico permite aumentar a confiabilidade do sistema, agindo como motivador para o desenvolvimento de uma técnica que minimize tais interrupções na comunicação.

Apesar das ondas sonoras se propagarem omnidirecionalmente, quando são produzidas em um ângulo suficientemente agudo é de uso corrente referir-se ao campo acústico situado dentro deste ângulo como um feixe de ondas direcionais.

Os feixes ultrassônicos produzidos por transdutores piezelétricos subaquáticos direcionais apresentam perfil de campo com distribuição gaussiana transversal de potência, como mostrado na Figura 3. A largura (W) do feixe de ultrassom é aquela em que a potência do feixe cai para 1/e da potência no centro do feixe, com distribuição gaussiana dada por

$$P_{(r)} = P_o e^{-\left(\frac{x}{W}\right)^2}$$

da amplitude máxima da curva. Com isso espera-se que, através da adequada disposição física de um grupo de transdutores (receptores – R), seja possível efetuar a localização por triangulação do ponto focal do feixe e determinar a correção necessária da direção de transmissão.



**Figura 3:** Perfil da curva Gaussiana

### **1.3. O problema e sua origem**

O campo das comunicações ultrassônicas subaquáticas apresenta contínuo desenvolvimento e, a cada dia, novos desafios se apresentam aos seus utilizadores. Um desses desafios é garantir a continuidade da comunicação entre dois pontos, mesmo em presença de adversidades que se apresentam no formato de turbulências e desviam ou atenuam os sinais subaquáticos de ultrassom usados na comunicação.

### **1.4. O Objetivo**

O objetivo deste trabalho é medir por triangulação (Calabrese & Indiveri) o deslocamento lateral de um feixe ultrassônico, monitorando a variação do sinal detectado por receptores de

ultrassom. Os valores dos deslocamentos são obtidos por meio de cálculos matemáticos aplicados aos sinais recebidos pelos sensores e associados a conceitos utilizados em técnicas de FSO (Free Space Optics) (SILVA, 2009 & 2011).

### **1.5. Abrangência da Pesquisa**

Surge então a necessidade de um sistema que não somente detecte a direção do deslocamento lateral do feixe de ultrassom, mas também que o quantifique, possibilitando o realinhamento do transmissor ao receptor. Assim, o objetivo deste trabalho é apresentar uma técnica que permita obter a direção e a magnitude do deslocamento lateral de um feixe subaquático de ultrassom e desenvolver a prova de conceito para validação de tal técnica, não abrangendo em seu escopo o sistema de controle de reposicionamento do transmissor.

Para alcançar esse objetivo que é a prova de conceito da pesquisa, serão montados experimentos em ambiente controlado de laboratório, que permitam a extração de dados de forma relativamente simples e seu posterior tratamento matemático, para validação conceitual da técnica proposta.

### **1.6. Revisão Bibliográfica**

A necessidade de comunicação subaquática sem fio tem aplicações em áreas como poluição ambiental, gravação de dados ambientais em boias marítimas e lacustres, mapeamento oceanográfico, controle remoto em vários setores da indústria petrolífera, comunicação entre veículos, submersos ou não, e vários outros.

Para operações a curtas distâncias podem ser utilizadas ondas de rádio ou mesmo sistemas ópticos baseados em laser ou LED de grande potência mas para as comunicações entre plataformas ou navios e equipamentos no fundo do oceano, a comunicação ultrassônica, devido ao alcance estendido do ultrassom subaquático, é até o momento a mídia mais eficaz e com a melhor relação custo/benefício (LEÃO - 2012) , (FELZKY - 2013), pois não sofrem tanta atenuação quanto os sinais de rádio nem tanto *scattering* (espalhamento) quanto os sinais ópticos (DONIEC *et al*).

Um sistema wireless acústico de operação ininterrupta pode permitir monitoramento constante de processos e equipamentos, recolhendo dados de medições sem a necessidade de intervenção humana local. Também a operação de um ROV sem cordão umbilical confere maior manobrabilidade a estes veículos, principalmente nas operações entorno de 5 km de profundidade, onde o peso dos cabos umbilicais se torna um grande problema tanto de segurança quanto de

consumo de energia. Com o emprego de sistemas de comunicação ultrassônica subaquática a segurança física contra acidentes nos equipamentos é aumentada, pois tais sistemas continuam a operar normalmente mesmo em condições de baixa visibilidade (CAVALCANTI, 2014), reduzindo os riscos de sinistros cujos custos alcançam facilmente a cifra dos milhões de dólares (FUGRO - 2010).

Um fator que impõe limitações ao sistema de comunicação subaquática é o elevado nível de ruído acústico sempre presente no meio. Este ruído observado no oceano é fortemente dependente da frequência e do local de observação. Por isso é que, devido aos ruídos produzidos pela proximidade das atividades humanas (MARSENSING - 2015), geralmente as medições próximas à costa são muito mais ruidosas que no mar aberto.

As comunicações hidro acústicas ainda enfrentam uma série de problemas de ordem tecnológica a serem resolvidos e um desses problemas, decorrente das turbulências nas águas onde estas comunicações acontecem, é o deslocamento lateral dos feixes acústicos transmitidos. Soluções de recuperação de dados durante as comunicações e o redirecionamento dinâmico dos transmissores e detectores acústicos (hidrofonos) podem auxiliar de forma significativa a viabilização e a confiabilidade desses sistemas. Então uma técnica dinâmica de localização espacial do feixe acústico torna-se essencial a tal sistema de redirecionamento.

## **1.7. Metodologia**

Este trabalho apresenta uma técnica para determinação da posição de um feixe acústico subaquático pelo método de triangulação de amplitude, utilizando para isso receptores ultrassônicos piezoelétricos. A metodologia adotada compreende uma abordagem mista entre qualitativa e quantitativa, iniciando-se o trabalho com um processo indutivo, onde a técnica proposta é avaliada conceitualmente, orientando quanto aos requisitos para a implementação do experimento e coleta dos dados. Na abordagem quantitativa da pesquisa é desenvolvido um modelo matemático e é montado um *setup* experimental em ambiente controlado de laboratório permitindo, por comparação dos resultados experimentais com os resultados teóricos validar o modelo matemático e assim a técnica proposta.

## **1.8. Organização da Dissertação**

Esta dissertação teve sua elaboração dividida em nove Capítulos. A introdução, sendo o primeiro (pág.1), trata do aspecto histórico do desenvolvimento da tecnologia ultrassônica aplicada, dos fatores que serviram de motivação para que este assunto tenha sido escolhido como

tema do trabalho, define os objetivos do trabalho, discorre sobre a abrangência do tema. Faz uma revisão bibliográfica que mostra as condições atuais de desenvolvimento do tema propõe uma metodologia para a pesquisa e finalmente apresenta a forma organizacional como o trabalho foi estruturado e desenvolvido.

No segundo Capítulo (pág.8) analisa a base teórica que dá sustentação à hipótese do trabalho e ao seu desenvolvimento prático como tema desta dissertação.

O terceiro Capítulo (pág.19) aborda as origens da, e técnicas de controle para turbulência, bem como seus efeitos sobre as comunicações ultrassônicas subaquáticas.

Os aspectos práticos da montagem do setup para os testes em laboratório são analisados no Capítulo quatro (pág.33), onde também são levadas em consideração as limitações práticas para sua execução em ambiente laboratorial.

Os resultados práticos obtidos são apresentados no quinto Capítulo (pág.58), onde também se faz a comparação destes com os resultados teóricos esperados, analisando-se essas diferenças.

O sexto Capítulo (pág.66) traz as conclusões que se pôde tirar dos resultados deste trabalho e apresenta sugestões para trabalhos futuros, adiantando soluções práticas para problemas que serão encontrados caso estes trabalhos venham a ser realizados.

As referências bibliográficas são disponibilizadas no Capítulo sete (pág.71) enquanto que no Capítulo oito (pág.74) é indicada a bibliografia adicional consultada, mas que não resultou em contribuição direta para este trabalho.

Finalmente, no Capítulo nove (pág.75) são disponibilizados os anexos, onde se encontram as tabelas mencionadas no texto deste trabalho, resultantes das diversas fases de levantamento de dados e que foram utilizadas para gerar os gráficos inseridos no corpo do texto.

## 2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Este Capítulo apresenta os conceitos básicos de onda e seus componentes, as características das ondas sonoras na água, a equação da onda e a forma de calcular a velocidade do som na água, apresenta o conceito de Impedância Acústica e aborda a questão da atenuação e da absorção do som na água.

A onda periódica, através da combinação de seus elementos permite a determinação de algumas relações que constituem as ferramentas matemáticas para a melhor compreensão de fenômenos relacionados às ondas, onde a velocidade de propagação de uma onda em um meio constante e uniforme é obtida pela relação entre a distância por ela percorrida e o seu período, como segue.

$$v = \Delta l / \Delta t \quad \text{Eq.01}$$

Considerando que o período é o tempo necessário para ser produzido um ciclo completo, e o comprimento de onda é a soma da largura de uma crista mais um vale, podemos concluir que a onda percorre um comprimento de onda no tempo de um período.

$$v = \lambda / T \quad \text{sendo} \quad T = \frac{1}{f} \quad \longrightarrow \quad v = \lambda \cdot f \quad \text{Eq. 02}$$

Onde:

$v$  = velocidade de propagação da onda;

$\Delta l$  = distância percorrida pela onda;

$\Delta t$  = tempo decorrido desde o início até o término da passagem da onda.

$\lambda$  = comprimento de onda

$T$  = período

$f$  = frequência

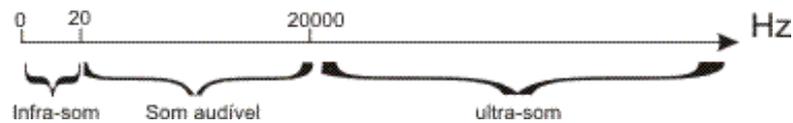
### 2.1. Som e Ultrassom

O som é definido como sendo a propagação tridimensional de uma frente de onda mecânica longitudinal em meios materiais, sejam eles líquidos, sólidos ou gasosos (SÓ FÍSICA – 2015). A ocorrência desta propagação impõe que aconteçam aumentos e reduções longitudinais de pressão ao longo do meio onde a onda mecânica é imposta ou inserida.

A passagem da onda não promove deslocamentos das partículas que compõem o meio, mas faz com que estas vibrem em torno de sua posição de equilíbrio estático original, transmitindo

sequencialmente a energia dessa vibração, de uma partícula para a que lhe é contígua, na direção de propagação da onda.

As ondas sonoras devem ser periódicas para que possam ser percebidas por seus receptores, p.ex., o ouvido humano (Grupo Virtuoso, 2015). Para que ele consiga perceber as ondas sonoras sua frequência deve estar entre 20 Hz e 20 kHz, como pode ser visto na Figura 4. As frequências inferiores a este intervalo são chamadas de infrassom e as superiores são chamadas de ultrassom, como se pode ver na figura abaixo.



**Figura 4:** Escala de classificação dos sons.

Toda molécula que apresenta uma condição natural de vibração em determinada frequência; como todo corpo é constituído por moléculas, o conjunto de moléculas que o compõem vibram em uma frequência determinada pela média das massas das moléculas e suas frequências naturais de vibração ou oscilação. Assim, todo corpo capaz de vibrar o faz em sua frequência característica.

Quando um sistema recebe energia com uma periodicidade igual à de uma de suas frequências naturais de oscilação, tal oscilação é reforçada a cada incidência de energia e o sistema passa a vibrar com amplitudes cada vez maiores naquela frequência de oscilação. Diz-se então que o sistema está oscilando em ressonância naquela frequência ou que aquela é uma das frequências de ressonância do sistema.

O ultrassom é uma onda mecânica e, como tal, pode ser produzida de várias formas, desde pela passagem de ar, em alta velocidade, por arestas e tubos de formato específicos como o de apitos, até pela vibração de uma peça metálica, como um diapasão.

Essa onda também pode ser produzida pela aplicação de um campo elétrico entre duas faces de um material piezoeletrico. A frequência de vibração ultrassônica de um dispositivo piezoeletrico é determinada por sua frequência de ressonância, que depende de suas dimensões e das características mecânicas de cada corpo e de seu material constituinte.

Exceto no caso do apito, todo dispositivo que pode produzir, também pode detectar a presença de ondas ultrassônicas que nele incidirem.

O diapasão vibra quando exposto a uma onda ultrassônica que apresente a mesma frequência mecânica em que este está sintonizado; já o material piezelétrico, além de vibrar, produz também um sinal elétrico de mesma frequência que o a do sinal a que está exposto, desde que este esteja em na frequência de ressonância do material.

## 2.2. Ondas Sonoras na Água

No ar as ondas sonoras se deslocam por compressão e rarefação das moléculas do meio. A propagação das ondas acústicas através da água também consiste na compressão e rarefação sucessivas das partículas da água e são percebidas nos receptores como uma variação de pressão que se transforma em sinal elétrico mas podem apresentar vibrações em direções preferenciais tornando possível ter-se diferentes tipos de ondas sonoras, chamados de modos de onda longitudinal, transversal, superficial (Rayleigh), de onda plana e Stoneley (propagação Rayleigh, irradiada por dentro de interfaces).

O movimento longitudinal das frentes de onda, ou seja, a velocidade de propagação do som ou, mais simplesmente, a velocidade do som ( $v$ ), depende da frequência ( $f$ ) do movimento longitudinal e do comprimento da onda ( $\lambda$ ) decorrente deste movimento, na seguinte relação  $v = \lambda / T$  então:

$$v = \lambda \cdot f \quad \text{Eq. 03}$$

ou seja:

$$\lambda = v / f \quad \text{Eq. 04}$$

sendo:

$\lambda$  = comprimento de onda, em metros.

$v$  = velocidade de propagação do som, em metros por segundo.

$f$  = frequência da onda, em hertz ( ou seja, em ciclos por segundo).

Deve-se, porém, atentar para o fato da velocidade de propagação do som diferir, em nível molecular, da velocidade de deslocamento ( $\hat{u}$ ) das partículas, decorrentes da onda mecânica sonora no meio, pois essa velocidade de deslocamento das partículas depende da pressão ( $P$ ) da onda plana, da velocidade do som ( $v$ ) no meio e da densidade ( $\rho$ ) relativa do meio, conforme segue:

$$v = P \cdot \hat{u} \cdot \rho \quad \text{Eq. 05}$$

Quando uma onda acústica, se propagando através de um material, encontra uma fronteira com outro material, uma parte da energia dessa onda é transmitida para o segundo material e outra parte é refletida de volta para o primeiro. A proporção entre a energia refletida e a refratada é diretamente proporcional ao coeficiente de reflexão entre os dois materiais e este é dependente dos índices de refração deles (UNESC – 2015).

### 2.3. A equação da Onda<sup>1</sup>

A onda ultrassônica subaquática é uma onda longitudinal pois sua variação (compressão e descompressão) ocorre ao longo da direção de propagação.

A equação da onda descreve matematicamente seu comportamento no meio desejado e a equação de continuidade do fluxo permite entender como se dá a propagação da onda no meio desejado, no caso, a água. O correlacionamento dessas duas equações permite saber como a onda se propaga no meio como uma função da variação pontual da densidade ao longo do percurso do feixe ultrassônico

Assim, a equação da onda (COSTA 2, Emerson S. et al) e (Wikipédia – Equação da Onda), que pode ser observada na Eq. 06, é deduzida a partir dos princípios da mecânica, utilizando as equações de estado para movimento e continuidade (Kinsler et al., 1982).

$$P - P_0 = \beta \frac{(\rho - \rho_0)}{\rho_0} \quad \text{Eq. 06}$$

Sendo:

$P$  = Pressão instantânea no ponto de interesse

$P_0$  = Pressão de equilíbrio no fluido

$p$  = é a pressão acústica no local pesquisado

$\rho$  = densidade instantânea no ponto de interesse

$\rho_0$  = densidade do fluido em equilíbrio = massa específica do fluido

$\beta$  = coeficiente de expansão térmica do fluido (ou módulo adiabático)

$s$  = é o adensamento ou compressão local, positiva ou negativa, das partículas do fluido

$t$  = tempo

$\vec{u}$  = Velocidade de deslocamento vibracional da partícula.

---

<sup>1</sup>NOTA 1: “A equação da onda é uma equação diferencial parcial linear de segunda ordem que descreve a propagação da onda”

Em 1988 Christensen (DACIUK, 2008) sugeriu uma abordagem alternativa para a equação proposta por Kinsler, como segue:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial z^2} - \rho_0 K \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = 0 \quad \text{Eq.07}$$

Onde  $z$  é a direção de propagação da onda, considerada como somente longitudinal, sendo ' $p$ ' a pressão que excede a pressão normal do fluido, tal que <sup>nota2</sup>

$$p = P - P_0 \quad \text{Eq. 08}$$

é a pressão sonora (pressão da onda acústica).

Pensando em termos de pressão ( $p$ ) e de adensamento ou compressão ( $s$ ), a Eq.09 pode ser expressa como sendo:

$$s = \frac{(\rho - \rho_0)}{\rho_0} \quad \text{Eq. 09}$$

Que é o adensamento local e temporário das partículas (variação da densidade), então:

$$p = \beta \cdot s \quad \text{Eq. 10}$$

é a pressão acústica no local pesquisado, onde  $\beta$  é o coeficiente de expansão térmica do fluido

## 2.4. Equação da Continuidade do Fluxo<sup>3</sup>

Para relacionar o movimento do fluido ( $p$ ) com a compressão ou expansão ( $s$ ), precisamos de uma função que relacione a velocidade ( $\hat{u}$ ) da partícula do fluido, com a densidade ( $\rho$ ).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \quad \text{Eq. 11}$$

que é uma das três Equações de Euler para fluidos<sup>3</sup>.

Considerando a partícula fixa no espaço como sendo um elemento infinitesimal do volume do fluido, a equação da continuidade relaciona a taxa ( $s$ ) de crescimento da massa

---

<sup>2</sup>NOTA 2: a) “Uma equação de estado é uma equação termodinâmica que descreve o estado da matéria sob um dado conjunto de condições físicas”.

NOTA 2.b) Para meios fluidos a equação de estado relaciona quantidades físicas que descrevem o comportamento termodinâmico dos fluidos

<sup>3</sup>Nota 3: Em mecânica dos fluidos, uma equação de continuidade é uma equação de conservação da massa

(aumento da densidade) neste elemento de volume (devido à compressão), com o fluxo da massa ( $\vec{u}$ ) através da superfície próxima que circunda esse volume. Como o fluxo deve ser igual à taxa de crescimento da densidade, obtém-se a equação da continuidade do fluxo da pressão acústica na forma que segue:

$$\frac{\partial s}{\partial t} + \nabla \hat{u} = 0 \quad \text{Eq. 12}$$

A equação do movimento relaciona a pressão acústica no ponto pesquisado ( $p$ ) com a velocidade instantânea ( $\hat{u}$ ) da partícula, desprezando-se os efeitos da viscosidade do fluido. Desta forma temos a equação de Euler para fenômenos acústicos de baixa amplitude.

$$\rho_0 \frac{\partial u}{\partial t} = -\nabla p \quad \text{Eq. 13}$$

## 2.5. Relação entre a Equação da Onda e a da Continuidade do Fluxo

Tomando-se a Eq.11 da continuidade do fluido (Equação de Euler), que trata do comportamento da densidade  $\rho$ , em um determinado ponto do fluido, com relação ao tempo, havendo ou não campo de velocidade no interior do fluido. Tomando também a equação Eq.07 do movimento da onda longitudinal, que trata sobre o comportamento da pressão  $p$  em um determinado ponto do fluido, com relação ao tempo e com a posição ( $z$ ) ao longo do sentido de propagação da onda, nota-se que a primeira está em termos da densidade  $\rho$  e a segunda está em termos da pressão  $p$ , num mesmo ponto no interior do fluido. Para relacionar uma com a outra é necessário usar uma terceira equação que correlacione as duas grandezas.

Da Mecânica dos Fluidos, temos a equação de Bernoulli, que pode fazer esse papel:

$$\frac{p}{\rho} + gy + \frac{1}{2}v^2 = \text{constante} \quad \text{Eq. 14}$$

A equação de Bernoulli pode ser utilizada quando estamos falando de dois pontos dentro do fluido, ao longo de uma mesma linha de corrente. Derivando em relação ao tempo esta equação obtemos que:

$$\frac{\partial p}{p} = \frac{\partial \rho}{\rho} \quad \text{Eq. 15}$$

Isto foi obtido considerando-se que não há diferença de altura entre os dois pontos tomados e que a diferença de velocidades também é nula. Trata-se, então, de pontos muito próximos. Estas hipóteses tornam as respectivas derivadas nulas.

Utilizando tal propriedade, determina-se, por meio da derivada de segunda ordem, bem como com pelo uso da regra do produto e do quociente das derivadas, a seguinte relação:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial z^2} = \frac{p}{\rho} \cdot \frac{\partial^2 \rho}{\partial z^2} \quad \text{Eq. 16}$$

Que é uma equação que relaciona a variação da pressão e a equação da densidade ao longo do sentido de deslocamento da onda longitudinal. Esta relação pode ser substituída na Eq. 07. Substituído, obtém-se

$$\frac{\partial^2 \rho}{\partial z^2} = \rho_0 K \frac{\partial^2 \rho}{\partial t^2} = 0 \quad \text{Eq. 17}$$

Que representa a segunda equação, mas em termos da variação da densidade ao longo do sentido de deslocamento da onda longitudinal. Note-se que a variação da densidade tem um comportamento semelhante à variação da pressão, enquanto a onda se desloca no sentido  $z$ .

Trazendo a Eq.11 e derivando parcialmente ambos os lados em relação ao tempo, tem-se

$$\frac{\partial^2}{\partial t^2} = -\frac{\partial}{\partial t} (\nabla(\rho \vec{u})) \quad \text{Eq. 18}$$

Invertendo a ordem na qual a diferenciação foi realizada do lado direito, tem-se

$$\frac{\partial^2 \rho}{\partial t^2} = -\nabla \left( \frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{u}) \right) \quad \text{Eq. 19}$$

Esta relação pode ser substituída na equação 18 modificada:

$$\frac{\partial^2 \rho}{\partial z^2} - \rho_0 K (-\nabla(\rho \vec{u})) = 0 \quad \text{Eq. 20}$$

Ou ainda:

$$\frac{\partial^2 \rho}{\partial z^2} + \rho_0 K \left( \nabla \left( \frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{u}) \right) \right) = 0 \quad \text{Eq. 21}$$

Que é uma equação que relaciona o comportamento da densidade com a posição no interior do fluido e como a densidade se comporta na presença ou não de campo de velocidade.

## 2.6. A velocidade do som (velocidade de propagação da onda sonora)

A onda sonora subaquática é longitudinal e sua passagem produz uma pequena variação de pressão no meio, criando deslocamento do fluido de tal forma que muda temporariamente sua densidade no ponto enquanto atravessa cada derivada de distância longitudinal. Esta variação longitudinal do ponto de compressão se traduz em propagação da onda sonora, ou seja, na velocidade de propagação do som ou, mais simplesmente, na velocidade do som no meio (no caso do presente trabalho, é a água). Essa velocidade de propagação é dependente da densidade do fluido, que equivale ao índice de refração acústico, que, por sua vez, é dependente da compressibilidade do meio e este, da salinidade, da temperatura e da pressão local. Esta dependência faz com que a velocidade do som seja extremamente variável, tanto espacial quanto temporalmente, em cada ponto do oceano, por exemplo, devido às condições altamente dinâmicas da água do mar em função de tais variáveis. Assim a velocidade do som na água doce, pode ser calculada pela equação de Marczak, como segue:

$$v = 1,402385 * e^3 + 5,038813 * \tau - 5,799136 * e^{-2} * \tau^2 + \\ + 3,287156 * e^{-4} * \tau^3 - 1,398845 * e^{-6} * \tau^4 + 2,78786 * e^{-9} * \tau^5 \quad \text{Eq. 22}$$

Sendo:

$\tau$  = temperatura, entre 0 °C e 95°C, @ 1 atmosfera.

Para se ter um sentimento da ordem de grandeza da velocidade que o som pode atingir na água doce, tome-se como exemplo que uma onda sonora subaquática, de frequência igual a 1 kHz, estando a água a 25°C, e comprimento de onda de cerca de 1,5 metros tem-se que a velocidade de propagação nessas condições é de 1497 m/s, enquanto que a velocidade do som na água salgada é determinada como sendo aproximadamente 1500 m/s, como visto a seguir, uma vez que na água do mar a velocidade é dependente da pressão decorrente da profundidade e também da salinidade. Fórmulas empíricas têm sido desenvolvidas para calcular o mais precisamente possível a velocidade do som em função dessas variáveis.

Uma fórmula empírica bastante aceita para o cálculo da velocidade do som na água do mar tem sido a proposta por Mackenzie (1981), como segue (COSTA, 2015):

$$v = 1,44896 + 4,591 * \tau - 5,304 * e^{-2} * \tau^2 + 2,374 * e^{-4} * \tau^3 + 1,34 * (s - 35) +$$

$$+1,63 * e^{-2} * h + 1,675 * e^{-7} * h^2 - 1,025 * e^2 * \tau * (s - 35) - 7,139 * e^{-13} * \tau * h^3 \dots\dots\dots \text{Eq. 23}$$

sendo:

$\tau$  = temperatura em °C; (neste caso, entre 2 to 30 °C).

$s$  = salinidade em partes por milhar; (entre 25e 40 partes por milhar, com maior incidência por volta de 37).

$h$  = profundidade, em metros; (entre 0 to 8000 m).

A comparação entre os resultados dessas duas equações mostra que há uma diferença entre a velocidade do som na água salgada e na água doce, sendo maior na água salgada. Em função do resultado da Eq.04, determina-se que o comprimento de onda para uma frequência de 1kHz na água salgada é

$$\lambda = 1500 / 1000 \Rightarrow \lambda = 1,5 \text{ m}$$

Para uma frequência de 500 kHz (0,5 MHz), nas mesmas condições, o comprimento de onda é

$$\lambda = 1500 / 500000 \Rightarrow \lambda = 0,003 \text{ m ou } 3 \text{ mm}$$

A título de informação, vale observar que a literatura informa a velocidade do som no metal como sendo em torno de 3000m/s a 5000 m/s (UFMG-2013), o que é bem superior à sua velocidade na água. Desta forma uma onda sonora subaquática que incida em uma superfície metálica sofrerá um baixo acoplamento e uma alta reflexão.

Por um lado, o aspecto positivo deste comportamento sugere a possibilidade de se construir dispositivos refletores e concentradores acústicos subaquáticos, permitindo o aumento da sensibilidade de hidrofones pela maior área de captação do sinal. Esta característica faz com que uma superfície metálica se torne um excelente refletor para ondas sonoras subaquáticas, o que pode eventualmente vir a se tornar um recurso a ser explorado em dissertações que derem continuidade ao presente trabalho.

Por outro lado, tal característica pode criar reflexões indesejáveis, que se somem ao ruído de fundo intrínseco ao ambiente subaquático, aumentando-o e degradando a relação sinal/ruído do sistema de comunicação que o utilizar.

## 2.7. Absorção e Propagação do som na água

A absorção do som, ou seja, sua atenuação, na água é diretamente proporcional a sua frequência e com isso, quanto maior a frequência empregada como portadora para comunicações, menor o potencial de alcance do sinal transmitido. Algumas das causas da absorção do som na água são sua viscosidade, o material do solo subaquático, que apresenta elevada absorção sonora por difusão das ondas que nele incidem, e as bolhas de ar presentes tanto na água e mais ainda na espuma da superfície. No presente estudo estas causas de absorção não são consideradas por não exercerem nenhuma influência na comunicação em linha direta, pois o objetivo é apresentar um mecanismo de auxílio a manutenção de um canal de comunicação que já tenha sido estabelecido e, portanto, não se justifica levar tais causas em consideração.

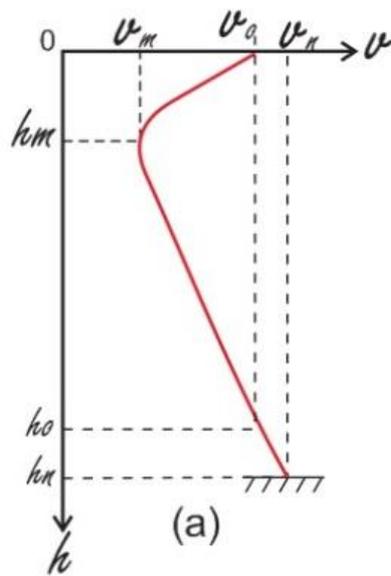
A propagação sonora ocorre por meio da transmissão da vibração acústica de uma molécula para sua próxima, no meio. Como visto acima, a velocidade de propagação do som na água salgada reside em torno de 1500 m/s com variações dependentes de vários fatores presente no ambiente submarino. Esta velocidade, muito baixa se comparada com a velocidade de transmissão das ondas eletromagnéticas, apresenta grande latência<sup>4</sup> (cerca de 0,67 segundos por km) e dificulta seu emprego em controles que demandem altas velocidades de resposta.

Sabe-se que a temperatura da água do mar diminui com a profundidade, fazendo com que a velocidade do som decresça continuamente. Quando a temperatura da água, em função da profundidade, atinge cerca de 4°C, dependendo da latitude, a temperatura se estabiliza e permanece neste patamar independentemente da profundidade. A partir desse ponto a temperatura deixa de alterar o resultado da equação, que passa a depender praticamente só da pressão. Como a pressão aumenta com a profundidade, a velocidade de propagação do som volta a aumentar na mesma proporção.

A Figura 5 mostra o perfil de velocidade de propagação em função da profundidade,

---

<sup>4</sup>NOTA 4: *Latência* é uma expressão para o tempo de trânsito de um pacote de informação entre dois pontos.



**Figura 5:** Variação da velocidade do som na água como função da profundidade.

Onde:

( $h$ ) é a altura da lâmina d'água

( $h_m, h_n, h_0$ ) são profundidades,

( $v$ ) é a velocidade do som na água,

( $v_0$ ) é a velocidade do som próximo a superfície,

( $v_m$ ) é a velocidade mínima do som na água,

( $v_n$ ) é a Velocidade máxima do som na água

### 3. TURBULÊNCIA SUBAQUÁTICA

Este Capítulo aborda as questões, origens e problemas causados pela turbulência nas ondas acústicas subaquáticas e expõe a sugestão para a solução do problema, faz uma avaliação qualitativa e quantitativa da técnica sugerida. Observa questões sobre o alcance dos sensores e aponta soluções para implementação dos testes de laboratório e as equações para localização do feixe ultrassônico promovendo a verificação e validação da prova de conceito da solução apresentada.

#### 3.1. As origens da turbulência

Durante sua propagação na água a onda ultrassônica, ao encontrar um objeto ( $L_0$ ) transparente ao ultrassom, com dimensões superiores ao da largura ( $W$ ) do feixe e com índice de refração diferente daquele do meio em que trafega, sofrerá uma mudança na direção de propagação, conhecida como “Divagação do Feixe” ou como “*Beam Wander*”, em inglês.

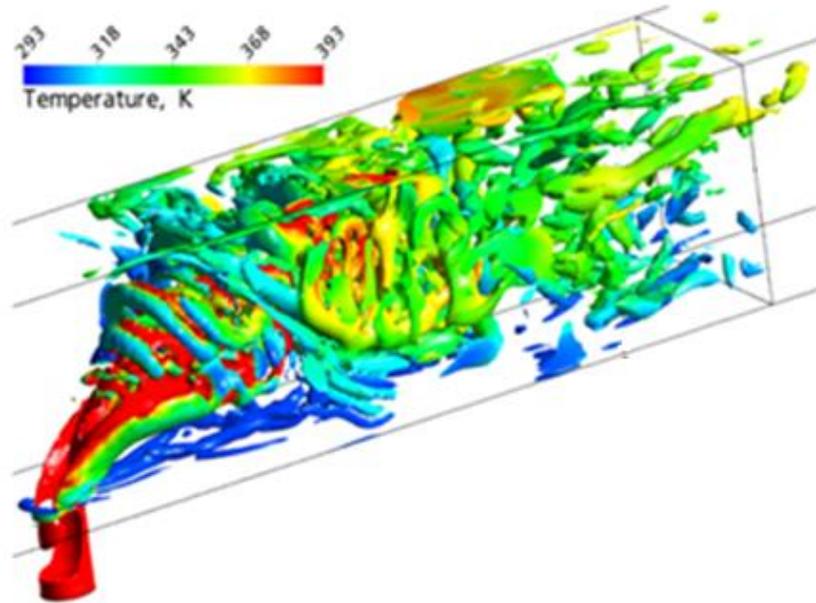
Além da interferência por passagem ou ocorrência de objeto no percurso do feixe ultrassônico, a variação aleatória do índice de refração da água se deve principalmente a ocorrência de turbulências que se interpõem no percurso da onda acústica direcionada ao receptor.

A turbulência tem origens diversas (RBEF, 2011) & (FREIRE, 1998), destacando-se dentre elas, as correntes ascendentes ou descendentes, decorrentes de variação de temperatura. Também a movimentação de embarcações nas proximidades produz o fenômeno, não somente pela movimentação da água, mas também pela formação de bolhas, devido a algum processo de cavitação, que produzem atenuação extrema do sinal acústico. Ainda mesmo, qualquer objeto sendo deslocado dentro d’água produz maior ou menor nível de turbulência.

Como a turbulência é um fenômeno aleatório de comportamento estatístico, apresenta-se intrinsecamente inconstante, mas sempre promovendo a alteração do índice de refração acústico da água no local onde ocorre, produzindo influência sobre a posição focal do feixe ultrassônico, mudando sua direção a cada vez que ele passa de um índice de refração para outro, produzindo nele um oscilar aleatório.

A presença de animais aquáticos, seja na forma de cardumes densos, seja na forma de indivíduos de grande porte, também pode interferir fortemente na comunicação. Além disso, atividades humanas nas imediações também são fontes de turbulências, exigindo intervenção para a devida correção direcional do feixe ultrassônico utilizado na comunicação.

Para se ter uma visão mais abrangente da complexidade do perfil de uma turbulência, na Figura 6 é mostrada a simulação tridimensional de uma turbulência produzida por um tubo de Pitot em um meio líquido (OZEN, 2015).

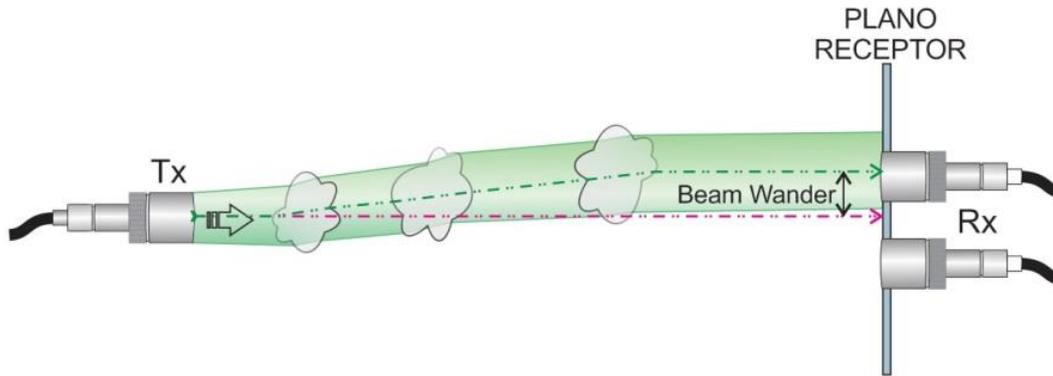


**Figura 6:** Turbulência produzida por um tubo de Pitot em um meio líquido, com os fluidos portante e portado em temperaturas diferentes entre si. (www.ozeninc.com).

Entretanto, nem toda turbulência precisa, a rigor, infligir variações no direcionamento do feixe, existem condições nas quais essa interferência torna-se inócua. Para que isso aconteça, é necessário que a relação dada pela Equação 24 seja verdadeira.

$$\frac{\varpi}{\ell_0} \gg 1, \quad \text{Eq. 24}$$

onde  $\varpi$  é o comprimento de onda do sinal acústico e  $\ell_0$  é a maior dimensão da partícula ou bolha, assim, quando o comprimento de onda do sinal que se propaga é maior que o obstáculo encontrado, este se torna transparente ao sinal. Enquanto a condição não for satisfeita, haverá a ocorrência do fenômeno de Beam Wander (divagação de feixe) e o feixe sofrerá mudança de direção de propagação, sendo afastando do ponto desejado de incidência do feixe, como pode ser visto na Figura 7.



**Figura 7:** Beam Wander (divagação do feixe) em relação a sua direção original.

Por outro lado, a presença de pequenas bolhas de ar, desde que em número suficiente e devido a seu elevadíssimo índice de atenuação, mesmo atendendo a condição da Eq. 24, pode provocar o fenômeno de cintilação nos receptores, introduzindo ruídos e falhas na comunicação.

A técnica proposta neste trabalho é imune à cintilação que, mesmo reduzindo a potência do sinal, o faz simultaneamente nos três receptores, não alterando assim a detecção da posição do centro do feixe.

Observadas as influências desses tipos de interferências, o trabalho ora desenvolvido sugere uma técnica de detecção e dimensionamento dessa influência e propõe uma solução para o manutenção do fluxo de comunicação.

### 3.2. Técnica para Medição da Turbulência Subaquática

A presente seção descreve o objeto deste trabalho de pesquisa levado a termo no LaCOP- Laboratório de Comunicações Ópticas, da Universidade Federal Fluminense. Nela será analisada a técnica de detecção e medição da turbulência subaquática em enlaces de comunicação de dados, voz e, ou, imagens usando como portadora um sinal ultrassônico senoidal.

Os Capítulos anteriores forneceram as bases teóricas para a compreensão do desenvolvimento da técnica aqui apresentada.

No caso de haver um transmissor (TX) e somente um receptor ( $R_1$ ), ao ocorrer o desvio do feixe de perfil gaussiano em relação ao receptor, a potência acústica percebida por este vai diminuindo proporcionalmente à curva gaussiana de distribuição de potência, conforme o feixe se afasta do centro do receptor. Conhecendo-se os parâmetros que caracterizam essa curva gaussiana pode-se facilmente determinar essa distância.

Sem perda de generalidade, vamos assumir que o centro do receptor acima mencionado esteja na posição  $(x_1, y_1)$  de um plano cartesiano, que em nosso caso é o plano do receptor.

Suponhamos que o feixe do transmissor possua uma distribuição de potência gaussiana sobre o plano do receptor, medido com o receptor  $R_1$ , dada por

$$P_1(x, y) = P_{01} e^{-\left(\frac{d_1}{W_1}\right)^2} \quad \text{Eq. 25}$$

sendo  $P_1(x,y)$  a potência medida pelo receptor  $R_1$  quando o centro do feixe gaussiano encontra-se no ponto  $(x,y)$  do plano do receptor.  $P_{01}$  é a potência máxima medida pelo receptor quando o centro do feixe gaussiano do transmissor coincide com o centro do receptor  $R_1$ , ou seja

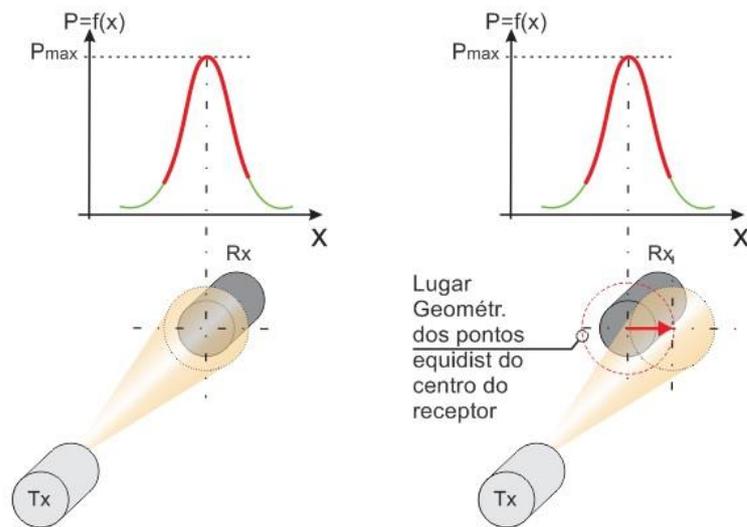
$$(x, y) = (x_1, y_1).$$

O parâmetro  $W_1$  é a largura do feixe gaussiano medida pelo receptor  $R_1$  e “ $d_1$ ” é a distância entre o centro do feixe gaussiano e o centro do receptor  $R_1$ . Assim,

$$d_1 = \sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2} \quad \text{Eq. 26}$$

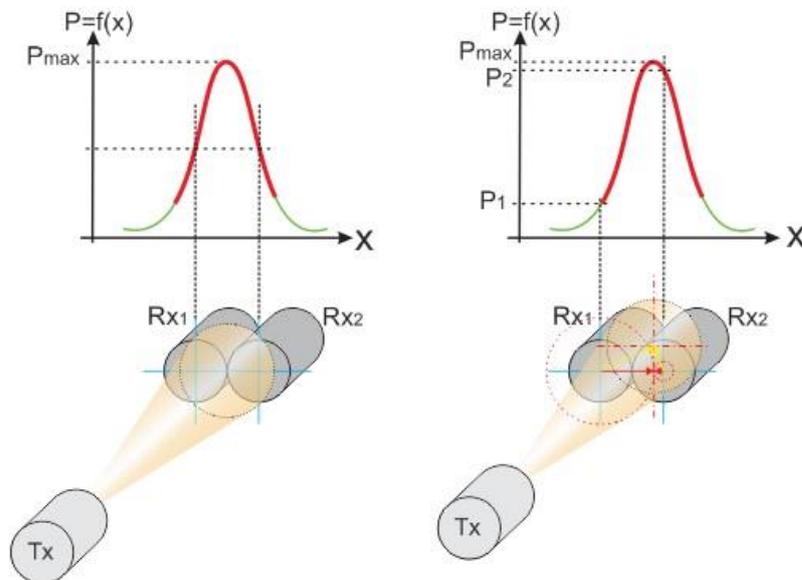
Perceba-se que a medida da potência  $P_{(x,y)}$  e o uso das Eq 25 e Eq 26 permitem o cálculo SOMENTE da distância do centro do feixe ao centro do receptor. Como neste caso há somente um receptor, determina-se SOMENTE a distância entre centros, mas não a posição  $(x,y)$  do centro do feixe gaussiano. Assim sendo, a solução para a posição do centro do feixe  $(x,y)$  é o lugar geométrico dos pontos equidistantes do centro do receptor e é um círculo de raio constante. A Figura 8 mostra a discussão acima.

Por simplicidade de representação gráfica, foi somente mostrado o deslocamento do feixe na direção coordenada “ $x$ ”.



**Figura 8:** Determinação limitada da posição do feixe usando só um receptor.

Com dois receptores, que chamaremos de  $R_1$  e  $R_2$ , ainda só é possível determinar a direção e a distância do centro do feixe. Como pode ser visto na Figura 9, quando um conjunto de dois receptores for interceptado pelo feixe gaussiano do transmissor, poderemos encontrar duas possíveis soluções para o centro do feixe  $(x,y)$ . Através do sistema abaixo mostrado na Eq. 27, podemos verificar essa afirmativa.



**Figura 9:** Determinação limitada da posição do feixe usando dois receptores.

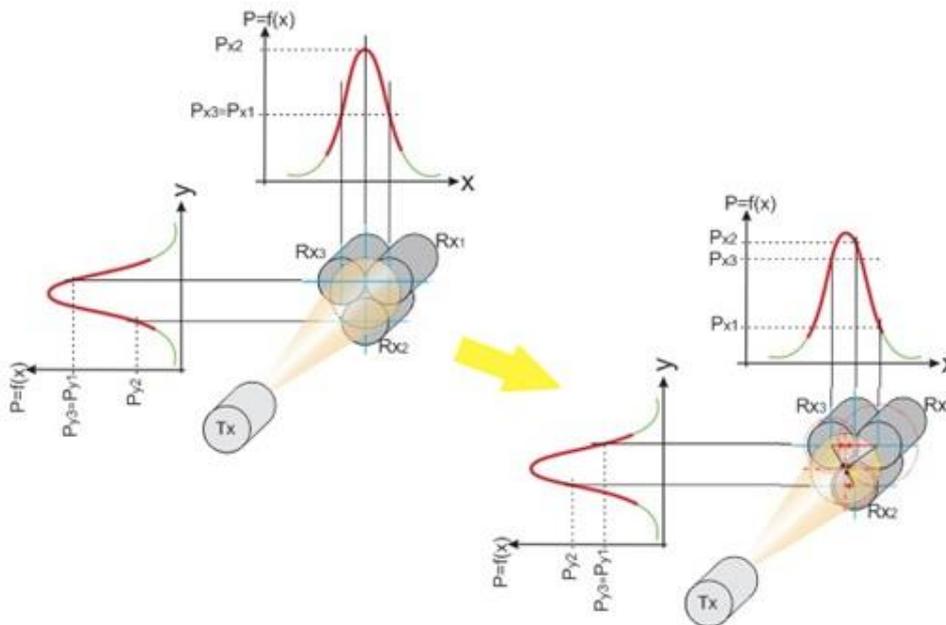
$$\begin{cases} P_1(x, y) = P_{01} e^{-\left(\frac{d_1}{W_1}\right)^2} \\ P_2(x, y) = P_{02} e^{-\left(\frac{d_2}{W_2}\right)^2} \end{cases}$$

Eq. 27

$$\text{onde } \begin{cases} d_1 = \sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2} \\ d_2 = \sqrt{(x - x_2)^2 + (y - y_2)^2} \end{cases}$$

Aqui  $(x_i, y_i)$  são as posições dos receptores  $R_i$  no plano cartesiano,  $W_i$  são as larguras do feixe gaussiano medidas pelos receptores  $R_i$  e “ $d_i$ ” são as distâncias entre o centro do feixe gaussiano e os centros dos receptores  $R_i$ . Quando se resolve o sistema de equações apresentado na Eq. 27, para determinar o ponto central/focal do feixe gaussiano  $(x, y)$  chega-se a uma equação de segundo grau, indicando duas possíveis soluções para o lugar geométrico que satisfaz o sistema. Assim, conclui-se que através do uso de dois receptores não é possível determinar o centro do feixe gaussiano, mas sua distância a um ponto de referência e a sua direção.

Para se determinar a distância, a direção e o sentido de movimento do feixe gaussiano do transmissor são necessários três receptores. A Figura 10 mostra o uso de 3 receptores.



**Figura 10:** Determinação limitada da posição do feixe usando três receptores.

Como foi mostrado anteriormente, o uso de dois receptores permite determinar duas possíveis soluções. Com o uso de um terceiro receptor, fica determinada somente uma solução para a posição do centro do feixe gaussiano  $(x,y)$ .

Através do sistema abaixo mostrado na Eq. 28, podemos verificar essa afirmativa.

$$\begin{cases} P_1(x, y) = P_{01}e^{-\left(\frac{d_1}{W_1}\right)^2} \\ P_2(x, y) = P_{02}e^{-\left(\frac{d_2}{W_2}\right)^2} \\ P_3(x, y) = P_{03}e^{-\left(\frac{d_3}{W_3}\right)^2} \end{cases} \quad \text{Eq. 28}$$

$$\text{onde } \begin{cases} d_1 = \sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2} \\ d_2 = \sqrt{(x - x_2)^2 + (y - y_2)^2} \\ d_3 = \sqrt{(x - x_3)^2 + (y - y_3)^2} \end{cases}$$

Devido ao escopo (abrangência) deste trabalho, propõe-se que algumas restrições de ordem prática devam ser observadas como limitações para a execução experimental e que concessões decorrentes dessas limitações sejam admitidas. O espaço de teste será restrito a um reservatório de água, cujas dimensões sejam compatíveis com seu uso no espaço restrito de uma bancada de laboratório; emprego de água doce em lugar de água salgada. Devido ao espaço restrito, a largura da curva gaussiana do feixe ultrassônico subaquático será mais estreita que aquela disponível a maiores distâncias, em campo. A distância entre transmissor (TX) e receptor(es) (R<sub>i</sub>) será muito menor que a que ocorrerá na prática. Também a potência acústica de excitação será propositalmente reduzida, diferentemente do que se poderá dispor quando em uso real. A distância entre os receptores que operam como hidrofones estará limitada pelo comprimento do reservatório de água.

### 3.3. Análise Qualitativa da Técnica

De idealização bastante simples, a técnica proposta se vale dos mesmos princípios propostos em (ASSIS, 2011), (SILVA1, 2009), (SILVA2, 2009), (SILVA3, 2009), (SILVA4 et al, 2011), (OLIVEIRA1, 2014), (OLIVEIRA2 et al, 2015), aplicando-os a comunicações subaquáticas, e em (BRAGANTINE et al, 2015).

Cada transdutor ultrassônico piezelétrico que esteja operando como receptor (doravante mencionado somente como receptor), apresenta uma curva de sensibilidade e um diagrama de recepção próprios, cujas características são obtidas na etapa de caracterização.

Medindo-se previamente a potência acústica máxima  $P_{0i}(x,y)$  que chega a cada receptor  $R_i$ , é possível determinar, a qualquer tempo, nestes receptores, as potências/amplitudes dos sinais detectados  $P_i(x,y)$ .

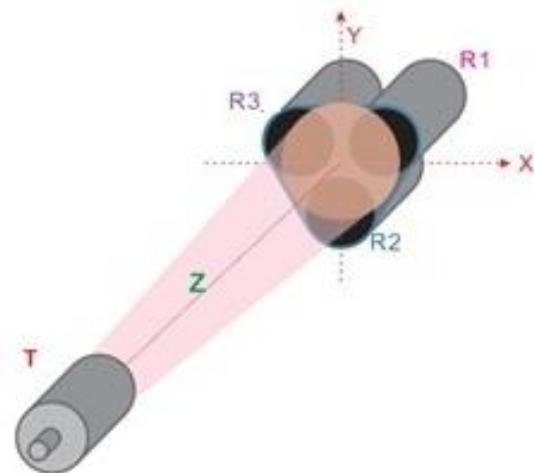
Ao desenhar um círculo em torno de cada receptor, definindo assim o lugar geométrico dos pontos de mesma potência, encontra-se a posição no feixe gaussiano simplesmente como sendo a intersecção dos três círculos. Essa intersecção dos três círculos representa, graficamente, a solução do sistema de equações da Eq. 28.

Certamente que o resultado prático, definido por um processo gráfico como este, será mais exato na medida em que os parâmetros utilizados sejam mais exatos/próximos dos valores reais. A vantagem deste processo de solução gráfica é fornecer um resultado visual para uma rápida avaliação qualitativa da solução.

Assim, pode-se resumir o procedimento qualitativo como segue: Um conjunto de três transdutores ultrassônicos atuando como receptores  $R_i$  (onde  $i = 1,2,3$ ), são montados em configuração triangular. Um quarto transdutor ultrassônico, atuando como transmissor (TX) é posicionado a uma distância  $z$ . O sinal acústico transmitido por TX, forma um “spot”, idealmente com seção transversal circular, com distribuição gaussiana e com largura

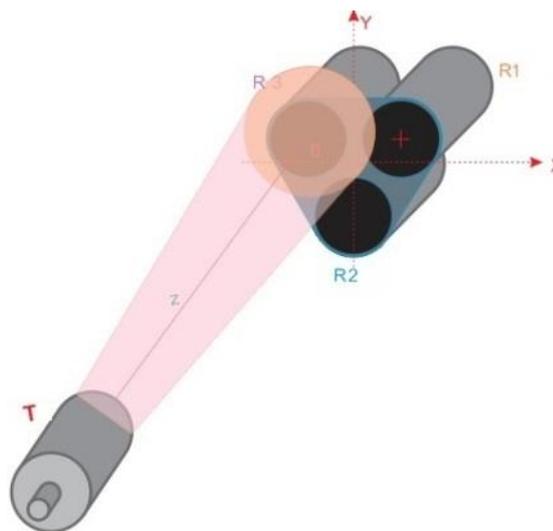
$$(e^{-1})W,$$

que “ilumina” os receptores conforme representado na Figura 11, sendo tal potência lida na forma de tensão de saída ( $V_i$ ) nos terminais de cada receptor. Nesta condição, todos os receptores recebem a mesma potência acústica e, portanto, apresentam em seus terminais tensões de saída ( $V_i$ ), idealmente idênticas entre si.

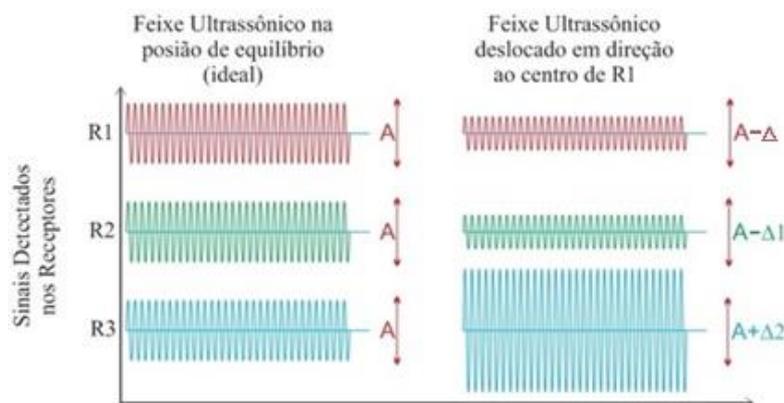


**Figura 11:** Arranjo dos Transdutores com o feixe incidindo no centro.

Quando o centro do feixe acústico se desloca de uma posição inicial, mostrada na Figura 11 e cujo gráfico de amplitudes pode ser visto no lado esquerdo da Figura 13, para a posição centralizada em  $R_3$ , como mostrado na Figura 12, a amplitude no receptor  $R_3$  aumenta e as amplitudes dos receptores  $R_1$  e  $R_2$  diminuem. Isso ocorre em razão da aproximação do foco do feixe gaussiano da posição central de  $R_3$  e de seu afastamento dos receptores  $R_1$  e  $R_2$ . Na Figura 13, no lado direito, se pode observar a variação dessas amplitudes.



**Figura 12:** Feixe afastado de sua posição ideal (central).



**Figura 13:** Sinais nos receptores alinhados (esq.) e desalinhados (dir.).

### 3.4. Análise Quantitativa da Técnica

Após a análise qualitativa para compreensão da técnica proposta neste trabalho, cabe uma avaliação quantitativa para sua validação.

Observando a Figura 13 e considerando-se a condição ideal, onde não há presença de nenhum ruído ou turbulência, tem-se que o feixe ultrassônico permanecerá imóvel. O lado esquerdo da Figura 13 apresenta uma situação hipotética, onde o feixe transmitido está posicionado de tal forma que o nível de potência acústica detectado por cada receptor é igual aos demais. Observar que esta é uma condição ideal e não imprescindível para posicionamento do ponto focal (de maior potência) do feixe acústico pois, uma vez conhecido o perfil de distribuição de potência do feixe transmitido e o perfil de sensibilidade de detecção de cada um dos três receptores e resolvendo-se o sistema de equações que pode ser montado com os valores de potência lidos em cada receptor, pode-se determinar a localização espacial do ponto no plano dos receptores, para o qual o feixe está direcionado. Este é o princípio em que se baseia a técnica de localização por triangulação de potência do sinal ultrassônico proposta neste trabalho.

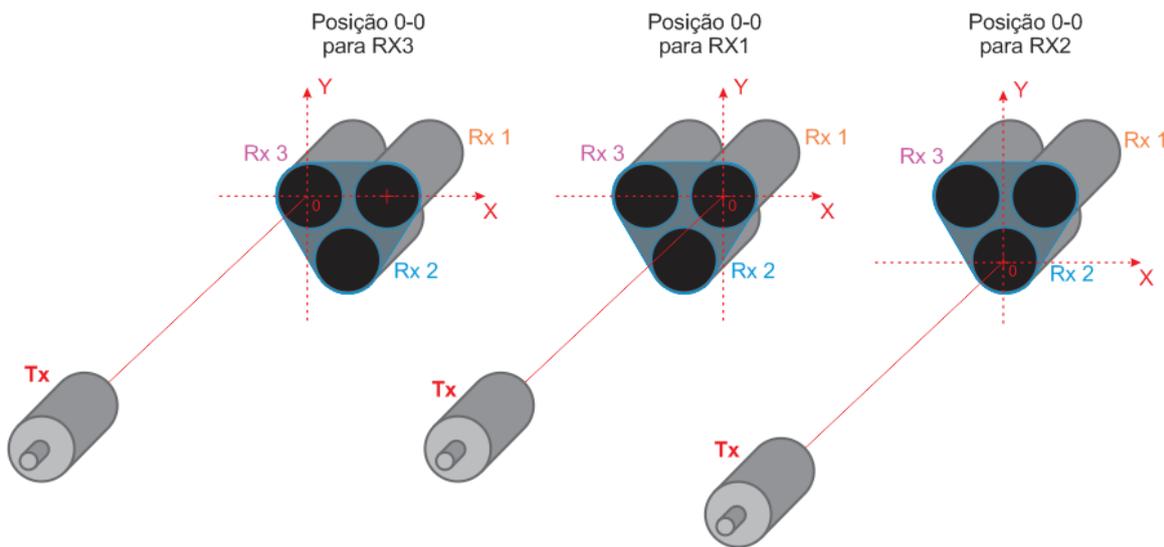
No lado direito da Figura 13 podem-se observar as alterações de nível de potência detectados nos receptores quando o ponto de maior potência do feixe acústico (ponto focal) está fora da posição de equilíbrio de leitura de potência recebida em cada transdutor, permitindo que esta nova posição também seja determinada pelo mesmo sistema de equações anterior, o que deixa perceber que há uma tendência de validação da técnica de triangulação proposta (SILVA, 2009).

Assim, cada receptor  $R_i$  deve ser cuidadosamente caracterizado para obter os valores de  $P_{0i}$  (potência máxima) detectada no receptor  $i$  quando o feixe acústico está axialmente alinhado com ele e também caracterizada a largura máxima do feixe acústico  $W_i$  para cada receptor,

necessários para a solução do sistema de equações acima citado, uma vez que, na prática, os receptores são ligeiramente diferentes e apresentam larguras  $W_i$  diferentes para a mesma potência  $P$  incidente. A fim de equalizar esses valores lidos nos receptores deve ser determinado um fator ou coeficiente de correção  $K_i$ , para cada receptor. Assim, multiplicando-se o coeficiente de correção pelo respectivo nível de potência  $P_{oi}$ , lido diretamente do receptor “ $i$ ”, obtém-se o mesmo resultado máximo para os três receptores. Então, para uma dada leitura de nível de potência em qualquer receptor, pode-se obter o valor ajustado, executando-se o produto

$$P_{oi} * K_i .$$

A técnica para se obter esses coeficientes, consiste em colocar o eixo de propagação do sinal acústico do transmissor diretamente alinhado com o centro  $(x_i, y_i)$  do receptor  $R_i$ , um de cada vez, conforme se  $P_{oi}$ , como se observa na Figura 14. Nesta condição cada receptor  $R_i$  apresenta a sua maior amplitude de saída  $P_{oi}$ , possibilitando o cálculo dos coeficientes de correção  $K_i$ .



**Figura 14:** Leitura dos valores máximos dos sinais de cada receptor.

### 3.5. Disposição dos Receptores no Conjunto de Triangulação

As posições  $x_i, y_i$  são conhecidas e definidas pela montagem dos receptores, assim as distâncias dos centros de  $R_i$  foram definidas como:

$$x_1 = 23 \text{ cm} \rightarrow y_1 = 4,7 \text{ cm},$$

$$x_2 = 0 \text{ cm} \rightarrow y_2 = 31,3 \text{ cm},$$

$$x_3 = 23\text{cm} \rightarrow y_1 = 4,7\text{ cm}$$

Permitindo que se obtenha a amplitude ( $P$ ) do sinal em cada receptor conforme a posição do feixe, como observado na Eq. 29

$$P_i(x, y) = K_i P_{0i} e^{-\left(\frac{d_i}{W_i}\right)^2}, \quad \text{Eq. 29}$$

onde:

$P_i(x, y)$  = a amplitude do sinal de saída do receptor  $R_i$  quando o feixe gaussiano do transmissor está na coordenada  $(x, y)$ .

$P_{0i}$  = a amplitude máxima do sinal de saída de  $R_i$  quando o feixe gaussiano do transmissor está na coordenada  $(x_i, y_i)$ , ou seja, quando o feixe está centralizado em  $R_i$

$K_i$  = o coeficiente de correção (já definido)

$d_i$  = a distância radial do centro de  $R_i$  ao centro geométrico ( $C_0$ ), do conjunto de receptores

$W_i$  = a largura do feixe

A amplitude elétrica do sinal de saída em cada receptor  $R_i$  é proporcional à potência acústica detectada. Assim, tendo em vista das equações de potência apresentadas na Eq. 29 e ainda considerando o uso dos coeficientes de correção  $K_i$ , a amplitude detectada para cada receptor  $R_i$  será dada pelo sistema

$$\begin{cases} P_1(x, y) = K_1 P_{01} e^{-\left(\frac{d_1}{W_1}\right)^2} \\ P_2(x, y) = K_2 P_{02} e^{-\left(\frac{d_2}{W_2}\right)^2} \\ P_3(x, y) = K_3 P_{03} e^{-\left(\frac{d_3}{W_3}\right)^2} \end{cases} \quad \text{Eq. 30}$$

e que, de forma geral, pode ser escrito como

$$\begin{cases} P_i(x, y) = K_i P_{0i} e^{-\left(\frac{d_i}{W_i}\right)^2} \\ d_i = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} \end{cases}, \quad \text{Eq. 31}$$

onde  $i = 1, 2, 3$ ,

sendo  $P_{0i}(x, y)$  a amplitude máxima do sinal de saída do receptor  $R_i$  quando o feixe gaussiano do transmissor está nas coordenadas  $(x_i, y_i)$ , ou seja, quando o feixe está centralizado em  $R_i$ ,  $K_i$  é o coeficiente de correção,  $d_i$  é a distância radial do centro de  $R_i$  à ordenada  $(x, y)$  do feixe gaussiano do transmissor no plano dos receptores e  $W_i$  é a largura do feixe.

### 3.6. Localização do Feixe no Plano dos Receptores

A localização do feixe no plano dos receptores se dá pela triangulação da potência detectada em cada um dos receptores  $R_i$  do sistema de equações Eq.30.

Usando a forma geral do sistema de equações, apresentado na Eq.31, e fazendo

$$\bar{P}_i = \frac{P_i(x, y)}{K_i P_{0i}} \quad \text{Eq. 32}$$

que é a amplitude normalizada de cada receptor, tem-se:

$$e^{-\left(\frac{d_i}{W_i}\right)^2} = \bar{P}_i \quad \text{Eq. 33}$$

$$\ln\left(e^{-\left(\frac{d_i}{W_i}\right)^2}\right) = \ln(\bar{P}_i) \quad \text{Eq. 34}$$

$$\left(\frac{d_i}{W_i}\right)^2 = -\ln(\bar{P}_i) \quad \text{Eq. 35}$$

O que leva às distâncias radiais

$$d_i^2 = W_i^2(-\ln(\bar{P}_i)) \quad \text{Eq. 36}$$

Transformando-se as distâncias radiais, que estão em coordenadas cilíndricas, para coordenadas cartesianas tem-se [OLIVEIRA – 2015] tem-se:

$$d_i^2 = (x_i - x_{0i})^2 + (y_i - y_{0i})^2 \quad \text{Eq. 37}$$

$$W_i^2(-\ln(\bar{P}_i)) = (x_i - x_{0i})^2 + (y_i - y_{0i})^2 \quad \text{Eq. 38}$$

Desenvolvendo a Eq. 36 para os três receptores obtém-se um sistema de três equações, apresentado na Eq. 39

$$\begin{cases} (x_1 - x_{01})^2 + (y_1 - y_{01})^2 - W_1^2(-\ln \bar{P}_1) = 0 \\ (x_2 - x_{02})^2 + (y_2 - y_{02})^2 - W_2^2(-\ln \bar{P}_2) = 0 \\ (x_3 - x_{03})^2 + (y_3 - y_{03})^2 - W_3^2(-\ln \bar{P}_3) = 0 \end{cases} \quad \text{Eq. 39}$$

Então, resolvendo-se o sistema de equações acima, se obtém a localização do centro do feixe acústico em  $(x, y)$ . Para encontrar a solução do sistema é necessário conhecer as características dos receptores  $R_i$  ( $W_i$  e  $K_i$ ) e suas posições  $(x_i, y_i)$  no plano receptor e conhecer as amplitudes normalizadas  $\bar{P}_i$ .

Dispondo-se das coordenadas  $(x, y)$  do centro do feixe gaussiano do transmissor é possível verificar a direção e amplitude do movimento do feixe acústico em um meio sujeito a turbulência.

$$r_c = \sqrt{x^2 + y^2} \quad \text{Eq. 40}$$

Então a variância de  $r_c$  pode ser obtida pela estatística temporal do parâmetro. [SILVA,2009] [OLIVEIRA,2015].

## 4. DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL

Este Capítulo avalia os transdutores, faz suas caracterizações, define o transdutor a ser utilizado no trabalho, determina a execução em laboratório dos experimentos avaliando as limitações dessa decisão, mostra os detalhes da técnica de elaboração e montagens, mostra os experimentos realizados e os resultados obtidos.

### 4.1. Diferenças entre Transdutor e Sensor

Embora bem próximos em função, a definição de transdutor difere da de sensor.

Transdutor é um componente que transfere informação (na forma de energia) de uma parte do sistema de medida para outra, geralmente, através de uma conversão para energia elétrica. São exemplos de transdutores: termopar (converte calor em ddp), encoder (movimento mecânico em pulsos elétricos) etc. Sensor é a parte do sistema de medida que responde pela grandeza física a ser medida. Os exemplos acima também são considerados sensores pois todo transdutor é um sensor, porém, nem todo sensor é um transdutor. Um termopar, que transforma uma forma de energia (calor) em outra (elétrica), pode ser utilizado como “sensor” de temperatura. Repare, porém, que, para ser considerado transdutor, deve ocorrer uma transformação de uma forma de

energia em outra. Por outro lado, quando utilizamos um sensor de sobre corrente, por exemplo, através de um resistor ou transformador de corrente, ele não pode ser considerado transdutor, pois trabalhamos apenas com uma forma de energia: a elétrica. Neste caso, uma sobre corrente (energia elétrica) é convertida em uma tensão (energia elétrica) de controle; não houve, então, conversão de energia.

#### **4.2. A solução confinada - Considerações**

A prova de conceito de que a turbulência pode ser qualificada e quantificada será experimentada e analisada tomando-se por base o comportamento e o sinal ultrassônico dentro de um ambiente reduzido, confinado e controlado, típico de laboratório.

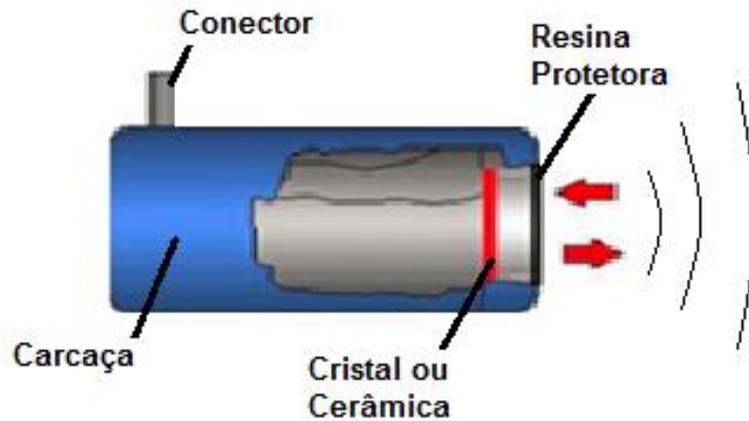
O ambiente confinado onde os transdutores serão submetidos aos testes de caracterização e de validação do conceito da técnica, deverá permitir, entre outras, que as posições relativas de cada transdutor ( $x_i$ ,  $y_i$ ) sejam medidas. Para tanto, será construído um reservatório de vidro em forma de uma cuba, a ser preenchido com água e provido de suportes e dispositivos mecânicos que permitam submergir os transdutores e realizar todas as medidas necessárias, com um mínimo de praticidade. Os mecanismos desenvolvidos para este fim não possuem automação, no momento destas medidas.

Sabe-se que, devido às atenuações características dos meios líquidos, os sistemas de comunicações ultrassônicas subaquáticas empregam transdutores operando em frequências iguais ou menores que 100 kHz e tipicamente limitadas a 70 kHz. Para a prova de princípio da técnica aqui apresentada usaremos transdutores de frequências maiores. Uma vez que a cuba de testes é relativamente pequena (< que 1 metro de comprimento), é interessante que o comprimento de onda seja o menor que experimentalmente seja possível para que a distância entre transmissor e receptores esteja em uma região de campo distante, como será explicado mais à frente.

#### **4.3. Transdutores Ultrassônicos**

Um transdutor ultrassônico converte energia elétrica em mecânica e vice-versa. Os materiais piezelétricos são frequentemente usados como transdutores ultrassônicos exatamente por funcionarem sob esse princípio. Os materiais ultrassônicos se dividem em naturais e artificiais, sendo o primeiro tipo constituído por cristais naturais adequadamente cortados e lapidados conforme a necessidade. Os artificiais são compostos por cerâmicas de vários tipos, como o Titanato de Bário ou piezo-polímeros, por exemplo, especialmente formulados para esta finalidade e conformados ou moldados para produzir diferentes modos de onda, de acordo com a aplicação

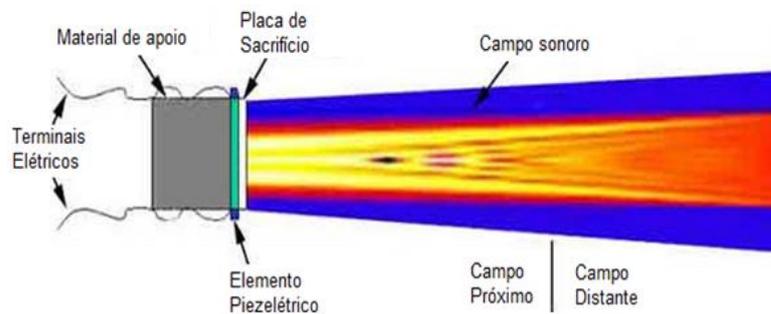
que se objetiva, como pode ser visto na Figura 15. Vale notar que um dos parâmetros determinantes da frequência ressonância é a espessura da pastilha da cerâmica, sendo o comprimento de onda de ressonância igual ao dobro da espessura do elemento piezelétrico.



**Figura 15:** Vista interna de transdutor piezelétrico normal.

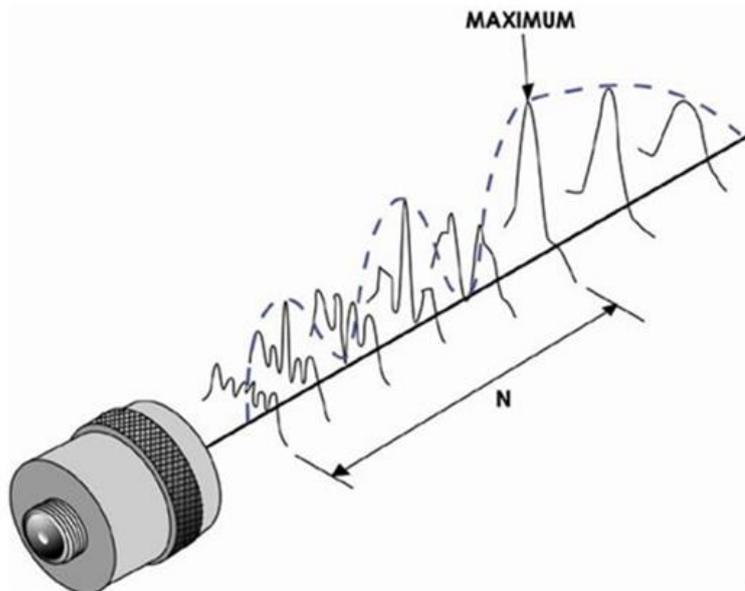
#### 4.4. Campo Irrradiado por Transdutores Piezelétricos

Pelo formato da pastilha piezelétrica, a onda emitida por um transdutor ultrassônico montado com este material não surge de um único ponto, mas de toda a superfície da face de propagação. O campo acústico que se forma na frente de um transdutor cilíndrico (NDT, 2015) apresenta a conformação típica como mostrada na Figura 16.



**Figura 16:** Formato padrão do campo ultrassônico.

Como o sinal ultrassônico se origina em uma série de pontos distintos na face do transdutor é de se esperar que as várias ondas que compõem o feixe interajam produzindo interferências construtivas e destrutivas entre si, apresentando uma resultante espacialmente dependente da direção de propagação. A Figura 17 mostra um exemplo típico da figura do sinal assim formado:



**Figura 17:** Padrão de Interferência no eixo z em um Transdutor.

#### 4.5. Configurações e Procedimentos Experimentais

Para que se possa definir qual o transdutor mais adequado dentre os disponíveis para teste, é necessário caracterizar seus perfis de distribuição de potência sonora na água. Para tanto são utilizados dois transdutores casados, ou seja, cuja frequência de operação é a mesma. Estes são montados justapostos aos pares, frente a frente conforme mostra a Figura 18, tendo uma camada pelicular de gel de acoplamento entre eles, conforme mostra a Figura 19, para que se minimizem as perdas de acoplamento (montagem back-to-back).

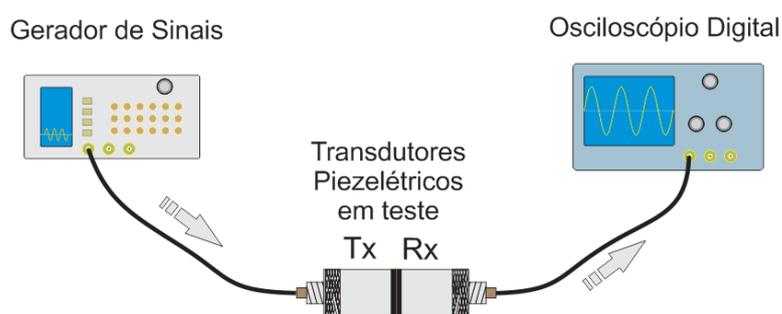


**Figura 18:** Montagem do acoplamento back-to-back de transdutores. A seta mostra o excesso de gel no acoplamento.



**Figura 19:** Transdutor com gel de acoplamento da superfície.

A montagem do setup de testes, conforme se observa na Figura 20, foi configurada para que um gerador de sinais senoidais, fornecesse energia a um dos transdutores escolhidos, passando este a funcionar como transmissor. Um osciloscópio permitiu verificar a amplitude do sinal lido no outro transdutor a ele acoplado.



**Figura 20:** Setup para Caracterização de Transdutores.

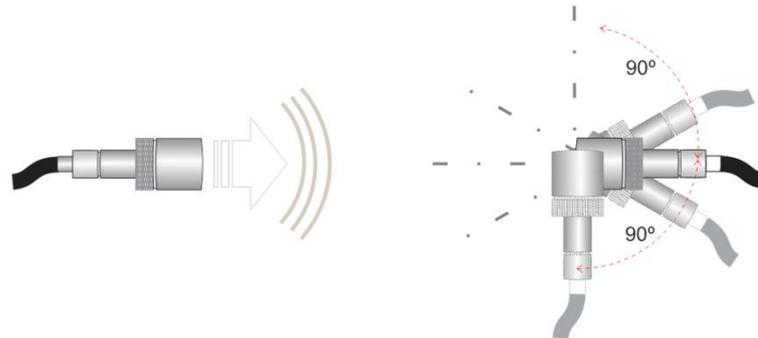
Utilizando essa configuração experimental, variou-se a frequência de excitação em torno da frequência de ressonância declarada pelo fabricante, permitindo verificar também se essa “frequência declarada” era realmente aquela em que o conjunto ressoa. Este procedimento foi executado para cada par de transdutores e será descrito com mais detalhes nas próximas seções.

O segundo passo para caracterização e escolha do melhor transdutor dentre os disponíveis, foi a instalação de cada par de transdutores dentro da cuba de teste espaçados de uma distância  $z$  e mantidos axialmente alinhados (grau zero), como mostrado na Figura 21. Tal procedimento também será adotado nas próximas seções.



**Figura 21:** Alinhamento grau zero entre Transmissor e Receptor.

O transdutor emissor/transmissor ( $TX$ ) foi mantido estacionário e o ângulo relativo entre os dois transdutores ( $TX$  e  $R$ ), foi variado em relação ao eixo longitudinal, conforme mostrado na Figura 22. Com este procedimento se caracterizou o par transmissor/receptor quanto à curva de distribuição de potência.

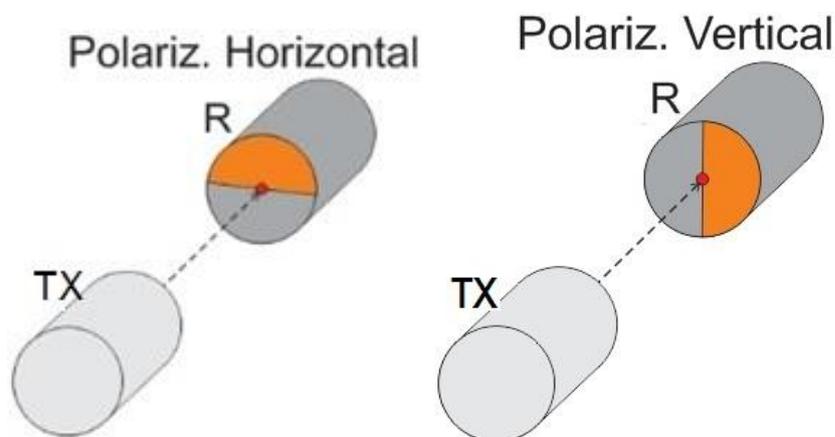


**Figura 22:** Caracterização com deslocamento angular do receptor.

Durante o procedimento de caracterização o receptor foi girado até noventa graus para a direita e até noventa graus para a esquerda em relação a posição de alinhamento de grau zero, anotando-se o valor de tensão disponível nos terminais do receptor para cada posição angular, como observável em um osciloscópio. A curva obtida pela leitura destes pontos constitui a curva de resposta por variação angular do transdutor.

Ao término dessas leituras, o transdutor foi realinhado à posição grau zero e girado axialmente de 90 graus, como representado na Figura 23, sendo as leituras anteriores repetidas. Tal procedimento permitiu a caracterização das curvas de distribuição/recepção de potência para ângulos de polarização/excitação ortogonais.

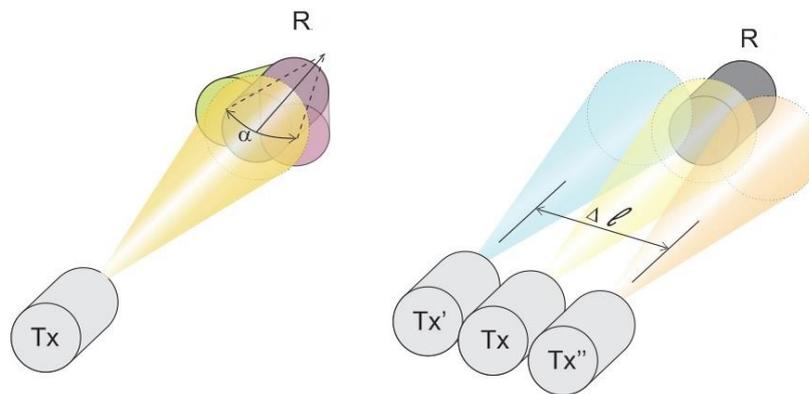
O gráfico obtido pela leitura destes pontos constitui a curva de resposta à excitação horizontal por variação angular do transdutor.



**Figura 23:** Caracterização da diferença entre sensibilidade à polarização horizontal e à vertical.

Para fazer o levantamento da curva de potência emitida pelo transdutor foi necessário instalar um transmissor ( $TX$ ) e um receptor ( $R$ ) alinhados axialmente (alinhamento em grau zero) dentro do reservatório e variar a posição de um em relação ao outro, tomando as leituras ponto a ponto durante esta variação.

Duas formas de variação puderam ser facilmente implementadas, sendo que a primeira foi a variação do ângulo do receptor em relação ao transmissor, mostrada no lado esquerdo da Figura 24 e a segunda foi o deslocamento lateral do transmissor em relação ao receptor, mostrado no lado direito da mesma Figura 24.



**Figura 24:** Ilustração mostrando a diferença entre o deslocamento Horizontal e Vertical.

No laboratório foram disponibilizados cinco pares de transdutores piezoelétricos, cada par ressoando em uma frequência distinta. Como se esperava, a sensibilidade, o rendimento e o ganho variam de um par de transdutores para outro, por isso as leituras obtidas foram normalizadas para que suas curvas pudessem ser superpostas e avaliadas comparativamente. É importante perceber aqui que duas caracterizações devem ser realizadas em cada par de transdutores. Estes pares de transdutores devem ser caracterizados quanto a sua resposta em frequência e quanto a sua resposta espacial (curva de distribuição de potência).

Para a caracterização da curva de distribuição de potência, dois transdutores foram fixados frente a frente, justapostos e com uma camada pelicular de gel entre eles, de modo a prover o acoplamento com a menor perda possível entre os transdutores, conforme já descrito anteriormente e mostrado nas Figura 18 e Figura 19. Uma varredura de frequência em torno da frequência característica do transdutor, definida pelo fabricante, permitiu a caracterização espectral do par de transdutores sob teste. Uma vez escolhido o transdutor mais adequado às condições impostas pelas condições de laboratório e pelos recursos financeiros disponibilizados para o projeto, os testes prosseguiram focados somente no transdutor escolhido, desprezando-se os demais, com outras frequências de ressonância.

## 4.6. Seleção e Caracterização dos Transdutores

### 4.6.1. Acoplamento Preliminar

Ensaios preliminares foram realizados com transdutores Olympus/harisonic dos seguintes modelos:

- a) Modelo 18-0018-S(853553) com frequência de operação em 500 kHz,
- b) Modelo 17-0112-R (713765) com frequência de operação em 1 MHz,
- c) Modelo 17-02-12-R (852731) com frequência de operação em 2,25 MHz,
- d) Modelo 17-0312-R (75453) com frequência de operação em 3,5 MHz e
- e) Modelo 17-0512-R (852732) com frequência de operação em 5 MHz.

Estes foram os transdutores utilizados nos testes iniciais porque estavam disponíveis no laboratório.

Todos estes modelos são a prova d'água, encapsulados em aço inoxidável e com um conector tipo N na parte de trás do transdutor, também à prova d'água, conforme se observa na Figura 25.



**Figura 25:** Transdutor Olympus a prova d'água.

Para a caracterização inicial dos transdutores, cada um foi montado em configuração back to back e interfaceados com gel acoplador conforme se observa na Figura 18 e na Figura 19 e mantidos um fixo ao outro pela aplicação de uma força constante. Para aplicar essa força de modo rápido e fácil foi utilizado um elo elástico entorno dos transdutores, como se vê na Figura 26. Também foi necessário manter os transdutores alinhados entre si para garantir a maior transferência possível de energia, o que foi conseguido fixando os dois transdutores a uma calha plástica, à semelhança do efeito obtido com um “Vgroove”, como também se vê nas Figura 27.a, Figura 27.b e Figura 27.c.



**Figura 26:** Dois transdutores mantidos alinhados por elos elásticos em uma guia e acoplados por gel.



**Figura 27:** Sequência de operações para acoplamento back to back de dois transdutores.

- Um dos transdutores encaixado em uma guia alinhador plástico.
- (a) Aplicação de gel acoplador nas faces dos dois transdutores
- (b) Preparação para montagem back to back dos transdutores
- (c) Os dois transdutores encaixados no guia e acoplados back to back.

#### 4.6.2. Excitação e Medição

Uma vez executada a montagem, aplicou-se a um dos transdutores um sinal senoidal CW, com 4,5 Vpp de amplitude constante, produzido por um Gerador de Sinais Arbitrários, marca Tektronix, Modelo AFG 3252, como mostrado na Figura 28, em uma faixa de frequência nas vizinhanças da ressonância definida pelo fabricante do transdutor. Este sinal foi recebido no outro transdutor de mesma frequência e observado em um osciloscópio marca Tektronics, Modelo TDS 3054C, mostrado na Figura 29.



**Figura 28:** Gerador de Sinais Arbitrários utilizado nos experimentos.



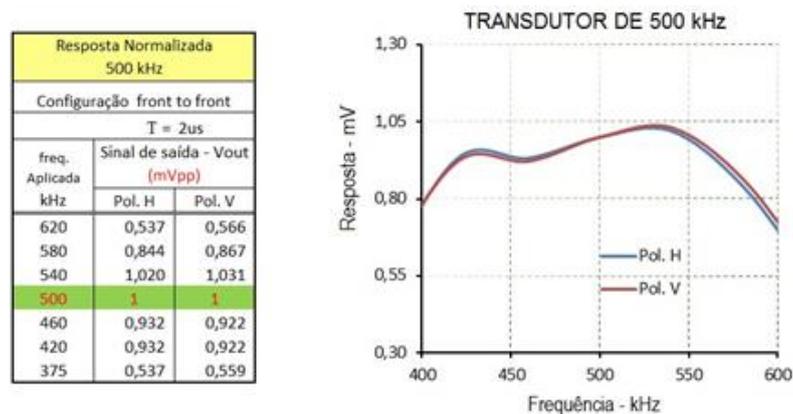
**Figura 29:** Osciloscópio Digital utilizado nos experimentos.

Esta configuração foi montada para cada par de transdutores disponível, cujas frequências de ressonância estão mencionadas acima, no subitem 4.6.1.

### 4.6.3. Caracterização Back to back

Aplicando-se o sinal a cada transdutor, variou-se manualmente a frequência de excitação dentro de uma faixa de frequências em torno da ressonância de cada par de transdutores informada pelo fabricante.

Assim foram obtidos os dados de resposta dos transdutores e montados seus respectivos gráficos, como se vê nas Figuras 30 até a Figura 34.



**Figura 30:** Transdutor de 500 kHz. Tabela de dados coletados e respectiva curva.

Na Figura 30 está caracterizado o par de transdutores que opera na frequência de 500KHz. A superposição da resposta à polarização vertical a da polarização horizontal, indica que o posicionamento radial de um transdutor em relação ao outro não introduz diferença significativa no perfil do sinal recebido.

As Figuras 31 até Figura 34 mostram as respostas dos demais transdutores ao mesmo teste efetuado do transdutor de 500 kHz. É importante perceber que este é primeiro teste de caracterização: Caracterização espectral e de polarização. O outro teste, de caracterização espacial, ainda deverá ser feito, o que nos permitirá definir o melhor transdutor a ser utilizado nos experimentos.

Resposta Normalizada 1 MHz		
Configuração front to front		
T = 1us		
freq. Aplicada MHz	Sinal de saída - Vout (mVpp)	
	Pol. H	Pol. V
1,42	0,496	0,365
1,28	0,731	0,596
1,14	1,210	1,051
<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>
0,87	0,899	0,613
0,75	0,681	0,473
0,62	0,496	0,311

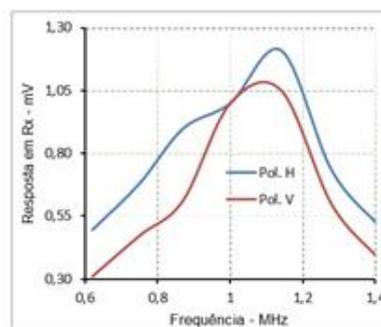


Figura 31: Transdutor de 1MHz. Tabela de dados coletados e respectiva curva.

Resposta Normalizada 2,25 MHz		
Configuração front to front		
T = 0,44us		
freq. Aplicada MHz	Sinal de saída - Vout (mVpp)	
	Pol. H	Pol. V
3,35	0,529	0,500
2,98	0,938	0,932
2,62	1,192	1,188
<b>2,25</b>	<b>1</b>	<b>1</b>
2,01	0,750	0,744
1,88	0,646	0,636
1,7	0,500	0,500

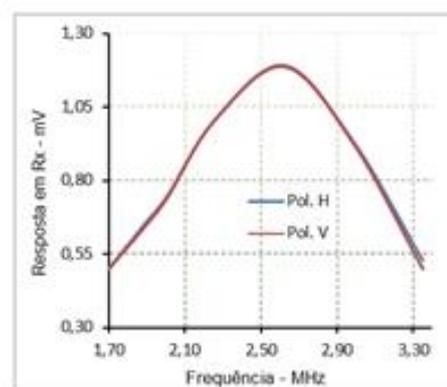


Figura 32: Transdutor de 2,25 MHz. Tabela de dados coletados e respectiva curva.

Resposta Normalizada 3,5 MHz		
Configuração front to front		
T = 0,29us		
freq. Aplicada MHz	Sinal de saída - Vout (mVpp)	
	Pol. H	Pol. V
5,23	0,499	0,501
4,89	0,665	0,662
4,58	0,834	0,834
<b>3,50</b>	<b>1</b>	<b>1</b>
3,20	0,834	0,834
2,90	0,665	0,668
2,57	0,499	0,501

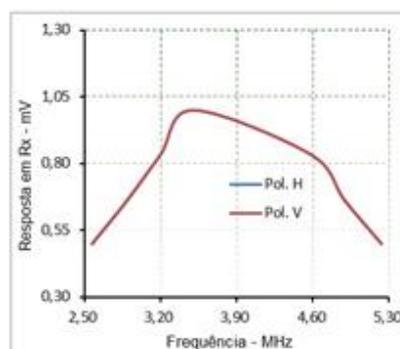


Figura 33: Transdutor de 3,5 MHz. Tabela de dados coletados e respectiva curva.

Resposta Normalizada 5 MHz		
Configuração front to front		
T = 0,2us		
freq. Aplicada MHz	Sinal de saída - Vout (mVpp)	
	Pol. H	Pol. V
7,03	0,500	0,500
6,71	0,668	0,665
6,44	0,832	0,830
<b>5,00</b>	<b>1</b>	<b>1</b>
4,50	0,832	0,830
4,30	0,668	0,665
4,02	0,500	0,500

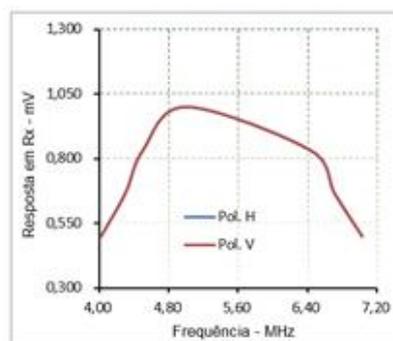


Figura 34: Transdutor de 5 MHz. Tabela de dados coletados e respectiva curva.

#### 4.7. Montagem dos Suportes dos Transdutores no Reservatório

A caracterização espacial, ou seja, a medida da curva de distribuição espacial de potência transmitida/recebida, somente pode ser feita com os transdutores submersos. Assim, antes dessa caracterização, será mostrada a montagem da cuba para os referidos testes. Além disso, a cuba de testes será importante, pois é o ambiente de testes para a prova de princípio da técnica.

Então, como esta prova de princípio será restrita ao ambiente laboratorial (Loureiro, 2005), o próximo passo foi a elaboração e construção de um reservatório de água que se adequasse ao espaço disponível no laboratório, resultando em uma cuba de vidro, com dimensões de 90 cm de comprimento por 50 cm de altura por 60 cm de largura, como se pode observar na Figura 35.



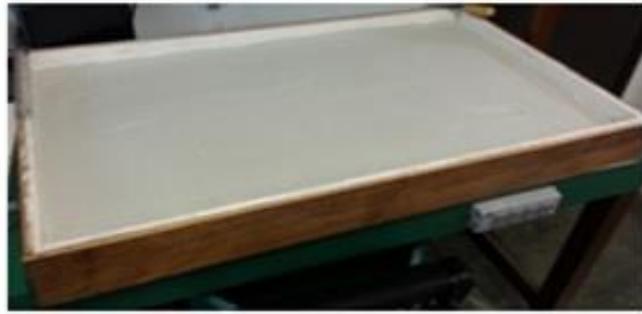
**Figura 35:** Cuba de vidro e apetrechos para preservação da qualidade da água.

A fim de reduzir o acoplamento mecânico entre o reservatório e a bancada sobre a qual o reservatório seria instalado, uma caixa rasa de madeira, mostrada na Figura 36.a e Figura 36.b, preenchida com micro esferas de vidro, com diâmetro médio de 0,3 mm, foi colocada sobre uma manta de borracha.

O objetivo, aqui, do uso das micro esferas de vidro é reduzir o acoplamento mecânico na direção horizontal entre o reservatório e a bancada de testes. A diferença comportamental entre microesferas e areia é o menor atrito entre os grãos da primeira, fazendo com que as esferas sejam mais eficientes por deslizarem melhor umas contra as outras.



(a)



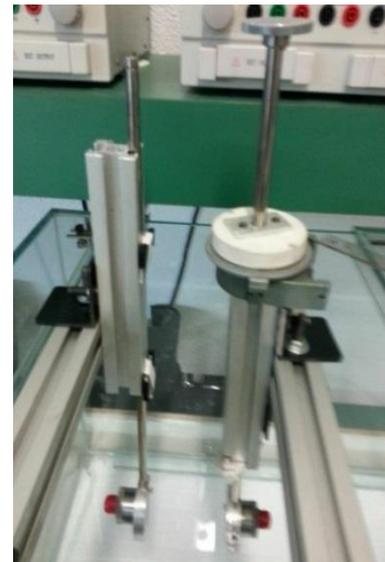
(b)

**Figura 36:** Caixa de madeira impermeabilizada, para comportar micro esferas de vidro.

Para fixação e ajuste dos transdutores ao reservatório, um conjunto de alinhamento e sustentação foi montado sobre uma estrutura rígida de perfil industrial de alumínio, conforme se observa na Figura 37.a e Figura 37.b, que foi fixada sobre o reservatório e ajustada para manter os dois transdutores alinhados axialmente e com as faces paralelas, conforme se observa na Figura 37.b, Figura 37. c, Figura 37.d, Figura 37.e e Figura 38.



(a)



(b)

**Figura 37:** Suporte para alinhamento dos transdutores. (a) montagem inicial dos suportes e (b), (c), (d), (e) pré-alinhamento sobre o reservatório.



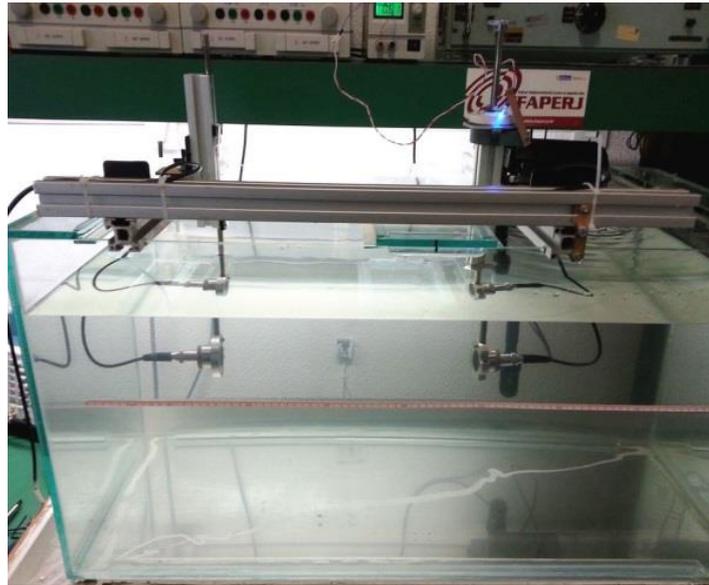
(Fig. 37-c)



(Fig. 37-d)



(Fig. 37-e)

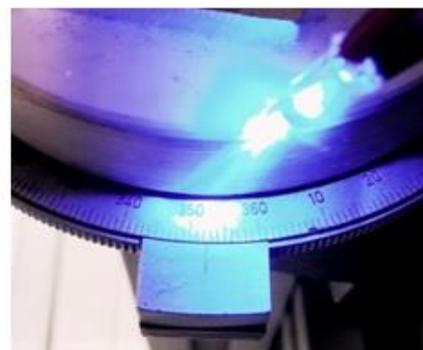


**Figura 38:** Suporte para alinhamento dos transdutores fixado ao reservatório, com transdutores alinhados e separados pela distância média calculada.

Uma escala circular graduada em 360 graus com resolução de 1 grau (transferidor) foi fixada de forma solidária ao eixo de suporte de um dos transdutores, permitindo a variação angular do transdutor bem como a repetibilidade deste posicionamento, conforme se observa nas Figuras 39.a e Figura 39.b.



(a)



(b)

**Figura 39:** Vista da escala circular graduada ajustável e detalhe da escala.

Para proporcionar repetibilidade de posicionamento e deslocamento lateral suave, o suporte móvel do transmissor foi fixado a outro suporte, fixo, com dois eixos, como mostram as Figura 40.a e Figura 40.b, observando-se alguns detalhes do eixo duplo (setas) na figura 40-a. A finalidade dele é impedir que o suporte vertical do transmissor se desloque da normal. Na figura40-b podem ser observados detalhes da preparação para automação e deslocamento motorizado do transmissor, em trabalhos futuros.



(a)

**Figura 40 :** a) Suporte adicional com dois eixos paralelos para garantir a repetibilidade de posicionamento do transmissor.

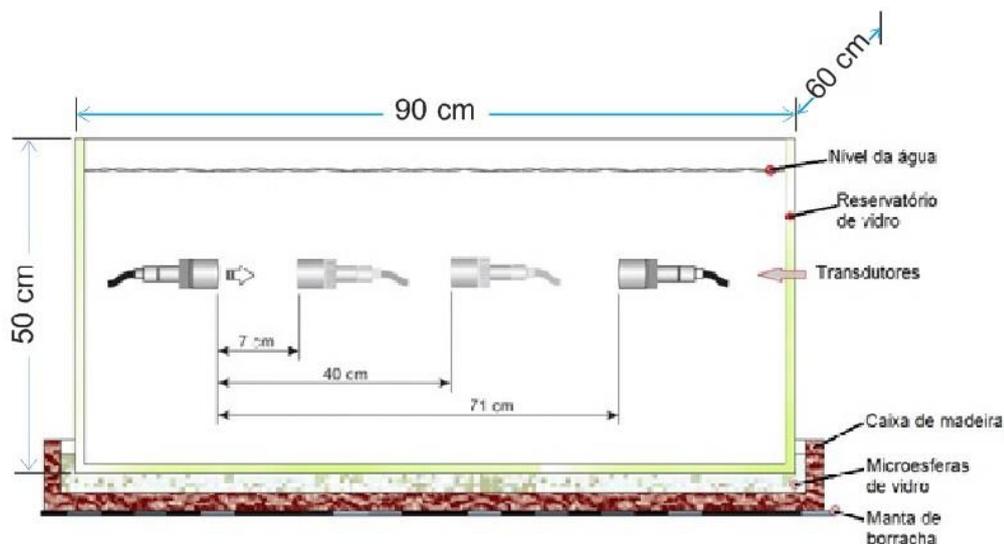


(b)

(b):Detalhe do mecanismo de acionamento motorizado do deslocamento lateral do transmissor.

#### 4.8. Posicionamento para Caracterização no Reservatório

Para a caracterização os transdutores foram posicionados dentro do reservatório na forma que segue. Um dos transdutores foi colocado o mais próximo possível de uma das bordas internas do reservatório e seu par foi posicionado, sequencialmente, em três distâncias distintas: 7 centímetros, 40 centímetros e 71 centímetros (maior distância permitida pelo reservatório), como podem ser observados na Figura 41.



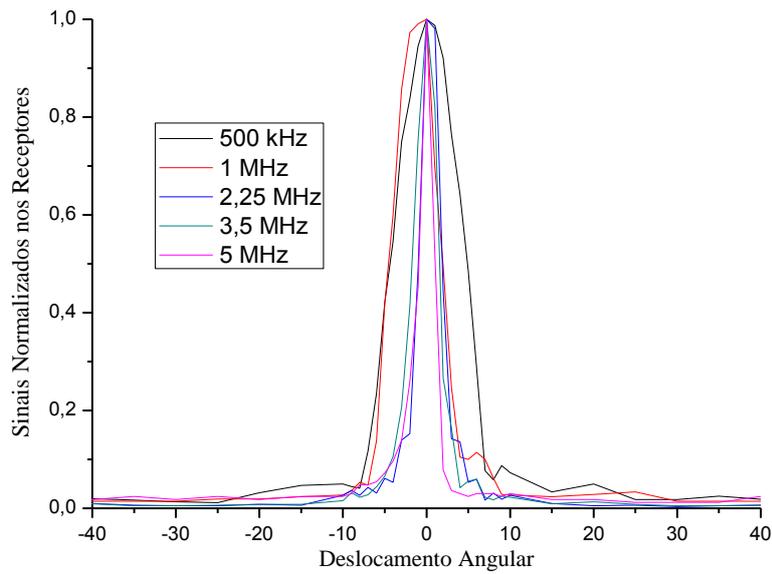
**Figura 41:** Posicionamento para caracterização dos transdutores a três distâncias distintas.

Uma vez montada a infraestrutura de suporte dos transdutores, foi possível a caracterização espacial dos pares de transdutores, variando angularmente a posição entre estes, conforme procedimento representado na Figura 22.

#### 4.9. Respostas dos Transdutores

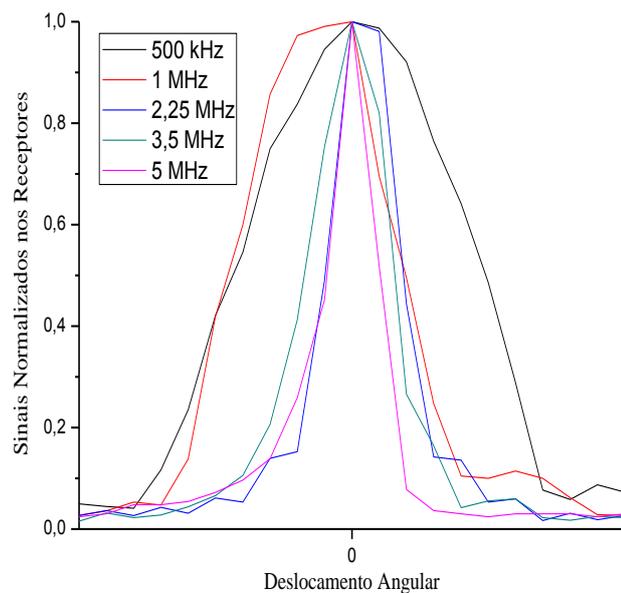
Colocados os transdutores (transmissor e receptor) dentro do reservatório com água doce e separando-os a distância de 40 cm, aplicou-se um sinal senoidal CW com amplitude de 4,5 volts e na frequência central de cada par de transdutores, conforme aquela já obtida na caracterização espectral. Variando angularmente o transdutor emissor, foram obtidos os dados para levantamento de suas respectivas curvas de resposta espaciais (distribuição espacial de potência).

Na Figura 42 pode ser observada a resposta normalizada dos transdutores de 500 kHz, 1 MHz, 2,25 MHz, 3,5 MHz e 5 MHz e as suas respectivas curvas, com ângulo de variação horizontal entre  $+90^\circ$  e  $-90^\circ$ . Na Figura 43, os mesmos dados são mostrados em detalhes dentro da variação angular de  $\pm 10$  graus. Na Tabela 1, no Anexo I podem ser vistos dos dados numéricos desse experimento.



**Figura 42:** Curva de resposta normalizada dos transdutores de 500 kHz, 1 MHz, 2,25 MHz, 3,5 MHz e 5 MHz – Vista completa das curvas, para além de seus ângulos úteis.

A Figura 43 aplica um *zoom* na Figura 42, mostrando somente a região entre -10 e +10 graus, permitindo a visualização de mais detalhes dessa curva.



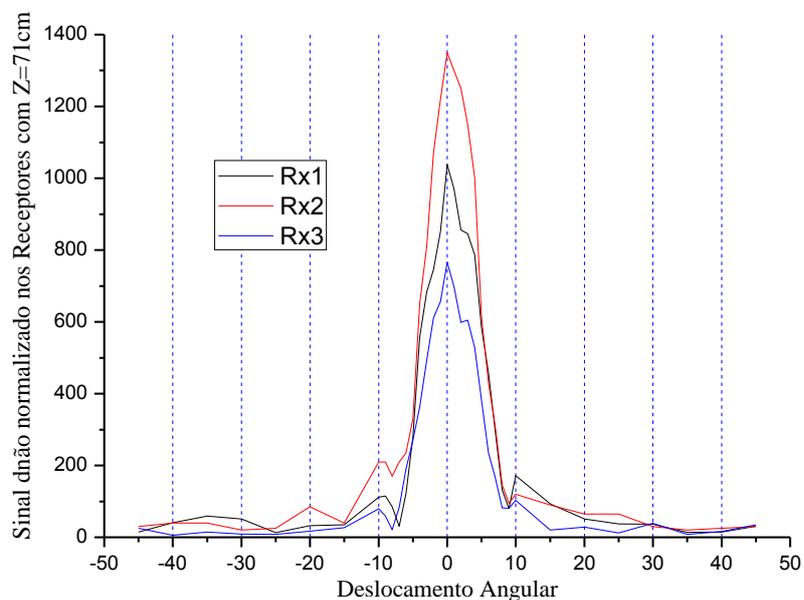
**Figura 43:** Curva de resposta normalizada dos transdutores - Visualização limitada a  $\pm 10$  Graus.

Da Figura 44 pode-se observar que o transdutor de 500 kHz é o que apresenta a distribuição espacial de potência com maior largura dentre os testados. Os outros transdutores possuem uma largura de feixe mais estreita, tornando os procedimentos experimentais que se

seguem, difíceis de serem executados, pois as variações de potência nos receptores serão muito agudas para pequenos deslocamentos do transmissor. Além disso, a largura de feixe dos transdutores de 500 kHz é de aproximadamente  $8^\circ$  (oito graus). Uma vez que, conforme a Figura 44, a largura do feixe no plano dos receptores será de aproximadamente 10 cm ( $\sim 71\text{cm} \times \text{tg } 8^\circ$ ) e a ‘largura x altura’ do reservatório é de aproximadamente ‘50 cm x 60 cm’, conforme Figura 41, então, a largura do feixe de 500 kHz é adequada ao propósito do trabalho.

Conforme apresentado na Eq. 30 a proposta técnica exige o uso de 3 receptores, assim o passo seguinte foi caracterizar outros dois transdutores de 500 kHz para compor o conjunto de três receptores e validar a prova de princípio da técnica de triangulação por amplitude.

A Figura 44 mostra o resultado da caracterização dos três transdutores de 500 kHz, usados como receptores, sem normalização.

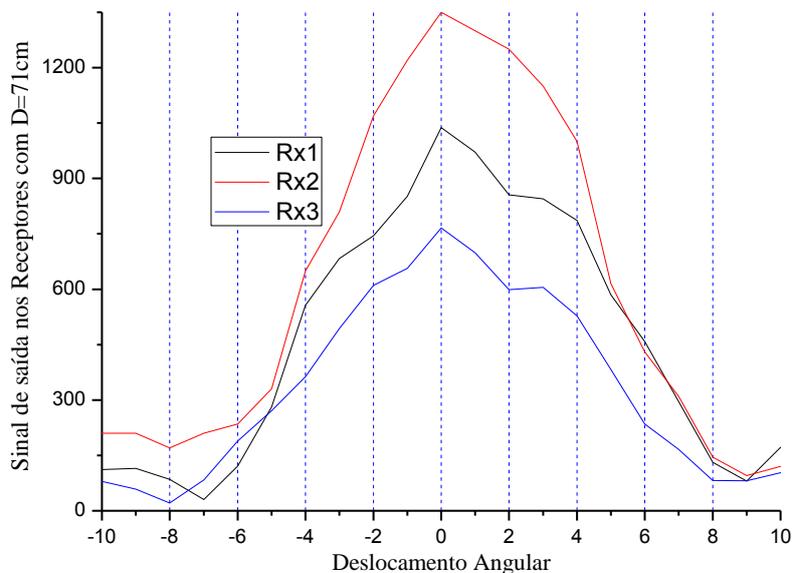


**Figura 44:** Resposta natural, não normalizada, comparativa dos três receptores de 500kHz, em todo o range de variação angular testada. Note-se a diferença entre os ganhos dos receptores

Como foi previsto no modelo matemático, Eq. 39, as amplitudes,  $P_{0i}$ , lidas nos receptores são ligeiramente diferentes entre si para a mesma excitação do feixe do transmissor. Nas condições experimentais observadas na Figura 45, o receptor  $R_1$  apresentou uma resposta de aproximadamente de 1000 mV, o receptor  $R_2$  de 1300 mV e o receptor  $R_3$  de 700 mV. Comparando a Figura 44 com a Figura 17 percebe-se que a distância máxima permitida pelas restrições dimensionais do reservatório não é suficiente para se obter a melhor gaussiana na caracterização, pois os lóbulos laterais que surgem nas curvas do receptor de 500 kHz são

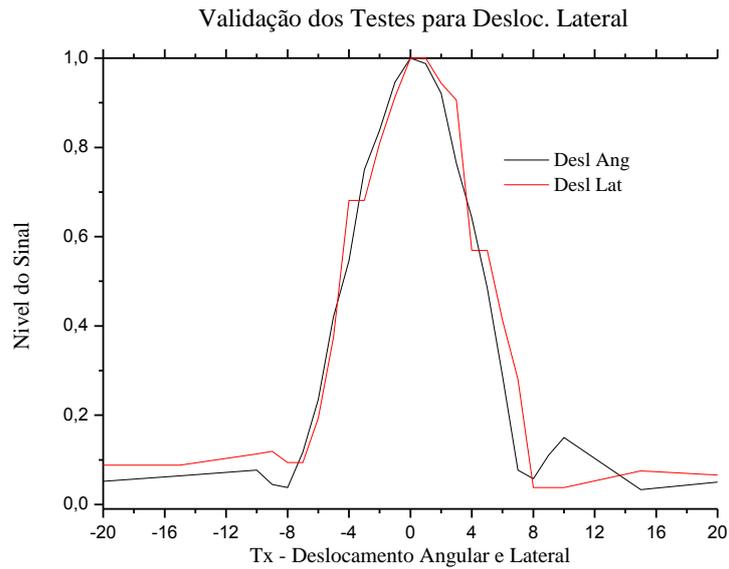
obtidos dentro da região de campo próximo. Pode-se perceber que, dentro das condições experimentais deste trabalho, a faixa angular mais interessante está situada entre  $\pm 10^\circ$ , como se pode observar na Figura 44, apresentando comportamento que tende à distribuição de potência gaussiana usada em nosso modelo matemático. Isso ocorre pois o reservatório não é suficientemente longo para podermos operar nas condições de campo distante. Nas condições de campo próximo, os lóbulos laterais reaparecem por volta dos  $\pm 10^\circ$  de deflexão a partir do centro do lóbulo principal.

A Figura 45 mostra com mais detalhes os lóbulos principais dos receptores caracterizados dentro da faixa angular de  $\pm 10^\circ$  de deflexão.



**Figura 45:** Respostas dos receptores  $R_1$ ,  $R_2$  e  $R_3$  não normalizados, acentuando as diferenças de seus ganhos e a necessidade de equilibrá-los antes da normalização.

Durante a operação de um sistema de telecomunicações ultrassônico subaquático é comum acontecer o deslocamento lateral e/ou angular do transmissor em relação ao receptor e também mudanças de ângulo de feixe ultrassônico provocadas por giro do transmissor ou do receptor. Nos dois casos o eixo do transmissor se afasta do eixo do receptor, provocando uma redução da potência acústica que atinge o receptor. Para verificar se entre estes dois tipos de deslocamento do feixe há uma diferença acentuada na potência recebida, testes comparativos foram executados e seus resultados são apresentados na figura 46.

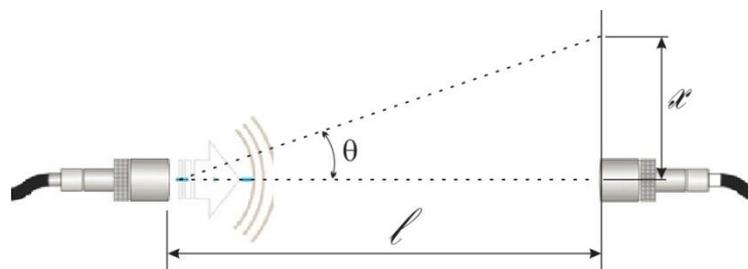


**Figura 46:** Comparação entre os resultados do deslocamento lateral relativo e o deslocamento angular entre transmissor e receptor (ver Tabela I).

Uma vez executados os testes e obtidos os valores dos ângulos nos quais se obtém leituras de potência equivalentes àquelas obtidas com deslocamento lateral, calcula-se o deslocamento que seria equivalente a aquele ângulo e o compara com o deslocamento experimental obtido.

Para se calcular o deslocamento correspondente a cada ângulo, já com os transdutores de 500 kHz escolhidos para o prosseguimento do trabalho, tomou-se a distância direta  $Z$  entre o transmissor e o receptor, distância esta normal aos dois planos, quais sejam, o de transmissão e o de recepção, sendo então promovido o deslocamento angular relativo do transmissor.

Medido o ângulo e conhecida a distância original entre os dois transdutores, obteve-se o deslocamento equivalente a esse ângulo. Os resultados foram armazenados em uma tabela (Tabela 1 no Anexo I) junto com a leitura do nível de saída do sinal no receptor, sendo tal procedimento repetido grau a grau, dentro de um alcance de 20 graus para cada lado, de deslocamento angular do transmissor em relação ao receptor, sendo este mantido estático.



**Figura 47:** Conversão de ângulo em deslocamento.

Sabendo-se que

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{x}{l} \quad \text{Eq. 41}$$

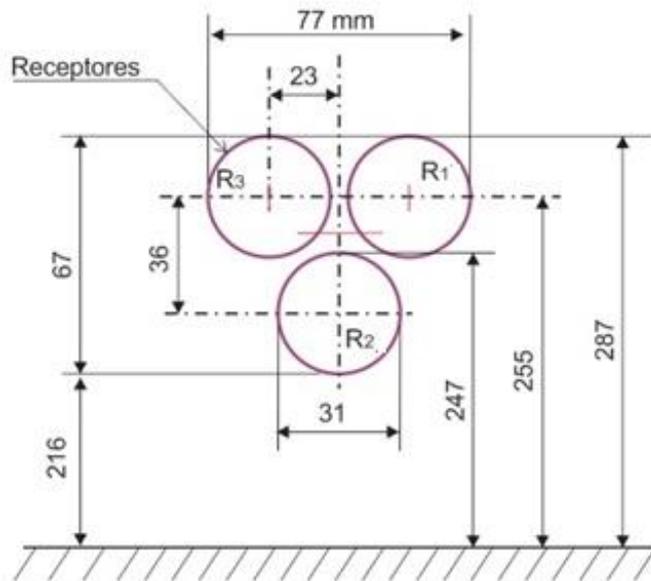
então,

$$x = l \cdot \operatorname{tg} \theta \quad \text{Eq. 42}$$

Os resultados obtidos pela aplicação da Eq.42 aos dados levantados através do *setup* mostrado na Figura 47 permitiu, por questões de simplificação de procedimentos e redução das tarefas, que o trabalho continuasse a ser desenvolvido elegendo-se somente um desses dois deslocamentos para continuação dos testes, uma vez que o resultado de um método corrobora o do outro, como observado na Figura 46.

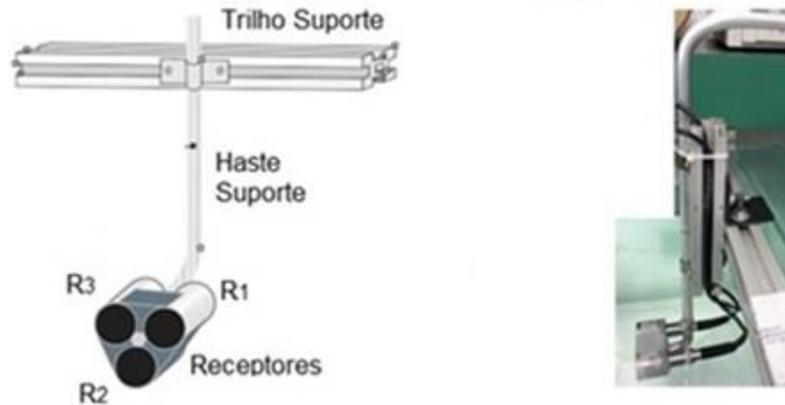
#### 4.10. Configuração para Triangulação

A Figura 48 ilustra as dimensões do conjunto com transdutores receptores, conforme elaborado e montado para alguns dos testes deste trabalho.



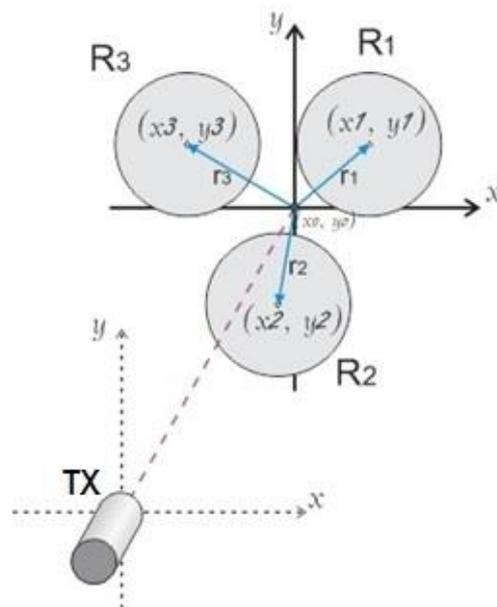
**Figura 48:** Dimensões do Conjunto de Transdutores.

Na Figura 49 pode ser observado no lado esquerdo o desenho e no lado direito a foto do conjunto de três receptores, respectivamente como foi projetado e como foi realizado.



**Figura 49:** Curvas de respostas dos receptores  $R_1$ ,  $R_2$  e  $R_3$ , com  $Z=54$  cm e  $y=4,7$  cm.

Como os transdutores emitem e recebem sinais não somente em seu ponto central, mas através de vários pontos de sua área acusticamente ativa, concluiu-se que a defasagem observada se deve à resultante dos pontos sensíveis de cada transdutor não coincidir com seu centro geométrico. Isto faz com que o centro acústico do conjunto dos receptores  $(x_i, y_i)$  seja diferente do centro geométrico do mesmo conjunto ( $r_1 \neq r_2 \neq r_3$ ), conforme pode ser observado na Figura 50; para tanto, se faz necessário definir aleatoriamente uma referência para o sistema de coordenadas e realizar todas as medidas a partir deste ponto.



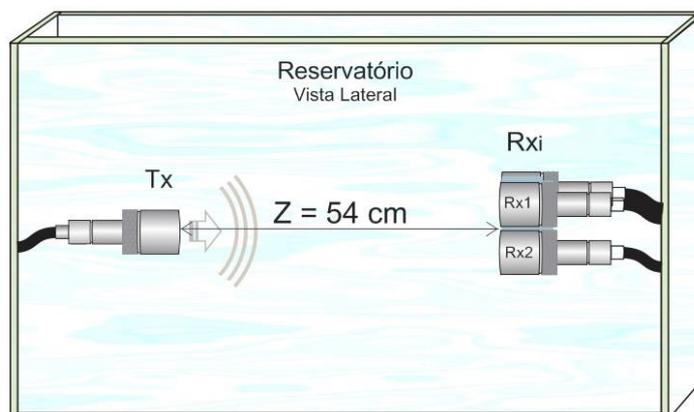
**Figura 50:** O ponto de equilíbrio de detecção dos sensores não coincide com o centro geométrico do conjunto.

Como este fato acontece tanto para os receptores como para o transmissor, a interação entre os sinais emitidos pelos diversos pontos da superfície do transmissor varia conforme a onda acústica se afasta do transmissor. Isso ocorre com maior intensidade dentro da região do campo

próximo e vai diminuindo na medida em que se aproxima da região do campo distante. Qualitativamente a região de campo próximo é caracterizada por possuir diversos lóbulos. Na medida em que a região de campo distante se aproxima, o lóbulo principal fica mais evidente e os lóbulos secundários vão sendo atenuados, como fica evidente na Figura 17 . A partir de determinado ponto o lóbulo principal se torna predominante e aos poucos assume o formato gaussiano. A partir da distância, no eixo  $z$ , em que isto acontece, começa o campo distante do transmissor. Como essa distância é maior que o comprimento do reservatório, todos os testes foram realizados dentro do campo próximo, ficando assim sujeitos às variações no formato do sinal acústico. Isto posto, o experimento buscou localizar algum trecho, ainda que reduzido, onde as curvas dos receptores apresentassem uma resposta aproximadamente gaussiana para a distribuição de potência, para que se pudesse determinar o deslocamento lateral do feixe do transmissor usando a técnica proposta. O sucesso na localização do centro do feixe do transmissor confirma a prova de princípio.

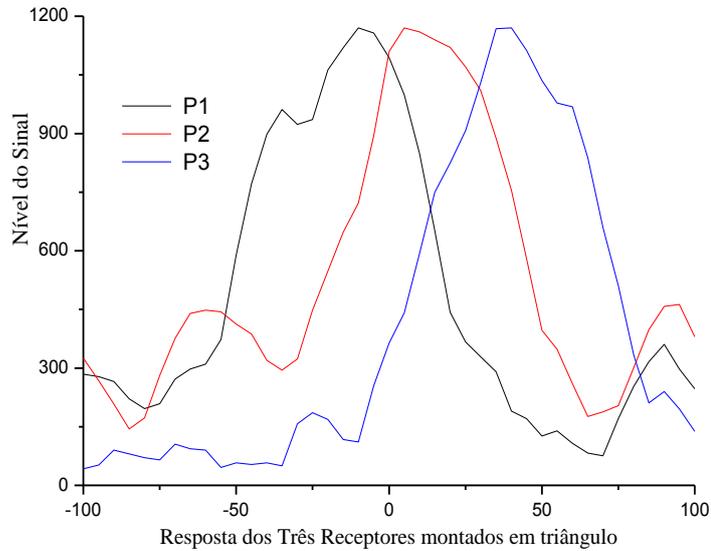
A partir desta referência, caracterizam-se os receptores  $R_i$  medindo suas posições  $(x_i, y_i)$  em relação à referência fixada anteriormente. Também são obtidas as amplitudes  $P_{0i}$ , que são os valores máximos de amplitude diretamente medidos. Toma-se então um deles como referência, para calcular os coeficientes de correção  $K_i$ . Estes coeficientes são usados para igualar os valores das amplitudes máximas dos três receptores, compensando assim as diferenças entre seus ganhos.

Devido às restrições dimensionais do reservatório, a montagem dos receptores em configuração triangular exigiu seu reposicionamento dentro do reservatório a uma menor distância até o transmissor. Esta nova distância, conforme mostrado na Figura 51, passou a exibir as curvas dos receptores, com formatos diferentes dos anteriores, como era esperado, em razão do surgimento de lóbulos laterais e reduzindo as larguras ( $W$ ) das curvas.



**Figura 51:** Transdutores dentro do reservatório, a nova distância.

Este procedimento permitiu a aquisição dos dados mostrados na Tabela 2, constante no Anexo II, e o traçado das respectivas curvas, mostradas na Figura 52.



**Figura 52:** Respostas dos três receptores montados em triângulo, com suas amplitudes equalizadas e distando 54 cm do TX.

Com esta configuração surgiram novos requisitos de espaço, fazendo com que, devido às dimensões do reservatório, os receptores fossem necessariamente posicionados mais próximos do transmissor ( $z= 65$  cm). Assim, como já estava previsto na literatura, as curvas geradas pelo deslocamento lateral do transmissor também sofreram modificações que, apesar de significativas, não se tornaram impeditivas para a realização do trabalho. As amplitudes dos sinais recebidos sofreram redução de potência devido a doação aos lóbulos laterais que surgiram junto às suas respectivas curvas gaussianas, como se pode observar na Tabela 2, de caracterização do conjunto triangular, e em sua curva correspondente, mostrados na Figura 52 e cujos dados constam da Tabela 3 no Anexo III.

### Ultrassom na água doce

$$f = 500 \text{ kHz}$$

$$\nu = 1450 \text{ m/s}$$

$$W = 71 \text{ mm}$$

$$P_0 = 480 \text{ mV (normalizado)}$$

$$K_1 = 6,324$$

$$K_2 = 1,918$$

$$K_3 = 1$$

} ----- Fatores de correção da amplitude

$$x_0 = 0$$

$$y_0 = 0$$

Obs.:  $x_i$  e  $y_i$  são as coordenadas do ponto central de cada receptor  $R_i$

$$x_1 = -20,763 \text{ mm}, y_1 = 12,474 \text{ mm}$$

$$x_2 = 0 \text{ mm}, y_2 = -24,127 \text{ mm}$$

$$x_3 = 20,763 \text{ mm}, y_3 = 12,474 \text{ mm}$$

## 5. RESULTADOS

Esta seção processa e analisa os resultados obtidos e determina sua validade.

### 5.1. Avaliação e Discussão dos Resultados

Buscando condições de teste mais favoráveis para aumentar a confiabilidade dos resultados deste trabalho, o conjunto de receptores foi deslocado para mais próximo do transmissor (54 cm), uma vez que quando se realizaram testes a 41 cm as curvas se mostraram, em toda a sua largura, bem mais próximas de uma curva gaussiana.

Apesar da melhora esperada, a posição a 54 cm se mostrou com lobos laterais ainda maiores e a curva ainda mais irregular; apesar disso resolveu-se verificar se mesmo nessas piores condições seria possível validar a proposta.

Foram efetuados novos testes tanto para verificação da amplitude máxima do sinal individual dos receptores quanto de deslocamento lateral do transmissor, sendo obtidos os dados que produziram a Tabela 3 e a Tabela 4, como constam respectivamente no Anexo 3 e no Anexo 4, bem como sua respectiva curva, mostrada na figura 53, obtendo-se as seguintes leituras:

Posição do transmissor:

$x$  = variável → Depende da posição do transmissor. Esta escala tem seu ponto de referência zero na face interna da lateral do reservatório.

$y$  = 4,7 cm acima do ponto aleatório, tomado como referência para o conjunto de receptores.

Corrigindo-se as posições dos receptores como segue, obtêm-se os respectivos valores para  $P_{oi}$  e  $W_i$  abaixo:

$$x_1 = 34,7 \text{ cm}$$

$$y_1 = 2,7 \text{ cm}$$

$$x_2 = 32,2 \text{ cm}$$

$$y_2 = 4,7 \text{ cm}$$

$$x_3 = 28,5 \text{ cm}$$

$$y_3 = 2,9 \text{ cm}$$

$$P_{o1} = 238 \text{ mV} \rightarrow \text{Potência máxima detectável em } R_1$$

$$P_{o2} = 1.300 \text{ mV} \rightarrow \text{Potência máxima detectável em } R_2$$

$P_{03}=740$  mV→Potência máxima detectável em  $R_3$

$W_1 = 3,3$  cm

$W_2 = 3,8$  cm

$W_3 = 3,5$  cm

Para determinar a distância ( $r_i$ ) entre o centro do feixe ultrassônico e o centro de cada receptor manipulam-se os termos da Eq. 36,

$$d_i^2 = W_i^2(-\ln(\bar{P}_i)),$$

obtendo o valor de  $r_i$  em função dos valores de  $P_i$ ,  $P_{0i}$  e  $W_i$  como segue:

$$r_i = \sqrt{-\ln\left(\frac{P_i}{P_{0i}}\right) * W_i} \quad \text{Eq. 43}$$

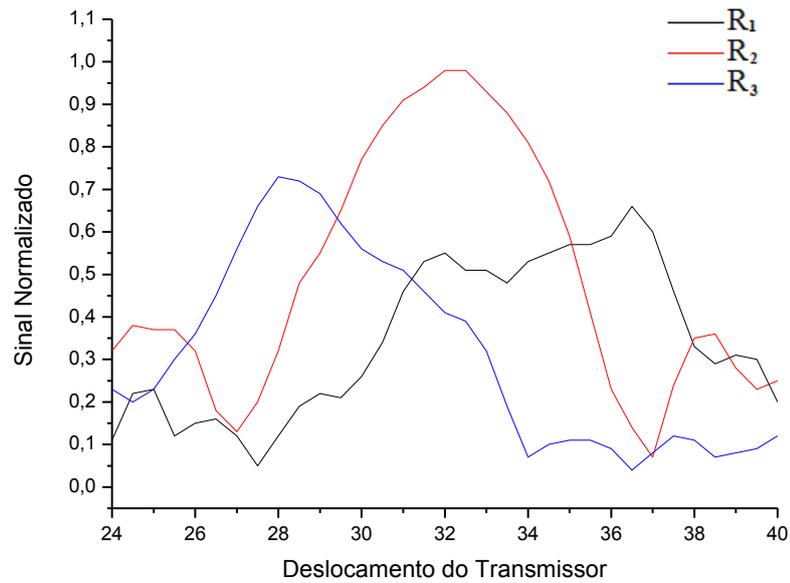
A Tabela 3, como consta no Anexo III, disponibiliza os valores de  $W_i$  e os valores das potências máximas medidas em cada receptor quando o transmissor está apontado diretamente para o ponto de maior sensibilidade desse receptor.

Aplicando o sinal de 500 kHz @ 4,5 volts no gerador senoidal e lendo os valores de  $P_i$  para cada posição ( $x$ ) do transmissor, no range de 18 cm a 44 cm, obtém-se os valores de  $P_i$  constantes na tabela 4, como consta no Anexo IV. Aplicando-se estes valores à Eq. 43 através do software ‘Mathematica’ (ver Anexo VII – “Algoritmo Usado com o Software Mathematica”), resulta nos valores de “ $r_i$ ”, também constantes na Tabela 4. Esses valores permitem plotar as novas curvas para  $R_i$ , como visto na Figura 53, onde a distância no eixo ( $z$ ) entre o transmissor (TX) e o plano dos receptores  $R_i$  é

$$z_{TX} = 54 \text{ cm}$$

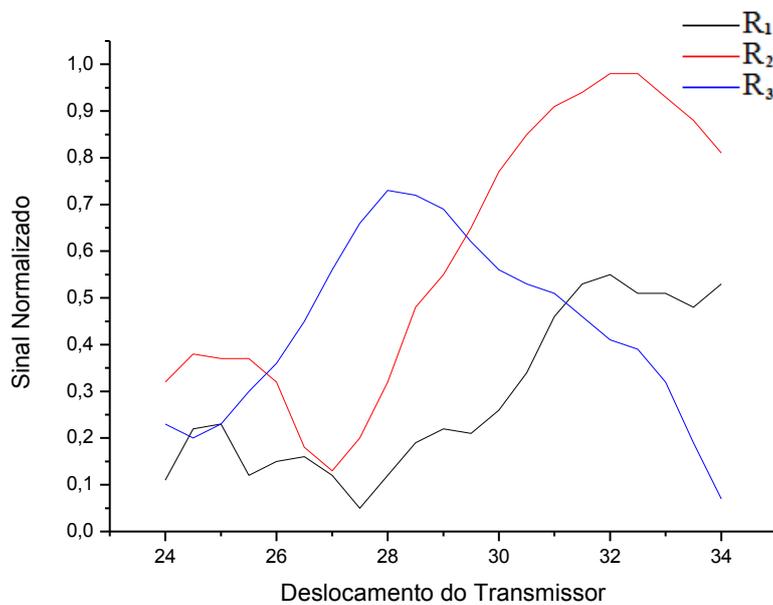
e o deslocamento do transmissor (TX) no eixo ( $y$ ) é

$$y_{TX} = 4,7 \text{ cm.}$$



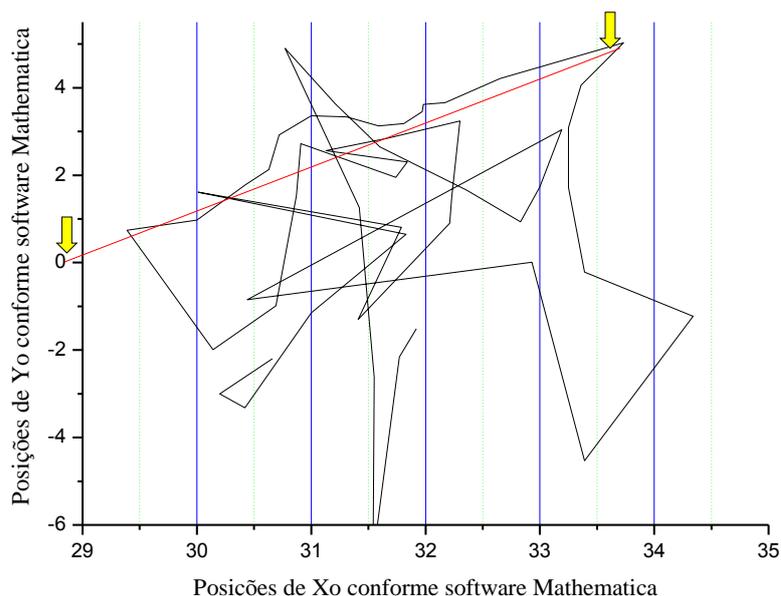
**Figura 53:** Resposta dos três receptores ao deslocamento lateral do TX a 54 cm de distância dos receptores.

É notável a mudança ocorrida nos perfis das curvas relativas a  $R_1$  e  $R_3$  devido a alteração da distância  $Z$ , apesar disto pode-se perceber que há um pequeno intervalo no eixo  $x$ , onde os perfis das curvas ainda permitem a validação da hipótese da técnica sugerida neste trabalho. Isto pode ser melhor percebido ampliando-se o trecho em questão, como se observa na Figura 54.



**Figura 54:** Zoom na curva da Figura 53, permitindo observar mais detalhes.

A aplicação um a um dos valores obtidos, no software Mathematica, fornece a posição detectada do feixe  $(x_0, y_0)$  para varias posições de TX ao longo do eixo  $x$ , como se vê na Tabela 5 e seu gráfico correspondente na Figura 55. O gráfico ampliado permite perceberque, nas três curvas, há uma certa linearidade entre os pontos 24 cm e 34 cm, ainda que prejudicada pelos erros grosseiros inerentes ao sistema de medição e montagem adotados.



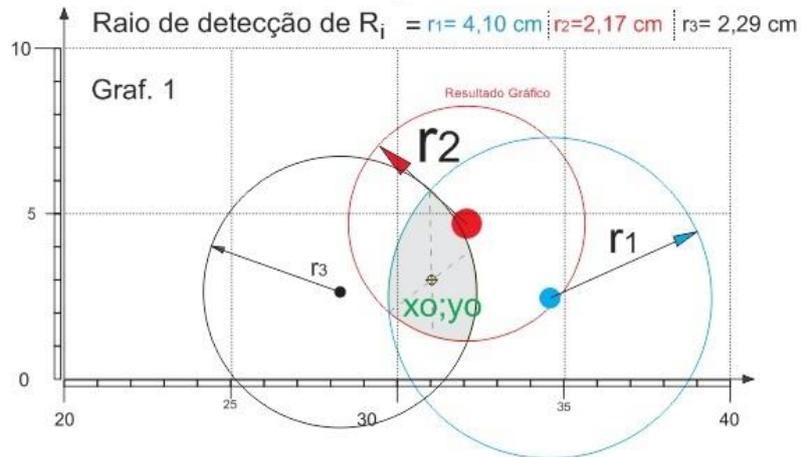
**Figura 55:** Gráfico da divergência do feixe conforme cálculo feito usando o software Mathematica apresentado no Anexo VII.

Devido a linearidade apresentada em relação aos outros trechos, o mais notável neste gráfico da Figura 55 é aquele situado sobre o eixo  $x$ , no intervalo de 29,5 cm a 33,5 cm.

Para fins de validação da solução matemática foram elaborados alguns desenhos com soluções gráficas baseadas nos dados experimentais. Esses dados foram obtidos em condições escolhidas aleatoriamente dentro do range de maior interesse, entre as posições 28 e 32 no eixo  $x$ . Isto permitiu gerar os gráficos mostrados nas Figura 56, Figura 57, Figura 58 e Figura 59.

Posição de T em  $x = 24$  cm

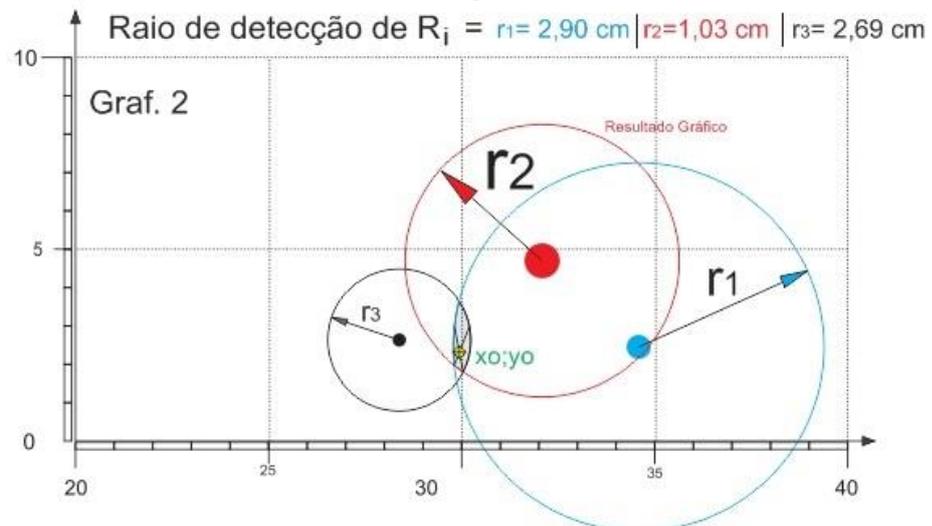
$$\text{Posição central de } R_i = \begin{cases} x_1= 34,7 \text{ cm} & y_1= 2,7 \text{ cm} \\ x_2= 32,2 \text{ cm} & y_2= 4,7 \text{ cm} \\ x_3= 28,5 \text{ cm} & y_3= 2,9 \text{ cm} \end{cases}$$



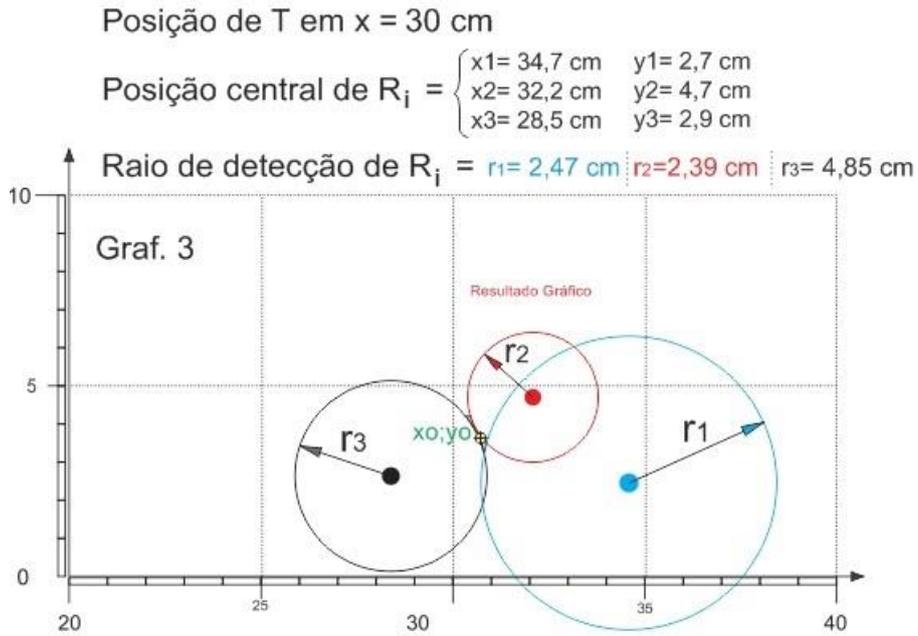
**Figura 56:**Solução Gráfica para TX em 24 cm

Posição de T em  $x = 28$  cm

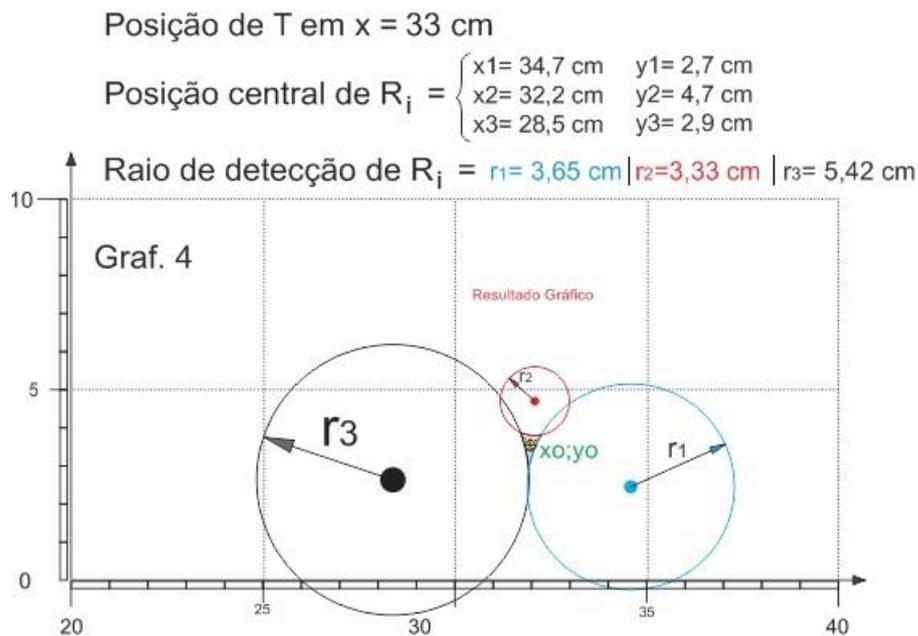
$$\text{Posição central de } R_i = \begin{cases} x_1= 34,7 \text{ cm} & y_1= 2,7 \text{ cm} \\ x_2= 32,2 \text{ cm} & y_2= 4,7 \text{ cm} \\ x_3= 28,5 \text{ cm} & y_3= 2,9 \text{ cm} \end{cases}$$



**Figura 57:**Solução Gráfica para TX em 28 cm



**Figura 58:**Solução Gráfica para TX em30 cm

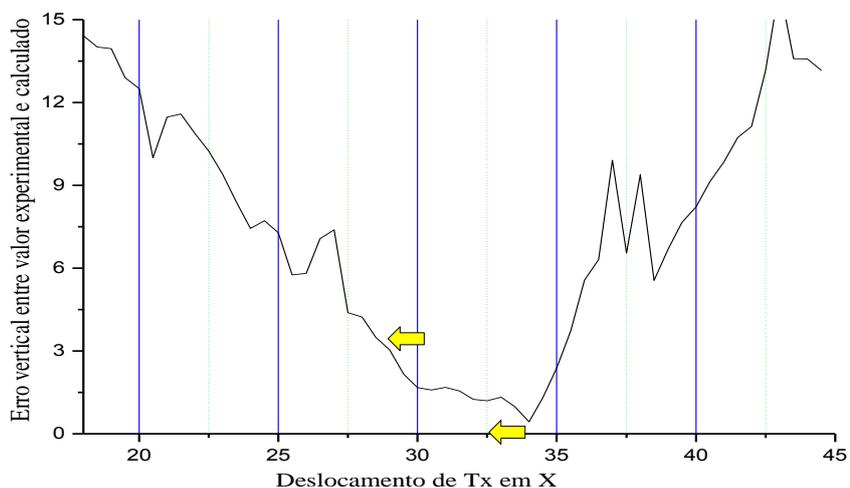


**Figura 59:**Solução Gráfica para TX em33 cm

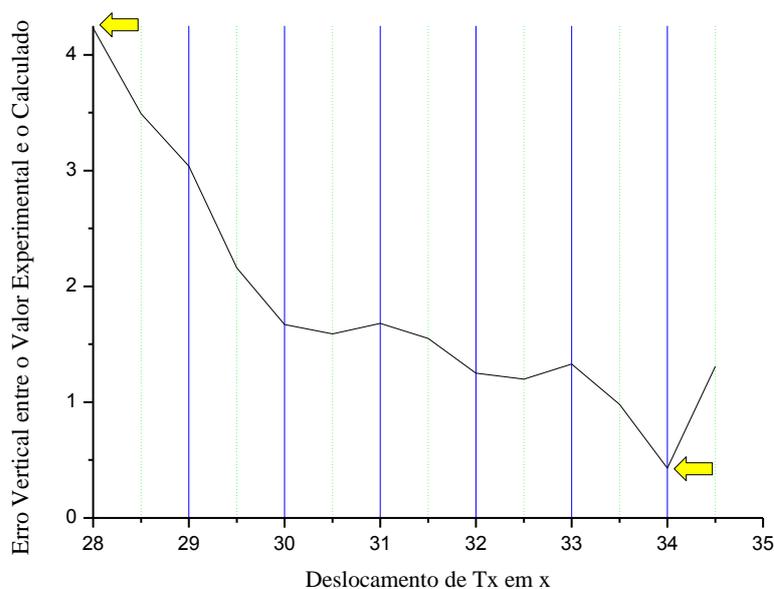
É de se notar que, ao contrário do que era esperado, cada solução gráfica define não um ponto mas sim uma área onde o ponto central do feixe deverá ser encontrado. Isto parece ocorrer devido a ruídos ambientes e às imprecisões das medidas práticas, ao passo que o software Matemática parece tender para um ponto mais provável. Vale notar que os pontos determinados pelo software Matemática estão sempre dentro da área definida graficamente; mais do que isso, o

ponto indicado pelo software está sempre bem próximo ao ponto central da área definida pelo gráfico; o que corrobora os resultados da solução matemática.

Plotando-se o gráfico do erro conforme os valores dados pela Tabela 5, é possível confirmar essa faixa de valores, mas observando que a Figura 60 é a plotagem de  $x_o$  versus  $y_o$ , com escala entre os pontos 28 e 34, enquanto que o gráfico do erro suporta todo o 'range' de 18 cm a 44 cm de percurso do TX ao longo de  $x$ .



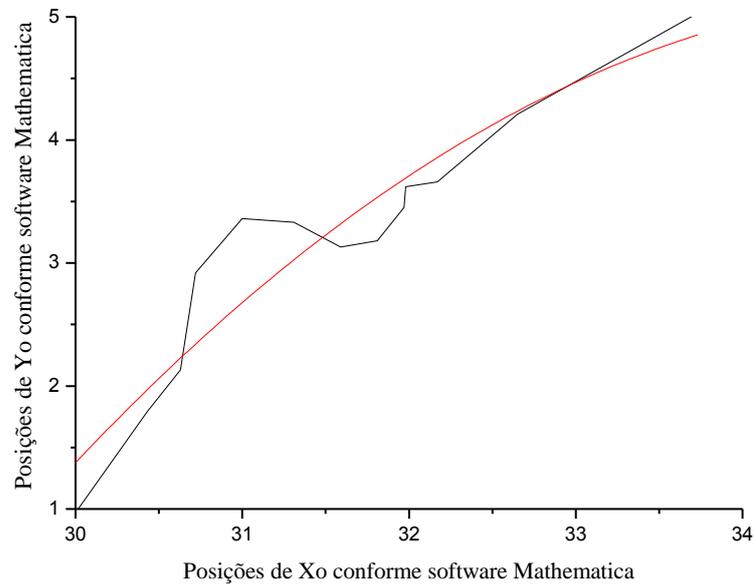
**Figura 60:** Gráfico do erro entre as localizações efetiva e calculada, para o centro do feixe



**Figura 61:** Zoom no trecho entre as ordenadas 24 e 34 no gráfico do erro existente entre a localização efetiva e a calculada para o centro do feixe em percurso restrito.

Nesta mesma tabela também estão plotados os erros entre o ponto real onde estava o transmissor e o ponto que a equação informou que ele estaria; sendo a Eq. 44, abaixo, aquela que fornece o valor do erro entre os pontos reais e os calculados.

$$Erro = \sqrt{(x - x_z)^2 + (y - y_z)^2} \quad \text{Eq. 44}$$



**Figura 62:** Valor de  $Y_0$  tal que  $X_0$  está entre 30 e 34 cm.  
Em vermelho está a representação de sua curva de tendência.

## 6. CONCLUSÃO

Este trabalho buscou avaliar a possibilidade de determinação, por triangulação, da posição de um feixe acústico em um meio líquido, à semelhança do que se faz com um feixe óptico no espaço livre (FSO). Analisou as influências que a turbulência subaquática e suas diversas fontes exercem sobre uma onda acústica direcional. Observou semelhanças notórias entre a propagação da onda acústica e a da onda eletromagnética. Verificou que, mesmo quando operando no campo próximo da onda acústica ultrassônica, existe a possibilidade de detecção da posição do ponto central do feixe acústico, ainda que em região espacialmente muito limitada devido às restrições impostas aos experimentos. Essa gama de observações e constatações permitiu concluir pela validade do princípio no qual a hipótese da possibilidade de localização por triangulação do feixe ultrassônico foi embasada, abrindo a possibilidade de novos estudos, mais aprofundados sobre o sistema de localização proposto, deixando assim algumas sugestões para o prosseguimento deste trabalho.

### 6.1. Sugestões para Trabalhos Futuros

A seguir são apresentadas algumas sugestões de ordem prática a serem implementadas caso se opte pelo prosseguimento deste trabalho em alguma ocasião futura.

Uma possível aplicação derivada da proposta deste trabalho é o monitoramento em tempo real do deslocamento espacial de estruturas ou a detecção de vibrações mecânicas que apresentem amplitudes além das previstas nas operações normais.

Como o objetivo deste trabalho foi avaliar a prova de princípio da triangulação de um feixe acústico subaquático, os processos de aquisição de dados se limitaram a procedimentos não automatizados, o que limitou fortemente tanto a precisão quanto a velocidade de aquisição e também o número de pontos aquisitados, o que será facilmente contornável em trabalhos futuros, mesmo com baixo nível de automação para automatizar o deslocamento lateral do transdutor T, acionando-o através de um motor de passo, com leitura de posição executada por um sensor óptico sobre uma régua de traços e monitorada por um microcontrolador.

Também é possível, da mesma forma, automatizar o deslocamento angular do transdutor receptor R usando um disco de traços, idem acima e efetuar a leitura automática do sinal de saída do transdutor receptor R, acumulando-a na memória do microcontrolador, junto com as informações de posição lateral e angular dos transdutores R e T.

A automação permitirá maior agilidade e repetibilidade das medições, permitindo também que cada medida seja obtida pela média entre várias medidas sequenciais, no mesmo ponto, conferindo maior confiabilidade e precisão às leituras.

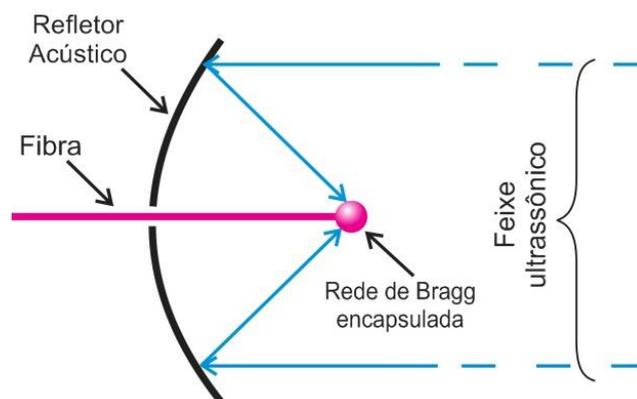
A fim de permitir o uso de dataloggers de menor taxa de amostragem na execução das medições, sugere-se o seguinte procedimento:

- a. Amplificar o sinal recebido do transdutor R
- b. Retificar em meia onda o sinal amplificado
- c. Filtrar o sinal para reduzir ou eliminar o ripple mas manter o mais possível a velocidade de variação da amplitude do sinal a fim de preservar a precisão da medida.

A velocidade do som na água é de cerca de 1500m/s e no metal é de 3000m/s; essa diferença faz com que a onda sonora que incide da água para o metal sofra um baixo acoplamento e uma alta reflexão, permitindo que uma superfície metálica seja um excelente refletor para as ondas na água, o que coloca a parabólica metálica como indicada para uso como especificado acima.

O uso de lentes acústicas confeccionadas com esferas poliméricas e acopladas a cada receptor, apesar de estar além do escopo de uma dissertação de mestrado, pode entretanto aumentar sensivelmente o nível do sinal captado, por conta de direcionar mais energia a cada receptor devido a maior área de captação do ultrassom, tornando o sistema mais sensível e ao mesmo tempo conseguindo monitorar deslocamentos maiores no feixe.

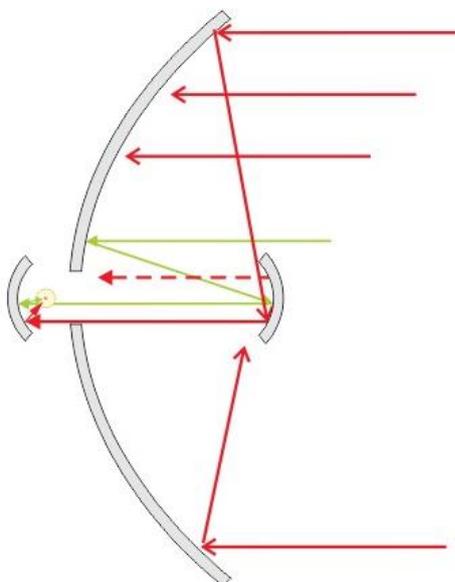
Devido a grande diferença entre o índice de refração da água do mar e o índice de refração dos metais em geral (relação de 1:3 pela elevada diferença de impedâncias acústicas), ocorre grande reflexão quando um sinal que esteja trafegando na água atinge uma superfície metálica. Mas é essa mesma diferença de índices de refração que permite o uso eficiente de refletores metálicos, permitindo que transdutores piezoelétricos sejam substituídos por fibras ópticas onde tenham sido impressas redes de Bragg (FISHER, 1998), sendo essas redes posicionadas no foco da parábola refletora de ultrassom, como ilustrado na Figura 63.



**Figura 63:** Receptor baseado em parábola e fibra óptica com rede de Bragg.

Deve-se observar que o polímero a ser utilizado para encapsular a rede de Bragg deve apresentar índice de refração o mais próximo possível ao da água do mar, para otimizar a refração do sinal até a rede de Bragg.

Para se evitar que a fibra fique exposta a incidentes mecânicos, no foco da parábola do refletor da figura 64 pode ser acrescentado colocar um outro refletor menor, com a concavidade voltada para o primeiro, como pode ser observado na Figura 64. No foco da parábola menor coloca-se então a ponta da fibra com a rede de Bragg, encapsulada em PVC, por exemplo. Para garantir ainda mais a proteção da fibra óptica, uma terceira parábola, também pequena, posicionada atrás da primeira, pode ser usada, como mostra a mesma Figura 64.



**Figura 64:** Receptor baseado em fibra óptica e multiparábola.

A parábola menor, ao receber a onda acústica e retransmiti-la para o detetor tenderá a criar um ‘fantasma’ no sinal, devido a componente cossenoidal, pois este caminho é menor que o

percorrido pelo sinal que incidir na parábola maior e for refletido para a menor. Este comportamento indesejado pode ser contornado ao se colocar um anteparo bloqueador entre a face convexa desta mini parábola e a incidência direta das ondas sonoras, isolando uma da outra.

Como a posição da parábola menor deve ficar fora da capa de PVC, essa capa deve ser conformada de modo a conseguir abrigar também a parábola menor.

Para conformar a capa de PVC coloca-se uma chapa sobre uma pequena caixa de madeira, de modo a ficar bem apoiada, aquecendo a face inferior da chapa de PVC com um soprador térmico e colocando uma quantidade de areia quente sobre ela, como peso, para esticá-la para baixo.

Pode-se também furar o centro da chapa, passando um pequeno parafuso pelo furo e prendendo o extremo de uma mola ao parafuso e seu outro extremo ao fundo da caixa, tencionando a mola o suficiente para que, ao amolecer a chapa esta seja esticada até a posição desejada. Neste momento ela deve ser molhada imediatamente com água gelada, para interromper a deformação.

Uma vez definidas as dimensões das parábolas, sua produção para fins de protótipo pode ser conseguida como segue:

- a) Desenhar uma semi parábola em tamanho real e a partir do desenho construir uma fôrma em chapa de aço 1020 ou outro qualquer metal de baixo custo. Usar uma capa comercial de PVC de antena direcional de Wi-Fi para definir o diâmetro da parábola e servir também de cobertura, proteção mecânica e acabamento para o conjunto.
- b) Colocar certa quantidade de massa de argila sobre uma mesa giratória (mesa de oleiro) e moldá-la manualmente com a forma e dimensões aproximadas da parábola desejada.
- c) Deslizar a concavidade da fôrma de aço da semi parábola sobre a argila, ajustando o formato da massa conforme a fôrma, na medida em que a mesa gira vagarosamente. Continuar o processo até obter uma parábola uniforme e lisa.
- d) Derramar cola branca (PVA) sobre a parábola de argila e alisar levemente com a mão úmida para criar uma película bem lisa. Deixar secar durante uma semana.
- e) Depois de seca a parábola e a cola, derramar sobre ela uma camada fina de resina dura, para molde tomando cuidado para que a superfície fique bem lisa e uniforme.

- f) Duas horas após a aplicação da resina de molde, verificar novamente com o molde se as dimensões da parábola estão mantidas ou se é necessário fazer ajustes. (deixar secar por 5 dias),
- g) Passados os 5 dias, aplicar quatro camadas de desmoldante sobre a parábola, polindo-a após cada aplicação.
- h) Fazer uma mistura de resina de alta fluidez com muita carga de pó de ferro ou de alumínio e aplicar uma camada bem fina sobre a parábola. Deixar endurecer até ficar quase dura ao toque e aplicar nova camada da mesma mistura, deixando novamente endurecer. O objetivo do pó metálico como carga para a resina é aproximar o máximo possível o índice de refração acústico da parábola de resina ao de uma parábola metálica e assim garantir elevada reflexão.
- i) Fazer uma mistura de resina de baixa fluidez com muita carga do mesmo pó de metal usado anteriormente e aplicar uma camada generosa sobre a parábola.
- j) Deixar secar por, pelo menos, 7 dias e desmoldar.
- k) Se a superfície interna não estiver bem uniforme e polida, usar de artifícios mecânicos para repará-la. Se não ficar a contento, repetir o processo até obter uma parábola bem uniforme, pois desta uniformidade depende a otimização do funcionamento do conjunto a ser montado.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALEGRE, Thiago Pedro Mayer - *A Natureza da Luz* - [http://www.ifi.unicamp.br/~lunazzi/F530\\_F590\\_F690\\_F809\\_F895/F809/F809\\_sem2\\_2003/002561Thiago\\_Lenz\\_F809\\_RF.pdf](http://www.ifi.unicamp.br/~lunazzi/F530_F590_F690_F809_F895/F809/F809_sem2_2003/002561Thiago_Lenz_F809_RF.pdf)
- ASSIS, Nelson C. N.; Tauk André M.; Silva, Vinícius H. N.; Barbero, Andrés P. Lopez; Ribeiro, Ricardo. M. - *Sistema para Medição da Constante de Estrutura do Índice de Refração para Enlaces Ópticos em Espaço Livre Baseado em Triangulação por Amplitude*, XXIX Simpósio Brasileiro de Telecomunicações, 2009.
- BELROSE, John, *Fessenden Oscillator* – Reginald Aubrey Fessenden, Association of Professional Engineers of Ontario, 2009.
- CLAUS, John - *Design and Development of an Inexpensive Acoustic Underwater Communications and Control System*, Technical Project pursuant to the M.S. Ocean Engineering degree requirements Florida Institute of Technology – Spring 2014.
- CAVALCANTI, Janailson O. - *Como Analisar os Riscos Operacionais de uma Anm-V Gll de Produção em Ambiente de Águas Ultraprofundas (Pré-Sal)* -UFRB–Universidade Federal do Recôncavo da Bahia – Cruz das Almas – Bahia – 2014 - [janailsonoliver@ufrb.edu.br](mailto:janailsonoliver@ufrb.edu.br)- <http://www.abenge.org.br/cobenge-2014/Artigos/127303.pdf>
- CORREA JUNIOR, Carlos -*Estudo da Propagação Acústica no Mar na Camada de Mistura*, 2008 IX, 71 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, M.Sc., Engenharia Oceânica) Dissertação – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, 2008.
- COSTA, Emerson S. 1, Eduardo B. Medeiros2- *Estudo Sobre a Propagação Acústica em Águas Rasas* - Congresso de Métodos Numéricos em Engenharia, Lisboa, Portugal - APMTAC 2015, [http://www.dem.ist.utl.pt/cmn2015/html/CDProceedings/PDF/Papers/CMN\\_2015\\_submission\\_395.pdf](http://www.dem.ist.utl.pt/cmn2015/html/CDProceedings/PDF/Papers/CMN_2015_submission_395.pdf)
- COSTA 2, Emerson S.(et al) Mestrando em Modelagem Matemática e Computacional, - *Simulação Numérica de Radiação Sonora através do Método de Elementos de Contorno*, CEFETMG – CEP:30.510-000, Belo Horizonte, MG E-mail: [emersondesousa@yahoo.com.br](mailto:emersondesousa@yahoo.com.br) , [http://sbmac.locaweb.com.br/eventos/cnmac/xxxi\\_cnmac/PDF/133.pdf](http://sbmac.locaweb.com.br/eventos/cnmac/xxxi_cnmac/PDF/133.pdf)
- CUNHA, Pedro Paulo – *Conversando Embaixo d'Água*, Biblioteca ,Techdiving, 1998.
- DACIUK, Rafael José – *Estudo de Parâmetros Ultrassônicos para Caracterização de Líquidos*, Universidade tecnológica federal do Paraná, Dissertação de Mestrado – Curitiba, 2008.
- DA SILVA, Paulo Tadeu - *Mersènne e a Teoria da Vibração das Cordas*, Cadernos Espinosanos V, P. 65-96, 1999.
- DIGULESCU Angela<sup>1</sup>, Candel Ion<sup>2</sup>, Ioana Cornel<sup>2</sup>, Bucur Diana<sup>3</sup>, Petrut Teodor<sup>2</sup> - *Underwater Object Tracking Using Time Frequency Signatures of Acoustic Signals*, <sup>1</sup>Faculty of Military Electronic and Information Systems, Military Technical Academy, Bucharest, Romania, [adigulescu@mta.ro](mailto:adigulescu@mta.ro), <sup>2</sup>Gipsa-lab, Grenoble Institute of Technology, Grenoble, France - {ion.candel, cornel.ioana, teodor-ion.petrut}@gipsa-lab.grenoble.inp.fr - <sup>3</sup>Power Engineering Faculty, University Politehnica of Bucharest, Romania - [diana.bucur@upb.ro](mailto:diana.bucur@upb.ro)
- DONOSO, J. Pedro – *História da Acústica* – Universidade de São Paulo, IFSC, 2014
- DOSITS, People and Sound, *History of Underwater Acoustics, The First Studies of Underwater Acoustics: The 1800s*,<http://www.dosits.org/people/history/1800s/>, 2015.
- FELZKY, Marcelo Alves - *O Desenvolvimento de Sistemas Subaquáticos para o Monitoramento da Amazônia Azul*, Anais da 65ª Reunião Anual da SBPC – Recife - PE julho/2013.

- FISHER, N. E., D. J. Webb, C. N. Pannell, D. A. Jackson, L. R. Gavrilov, J. W. Hand, L. Zhang, and I. Bennion - *Ultrasonic hydrophone based on short in-fiber Bragg gratings*, - Applied Optics Group, University of Kent at Canterbury, Canterbury,- APPLIED OPTICS, Vol. 37, No. 34 - 1998
- FRANCESCA Calabrese and Giovanni Indiveri - *An Omni-vision Triangulation-like Approach to Mobile Robot Localization*, Dipartimento Ingegneria Innovazione University of Lecce, via Monteroni, 73100 Lecce, Italy, Francesca Calabrese <calfran80@libero.it>, giovanni.indiveri@unile.it
- FREIRE, Atila P. S.; Mila, Avelino R.; Santos, Luiz Claudio C.- *The State of the Art in Turbulence Modelling in Brazil* – RBCM – J. of the Braz. Soc. Mechanical Science, Vol. XX – Nº1 – 1998 – pp.1-38 – Universidade Federal do Rio de Janeiro – COPPE – atila@serv.com.ufrj.br
- FUGRO Brasil - *Veículos de Operação Remota* – ROVs, <http://www.fugro-br.com/rov.asp> ,2010.
- GRUPO VIRTUOUS - site Só Física, acessado em 17/02/2015 - *Componentes de uma onda*, <http://www.sofisica.com.br/conteudos/Ondulatória/Ondas/classificacao2.php>
- GRUPO VIRTUOUS - Só Física (site), acessado em 17/02/2015 - *Som e sua propagação*, <http://www.sofisica.com.br/conteudos/Ondulatória/Acústica/som.php>
- LEÃO, João Paulo Carvalho Ferreira - *Comunicações Rádio Subaquáticas*, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Mestrado – 2012.
- LOUREIRO J. B. R., A. P. Silva Freire – *Experimental Investigation of Turbulent Boundary Layers over Steep Two-dimensional Elevations*, Programa de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, PEM/COPPE/UFRJ , [jbrloureiro@mecanica.coppe.ufrj.br](mailto:jbrloureiro@mecanica.coppe.ufrj.br), [atila@mecanica.coppe.ufrj.br](mailto:atila@mecanica.coppe.ufrj.br) , Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2005
- MARSENSING Ltda. - *Medições de Ruído Subaquático / Ruído Submarino*, Tecnologias Marinhas e Acústica Submarina, 2015
- NDT Resource Center- *Transducer Beam Spread, Radiated Fields of Ultrasonic Transducers*- <https://www.nde-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Ultrasonics/EquipmentTrans/beamspread.htm>
- OLIVEIRA<sub>1</sub>, Gubio - *Caracterização da Constante de Estrutura do Índice de Refração ( $C_n^2$ ) Através de Triangulação de Potências Ópticas*, Mestrado em Engenharia de Telecomunicações da Universidade Federal Fluminense - 2014
- OLIVEIRA<sub>2</sub>, Gúbio; Silva Vinicius N. H.; Barbero, Andrés P. L. e Ribeiro, Ricardo M. - *Caracterização da Constante de Estrutura do Índice de Refração( $C_n^2$ ) Através de Triangulação de Potências Ópticas – Paper*, Laboratório de Comunicações Ópticas, Universidade Federal Fluminense, 24.210-240, Niterói/RJ, Brasil , [gubio@hotmail.com](mailto:gubio@hotmail.com) - MOMAG 2014
- OZEN Engineering Inc. – *Modelagem de Turbulência*, <http://www.ozeninc.com/>, 2015
- RAYLEIGH, John William Strutt, Baron - *The theory of sound* – Published 1894
- RBEF (Revista Brasileira de Ensino de Física) vol.33 no.1, São Paulo Jan./Mar. 2011 - *Conceitos Básicos Sobre a Difração e a Dispersão de Ondas Eletromagnéticas*, <http://dx.doi.org/10.1590/S1806-11172011000100007>
- REGINALD Fessenden e o oscilador Fessenden. Publicado em "Submarine Signaling", Scientific American Supplement, No. 2071, pp. 168-170, Sept. 11, 1915. Image courtesy of NOAA Photo Library.
- SILVA<sub>1</sub>, Vinicius N.H. – *Desenvolvimento Experimental de uma Nova Técnica para a Medição da Turbulência Atmosférica, em Enlaces Ópticos Horizontais no Espaço Livre*.– Dissertação de Mestrado, Universidade Federal Fluminense – Centro Tecnológico – Escola de Engenharia – Engenharia de Telecomunicações – 2009.

- SILVA<sub>2</sub>, Vinicius N. H.; BARBERO, Andrés P. L.; RIBEIRO, Ricardo M.- *Nova Técnica para a Medida da Constante de Estrutura para o Índice de Refração ( $C_n^2$ ) em Sistemas de Óptica no Espaço Livre* - Simpósio Brasileiro de Telecomunicações – 2009
- SILVA<sub>3</sub>, Vinicius N. H.; BARBERO, Andrés P. L.; RIBEIRO, Ricardo M.- *Experimental Development of a New Technique to Measure Atmospheric Turbulence in Horizontal Optical Links Through Free Space* - Proceedings of the International Workshop On Telecommunications, 2009
- SILVA<sub>4</sub>, Vinicius N. H.; BARBERO, Andrés P. L.; RIBEIRO, Ricardo M.- *A new Triangulation-like Technique for the Evaluation of the Refractive Index Structure Constant ( $C_n^2$ ) in Free-Space Optical Links*- Estados Unidos da América: IEEE Jour. Light Tech., vol. 29, p. 3603-3610, Dezembro 2011.
- SÓ FÍSICA - *Som e Sua Propagação* - <http://www.sofisica.com.br/conteudos/Ondulatoria/Acustica/som.php> - acessado em 17/02/2015
- STRUTT, John William Strutt, 3rd Baron Rayleigh - <http://www.britannica.com/biography/John-William-Strutt-3rd-Baron-Rayleigh> - 2015
- TOBY Schneider and Henrik Schmidt - *Approaches to Improving Acoustic Communications on Autonomous Mobile Marine Platforms*, Center for Ocean Engineering, Department of Mechanical Engineering Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA 02139 - tes@mit.edu and henrik@mit.edu
- UFMG – Velocidade do Som em metais - [http://www.fisica.ufmg.br/~lab1/roteiros\\_2013/Velocidade do som em metais.pdf](http://www.fisica.ufmg.br/~lab1/roteiros_2013/Velocidade_do_som_em_metais.pdf)
- UNESC – Mineralogia óptica - <http://www.rc.unesp.br/igce/petrologia/nardy/mon.html>
- WIKIPEDIA – Equação da Onda - [https://pt.wikipedia.org/wiki/Equa%C3%A7%C3%A3o da onda](https://pt.wikipedia.org/wiki/Equa%C3%A7%C3%A3o_da_onda)
- WHO- World Health Organization - *História Relativa ao Som* – 2014 - <http://gestaodoruido.no.sapo.pt/HistoriaRelativaSom.htm>

## 8. BIBLIOGRAFIA ADICIONAL

- BAGGEROER, Arthur B. - *An Overview of Acoustic Communications from 2000 – 2012*, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA 02139 USA, : [abb@boreas.mit.edu](mailto:abb@boreas.mit.edu)
- BALANIS, Constantine - *Advanced Engineering Electromagnetics* - Estados Unidos da América: John Wiley & Sons, 1989.
- BRAGANTINE, S , A. P. L. Barbero, V. H. N. da Silva, P. X. Neto, R. M. Ribeiro - *Detecção por Triangulação de Feixe Ultrassônico Subaquático Desviado por Turbulência* – paper submetido ao encontro anual do IECOM em comunicações, redes e criptografia - ENCOM 2015, <http://www.iecom.org.br/encom2015/>
- C. CHEN, A. Abdi - *A Vector Sensor Receiver for Chirp Modulation in Underwater Acoustic Particle Velocity Channels*, Center for Wireless Communication and Signal Processing Research, Dept. of Electrical and Computer Engineering, New Jersey Institute of Technology, Newark, NJ 07102, USA, [ali.abdi@njit.edu](mailto:ali.abdi@njit.edu) .
- CIOFALO, Michele - *Modelli di turbolenza*, Dipartimento di Ingegneria Nucleare, Università degli Studi di Palermo, Vialdelle Scienze, Parco d’Orleans, edificio6, I-90128 Palermo, Italy , [ciofalo@din.unipa](mailto:ciofalo@din.unipa).
- CORDEIRO, Mauro C. R. - *Avaliação Experimental dos Efeitos de Cintilação no Canal Óptico no Espaço Livre em 780 nm, 1550 nm e 9100 nm*, Tese de Doutorado, Programa de Pós- Graduação em Engenharia Elétrica da PUC-Rio – Brasil – 2008
- DONIEC, Marek, Michael Anger Mann, Daniela Russ- *An End-to-End Signal Strength Model for Underwater Optical Communication*, CSAIL, MIT, Cambridge, MA, USA, [rus@csail.mit.edu](mailto:rus@csail.mit.edu)
- FREITAS, Marco Antônio B. - *Medindo a Velocidade do Som com o Microfone do PC*, Licenciatura em Física - Instituto de Física, UFRJ, PROJETO FINAL DE CURSO, 2005, Rio de Janeiro – Brasil
- HEMLATA, Choudhary<sup>1</sup>, Arun Kumar<sup>2</sup> and Rajendar Bahl<sup>3</sup> - *Enhanced Passive Acoustic Localization with an Array of Non-Identical Sensors using Blind Gauss-Markov Estimate*, Center for Applied Research in Electronics, Indian Institute of Technology Delhi, India, [1crz078222@care.iitd.ac.in](mailto:1crz078222@care.iitd.ac.in)
- HOU, Weilin,\* EwaJarosz, Sarah Woods, Wesley Goode, and Alan Weidemann, - *Impacts of underwater turbulence on acoustical and optical signals and their linkage* , *Naval Research Laboratory, Code 7333, Stennis Space Center, MS 39529, USA*, \* [hou@nrlssc.navy.mil](mailto:hou@nrlssc.navy.mil)
- KOLMOGOROV, Andrei N.-*The local structure of turbulence in incompressible viscous fluid for very large Reynolds numbers* - Reino Unido: Royal Society Publishing Transl. Proc. Match. Phy. Sci., vol. 434, p. 9-13, Julho 1991 [Compilado de Dokl. Akad. Nauk SSSR Rússia, p. 301-305, 1941].
- KULHANDJIAN, Hovannes, Li-Chung Kuo, Tommaso Melodia, Dimitris A. Pados, Dale Green - *Towards Experimental Evaluation of Software-Defined Underwater Networked Systems* , Department of Electrical Engineering, State University of New York at Buffalo, Buffalo, NY 14260 USA, [dale.green@teledyne.com](mailto:dale.green@teledyne.com).
- LIMA, Daniel Leite - *Transmissão de Sinais Acústicos de Controle Através de Dutos Submarinos Rígidos*, Pós-Graduação de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil, 2004
- MANHAR, Dhanak , Ken Holappa - *An Autonomous Ocean Turbulence Measurement Platform* , *Department of Ocean Engineering, Florida Atlantic University, Boca Raton, Florida, USA, 2008*
- MEDEIROS, Eduardo B. - *Introdução à Teoria Acústica*, Departamento de Engenharia Mecânica da UFMG, Belo Horizonte, MG – Brasil, [flugzbau@dedalus.lcc.ufmg.br](mailto:flugzbau@dedalus.lcc.ufmg.br).
- NOISE CONTROL, [http://www.me.psu.edu/lamancusa/me458/10\\_osp.pdf](http://www.me.psu.edu/lamancusa/me458/10_osp.pdf)

- PENTEADO, Diorgenes - Redes Acústicas Subaquáticas na Monitoração de Correntes Marítimas, Dissertação de Mestrado - Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil, 2010
- RIBEIRO, Ricardo M.; Barbero, Andrés Pablo L., Bragantine, Sydney - *Desenvolvimento de Protótipo de Sensor Modulométrico de Fibra Óptica para Detecção de Descargas Parciais em Transformadores e Reatores de Potência*, XXIII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica – SNPTEE., a acontecer de 18 a 21 de outubro de 2015, em Foz do Iguaçu - Brasil
- SANTOS, Felipe Duarte dos - Análise da viabilidade de aplicações de monitoramento e controle utilizando redes acústicas submarinas, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Eletrônica, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Brasil, 2012.
- SILVEIRA, Clenilson R. da; Costa, João C. W. A; Rocco Giraldi, Maria Thereza M.; Barbero, Andrés P. L., Bragantine, S. - *Bent optical fiber taper for refractive index measurements with tunable sensitivity* - Microwave and Optical Technology Letters - Volume 57, Issue 4, pages 921–924, April 2015 - <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/mop.28984/abstract>
- STOJANOVIC, Milica - *Underwater Acoustic Communication Channels: Propagation Models and Statistical Characterization*, Northeastern University James Preisig, Woods Hole Oceanographic Institution - IEEE Communications Magazine • January 2009.
- URBAN, Frantisek 1, Jaroslav Kadlec 1,\* , Radek Vlach 2 and Radek Kuchta 1 - *Design of a Pressure Sensor Based on Optical Fiber Bragg Grating Lateral Deformation*, Department of Microelectronics, Brno University of Technology, Brno, Udolni 53, CZ-602 00 Brno, Czech Republic; [urban@feec.vutbr.cz](mailto:urban@feec.vutbr.cz) (F.U.); [kuchtar@feec.vutbr.cz](mailto:kuchtar@feec.vutbr.cz)(R.K.), *sensors* ISSN 1424-8220 [www.mdpi.com/journal/sensors](http://www.mdpi.com/journal/sensors).
- WILSON, W. D. “Speed of Sound in Sea Water as a Function of Temperature, Pressure, and Salinity”, *Journal of the Acoustic Society of America*, v. 32, n. 6, pp. 641–644, 1960.
- XINGJIE, Ni, Yong Zhao\*, Jian Yang - *Research of a novel fiber Bragg grating underwater acoustic sensor*, Department of Automation, Tsinghua University, Beijing 100084, PR China – 2007
- ZUCCHER, Simone - *Dinamica dei Fluidi, Lezione 07 – a.a. 2009-2010*, 12 Maggio, Italy, 2010 [zuccher@sci.univr.it](mailto:zuccher@sci.univr.it)

## 9. Anexos

### Anexo I

**Tabela 1:** Tabela normalizada da resposta dos transdutores

Graus	Leitura no Transdutor RX				
	Polariz. Horizontal - Valores Normalizados				
	500 kHz	1 MHz	2,25 MHz	3,5 MHz	5 MHz
90	0,00937	0,01429	0,00497	0,00529	0,0241
85	0,01354	0,00952	0,00497	0,00397	0,01807
80	0,00937	0,01429	0,00497	0,00397	0,01807
75	0,01667	0,01905	0,00331	0,00397	0,01807
70	0,00625	0,01905	0,00497	0,00265	0,01807
65	0,00937	0,01905	0,00497	0,00794	0,01807
60	0,025	0,02857	0,01987	0,00529	0,01807
55	0,01563	0,02381	0,00331	0,00529	0,01807
50	0,051	0,01905	0,00828	0,00661	0,01807
45	0,03333	0,01429	0,00662	0,00661	0,01807
40	0,01875	0,01429	0,00662	0,00661	0,0241
35	0,025	0,01429	0,00497	0,00529	0,01205
30	0,01771	0,01429	0,00331	0,00529	0,01205
25	0,01771	0,03333	0,00662	0,00794	0,01205
20	0,05	0,02857	0,00497	0,01323	0,01807
15	0,03333	0,02381	0,00993	0,00926	0,01807
10	0,073	0,027	0,02649	0,02249	0,03012
9	0,087	0,02857	0,01821	0,02513	0,0241
8	0,05833	0,0619	0,03146	0,0172	0,03012
7	0,07708	0,1	0,01656	0,02249	0,03012
6	0,28854	0,11429	0,0596	0,05952	0,03012
5	0,48542	0,1	0,05298	0,05556	0,0241
4	0,64167	0,10476	0,13576	0,04233	0,03012
3	0,76458	0,24762	0,14238	0,16402	0,03614
2	0,92083	0,49524	0,44371	0,26587	0,07831
1	0,9875	0,69524	0,981	0,82011	0,51807
0	1	1	1	1	1

	0	1	1	1	1	1
-1	0,94583	0,991	0,49007	0,75397	0,45181	
-2	0,8375	0,973	0,15232	0,4127	0,25904	
-3	0,75	0,85714	0,13907	0,20635	0,13855	
-4	0,54583	0,6	0,05298	0,10582	0,09639	
-5	0,42083	0,41905	0,06126	0,06614	0,07229	
-6	0,23542	0,1381	0,03146	0,04365	0,05422	
-7	0,11667	0,04762	0,04305	0,02778	0,04819	
-8	0,041	0,053	0,02649	0,02249	0,04819	
-9	0,04479	0,036	0,03642	0,03175	0,03012	
-10	0,05	0,027	0,02649	0,01587	0,0241	
-15	0,047	0,02381	0,00662	0,00794	0,0241	
-20	0,032	0,01905	0,00828	0,00794	0,01807	
-25	0,01146	0,01905	0,00497	0,00661	0,0241	
-30	0,01354	0,01429	0,00497	0,00529	0,01807	
-35	0,017	0,01429	0,00662	0,00529	0,0241	
-40	0,01979	0,01429	0,00993	0,00926	0,01807	
-45	0,00729	0,01905	0,00828	0,00397	0,01807	
-50	0,00729	0,02381	0,00662	0,00529	0,01807	
-55	0,02813	0,00952	0,00497	0,0172	0,01807	
-60	0,02813	0,02381	0,006	0,00397	0,01807	
-65	0,01042	0,00952	0,00662	0,00397	0,01807	
-70	0,0253	0,00952	0,00662	0,00397	0,01807	
-75	0,00625	0,01429	0,00497	0,00397	0,01205	
-80	0,01354	0,00952	0,00331	0,00265	0,01205	
-85	0,02083	0,01905	0,00331	0,00661	0,01205	
-90	0,00729	0,02857	0,00331	0,00661	0,01205	

## Anexo II

**Tabela 2:** Comparação entre deslocamento lateral e angular

R <sub>1</sub> - 500 kHz		
Comparação entre Deslocamento Angular e Lateral		
Graus	Desloc Ang	Desloc Lat
20	0,050	0,066
15	0,033	0,075
10	0,150	0,038
9	0,110	0,038
8	0,058	0,038
7	0,077	0,281
6	0,289	0,413
5	0,485	0,569
4	0,642	0,569
3	0,765	0,906
2	0,921	0,944
1	0,988	1,000
0	1,000	1,000
-1	0,946	0,913
-2	0,838	0,809
-3	0,750	0,681
-4	0,546	0,681
-5	0,421	0,375
-6	0,235	0,194
-7	0,117	0,094
-8	0,038	0,094
-9	0,045	0,119
-10	0,077	0,113
-15	0,064	0,088
-20	0,052	0,088

## Anexo III

**Tabela 3:** Curvas de respostas dos receptores R<sub>1</sub>, R<sub>3</sub> e R<sub>2</sub> Normalizados

Obs.: As cores mais fortes indicam os pontos de maior amplitude

Leituras dos sinais de saída nos Receptores Rxi						
Dados Crús			X	Dados Normalizados		
Leituras Vmax (mV)				Série 1 = Rx1	Série 2 = Rx3	Série 3 = Rx2
RX1 max = 185	RX3 max = 1170	Rx2 max = 610	Distância horizontal do centro do feixe até a posição Xo (no meio dos receptores)	X1=X +20,763	X3=X -20,763	X2 = X
V1	V3	V2		Y1=+12,474	Y3=+12,474	Y2= - 24,127
				K1 6,32	K3 1,00	K2 1,92
				A1=V1*K1	A3=V3*K3	A2=V2*K2
39	380	72	100	246,64	380	138,10
47	463	102	95	297,23	463	195,64
57	458	125	90	360,47	458	239,75
50	398	110	85	316,20	398	210,98
40	301	174	80	252,96	301	333,73
27	204	266	75	170,75	204	510,19
12	188	344	70	75,89	188	659,79
13	176	437	65	82,21	176	838,17
17	260	505	60	107,51	260	968,59
22	348	510	55	139,13	348	978,18
20	397	540	50	126,48	397	1.035,72
27	580	580	45	170,75	580	1.112,44
30	755	610	40	189,72	755	1.170
46	888	609	35	290,90	888	1.168,08
52	1010	537	30	328,85	1.010	1.029,97
58	1070	473	25	366,79	1.070	907,21
70	1120	430	20	442,68	1.120	824,74
103	1140	391	15	651,37	1.140	749,94
134	1160	310	10	847,42	1.160	594,58
158	1170	230	5	999,19	1.170	441,14
173	1110	190	0	1.094,05	1.110	364,42
183	895	133	-5	1.157,29	895	255,09
185	722	58	-10	1.170	722	111,24
177	648	61	-15	1.119,35	648	117,00
168	548	88	-20	1.062,43	548	168,78
148	448	97	-25	935,95	448	186,05
146	323	82	-30	923,30	323	157,28
152	295	26	-35	961,25	295	49,87
142	320	30	-40	898,01	320	57,54
122	387	28	-45	771,53	387	53,70
93	413	30	-50	588,13	413	57,54
59	444	24	-55	373,12	444	46,03
49	448	47	-60	309,88	448	90,15
47	440	49	-65	297,23	440	93,98
43	376	55	-70	271,93	376	105,49
33	281	34	-75	208,69	281	65,21
31	173	37	-80	196,04	173	70,97
35	144	42	-85	221,34	144	80,56
42	208	47	-90	265,61	208	90,15
44	268	27	-95	278,26	268	51,79
45	325	22	-100	284,58	325	42,20

## Anexo IV

**Tabela 4:** Valores de  $P_{oi}$  e  $W_i$  para uma posição específica de T

Cálculo para solução gráfica quando o transmissor está fixo na posição Y=4,7 e sofre variação no eixo X			
Parâmetros Fixos			
P01 =	238 mV	<=Potência máxima detectável por Rx1	
P02 =	1300 mV	<=Potência máxima detectável por Rx2	
P03 =	740 mV	<=Potência máxima detectável por Rx3	
W1 =	3,3 cm		
W2 =	3,8 cm	$r_i = [\text{raiz}(-\text{Ln}(P_i/P_{oi}))].W_i$	
W3 =	3,5 cm		

## Anexo IV

**Tabela 5:**Dados para o cálculo dos valores de W e dos alcances de leitura dos receptores

X2 (cm)	P1	P2	P3	r1 (cm)	r2 (cm)	r3 (cm)
18	33	150	280	4,64	4,85	3,25
18,5	22	104	300	5,09	5,24	3,14
19	22	88	240	5,09	5,42	3,50
19,5	24	140	154	5,00	4,93	4,13
20	29	200	84	4,79	4,51	4,87
20,5	29	245	72	4,79	4,26	5,04
21	38	260	112	4,47	4,19	4,53
21,5	49	200	192	4,15	4,51	3,83
22	40	240	77	4,41	4,29	4,96
22,5	36	260	70	4,54	4,19	5,07
23	25	312	50	4,95	3,94	5,42
23,5	30	400	110	4,75	3,58	4,56
24	27	410	170	4,87	3,54	4,00
24,5	52	490	148	4,07	3,26	4,19
25	55	479	169	3,99	3,30	4,01
25,5	28	476	222	4,83	3,31	3,62
26	35	410	270	4,57	3,54	3,31
26,5	39	236	330	4,44	4,31	2,97
27	28	168	412	4,83	4,72	2,53
27,5	13	260	486	5,63	4,19	2,14
28	29	412	540	4,79	3,54	1,85
28,5	45	620	530	4,26	2,84	1,91
29	53	720	510	4,04	2,54	2,01
29,5	51	844	460	4,10	2,17	2,28
30	62	1.000	415	3,83	1,69	2,51
30,5	82	1.100	390	3,41	1,35	2,64
31	110	1.180	380	2,90	1,03	2,69
31,5	125	1.220	340	2,65	0,83	2,91
32	130	1.280	302	2,57	0,41	3,12
32,5	122	1.280	286	2,70	0,41	3,22
33	122	1.210	235	2,70	0,88	3,53
33,5	115	1.140	140	2,81	1,20	4,26
34	125	1.050	52	2,65	1,53	5,38
34,5	130	940	76	2,57	1,88	4,98
35	136	770	85	2,47	2,39	4,85
35,5	136	528	82	2,47	3,13	4,89
36	140	300	68	2,40	4,00	5,10
36,5	157	178	28	2,13	4,65	5,97
37	142	92	60	2,37	5,37	5,23
37,5	110	312	88	2,90	3,94	4,82
38	78	450	78	3,49	3,40	4,95
38,5	70	470	50	3,65	3,33	5,42
39	73	360	60	3,59	3,74	5,23
39,5	71	300	68	3,63	4,00	5,10
40	48	324	88	4,18	3,89	4,82
40,5	31	396	120	4,71	3,60	4,45
41	20	428	125	5,19	3,48	4,40
41,5	10	420	110	5,88	3,51	4,56
42	34	308	150	4,60	3,96	4,17
42,5	63	160	200	3,80	4,78	3,77
43	78	60	214	3,49	5,79	3,68
43,5	81	204	204	3,43	4,49	3,75
44	67	200	150	3,72	4,51	4,17
44,5	70	110	110	3,65	5,19	4,56

## Anexo V

**Tabela 6:** Posições calculadas para o centro do feixe e seus respectivos erros. As linhas em amarelo correspondem às que também foram plotadas graficamente

Medição Real		com o Mathematica			
XTx (cm)	YTx (cm)	Xo (cm)	Yo (cm)	XTx (cm)	Erro
18	4,7	30,66	- 2,20	18	14,4
18,5	4,7	30,20	- 3,00	18,5	14,0
19	4,7	30,42	- 3,32	19	14,0
19,5	4,7	31,00	- 1,15	19,5	12,9
20	4,7	31,83	0,65	20	12,5
20,5	4,7	30,01	1,61	20,5	10,0
21	4,7	31,79	0,81	21	11,5
21,5	4,7	31,41	- 1,30	21,5	11,6
22	4,7	32,21	0,90	22	10,9
22,5	4,7	32,23	1,50	22,5	10,2
23	4,7	32,30	3,24	23	9,4
23,5	4,7	31,67	2,85	23,5	8,4
24	4,7	31,13	2,56	24	7,4
24,5	4,7	31,84	2,30	24,5	7,7
25	4,7	31,74	1,95	25	7,3
25,5	4,7	30,91	2,72	25,5	5,8
26	4,7	30,87	1,53	26	5,8
26,5	4,7	30,69	- 0,99	26,5	7,1
27	4,7	30,14	- 1,99	27	7,4
27,5	4,7	29,39	0,74	27,5	4,4
28	4,7	30,00	0,97	28	4,2
28,5	4,7	30,43	1,79	28,5	3,5
29	4,7	30,63	2,13	29	3,0
29,5	4,7	30,72	2,92	29,5	2,2
30	4,7	31,00	3,36	30	1,7
30,5	4,7	31,31	3,33	30,5	1,6
31	4,7	31,59	3,13	31	1,7
31,5	4,7	31,81	3,18	31,5	1,6
32	4,7	31,97	3,45	32	1,3
32,5	4,7	31,98	3,62	32,5	1,2
33	4,7	32,17	3,66	33	1,3
33,5	4,7	32,65	4,21	33,5	1,0
34	4,7	33,73	5,03	34	0,4
34,5	4,7	33,36	4,06	34,5	1,3
35	4,7	33,25	3,09	35	2,4
35,5	4,7	33,25	1,72	35,5	3,7
36	4,7	33,39	- 0,22	36	5,6
36,5	4,7	34,34	- 1,23	36,5	6,3
37	4,7	33,39	- 4,53	37	9,9
37,5	4,7	32,93	0,01	37,5	6,5
38	4,7	30,44	- 0,85	38	9,4
38,5	4,7	33,19	3,04	38,5	5,6
39	4,7	33,00	1,73	39	6,7
39,5	4,7	32,83	0,93	39,5	7,7
40	4,7	32,36	1,66	40	8,2
40,5	4,7	31,60	2,65	40,5	9,1
41	4,7	31,21	3,63	41	9,8
41,5	4,7	30,77	4,90	41,5	10,7
42	4,7	31,42	1,26	42	11,1
42,5	4,7	31,55	- 2,62	42,5	13,2
43	4,7	31,54	- 6,76	43	16,2
43,5	4,7	31,77	- 2,16	43,5	13,6
44	4,7	31,92	- 1,51	44	13,6
44,5	4,7	32,21		44,5	13,2

## Anexo VI

Tabela 7: velocidades do som em diversos meios

Melo de Propagação	Velocidade do Som [m/s]
Ar	344
Água do mar	1481
Água doce	1500
Alumínio	5150
Aço	5200
Betão	3400
Vidro	5200
Gesso cartonado	1600
PVC	1310

Tabela 8: Comprimentos de Onda acústica na água

Frequência (Hz)	Comprimento de Onda (m) (vel. de propagação = 344 m/s)
10	34,40
20	17,20
30	11,46
40	8,60
50	6,88
60	5,73
70	4,91
90	3,82
100	3,44
250	1,376
500	0,688
750	0,458
1000	0,344
1500	0,229
2000	0,172
2500	0,137
5000	0,0688
7500	0,0458
10000	0,0344
15000	0,0229
20000	0,0172

## Anexo VII

### Algoritmo Usado com o Software Mathematica:

“Início”;

zc=540; “ somente para registrar a distância inicial entre TX e Ri”;

Clear[xc,yc,zc]

“Definindo as posições dos centros dos receptores”;

X1=34.7;

Y1=2.7;

X2=32.3;

Y2=4.7;

x3=28.5;

y3=2.9;

“Definindo as potências máximas percebidas em cada receptor”;

P01=238;

P02=1300;

P03=740;

“Definindo as larguras das gaussianas conforme fornecido pelo software Origin, que partiu da tabela de dados experimentais”;

Larg1=3.3;

Larg2=3.8;

Larg3=3.5;

“Potências lidas em cada receptor após o deslocamento do feixe”;

Pot1=122;

Pot2=1280;

Pot3=286;

“Cálculo do raio de detecção de cada sensor para quaisquer condições dadas”; Eq. 43

r1=sqrt[-Log[Pot1/Po1]]\*larg1;

r2=sqrt[-Log[Pot2/Po2]]\*larg2;

r3=sqrt[-Log[Pot3/Po3]]\*larg3;

“Equação para solução pelo software Mathematica”;

NSolve[{{(x1-xc)^2+(y1-yc)^2-r1^2+Zc^2==0,(x2-xc)^2+(y2-yc)^2-r2^2+Zc^2==0,(x3-xc)^2+(y3-yc)^2-r3^2+Zc^2==0},{xc,yc,zc}]

Ou então:

$\text{NSolve}[\{(x_1 - x_c)^2 + (y_1 - y_c)^2 - r_1^2 + Z_c^2 == 0, (x_2 - x_c)^2 + (y_2 - y_c)^2 - r_2^2 + Z_c^2 == 0, (x_3 - x_c)^2 + (y_3 - y_c)^2 - r_3^2 + Z_c^2 == 0\}, \{x_c, y_c, z_c\}]$

Ou ainda:

$\text{NSolve}\left\{\begin{array}{l} [(x_1 - x_c)^2 + (y_1 - y_c)^2 - r_1^2 + z_c^2 = 0] \\ [(x_2 - x_c)^2 + (y_2 - y_c)^2 - r_2^2 + z_c^2 = 0] \\ [(x_3 - x_c)^2 + (y_3 - y_c)^2 - r_3^2 + z_c^2 = 0] \end{array}\right.$

“Resultados Obtidos com o Mathemática”;

2.69764

0.47316

3.41256

$\{\{z_c \rightarrow 0.990882i, x_c \rightarrow 31.9789, y_c \rightarrow 3.62444\}, \{z_c \rightarrow 0.990882i, x_c \rightarrow 31.9789, y_c \rightarrow 3.62444\}\}$

%%%

**FIM**

%%%