

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

BRUNA ZOLETTI DA SILVA

**HIDROFONE PARA CARACTERIZAÇÃO DE CAMPO  
ULTRASSÔNICO EM ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PATO BRANCO

2020

BRUNA ZOLETTI DA SILVA

# **HIDROFONE PARA CARACTERIZAÇÃO DE CAMPO ULTRASSÔNICO EM ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS**

## **Hydrophone for ultrasonic field characterization in non-destructive tests**

Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Elétrica, apresentado como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Câmpus Pato Branco.

Orientador: Giovanni Alfredo Guarneri.

PATO BRANCO

2020



Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

## **TERMO DE APROVAÇÃO**

O Trabalho de Conclusão de Curso intitulado **HIDROFONE PARA CARACTERIZAÇÃO DE CAMPO ULTRASSÔNICO EM ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS** do acadêmico **Bruna Zoletti da Silva** foi considerado **APROVADO** de acordo com a ata da banca examinadora N<sup>o</sup> 260 de **2020**.

Fizeram parte da banca examinadora os professores:

**Giovanni Alfredo Guarneri**  
Orientador

**Prof.**  
Diogo Ribeiro Vargas

**Prof.**  
Fabio Luiz Bertotti

**A Ata de Defesa assinada encontra-se na Coordenação do Curso de Engenharia Elétrica**

*Este trabalho é dedicado a todas as pessoas que,  
contribuíram para a minha formação como engenheira e ser humano.*

*"O sucesso nasce do querer, da determinação e persistência em se chegar a um objetivo. Mesmo não atingido o alvo, quem busca e vence obstáculos, no mínimo fará coisas admiráveis."  
(José de Alencar)*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço ao meu orientador Giovanni Alfredo Guarneri, por todo o auxílio durante o desenvolvimento desse trabalho. Agradeço aos meus colegas que contribuíram para a construção do meu conhecimento ao longo de minha formação. E agradeço principalmente aos meus pais, Roseli Fátima Frizon e Valmor Zoletti da Silva, aos meus irmãos, Ricardo Augusto Zoletti da Silva e Diego Rafael Zoletti da Silva, minha família, amigos e namorado Renan Satoshi Yamamoto, que me deram suporte para eu alcançar esse objetivo.

## RESUMO

SILVA, Bruna Zoletti da. Hidrofone para caracterização de campo ultrassônico em ensaios não destrutivos. 2020. 63 p. Trabalho de Conclusão de Curso - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2020.

Este trabalho consiste da construção e avaliação experimental de um hidrofone do tipo agulha, utilizando o material piezoelétrico PVDF, além do estudo e análise de técnicas para o projeto, simulações e implementação dos circuitos de instrumentação para o hidrofone. As simulações realizadas utilizando um sinal de sincronismo externo que simula o sinal de saída do hidrofone comprovam o funcionamento de todos os circuitos projetados para a sua instrumentação, embora os resultados gráficos obtidos nos ensaios do hidrofone tipo agulha com os circuitos de instrumentação confeccionadas não terem sido coerentes com as respostas esperadas dos circuitos projetados. Portanto, foram apresentadas possíveis soluções para os problemas encontrados para que a integridade do sinal seja mantida em trabalhos futuros.

**Palavras-chave:** Hidrofones, Ensaios não destrutivos por ultrassom, Instrumentação eletrônica.

## ABSTRACT

SILVA, Bruna Zoletti da. Hydrophone for ultrasonic field characterization in non-destructive tests. 2020. 63 p. Final Paper - Electrical Engineering, Federal University of Technology - Paraná. Pato Branco, 2020.

This work aims at the construction and experimental evaluation of a needle-type hydrophone, using the piezoelectric material PVDF, and the study and analysis of techniques for the design, simulations, and implementation of the instrumentation circuits for the hydrophone. The simulations carried out using an external synchronization signal that simulates the hydrophone output signal prove all circuits' operation designed for its instrumentation. However, the graphic results obtained in the needle-type hydrophone tests with the developed instrumentation circuits have not been consistent with the project expected responses. Therefore, possible solutions for the problems encountered were presented to maintain signal integrity in future works.

**Keywords:** Hydrophone, Ultrasonic non-destructive testing, Electronic instrumentation.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Desenho esquemático de um hidrofone tipo agulha .....	19
Figura 2 – Diagrama em blocos do processo de medição do campo acústico .....	19
Figura 3 – Fotografia de um hidrofone do tipo agulha .....	20
Figura 4 – Diagrama em blocos do processo de instrumentação .....	22
Figura 5 – Configuração clássica de um amplificador de instrumentação .....	24
Figura 6 – Configuração clássica de um circuito RLC .....	26
Figura 7 – Configuração clássica de um filtro passa-faixa .....	27
Figura 8 – Filtro passa-faixa em cascata .....	27
Figura 9 – Configuração clássica de um amplificador inversor .....	28
Figura 10 – Diagrama em blocos do processo de medição do campo acústico .....	30
Figura 11 – Ultrasonic Flaw Detector Einstein II DGS .....	31
Figura 12 – Transdutor emissor moledo VIDEOSCAN V110-RM .....	32
Figura 13 – Reservatório de água para ensaio de obtenção do campo acústico.	32
Figura 14 – Hidrofone tipo agulha construído .....	33
Figura 15 – Elemento sensor .....	34
Figura 16 – Filme PVDF (Fluoreto de Polivinilideno) utilizado como elemento sensor.	35
Figura 17 – Cola epoxy .....	37
Figura 18 – Circuito do amplificador de instrumentação .....	38
Figura 19 – Circuito do filtro passa-faixa .....	39
Figura 20 – Circuito do amplificador de potência .....	40
Figura 21 – Placa de fenolite confeccionada para realização de testes em bancada.	42
Figura 22 – Placa de fenolite confeccionada para realização de testes em bancada.	42
Figura 23 – Bancada de testes .....	45
Figura 24 – Mesa de ensaio .....	46
Figura 25 – Resultado do ensaio no hidrofone tipo agulha .....	47
Figura 26 – Circuito do amplificador de instrumentação simulado .....	48
Figura 27 – Sinal de saída do amplificador de instrumentação .....	49
Figura 28 – Circuito do filtro passa-faixa simulado .....	49
Figura 29 – Gráfico de resposta em frequência do filtro passa-faixa .....	50
Figura 30 – Sinal de saída do filtro passa-faixa para frequência de 100 kHz .....	50
Figura 31 – Sinal de saída do filtro passa-faixa para frequência de 20 MHz .....	51
Figura 32 – Sinal de saída do filtro passa-faixa para frequência de corte de 1 MHz.	51
Figura 33 – Sinal de saída do filtro passa-faixa para frequência de corte de 10 MHz.	52
Figura 34 – Sinal de saída do filtro passa-faixa para frequência central de 5 MHz.	52
Figura 35 – Circuito do amplificador inversor simulado .....	53
Figura 36 – Sinal de saída do amplificador e circuitos de instrumentação .....	53

Figura 37 – Detalhe do sinal de saída do amplificador de instrumentação.....	54
Figura 38 – Detalhe do sinal de saída do filtro passa-faixa .....	54
Figura 39 – Detalhe do sinal de saída do amplificador de potência .....	55
Figura 40 – Detalhe do sinal de saída do circuito completo .....	55
Figura 41 – Sinal de saída do hidrofone tipo agulha .....	56
Figura 42 – Sinal de saída do amplificador de instrumentação .....	57
Figura 43 – Sinal de saída do filtro passa-faixa.....	58

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABENDI	Associação Brasileira de Ensaios Não Destrutivos.
ABR	Amplificador de baixo ruído.
ADC	<i>Analog to Digital Converter</i> (Conversor Analógico-Digital).
AmpOp	Amplificador Operacional.
CMRR	<i>Common Mode Rejection Ratio</i> (Razão de Rejeição de Modo Comum).
END	Ensaio não destrutivo.
IN-AMP	<i>Instrumentation Amplifier</i> (Amplificador de Instrumentação).
PCI	Placa de Circuito Impresso.
ROV	<i>Remotely Operated Vehicle</i> (Veículo Operado Remotamente).
PTFE	Politetrafluoroetileno.
PVDF	<i>Polyvinylidene Fluoride</i> (Fluoreto de Polivinilideno).
PZT	Titanato Zirconato de Chumbo.
SNR	<i>Signal to Noise Ratio</i> (Relação Sinal-Ruído)
VCVS	<i>Linear Voltage-Controlled Voltage Source</i> .

## SUMÁRIO

	<b>Sumário .....</b>	<b>11</b>
<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>13</b>
1.1	Objetivos .....	13
1.2	Organização do Trabalho.....	14
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>15</b>
2.1	<b>Ultrassom .....</b>	<b>15</b>
2.1.1	Campo acústico ultrassônico .....	16
2.1.2	Propagação do ultrassom.....	16
2.2	<b>Métodos utilizados para caracterização do campo acústico .....</b>	<b>17</b>
2.2.1	Caracterização do campo acústico por hidrofone.....	18
2.2.2	Meio de propagação e tanque de ensaio.....	21
2.3	<b>Circuito de instrumentação para hidrofones .....</b>	<b>21</b>
2.3.1	Amplificadores de instrumentação com OP-AMPS .....	22
2.3.2	Filtros ativos .....	25
2.3.3	Amplificadores .....	28
2.4	<b>Considerações finais.....</b>	<b>29</b>
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>30</b>
3.1	<b>Dispositivo gerador de pulsos ultrassônicos .....</b>	<b>30</b>
3.2	<b>Reservatório de água .....</b>	<b>32</b>
3.3	<b>Construção do hidrofone tipo agulha .....</b>	<b>33</b>
3.3.1	Elemento sensor.....	34
3.4	<b>Circuito do amplificador de instrumentação.....</b>	<b>37</b>
3.5	<b>Circuito do filtro passa-faixa .....</b>	<b>39</b>
3.6	<b>Circuito do amplificador inversor .....</b>	<b>40</b>
3.7	<b>Sistema de aquisição de dados.....</b>	<b>40</b>
3.8	<b>Confecção das placas de circuito impresso .....</b>	<b>41</b>
3.9	<b>Considerações finais.....</b>	<b>43</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>45</b>
4.1	<b>Hidrofone tipo agulha.....</b>	<b>45</b>
4.1.1	Calibração do hidrofone tipo agulha .....	47
4.2	<b>Amplificador de instrumentação .....</b>	<b>47</b>
4.3	<b>Filtro passa-faixa .....</b>	<b>49</b>
4.4	<b>Amplificador de potência.....</b>	<b>52</b>

<b>4.5</b>	<b>Ensaio do circuito simulado com a entrada do hidrofone .....</b>	<b>53</b>
<b>4.6</b>	<b>Ensaio com o hidrofone e circuitos de instrumentação .....</b>	<b>55</b>
<b>4.7</b>	<b>Considerações finais.....</b>	<b>59</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>60</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>62</b>

# 1 INTRODUÇÃO

O Brasil é um dos líderes mundiais em produção de petróleo *off-shore*, contando com a participação de mais de 20 empresas exploradoras (OPETRÓLEO, 2017). A segurança e qualidade das operações nessas empresas requerem ações contínuas, visando a garantia da integridade de seus equipamentos. Inspeções rotineiras buscando identificar, dimensionar e/ou monitorar falhas em equipamentos são de suma importância no processo de garantia de integridade, sobretudo em ambientes submarinos.

Ensaio não destrutivo por ultrassom são métodos amplamente usados para inspeção de equipamentos. Em ambientes *on-shore* (exploração petrolífera realizada no continente), por possibilitar que os ajustes nos equipamentos sejam feitos a cada inspeção, existe liberdade de operação como por exemplo, o reposicionamento de transdutores com a finalidade de maximizar a qualidade dos dados adquiridos. Diferente do ambiente *on-shore*, em ambientes *off-shore* (estruturas para exploração petrolífera localizadas em alto mar) existem dificuldade nos ajustes dos equipamentos utilizados, já que os aparelhos são manipulados remotamente a partir de um ROV (*Remote Operated Vehicle*) (OPETRÓLEO, 2017).

Para obter informações do campo acústico gerado por um transdutor emissor de ultrassom em um ambiente submerso, é necessário utilizar um dispositivo denominado hidrofone capaz de capturar esse campo. Nesse caso, o hidrofone é um dispositivo piezoelétrico utilizado para a medição das características espaciais e temporais de um campo acústico na água, produzindo um mínimo de perturbação no meio e, com isso, permitir o desenvolvimento de novas técnicas no processo de inspeção não destrutiva. A partir do conhecimento do campo acústico, é possível obter melhores informações da condição do material inspecionado, oferecendo melhor calibração e, conseqüentemente, aquisição de dados mais precisos pelos equipamentos de inspeção por ultrassom.

## 1.1 OBJETIVOS

O objetivo principal desse trabalho consiste do projeto, construção e avaliação experimental de um hidrofone tipo agulha, além do projeto e implementação de circuito de instrumentação para o hidrofone.

Os objetivos específicos são:

- Estudar e analisar técnicas para a construção de hidrofones do tipo agulha.
- Construir um hidrofone do tipo agulha.

- Estudar e analisar técnicas para projeto dos circuitos de instrumentação de hidrofones do tipo agulha.
- Projetar e simular os circuitos de instrumentação para um hidrofone do tipo agulha.
- Realizar ensaios de validação do hidrofone do tipo agulha construído e analisar os resultados obtidos.

## 1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho está organizado em 5 capítulos, incluindo a Introdução já abordada. No Capítulo 2 é feita a fundamentação teórica sobre métodos de instrumentação para hidrofone do tipo agulha utilizado na caracterização do campo ultrassônico em ensaios não destrutivos. O Capítulo 3 descreve as metodologias que foram utilizadas na construção do hidrofone e nos projetos dos circuitos de instrumentação. O Capítulo 4 demonstra os resultados e discussões dos ensaios para validação da metodologia utilizada para construção do hidrofone tipo agulha e discussões das simulações dos projetos realizados para os circuitos de instrumentação. O capítulo 5 apresenta a conclusão.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta a fundamentação teórica que será utilizada como base de conhecimento para o desenvolvimento do trabalho. Primeiramente serão apresentados os conceitos sobre o ultrassom e campo acústico associados ao hidrofone do tipo agulha e os circuitos de instrumentação necessários, sendo eles: (I) amplificador de instrumentação (pré-amplificador); (II) filtro passa-faixa; (III) amplificador de potência. Serão abordados os conceitos que estão relacionados a construção de um hidrofone do tipo agulha; a implementação de um circuito de instrumentação; a implementação de um filtro do tipo passa-faixa; a implementação de um amplificador inversor; e a caracterização do campo acústico.

### 2.1 ULTRASSOM

As ondas sonoras com frequências situadas acima do limite audível para o ser humano (acima de 20 KHz) são chamadas de ultrassom. Apresenta velocidades de propagação, compatíveis com diferentes meios, sendo essa característica importante para o processo de interação das ondas ultrassônicas (mecânicas) com o meio em particular, na água 1480 m/s. O ultrassom sofre reflexão e refração nas interfaces onde ocorre uma mudança na densidade.

As ondas ultrassônicas são geradas por transdutores ultrassônicos também chamados simplesmente de transdutores. Os transdutores ultrassônicos convertem energia elétrica em energia mecânica e vice-versa. Esses transdutores são feitos de materiais piezoelétricos. A palavra piezoelectricidade vem do grego e significa eletricidade pela pressão. É um fenômeno associado a presença de dipolos elétricos preferencialmente orientados (polarização) dentro de um material e que se deformam quando é aplicada uma certa tensão mecânica (pressão). Essa deformação gera um campo elétrico capaz de movimentar cargas elétricas livres presentes nos eletrodos depositados em sua superfície (SILVA, 2011).

O processo inverso também ocorre quando é aplicado um campo elétrico entre os eletrodos fixados na superfície do material piezoelétrico. Conseqüentemente, a sua estrutura formada por dipolos elétricos em seu interior se deforma. Certos cristais naturais, como o quartzo e a turmalina, são piezoelétricos. Outros tornam-se artificialmente, como o sulfato de lítio, o titanato de bário, o titanato de zirconato de chumbo (PZT) e o fluoreto de polivinilideno (PVDF). O mesmo transdutor que emite o sinal ultrassônico funciona como detector (SILVA, 2011). Dependendo da aplicação, o elemento piezoelétrico é quem determina a frequência de operação do transdutor.

### 2.1.1 CAMPO ACÚSTICO ULTRASSÔNICO

O campo acústico ultrassônico é a região na qual as ondas ultrassônicas se propagam. A forma como essas ondas se propaga a partir do transdutor depende da dimensão do transdutor ultrassônico e do comprimento de onda. A necessidade de otimização de instrumentação e de transdutores para aplicações nos equipamentos de imagem por ultrassom, deve-se a importância dada ao estudo do padrão do campo acústico irradiado por um transdutor, seja contínuo ou pulsátil, levando a uma melhor interpretação de sinais e resultados obtidos, tanto na transmissão quanto na recepção.

O campo gerado por este tipo de fonte acústica é dividido em duas regiões distintas ao longo do eixo de propagação da onda. A primeira descreve a região limitada às adjacências do transdutor, denominada região de campo próximo. A segunda descreve o campo distante. Este padrão de radiação do campo acústico gerado por um transdutor de ultrassom é considerado uma combinação de duas componentes: ondas planas e ondas de borda. As ondas planas se propagam a partir de toda a face do transdutor e as ondas de borda irradiam a partir do perímetro da fonte e se espalham por todas as direções. O fenômeno de sobreposição das ondas de borda e plana determina o comportamento do campo acústico nas regiões de campo próximo e campo distante (CARRIJO, 2008).

Como definição mais usual de campo próximo, tem-se como uma região do campo acústico caracterizada pela interferência, nesta região, está concentrada grande parte da energia, estando repleta de máximos e mínimos muito próximos, sendo portanto difícil quantificar exatamente o nível de pressão num determinado ponto. Assim é inadequado trabalhar em tal região quando precisão é exigida (FILHO, 2004).

Em contraste à definição de campo próximo, a região de campo distante é caracterizada por um campo acústico, onde diferenças de fase entre as ondas de borda e plana não são tão acentuadas e as ondas interferem entre si construtivamente formando uma frente de onda quase plana, que se atenua à medida que vai se propagando no meio e se distanciando da fonte, possibilitando uma previsão mais fácil dos níveis de pressão (FILHO, 2004).

### 2.1.2 PROPAGAÇÃO DO ULTRASSOM

As ondas ultrassônicas propagam-se, em uma determinada frequência, pelo meio irradiado, tanto no modo contínuo como no pulsado. No modo contínuo, a onda é gerada ininterruptamente, incidindo dessa forma no meio de propagação. No modo pulsado, a geração se dá por interrupções intermitentes, como ocorre nos equipamentos de inspeção não destrutiva por ultrassom, gerando um campo acústico, que pode ser captado por um transdutor receptor em um hidrofone. Assim, ocorrem no meio irradiado

intervalos de tempo onde existem oscilações de pressão (deslocamento da onda) e intervalos de tempo quando a pressão permanece inalterada.

O intervalo de tempo em que ocorrem esses aumentos e diminuições da pressão do meio é a duração do pulso. No período de repetição do pulso considera-se o intervalo de tempo quando ocorrem as mudanças de pressão no meio (pulso ultrassônico) e o intervalo de tempo em que a pressão permanece inalterada. O som se propaga por meio de ondas longitudinais e transversais. Nos gases e líquidos existem apenas as ondas longitudinais. Além disso, nos sólidos as ondas sonoras apresentam velocidades diferentes das velocidades apresentadas em meios líquidos e gasosos.

## 2.2 MÉTODOS UTILIZADOS PARA CARACTERIZAÇÃO DO CAMPO ACÚSTICO

As ondas ultrassônicas comportam-se de forma semelhante às eletromagnéticas, podendo sofrer reflexão, refração ou difração e transmissão quando o feixe encontra uma interface entre meios com características acústicas diferentes. Baseados nesse comportamento das ondas ultrassônicas, dois métodos experimentais são geralmente utilizados para caracterização de meios por ultrassom: o método pulso-eco (reflexão) e o método transmissão-recepção. A combinação desses dois métodos permite obter informações sobre distância entre objetos, velocidade de propagação e atenuação das ondas ultra-sônicas nos meios.

No método pulso-eco o mesmo transdutor atua como transmissor e como receptor de ondas ultrassônicas. Neste caso, um pulso elétrico é aplicado ao transdutor e este gera uma onda ultrassônica. A onda ultrassônica propaga-se através do meio e, assim que encontra a interface entre os meios, parte da onda é refletida e outra parte propaga-se através do meio. Da mesma forma, a onda que se propaga através do meio, ao encontrar uma outra interface, terá parte refletida e parte transmitida. As ondas refletidas que são captadas pelo transdutor, trazem informações sobre a distância ou a velocidade de propagação através da relação ( $S = Vt$ ), onde  $S$  é o espaço percorrido (no método pulso-eco a onda ultrassônica propaga-se em uma distância equivalente a 2 vezes a distância entre o transdutor e o objeto alvo),  $V$  é a velocidade de propagação e  $t$ , o tempo decorrido entre a aplicação do pulso e a recepção do eco (MAIA, 2001). Também é possível obter informações sobre atenuação do som no meio processando-se os ecos recebidos.

No método transmissão-recepção, são utilizados transdutores independentes para transmitir e receber as ondas ultrassônicas. Neste caso, um pulso elétrico é aplicado ao transmissor, gerando uma onda ultra-sônica que se propaga através do meio e será captada no transdutor receptor, no caso em estudo, o hidrofone tipo agulha. Este método pode fornecer informações sobre o tempo de propagação e atenuação das ondas ultrassônicas em função da presença ou não de objetos (meios

com características acústicas diferentes) na trajetória de propagação da onda. Para os propósitos de caracterização do campo acústico em meio aquático, frequências acima de 1 MHz são utilizadas (MEDEIROS, 2014).

### 2.2.1 CARACTERIZAÇÃO DO CAMPO ACÚSTICO POR HIDROFONE

A caracterização de um campo acústico feita por hidrofone é um dos métodos mais completo e sensível. Para seu uso, a norma NBR-IEC 61689 determina a realização do mapeamento por varredura planar, em que ocorre captação dos sinais de pressão do campo acústico, irradiado pelo transdutor, e os transformam em sinais elétricos (SILVA, 2011).

O parâmetro que caracteriza a conversão da forma de energia mecânica em elétrica é a sensibilidade de recepção. Esses sinais elétricos são processados e utilizados para reconstruírem a imagem do meio, ou no caso do hidrofone tipo agulha, a caracterização do campo acústico mostrando suas características espaciais e temporais, produzindo um mínimo de perturbação no mesmo, ou seja, o hidrofone deve proporcionar uma réplica da forma de onda, não distorcida, da pressão acústica do campo para qualquer ponto. A sensibilidade de recepção fornece dados precisos sobre o perfil espacial do feixe, proporcionando uma indicação do local de aplicação da energia acústica na área de interesse.

As desvantagens de utilizar o hidrofone tipo agulha para realizar a caracterização do campo acústico residem no fato de ser pouco acessível, devido ao alto custo da montagem experimental necessária, que consiste de um tanque acústico, construção do hidrofone, além de sua instrumentação, osciloscópio e o gerador de sinal (SILVA, 2011).

O reservatório de água deve conter água desgasificada, para evitar a formação de bolhas, deionizada para evitar a corrosão dos hidrofones e estar a uma temperatura controlada de  $22^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$  (norma NBR-IEC 61689) (SILVA, 2011). O transdutor e o hidrofone são imersos neste reservatório com água. O hidrofone deve estar em um suporte que permita a sua movimentação nos eixos ortogonais X, Y e Z. Um computador é responsável por armazenar o sinal coletado com o sistema de aquisição de sinais, podendo ser um osciloscópio digital. Segundo a norma IEC 61689 (2007), deve ser feita a varredura ao longo do eixo do transdutor, pois nesse eixo localizam-se os maiores picos de pressão. Devem também ser feitas varreduras ao longo de um plano longitudinal, que contenha o eixo do transdutor e também em planos transversais, a distâncias determinadas da face do transdutor.

Dois tipos de hidrofones são utilizados atualmente: o do tipo agulha e o do tipo membrana. Os hidrofones tipo agulha são compostos de uma abertura em um tubo de metal, sendo revestidos em uma das extremidades pelo elemento transdutor de energia

(PVDF). A Figura 1 é a representação esquemática de um hidrofone tipo agulha, em que o elemento sensor é apoiado em um tubo de aço inoxidável (OLIVEIRA, 2014).

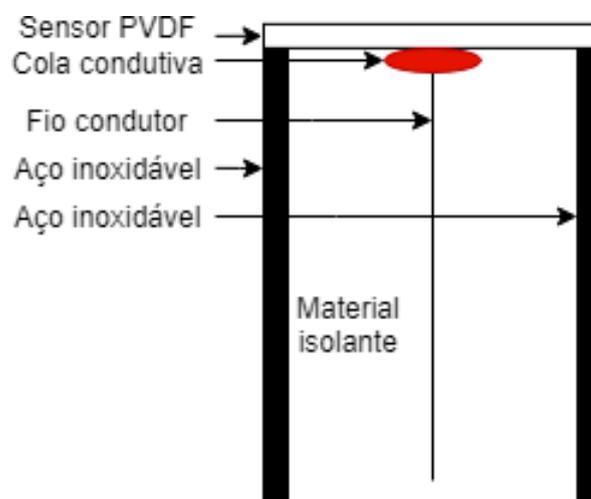


Figura 1 – Desenho esquemático de um hidrofone tipo agulha.

Fonte: Autoria própria.

A Figura 2 ilustra o processo de caracterização do campo acústico com o uso de um hidrofone.

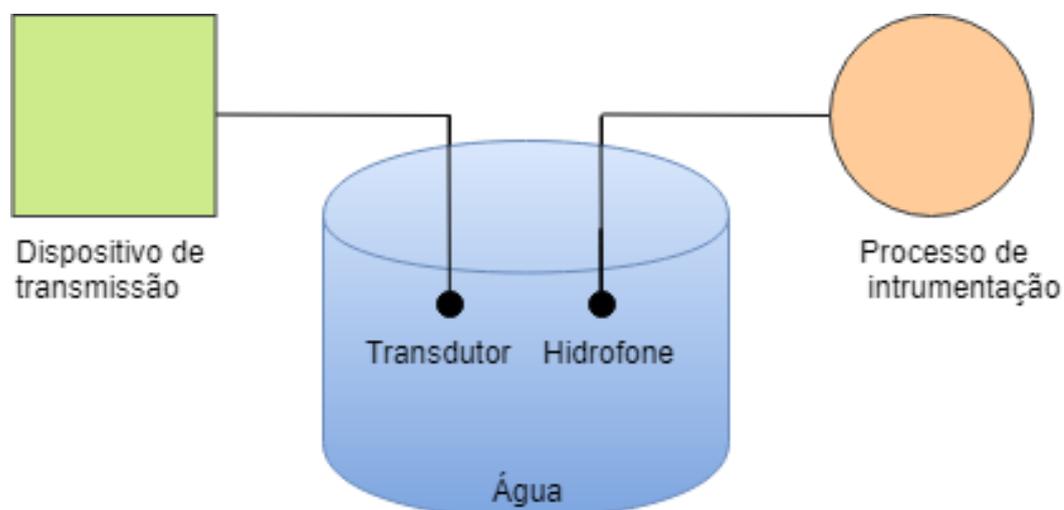


Figura 2 – Diagrama em blocos do processo de medição do campo acústico.

Fonte: Autoria própria.

Portanto, para que o hidrofone funcione corretamente é preciso que apresente algumas características, tais como: as dimensões de seu elemento ativo devem ser as menores possíveis, para diminuir as perturbações no meio e para melhorar a resolução

espacial; sua relação sinal/ruído deve ser alta dentro de uma larga faixa de frequência (VALENTE, 2006). Esse dispositivo deve ser calibrado, de modo que possa proporcionar uma réplica da forma de onda, não distorcida, da pressão acústica do campo em qualquer ponto (NICACIO, 2002). O elemento ativo do hidrofone pode ser de cerâmica piezoelétrica, cristal ou um polímero piezoelétrico (DUARTE, 1977).

O hidrofone do tipo agulha tem o formato de uma haste fina (*needle probes*), tendo no topo sua superfície sensível. Apresenta a vantagem de também poder trabalhar em volumes reduzidos e ser inserido em pequenas cavidades, característica importante de projeto, já que o tanque onde ocorrerão os ensaios de validação deste trabalho possui dimensões pequenas, por esse motivo escolheu-se um hidrofone do tipo agulha para esse trabalho. Um exemplo desse tipo de transdutor é mostrado na Figura 3.



Figura 3 – Fotografia de um hidrofone do tipo agulha.

Fonte: (VALENTE, 2006).

O processamento dos sinais coletados com um hidrofone permite determinar a duração dos pulsos ultrassônicos e seus espectros de frequência. Por meio dos espectros, pode-se obter os pulsos de mínima e máxima frequência com relação ao pico e com esses valores, calcular a frequência central e a largura de banda dos transdutores,

geralmente apresentada em porcentagem com relação a frequência central (MAIA, 2001). Outro dado que pode ser obtido é a frequência de pico de energia no espectro.

### 2.2.2 MEIO DE PROPAGAÇÃO E TANQUE DE ENSAIO

Para o estudo do campo acústico irradiado por um transdutor ultrassônico, a água é usada como meio de propagação, por ser um fluido homogêneo e suas propriedades organolépticas: transparente, inodoro, insípida e incolor, com parâmetros físico-químicos bem conhecidas. Isso possibilita o conhecimento das condições de transmissão e recepção, para qual o transdutor possa ser usado, e o próprio equipamento de ultrassom. Devido às suas propriedades e facilidades de obtenção, a água é tomada como um meio universal padrão para estudo experimental (WELLS, 1977).

Os estudos desenvolvidos envolvendo tanque de ensaio acústico levaram a uma padronização do tanque experimental. Suas dimensões devem ser grandes o suficiente para permitir a excursão do hidrofone na região de interesse do feixe analisado e garantir que os sinais provenientes de reflexões das ondas acústicas em suas paredes sejam os menores possíveis. Caso seja necessário, o fundo do tanque, bem como suas paredes internas, devem ser cobertas com material que absorva as ondas acústicas para evitar reflexões indesejadas. Além disso, a água com a qual o tanque acústico é preenchido deve ser destilada, degaseificada e estar a uma temperatura de 24°C e 3°C.

A movimentação do hidrofone dentro do tanque acústico deve ser tal que permita sua movimentação nos três eixos ortogonais. Os eixos Z e Y devem estar perpendiculares e o eixo X deve estar paralelo ao eixo do feixe de transmissão do transdutor. E, também, deve ser capaz de proporcionar a rotação do hidrofone através de ângulos medidos sobre um eixo que seja paralelo ao eixo Y e passe através do centro do elemento ativo do hidrofone (AIUM/NEMA, 1991).

### 2.3 CIRCUITO DE INSTRUMENTAÇÃO PARA HIDROFONES

Uma montagem típica para um sistema de medição com hidrofone tipo agulha consiste na conexão do elemento sensor contido na agulha a um amplificador de instrumentação (pré-amplificador) com a finalidade de amplificar o sinal eletrônico de baixo nível captado pelo hidrofone; um filtro passa-faixa para selecionar a faixa de operação do transdutor; e um amplificador para adequar o sinal de saída em uma faixa adequada de corrente ou tensão de um sistema de aquisição (VALENTE, 2006). A Figura 4 apresenta um diagrama de blocos contendo esses elementos.

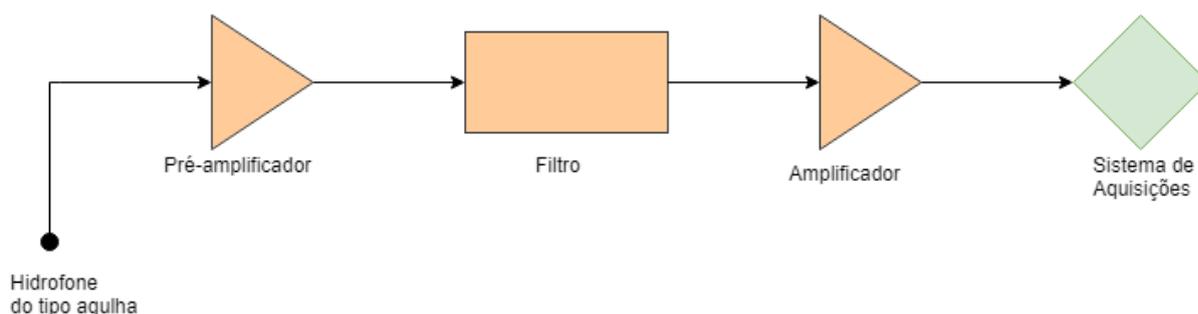


Figura 4 – Diagrama em blocos do processo de instrumentação.

Fonte: Autoria própria.

### 2.3.1 AMPLIFICADORES DE INSTRUMENTAÇÃO COM OP-AMPS

Um amplificador de instrumentação, também conhecido por *in-amp* (*instrumentation amplifier*) é um elemento essencial em qualquer sistema de aquisição de sinais com pequena amplitude. O amplificador de instrumentação será o primeiro bloco de condicionamento utilizado na instrumentação do hidrofone, por isso, é nele onde é definido o nível de ruído que será transmitido para o restante do sistema e, também, o CMRR (*Common Mode Rejection Ratio*), a capacidade de rejeitar sinais de modo-comum (COULON, 2012).

O que o difere o amplificador de instrumentação de um amplificador operacional (*AmpOp*) é que o amplificador de instrumentação deve ser capaz de rejeitar sinais de modo-comum a uma taxa de  $-90\text{dB}$ , aproximadamente. Outra diferença básica é que aos amplificadores operacionais, uma malha de realimentação deve ser incorporada para que eles operem de forma controlada, ao passo que os amplificadores de instrumentação já são estruturas intrinsecamente realimentadas (FABBRO, 2002a).

São muitas as aplicações em que amplificadores de instrumentação podem ser empregados. Dentre elas, destacam-se a instrumentação biomédica, o tratamento de sinais sensíveis a ruídos, sinais transmitidos remotamente e transdutores de baixa sensibilidade. De modo a realizar a conversão de entrada diferencial para saída simples, um amplificador de instrumentação ideal deve ter a habilidade de amplificar apenas sinais de modo diferencial, ou seja, amplificar somente a diferença entre os sinais presentes nas entradas. Para tanto, a componente de modo comum aos sinais de entrada deve ser completamente rejeitada, característica conhecida como *rejeição de modo comum*. Assim, o termo *Razão de Rejeição de Modo Comum*, ou simplesmente CMRR (*Common Mode Rejection Ratio*), descreve quantitativamente essa característica do amplificador. A CMRR é normalmente expressa em decibéis (dB) e é dada pela razão entre o ganho do amplificador para sinais diferenciais e o ganho para sinais de modo comum (PERTENCE, 1996).

Entenda-se por ganho de modo comum, a razão entre a variação na tensão de saída pela variação na tensão de modo comum na entrada e ganho de modo diferencial como a razão entre a variação na tensão de saída pela variação na tensão de modo diferencial na entrada. Portanto, quanto maior a CMRR, melhor é o amplificador de instrumentação. Entre as suas características construtivas estão: resistência de entrada muito alta; resistência de saída relativamente muito baixa; CMRR alto; ganho em malha aberta relativamente muito alto; tensão de *offset* baixíssima - *drift* baixo (PERTENCE, 1996).

A seguir será apresentada a principal arquitetura encontrada na literatura para amplificadores de instrumentação. A arquitetura que é mais difundida na literatura e que foi a primeira a ser projetada é a que faz uso de três amplificadores operacionais, conhecida como INA resistivo (SHARMA BUDDHI, 2016; GOEL AKSHAY, 2013). Portanto, sendo uma configuração padrão para amplificadores de instrumentação, essa estrutura é baseada em três amplificadores operacionais como mostrado na Figura 5, sendo dois configurados como não-inversores e um terceiro como amplificador diferencial (THAKOR, 1999). É de fácil implementação, possui uma alta impedância de entrada e um ganho de banda passante que depende exclusivamente de uma razão entre resistores de realimentação.

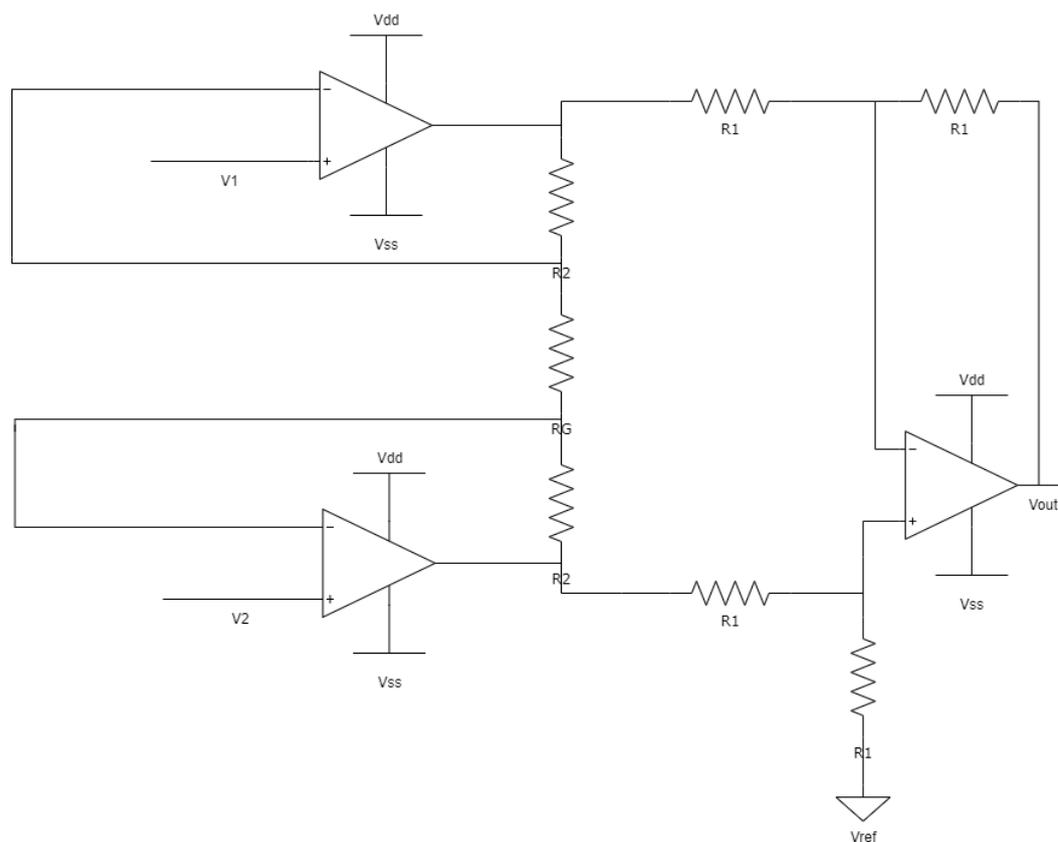


Figura 5 – Configuração clássica de um amplificador de instrumentação formado por três op-amps.

Fonte: Autoria própria.

O circuito da Figura 5 apresenta dois estágios: o primeiro formado pelos dois primeiros amplificadores e pelas resistências  $R_2$  e  $R_g$ ; e o segundo que nada mais é do que um circuito subtrator para sinais de modo diferencial. O estágio de entrada apresenta impedâncias altas e casadas em suas entradas, características essas conferidas pelos amplificadores iniciais. Quando um sinal diferencial  $V_{id}$  é aplicado entre as entradas do circuito, a tensão  $V_{id}$  é imposta sobre a resistência  $R_g$  e, portanto, passa para o segundo estágio com um ganho dado pelo fator  $1 + 2 R_2 R_g$ . Já para sinais de modo comum, as tensões nas extremidades de  $R_g$  serão iguais e não haverá corrente fluindo por  $R_g$ . Portanto, os *op-amps* disponibilizarão para o segundo estágio o sinal de entrada de modo comum com ganho unitário. Cabe ao segundo estágio rejeitar esse sinal, passando para a saída somente sinais de modo diferencial. Ainda assim, uma boa CMRR nesse tipo de amplificador de instrumentação depende do casamento de resistores (GIACOMIN, 2018).

Porém, além do problema relacionado ao casamento de resistores, essa arquitetura possui um elevado consumo de energia, níveis consideráveis de ruído e problemas com saturação do sinal. Como fazem uso de muitos resistores ocupam uma

área maior na placa de circuito impresso, sendo assim, pode-se concluir que esse tipo de arquitetura não é muito indicada para aplicações que exijam um baixo consumo e baixo ruído (HA et al., 2014; PRIOR et al., 2008; FABBRO, 2002b; PANCOTTO, 2017; YAZICIOGLU; HOOF; PUERS, 2008; COULON, 2012; HELLEPUTTE et al., 2015). Um dos maiores problemas de se trabalhar com pequenos sinais, que é o caso em estudo, está no ruído, uma vez que este pode deteriorar o sinal a ser analisado.

### 2.3.2 FILTROS ATIVOS

Os filtros ativos são assim chamados por apresentam componentes ativos, ou seja, que necessitam de alimentação, associados aos componentes passivos, resistores e capacitores. Assim, ao contrário dos filtros passivos, os ativos apresentam também um amplificador a fim de produzir uma amplificação de tensão (ganho).

Existem inúmeras estruturas de implementação para filtros ativos. As estruturas mais comuns são as com realimentação múltipla (MFB) e com fonte de tensão controlada por tensão. Ambas as estruturas possuem algumas vantagens que as torna muito usuais na prática: boa estabilidade, baixa impedância de saída, facilidade de ajuste de ganho e de frequência, requerem poucos componentes externos. Entretanto, o máximo valor para o fator de qualidade para filtros implementados com essas estruturas é da ordem de 10. A estrutura MFB apresenta polaridade de saída invertida, ou seja, apresenta ganho invertido. Essa característica não tem nenhum efeito prejudicial no desempenho dos filtros implementados com estrutura MFB. A estrutura VCVS (*Linear Voltage-Controlled Voltage Source*) costuma também ser denominada estrutura de Sallen e Key, a denominação VCVS está relacionada com o fato do amplificador operacional, como amplificador de tensão, poder ser comparado a uma fonte de tensão cuja saída é função da tensão de entrada e do ganho do circuito (PERTENCE, 1996).

As estruturas podem ser utilizadas para implementar diferentes aproximações (Butterworth, Chebyshev, Bessel, etc.). A determinação de uma certa função-resposta é estabelecida pelos valores dos componentes da estrutura, os quais, por sua vez, são condicionados por alguns parâmetros previamente tabelados, bem, como pelas condições de projeto do filtro. O filtro será o segundo bloco de condicionamento utilizado na instrumentação do hidrofone.

A etapa de filtragem auxilia na redução das interferências. São inúmeras as fontes dessas interferências, como por exemplo, a impedância da fonte ou os próprios cabos de conexão dos eletrodos (NOKES et al., 1995). Podem ser utilizados para o tratamento dessas interferências diversas configurações de filtros analógicos, no projeto em estudo utilizou-se um filtro passa-faixa.

O filtro passa-faixa é um dispositivo que permite a passagem das frequências de uma certa faixa e rejeita (atenua) as frequências fora dessa faixa. Um exemplo de

um filtro passa-faixa analógico é o circuito RLC (um circuito resistor-indutor-capacitor). O filtro passa-faixa ideal possui resposta constante dentro da banda de frequência desejada e ganho igual a zero fora desta faixa. Na aproximação desta característica obtida através do circuito RLC tem uma resposta que eleva muito o ganho na região de determinada frequência e o diminui acentuadamente conforme se afasta dessa frequência (MILLMAN, 1981). O circuito básico RLC é a seção de segunda ordem mostrada na Figura 6. Este tipo filtro também pode ser obtido a partir da combinação de um filtro passa-baixas e um filtro passa-altas.

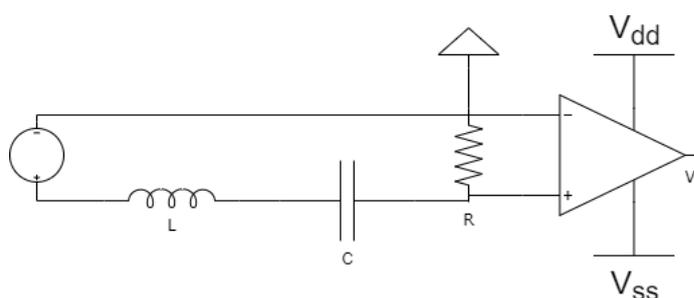


Figura 6 – Configuração clássica de um circuito RLC.

Fonte: Autoria própria.

Na prática, nenhum filtro passa-faixa é ideal. O filtro não atenua todas as frequências fora da faixa desejada, existe uma região em particular fora da banda desejada em que as frequências são atenuadas, mas não rejeitadas (MALVINO, 1997).

A configuração escolhida para o projeto do filtro foi por aproximação Butterworth que é um tipo de projeto para filtros eletrônicos. Ele é desenvolvido de modo a ter uma resposta em frequência o mais plana da banda passante, ou seja, não possuir *ripple*, ou ondulações na banda passante, e se aproxima do zero na banda rejeitada. Quando visto em um gráfico logarítmico, essa resposta decresce linearmente até o infinito negativo. Para um filtro de primeira ordem, a resposta varia em  $-6$  dB por oitava ( $-20$  dB por década). Já para um filtro Butterworth de segunda ordem, a resposta em frequência varia em  $-12$  dB por oitava, e em um filtro de terceira ordem a variação é de  $-18$  dB, e assim por diante. Os filtros Butterworth possuem uma queda na sua magnitude como uma função linear (PERTENCE, 1996).

A função de transferência obtida através do circuito RLC apresentado na Figura 6 pode ser implementado então com o circuito de múltipla realimentação da Figura 7, que utiliza três resistores, dois capacitores e um amplificador operacional.

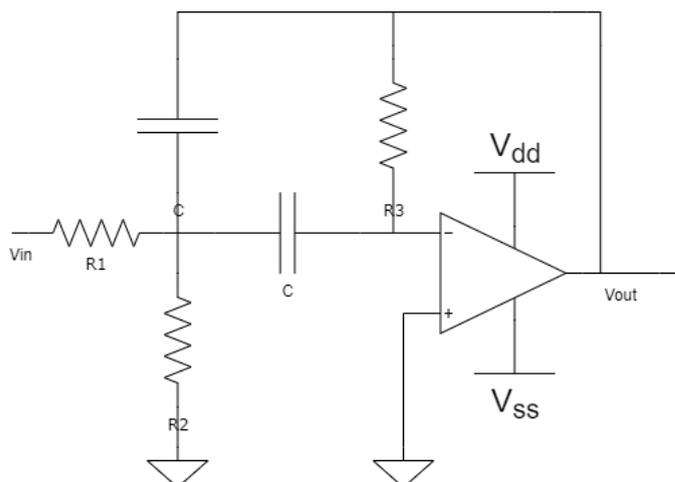


Figura 7 – Configuração clássica de um filtro passa-faixa.

Fonte: Autoria própria.

O filtro passa-faixa também pode ser projetado a partir de um filtro passa-alta e passa-baixa em uma ligação em cascata apresentada na Figura 8. O filtro passa-baixa é o nome dado ao circuito que permite a passagem de baixas frequências sem dificuldades e atenua a amplitude das frequências maiores que a frequência de corte. A quantidade de atenuação para cada frequência varia de filtro para filtro. Já o filtro passa-alta de forma análoga ao filtro passa-baixa, é um filtro que permite a passagem de altas frequências e atenua as frequências de menor amplitude.

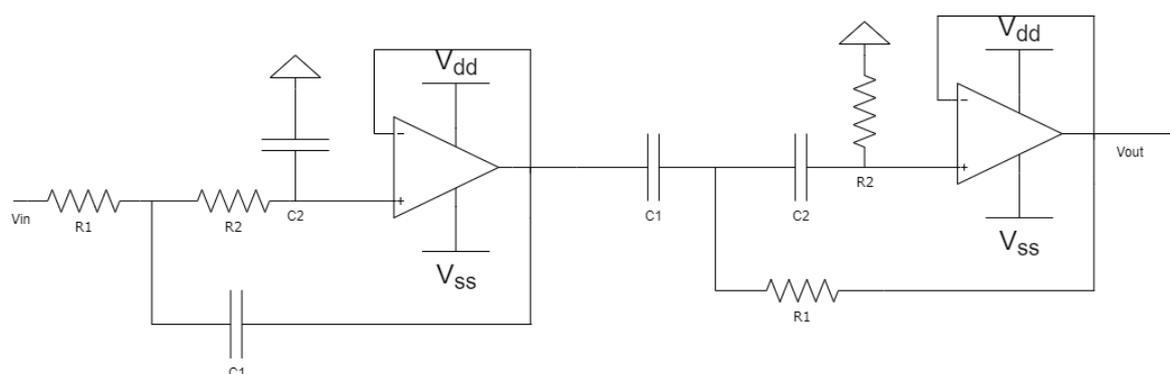


Figura 8 – Configuração clássica de um filtro passa-faixa por associação em cascata.

Fonte: Autoria própria.

Porém, a alternativa apresentada na Figura 8 nem sempre pode apresentar boa precisão em se tratando de filtro passa-faixa por conta dos problemas que podem surgir em relação ao fator de seletividade, com a largura de banda resultante da associação e com o ganho do circuito correspondente à faixa de passagem (PERTENCE, 1996).

### 2.3.3 AMPLIFICADORES

As configurações para a amplificação de sinais de altas frequências (RF) não diferem muito das configurações de áudio. Além das características de impedância de entrada e de saída, nível de sinal de entrada e de saída e ruído, assim como os amplificadores de áudio, os amplificadores de RF têm ainda outros pontos importantes a serem considerados quando projetados.

Um deles refere-se ao fato de que, enquanto num amplificador de áudio normalmente trabalha-se com uma faixa muito ampla de frequências, normalmente a faixa audível entre 20 e 20000 Hz, no caso dos amplificadores de RF existe a possibilidade tanto de se trabalhar com uma faixa larga de frequências, como com uma faixa muito estreita de frequências de um sinal.

O amplificador utilizado para amplificar o sinal de saída do filtro passa-faixa foi o amplificador inversor, que é o terceiro e último bloco de condicionamento utilizado na instrumentação do hidrofone. Chamado de inversor porque, além de amplificar o sinal de entrada, o sinal de saída possui polaridade invertida, ou seja, valores positivos na entrada se tornam valores negativos na saída e vice-versa. O amplificador inversor compreende um amplificador operacional com dois resistores de realimentação, sendo  $V_{in}$  a tensão de entrada e  $V_{out}$  a tensão de saída do amplificador conforme ilustrado na Figura 9. O resistor  $R_1$  liga a tensão de entrada  $V_I$  ao terminal inversor do amplificador operacional. O resistor de realimentação  $R_F$  liga o terminal inversor do amplificador operacional ao terminal de saída  $V_{out}$ . O terminal não-inversor do amplificador operacional é ligado ao terra (GND).

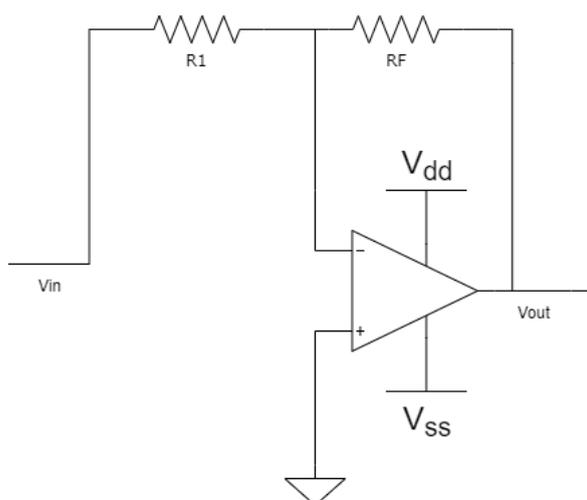


Figura 9 – Configuração clássica de um amplificador inversor.

Fonte: Autoria própria.

A Figura 9 mostra o circuito equivalente para este circuito inversor. O seu ganho em malha fechada é negativo (invertido) e depende apenas da relação de dois resistores,  $R_F$  por  $R_1$ . Além de ser independente do ganho muito alto de malha aberta. Este resultado desejável é causado pelo uso de uma parte da tensão de saída para subtrair da tensão de entrada. O *feedback* da saída para a entrada através  $R_F$  serve para acionar a tensão diferencial,  $v_d = v_+ - v_-$ , perto de zero. Desde a tensão de entrada não-inversora,  $v_+$ , é zero, o *feedback* tem o efeito de dirigir  $v_-$  para zero. Assim, na entrada do AmpOp,  $v_+$  é igual a  $v_-$  que é igual a zero. Seguindo este procedimento simples, pode-se analisar rapidamente e projetar o circuito do amplificador inversor.

## 2.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo descreve, de forma resumida, as principais características a respeito das ondas ultrassônicas geradas por transdutores ultrassônicos e seu elemento sensor, nesse caso, o material piezoelétrico. Também foram abordados os conceitos sobre campo acústico ultrassônico, por ser a região na qual as ondas ultrassônicas se propagam e os seus modos de propagação. Após os conceitos básicos sobre ultrassom serem esclarecidos, foram descritos os métodos que podem ser utilizados para a realização da caracterização do campo acústico utilizando um transdutor, seu meio de propagação e os principais conceitos envolvidos na construção de um hidrofone tipo agulha. Por fim, foram apresentados os circuitos de instrumentação necessários para um hidrofone tipo agulha, sendo eles: o amplificador de instrumentação com AmpOp; o filtro ativo; e o amplificador.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os materiais e a metodologia utilizados para construção do hidrofone que, apesar de simples, possui uma construção considerada um processo artesanal e bastante desafiador; e construção de seu circuito de instrumentação, bem como a montagem experimental necessária para a caracterização do campo acústico. A Figura 10 apresenta um diagrama em blocos do processo de medição do campo acústico. Cada bloco será descrito a seguir, junto com o seu princípio de funcionamento e utilização no sistema, além da descrição dos materiais utilizados na montagem do sistema.

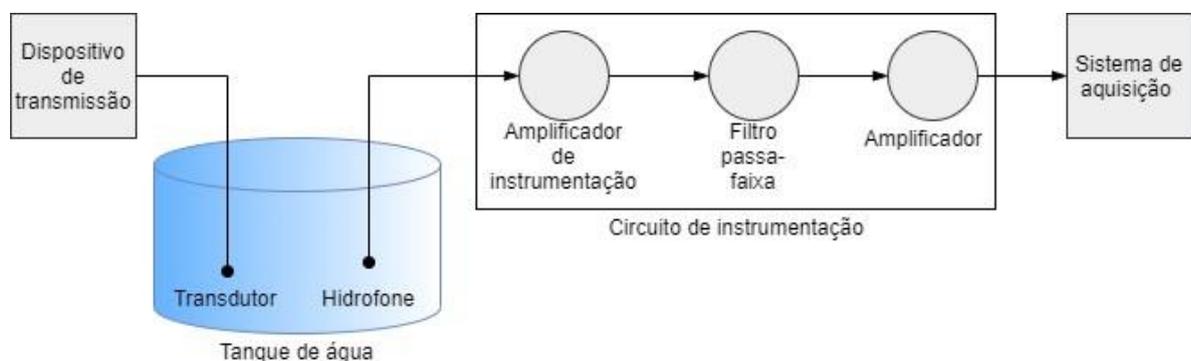


Figura 10 – Diagrama em blocos do processo de medição do campo acústico.

Fonte: Autoria própria.

#### 3.1 DISPOSITIVO GERADOR DE PULSOS ULTRASSÔNICOS

O equipamento utilizado para gerar os pulsos ultrassônicos foi o Einstein-II DGS apresentado na Figura 11 como “Dispositivo de transmissão”. O Einstein-II DGS é um instrumento de teste ultrassônico de canal único usado principalmente para a inspeção de material homogêneo quanto à presença de inclusões, porosidade e outras discontinuidades que podem afetar o desempenho de materiais e componentes. Também pode ser utilizado para aferição de espessura de material homogêneo, exigindo acesso de apenas um lado da peça de teste. Ondas de som de alta frequência (som ultrassônico) são introduzidas no material / peça de teste de um transdutor / sonda que geralmente é acoplado à peça de teste por água ou outro líquido de acoplamento adequado. Nesse caso, o equipamento foi conectado ao transdutor emissor, que converteu os pulsos elétricos gerados em uma onda ultrassônica introduzida no meio de teste para que parte da energia fosse refletida no meio e parte captada pelo hidrofone tipo agulha onde uma medição do campo acústico pode ser obtida.

O método onde são utilizados transdutores independentes para transmitir e receber as ondas ultrassônicas como mostrado na Figura 10 é chamado de emissão-recepção. Esse método pode fornecer informações sobre tempo de propagação e atenuação das ondas ultrassônicas em função da presença ou não de objetos (meios com características acústicas diferentes) na trajetória de propagação da onda. Neste caso, um pulso elétrico foi aplicado ao transmissor emissor, gerando uma onda ultrassônica que se propaga através do meio e será captada no transdutor receptor.



Figura 11 – Ultrasonic Flaw Detector Einstein II DGS.

Fonte: Modsonic Instruments.

O transdutor emissor utilizado foi o transdutor modelo VIDEOSCAN V110-RM da Olympus, conforme ilustrado na Figura 12, que emite onda ultrassônicas longitudinais na direção normal à superfície, na sua frequência nominal de 5 MHz. O transdutor recebeu um pulso de tensão, proveniente do pulsador Einstein-II DGS, e o converteu para ultrassom. Assim, o pulso foi transmitido através do material, para enfim ser capturado pelo transdutor receptor e sistema de aquisição.



Figura 12 – Transdutor emissor moído VIDEOSCAN V110-RM.

Fonte: Olympus.

### 3.2 RESERVATÓRIO DE ÁGUA

Pelo fato de ser um experimento em escala protótipo, foi utilizado um reservatório de pequena capacidade, construído em vidro transparente para realizar as medidas, conforme mostra a Figura 13. A escolha de um reservatório feito de vidro transparente foi uma forma de se obter uma melhor visualização do posicionamento do transdutor emissor e do hidrofone.

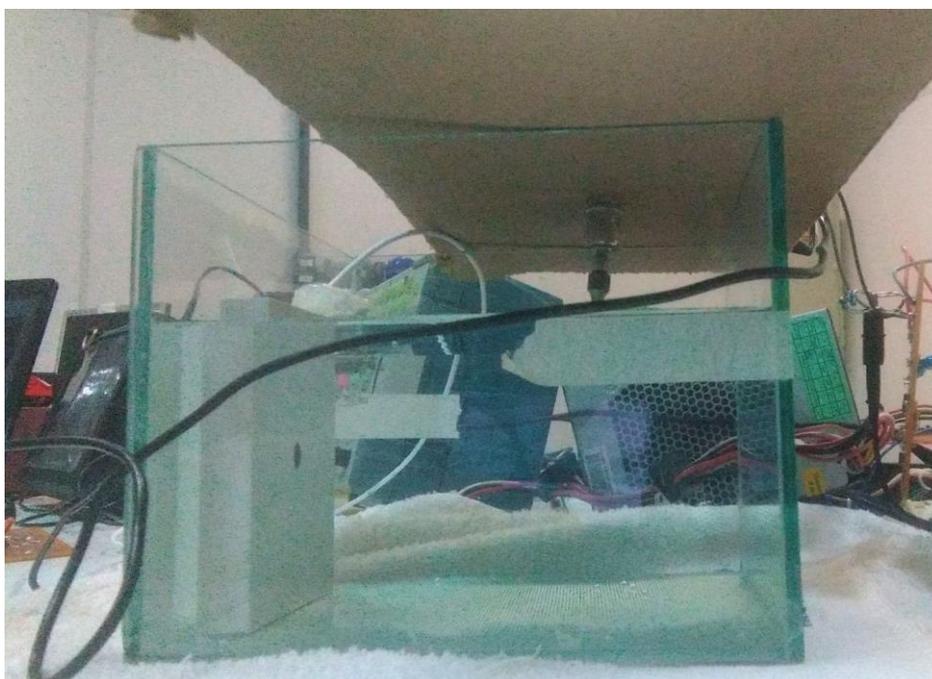


Figura 13 – Reservatório de água para ensaio de obtenção do campo acústico.

Fonte: Autoria própria.

A água foi escolhida como meio de propagação do ultrassom por ser um meio com características apropriadas e com coeficiente de atenuação desprezível para os experimentos realizados.

### 3.3 CONSTRUÇÃO DO HIDROFONE TIPO AGULHA

A etapa inicial deste trabalho concentrou-se no desenvolvimento do protótipo do hidrofone, que compreende resumidamente em um invólucro ou encapsulamento metálico, circuitos eletrônicos do amplificador de instrumentação, filtro passa-faixa e amplificador para o sinal gerado pelo elemento sensor, todo o substrato necessário para acomodar o filme piezoelétrico e uma conexão de saída para a aquisição dos dados.

Nota-se que o corpo desse protótipo é formado por peças em alumínio (encapsulamento e conector). Um dos principais focos do projeto foi a vedação e inúmeros testes foram efetuados com a imersão do protótipo em tanques de água. A característica relevante deste protótipo foi ter deixado o elemento sensor diretamente exposto ao meio acústico, neste caso, a água. A Figura 14 apresenta o hidrofone tipo agulha construído.

O encapsulamento do equipamento, além de acomodar o sensor piezoelétrico e a placa do circuito de instrumentação, ainda, é responsável pela blindagem elétrica do dispositivo. A saída do sinal elétrico, proporcional ao campo acústico e a alimentação do circuito eletrônico, faz-se por conectores do tipo BNC (conexão padrão aos equipamentos elétricos de laboratório), posicionado na extremidade posterior da carcaça.

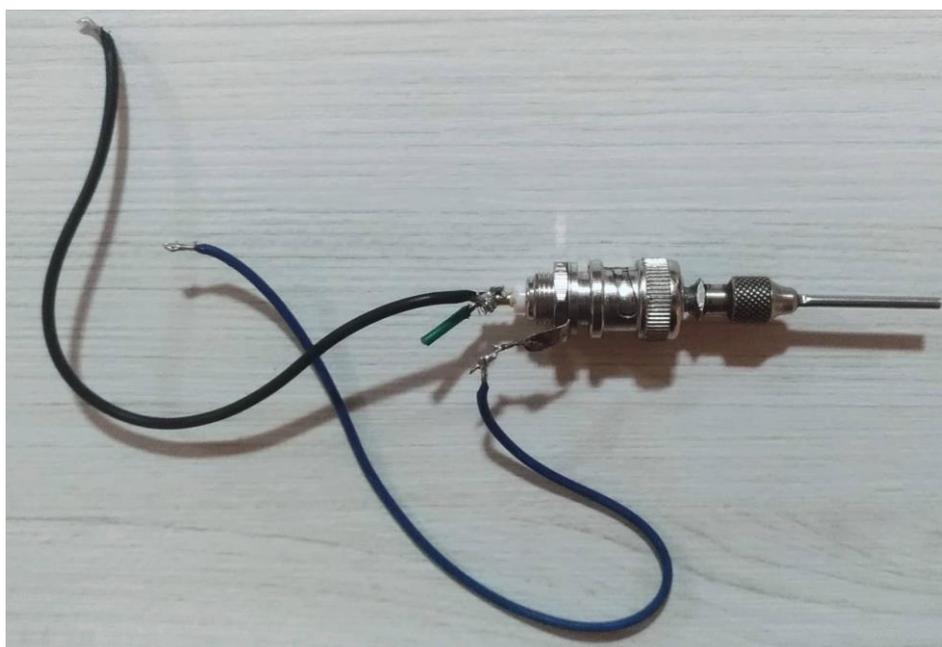


Figura 14 – Hidrofone tipo agulha construído.

Fonte: Autoria própria.

Para a construção do protótipo utilizou-se como carcaça uma agulha hipodérmica de uso veterinário. Inicialmente o fio condutor utilizado teve uma de suas extremidades soldada ao conector BNC, que permite seu acoplamento do hidrofone tipo agulha ao painel do osciloscópio. Em seguida utilizando cola condutiva epoxy, o elemento sensor piezoelétrico (PVDF) foi colado a outra extremidade do fio condutor. Após a passagem do fio pela agulha, o plástico PVDF fica exposto fazendo contato com o meio acústico. A carcaça da agulha exerce a função do neutro do equipamento. A Figura 15 tem foco no elemento sensor presente na agulha do hidrofone tipo agulha.



Figura 15 – Elemento sensor.

Fonte: Autoria própria.

### 3.3.1 ELEMENTO SENSOR

O hidrofone tipo agulha é composto pela seu corpo e pelo seu elemento sensor. O corpo do hidrofone corresponde a agulha de uso veterinário descrita anteriormente. O elemento piezoelétrico ativo que compõe o hidrofone é resultante da tecnologia dos piezoelétricos termoformados. A escolha por este filme eletroacústico foi motivada principalmente por desempenhar uma atividade piezoelétrica superior a muitos outros

piezopolímeros utilizados em transdutores ultrassônicos, por dispor de uma estabilidade térmica em torno de 130 °C e pela grande viabilidade de compra. Adaptados para uso nos sistemas de alta frequência, apresentam resposta em banda larga e baixa impedância acústica (ALVES; SNOOK; ZHAO, 2002). Além dessas vantagens, ressaltam-se outros fatores, como por exemplo sua facilidade na construção dos dispositivos pois são filmes finos e flexíveis.

É importante destacar que, na incidência de ondas acústicas, o sensor baseado na tecnologia dos eletretos termoformados apresenta características piezoelétricas mais eficientes em seu modo de vibração longitudinal e, por esta razão, a atividade de caracterização do equipamento explora a incidência de ondas neste modo de vibração, dada por coeficientes piezoelétricos.



Figura 16 – Filme PVDF (Fluoreto de Polivinilideno) utilizado como elemento sensor.

Fonte: Precision Acoustics Ltd.

Na montagem do equipamento, o filme PVDF (Fluoreto de Polivinilideno), apresentado na Figura 16, foi depositado diretamente sobre o elemento condutor do hidrofone do tipo agulha, com a utilização de uma camada de adesão, construída por epóxi condutivo de prata. A área ativa do sensor, exposta ao meio acústico, com o equipamento montado, compreende uma seção circular com aproximadamente 1mm de diâmetro. Além disso, a fim de prevenir infiltrações no elemento ativo, uma vez que o filme PVDF se encontra em contato direto com a água, a camada de adesão também exerce a função de vedação.

O PVDF vibra de modo tridimensional, ou seja, segundo suas três dimensões: comprimento, largura e espessura, sendo que cada dimensão corresponde a uma frequência fundamental de vibração. Quando uma excitação elétrica é aplicada nas camadas adjacentes às faces de um elemento piezoelétrico, o elemento ativo sofre uma contração ou expansão e, analogamente quando é deformado, ele apresenta uma diferença de potencial entre suas faces (VALENTE, 2006).

Entre as propriedades e especificações do material utilizado como elemento sensor do hidrofone estão a sua baixa densidade em comparação a outros fluoropolímeros, boa resistência mecânica em comparação a outros fluoropolímeros, alta temperatura de operação permanente (140°C), praticamente sem absorção de umidade, boa estabilidade dimensional, alta resistência química, boa resistência à hidrólise, resistência UV, resistência à radiação, bom isolamento elétrico e alta resistência à abrasão (VALENTE, 2006).

A fixação do elemento sensor ao corpo do hidrofone tipo agulha na construção do transdutor foi feita utilizando a cola condutiva epoxy CW2400 apresentada na Figura 17. Usada em protótipo, reparo e ligação condutiva, apresenta fortes ligações mecânicas e excelente condutividade. Para polímeros as técnicas de soldagem aplicadas para material cerâmico não são utilizáveis, por se tratarem de filmes plásticos, a condução de calor durante este processo fatalmente danificaria as estruturas químicas e físicas do polímero, portanto foi utilizada uma técnica de acoplamento elétrico, empregando resina a base de prata.

A mistura foi feita em quantidades iguais (1:1) por peso ou volume das partes A e B do epoxy e misturadas por 2 minutos, a aplicação deve ser realizada dentro de 8 minutos, após 8 minutos a mistura deve ser descartada. Para obter melhores resultados de condutividade, a superfície utilizada para a mistura foi limpa, garantindo a remoção de qualquer contaminação da superfície que podia impedir o contato adequado com o filme PVDF.

Seus tempos de cura e elétrica condutividade depende principalmente da temperatura. Para tempos de cura mais rápidos, máxima condutividade e adesão, a cura pode ser realizada entre 65-121 °C entre 5 e 10 minutos. Cura a temperaturas abaixo 25 °C resulta em perda de condutividade e adesão. Neste caso o epóxi foi curado em ambiente climatizado em temperatura acima de 25 °C por 4 horas e sua máxima condutividade e resistência de união foram alcançadas em 24 horas.

A etapa da adesão do elemento piezoelétrico ao fio condutor pela cola condutiva epoxy e sua passagem pela agulha foram realizadas diversas vezes por se tratar de uma etapa de construção extremamente manual e complexa devido ao diâmetro de contato do fio condutor ter menos de um milímetro. Além disso para a construção do hidrofone foi utilizada uma agulha destinada para uso veterinário, não apresentando

superfície extremamente lisa para a passagem do fio. A fricção e força empregados na passagem muitas vezes descolou o elemento sensor. Neste caso, todas as etapas anteriores precisaram ser repetidas.



Figura 17 – Cola epoxy.

Fonte: Autoria própria.

### 3.4 CIRCUITO DO AMPLIFICADOR DE INSTRUMENTAÇÃO

Existem fabricantes que produzem circuitos integrados de um amplificador de instrumentação, cada qual com sua finalidade específica, sendo assim a primeira etapa do estudo foi feita uma análise dos principais modelos de amplificadores de instrumentação disponíveis no mercado, entretanto para as altas frequências empregas no estudo de ultrassom estes circuitos não podem ser utilizados. A configuração utilizada para o projeto do amplificador de instrumentação é a clássica estrutura baseada em três amplificadores operacionais.

Após definir quais os pré requisitos são necessários para o sistema a ser projetado, é necessário levar em consideração que estes sinais apresentam em síntese baixas amplitudes e altas frequências, o que os deixam sujeitos a vários tipos de interferências relacionadas ao circuito implementado, como por exemplo, fonte de alimentação e o descasamento entre resistores. Para a escolha de qual topologia de amplificador de instrumentação utilizar, foi realizado um comparativo entre as arquiteturas de amplificadores de instrumentação existentes. A arquitetura que apresentou o melhor

compromisso com os requisitos apresentados foi a escolhida para ser implementada neste projeto.

Após comparativo optou-se por se utilizar a topologia de um amplificador de instrumentação formado por três amplificadores operacionais apresentado na Figura 5, uma vez que essa apresenta uma arquitetura mais simples que as demais e um ganho com fácil manipulação. A equação para o cálculo de ganho desta topologia para o circuito do amplificador de instrumentação é a mesma que para o amplificador diferencial e é dado pela Equação (3.1).

$$G = \left(1 + 2 \times \frac{R_1}{R_g}\right) \times \left(\frac{R_3}{R_2}\right) \quad (3.1)$$

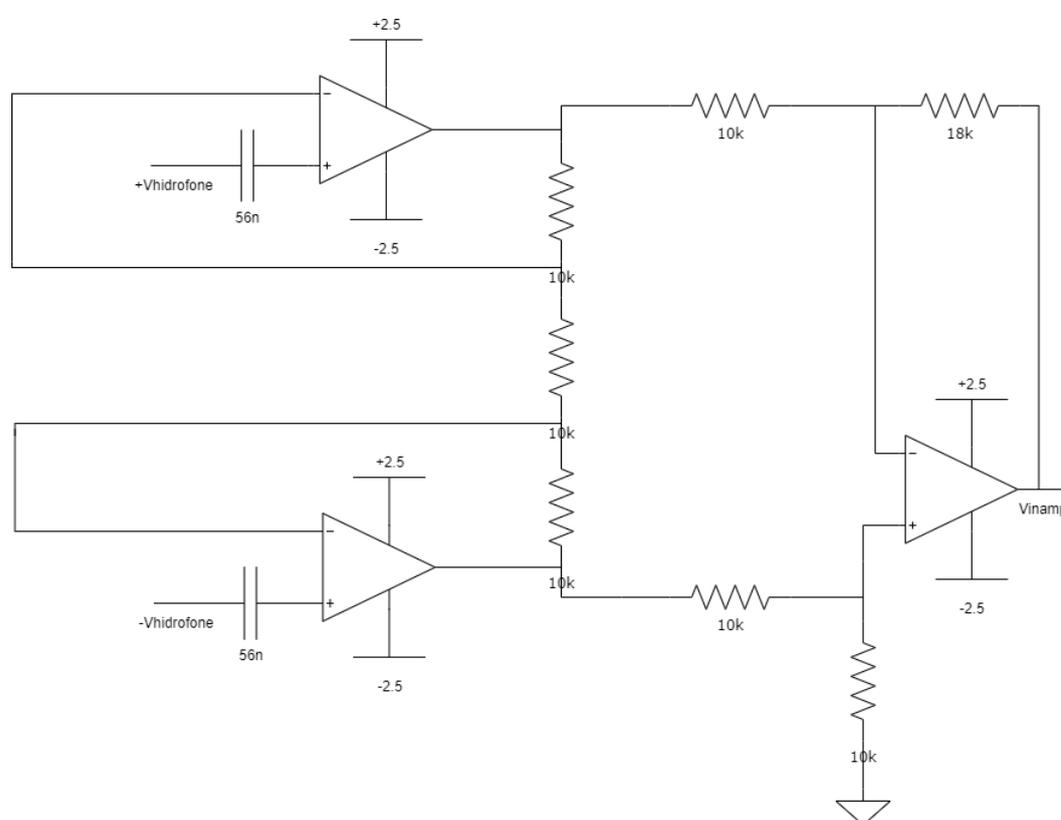


Figura 18 – Circuito do amplificador de instrumentação.

Fonte: Autoria própria.

O amplificador operacional OPA365AID, encapsulamento SMD do tipo SOIC-8, foi escolhido por apresentar alto desempenho, ser otimizado para uma baixa tensão de alimentação e operação de alta frequência (produto ganho-banda de 50 MHz) tornando esse dispositivo ideal para aplicações como as que incluem condicionamento de sinal e amplificação do sensor. A família OPA365 de amplificadores operacionais também são

adequados para amplificadores de potência. Recursos especiais incluem uma excelente relação de rejeição em modo comum (CMRR), sem distorção de estágio de entrada e alta impedância de entrada.

A escolha portanto dos resistores do amplificador de instrumentação baseou-se nos amplificadores de instrumentação de circuitos integrados. O ajuste dos valores dos componentes foi realizado por meio de simulação, isso porque apesar de ser um componente de fácil uso e que apresenta bom desempenho, o amplificador operacional OPA365AID possui algumas limitações, uma delas, a qual teve influência direta para projetar os circuitos de instrumentação, é a relação ganho versus frequência. Devido a esse fator, em alguns testes com certos valores de frequência, as medições acabavam se distorcendo. Assim, o circuito teve que ser reprojeto até que os parâmetros de ganho definidos no projeto fossem alcançados.

Portanto, foram definidos valores para os componentes do amplificador de instrumentação baseando-se nos valores dos componentes internos dos amplificadores de instrumentação existentes utilizados em aplicações de ultrassom. Em seguida foram feitas simulações para verificar se o sistema implementado estava se comportando como esperado. Até o valor do ganho que foi definido em aproximadamente 8 vezes não fosse alcançado, seria realizado um novo ajuste nos valores dos resistores. O resultado da simulação pode ser observado no Capítulo a seguir.

### 3.5 CIRCUITO DO FILTRO PASSA-FAIXA

O projeto do filtro passa-faixa foi realizado após estipular os valores de ganho e frequência de corte desejados e então determinar os valores dos componentes de acordo com a teoria encontrada nos livros utilizados pelas matérias de eletrônica durante a graduação. A frequência de corte mínima utilizada para o projeto do filtro em cascata foi de 1 MHz e frequência de corte máxima de 10 MHz.

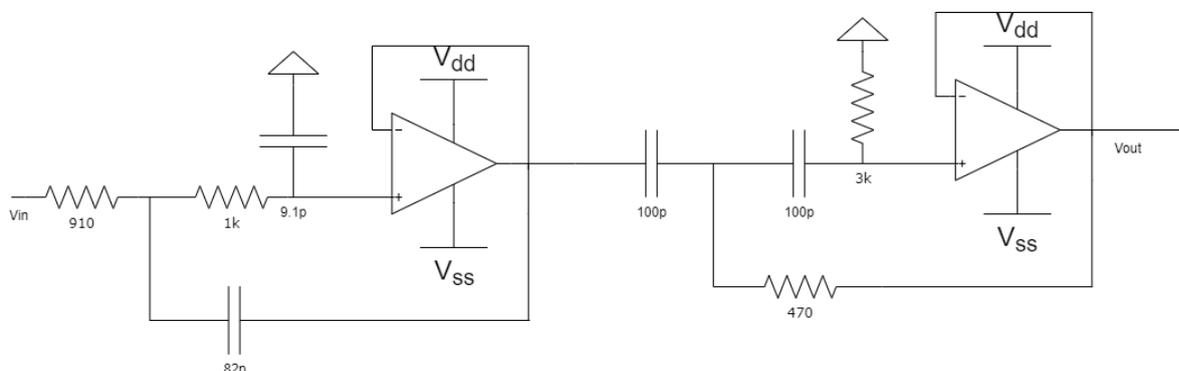


Figura 19 – Circuito do filtro passa-faixa.

Fonte: Autoria própria.

A Figura 19 apresenta o circuito projetado, com os valores dos respectivos resistores e capacitores do filtro passa-faixa, utilizado durante as simulações. A escolha da configuração do filtro passa-faixa por associação em cascata foi feita após a comparação dos resultados obtidos dos gráficos de resposta em frequência simulados dos projetos das duas configurações projetadas.

### 3.6 CIRCUITO DO AMPLIFICADOR INVERSOR

O amplificador inversor é um amplificador de ganho constante, a sua saída é obtida pela multiplicação do valor de entrada por um ganho constante, que neste caso foi de 10 vezes, fixado pelo valor do resistor de entrada e o resistor de realimentação. Essa tensão de saída amplificada é defasada em  $180^\circ$  à de entrada como mencionado anteriormente.

A Figura 20 apresenta o circuito projetado, com os valores do resistor de entrada e resistor de realimentação do amplificador inversor, utilizado durante as simulações e testes em bancada. Após o ganho para o projeto definido calculou-se os valores dos resistores  $R_1$  e  $R_f$  através da relação -  $R_f$  dividido por  $R_1$  que deve ser igual ao ganho.

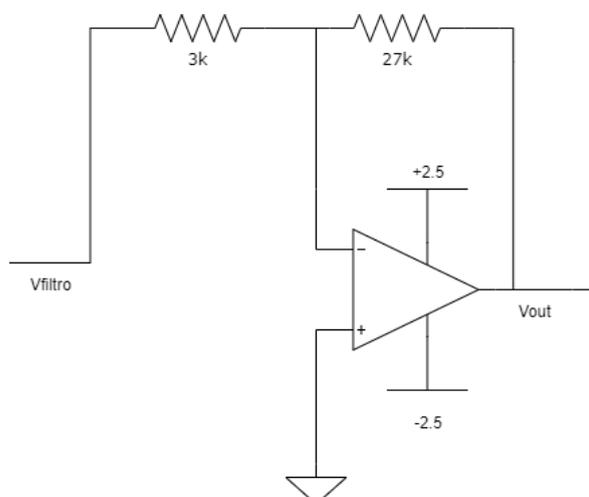


Figura 20 – Circuito do amplificador de potência.

Fonte: Autoria própria.

### 3.7 SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

Um osciloscópio digital foi utilizado como sistema de aquisição dos dados por ser um instrumento de teste para visualização dos sinais elétricos em função do tempo, permitindo a obtenção de diversas informações, da onda analisada com precisão. Uma ampla faixa de osciloscópios é disponível e a escolha do osciloscópio é muito importante quando se trata de sinais de alta frequência e, para que isso aconteça, devem possuir

algumas características específicas, como por exemplo, banda de frequência larga, boa resolução e capacidade de armazenar digitalmente o sinal.

### 3.8 CONFECÇÃO DAS PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO

Após a realização dos projetos para o circuito de instrumentação, para ser implementado na bancada foi confeccionada uma placa de circuito impresso mostrada nas Figuras 21 e 22, contendo o circuito do amplificador de instrumentação e do filtro passa faixa. Todas as placas foram confeccionadas de face simples. Para projetar o esquemático e fazer o layout da placa foi utilizado o software Eagle.

Para a confecção de placas de circuito impresso, é preciso passar por duas etapas. A primeira consiste basicamente em projetar o esquemático de cada circuito e a segunda, em projetar a placa de circuito impresso, estabelecendo suas características, como por exemplo, as dimensões da placa, quantidade de layers e tamanho das trilhas, além de rotear o circuito e planejar o layout da placa, determinando a posição de cada componente.

Uma simples trilha facilmente dimensionada nos primeiros integrados que operavam em frequências baixas, torna-se, em frequências elevadas, uma descontinuidade de impedância capaz de introduzir reflexões, perdas, retardos e irradiação. Portanto, tornou-se muito importante o estudo de um conjunto de técnicas que possibilitem a utilização de trilhas e componentes em altas frequências para que a resposta mantenha sua integridade.

Atualmente, placas de circuitos impressos (PCIs) são amplamente empregados em todos os tipos de equipamentos eletrônicos, principalmente quando se empregam em sua construção circuitos integrados. O material inicialmente usado para a fabricação de placas de circuito impresso foi uma chapa conhecida como fenolite. O principal problema das chapas de fenolite para aplicações em frequências muito elevadas decorre de problemas de polarização dielétrica.

Como alternativa existem chapas para circuito impresso onde o material isolante utilizado é o politetrafluoroetileno (PTFE) ou então, uma opção mais acessível como as chapas para circuito impresso de fibra de vidro (FR-4). Quanto ao material condutor das PCIs, é empregado o cobre. A escolha deste metal se deve à sua excelente condutividade elétrica, somente superada pela prata, além de suas características mecânicas que permitem a produção de folhas de pequena espessura.

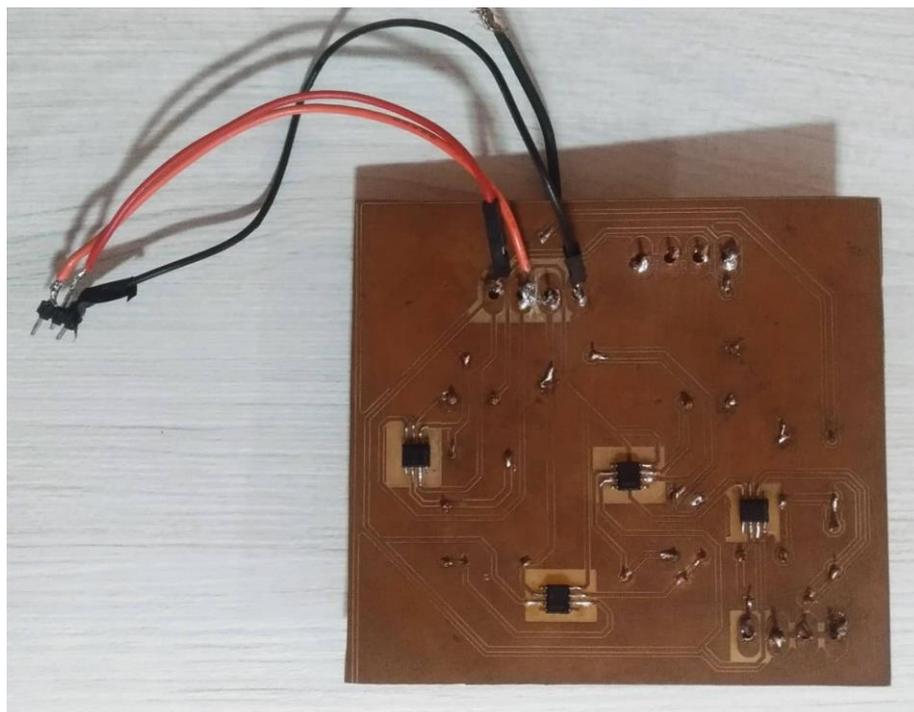


Figura 21 – Placa de fenolite confeccionada para realização de testes em bancada.

Fonte: Autoria própria.

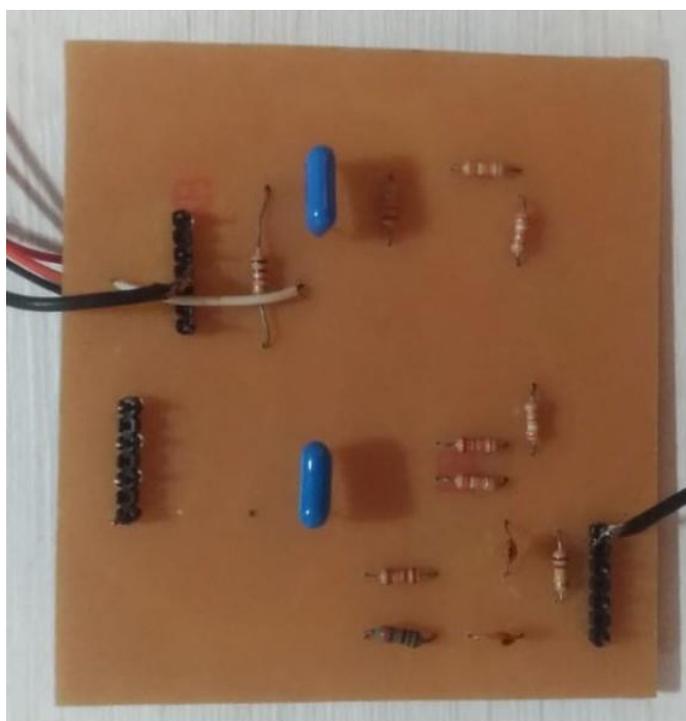


Figura 22 – Placa de fenolite confeccionada para realização de testes em bancada.

Fonte: Autoria própria.

Durante os ensaios verificou-se a necessidade de uma montagem em pelo menos duas camadas, sendo uma delas o terra. Entretanto as placas de circuito impresso de múltiplas camadas se tornam cada vez mais complexas, já que é necessário um maior número de linhas e vias para interligar um número grande de componentes, surgem então outros problemas que prejudicam a integridade do sinal. As descontinuidades de impedância nas conexões entre linhas, capacitores e soldas provocam reflexões que atenuam o sinal transmitido. As impedâncias características dos componentes eletrônicos e das cargas de terminações devem estar casadas com as linhas para evitar reflexões. A proximidade entre as linhas e vias causam interferência. Entre as trilhas existe uma distância mínima necessária para evitar interferência, essa distância é calculada a partir da corrente do sinal que se propaga na via e o campo magnético gerado por esta corrente, de acordo com as dimensões físicas da via.

Como os componentes eletrônicos se tornam cada vez menores com o aumento da frequência de operação, uma possível solução seria a utilização de apenas componentes SMD. Como solução, a substituição da topologia empregada poderia ser outro caminho a ser adotado caso os problemas com as placas de circuito impresso não fossem corrigidos com as soluções apresentadas anteriormente, já que existem diversas topologias para os circuitos de instrumentação projetados. Por fim, uma fonte projetada especialmente para os ensaios com o hidrofone do tipo agulha seria uma solução para a diminuição dos ruídos encontrados durante os testes.

Os resultados obtidos utilizando as placas confeccionadas dos circuitos de instrumentação, como por exemplo, as mostradas nas Figuras 21 e 22 não apresentaram as respostas esperadas. Devido a situação em que nos encontramos mundialmente de pandemia, tornou-se inviável a construção de uma placa adequada para os circuitos de instrumentação, já que os componentes e a placa em múltiplas camadas teriam que ser encomendados para só então serem realizados os ensaios.

### 3.9 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo descreve, de forma resumida, o dispositivo utilizado para a geração dos pulsos ultrassônicos, o transdutor emissor das ondas ultrassônicas geradas e o reservatório utilizado nos ensaios com o hidrofone construído. Foram descritos também os principais conceitos envolvidos na construção de um hidrofone tipo agulha, os materiais necessários para a sua construção, as principais características do material utilizado como elemento sensor e da cola utilizada para fixar o elemento sensor a carcaça do transdutor. Foram apresentadas as topologias dos circuitos de instrumentação escolhidos, os valores dos seus componentes e sistema de aquisição utilizado. O último tópico abordado foi a respeito da confecção das placas de circuito

impresso dos circuitos de instrumentação projetados e possíveis soluções para os problemas práticos encontrados durante os ensaios.

## 4 RESULTADOS

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos durante as etapas de projeto e construção do hidrofone tipo agulha, sua calibração e, projeto e simulação dos circuitos de instrumentação do hidrofone tipo agulha. Os testes com o hidrofone foram realizados para garantir o funcionamento correto do sistema de aquisição, do pulsador e do transdutor construído. Por fim, é demonstrado por meio de simulações que os projetos para os circuitos de instrumentação estão corretos, apesar de não confeccionados por problemas técnicos. As simulações para cada um dos circuitos de instrumentação projetados foram realizadas separadamente.

### 4.1 HIDROFONE TIPO AGULHA

Após a construção do hidrofone tipo agulha, foram realizados ensaios no sistema montado no Laboratório de Compatibilidade Eletromagnética, POLITEC-UTFPR/PR. O transdutor emissor utilizado e o hidrofone foram posicionados na bancada de testes, montada para esse trabalho, imersos em água no tanque de ensaios acústicos foram ligados a um conjunto de equipamentos, com exceção do circuito de instrumentação. Ambos dispositivos foram baixados no interior do reservatório contendo água como meio de propagação para o ultrassom em quantidade suficiente para cobri-los durante as medições. Tanto o transdutor comercial como o hidrofone construído foram posicionados visualmente e alinhados em seus eixos de emissão ultrassônica como mostra a Figura 23.



Figura 23 – Bancada de testes.

Fonte: Autoria própria.

Durante a execução do teste de recepção com o hidrofone, portanto, o transdutor emissor permanece numa posição fixa no reservatório, enquanto o hidrofone é cuidadosamente movimentado manualmente no sistema ao longo do eixo longitudinal de propagação com o auxílio de um papelão fixado ao hidrofone utilizado para facilitar a movimentação. Faz-se o deslocamento longitudinal do hidrofone em relação ao transdutor e observa-se o sinal no osciloscópio. Foram realizadas varreduras do campo acústico em vários planos para se avaliar o comportamento do feixe ultrassônico emitido pelo transdutor emissor, procurando-se o ponto que apresentou o pico máximo do sinal.

O sinal gerado pelo pulsador ultrassônico excita o transdutor e produz uma onda de pressão, que se propaga na água (meio com baixa perda de energia). O sinal emitido é captado pelo hidrofone tipo agulha e sua saída foi conectada a entrada do osciloscópio utilizado como sistema de aquisição. Uma foto da mesa de testes montada para a realização dos ensaios pode ser observada na Figura 24.

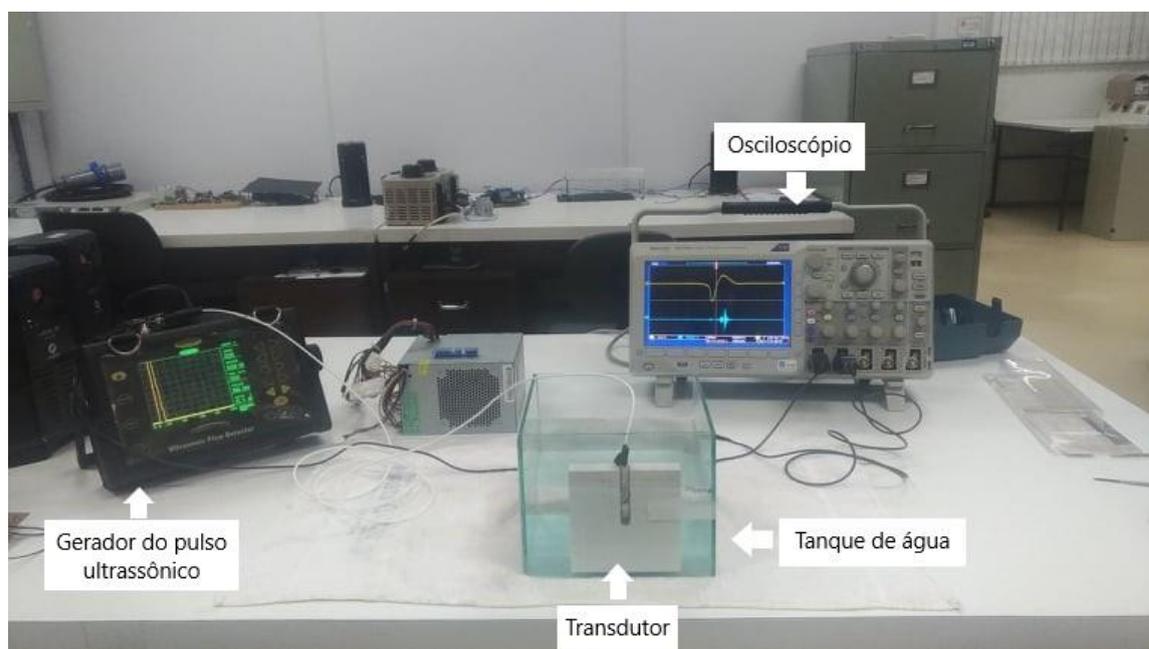


Figura 24 – Mesa de ensaio.

Fonte: Autoria própria.

A Figura 25 apresenta o sinal captado pelo hidrofone tipo agulha construído. O resultado gráfico obtido nos ensaios com o hidrofone são coerentes com a teoria. Este sinal foi adquirido com o posicionamento do hidrofone ao longo do eixo axial, na região de campo distante, a aproximadamente 150 mm da face do transdutor. O processamento desses sinais permite determinar a duração do pulso e seus espectros de frequências.

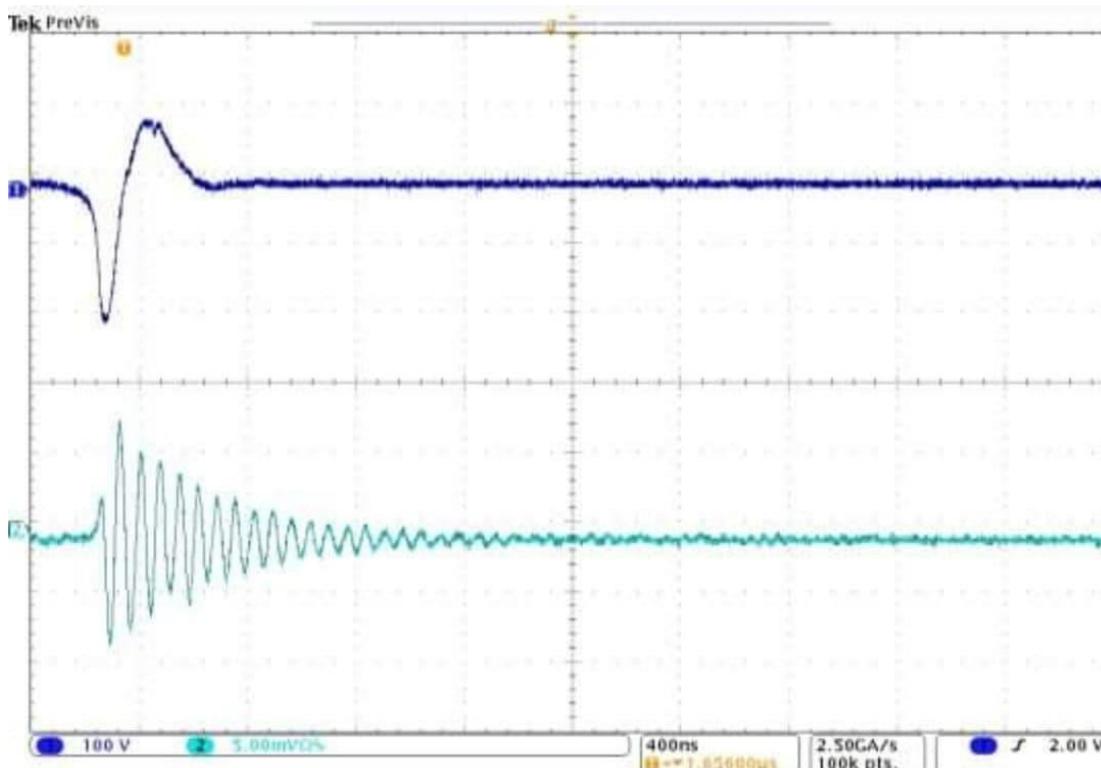


Figura 25 – (1) Pulso de tensão aplicado ao transdutor emissor. (2) Pulso acústico captado pelo hidrofone tipo agulha de PVDF construído.

Fonte: Autoria própria.

#### 4.1.1 CALIBRAÇÃO DO HIDROFONE TIPO AGULHA

A calibração de transdutores ultrassônicos é um assunto que vem despertando grande interesse por parte de diversos pesquisadores. Uma extensa revisão bibliográfica sobre esse assunto foi realizada para fundamentar a pesquisa científica na qual esta trabalho se enquadra. No entanto, como o hidrofone tipo agulha utilizado nos ensaios foi construído especialmente para esta aplicação neste trabalho, todas as suas características tornaram-se conhecidas, especialmente sua sensibilidade, portanto, não foi necessário realizar sua calibração.

#### 4.2 AMPLIFICADOR DE INSTRUMENTAÇÃO

A simulação do amplificador de instrumentação projetado foi realizada no software *TINA*, fornecido pela empresa *Texas Instruments*. O subcircuito referente ao amplificador de instrumentação simulado pode ser observado na Figura 26. Utilizou-se um sinal de sincronismo externo fornecido pelo gerador de funções, considerando as condições práticas de amplitude do sinal do hidrofone, foi aplicada uma onda senoidal

com frequência de 5 MHz e amplitude de 20 mVpp à entrada do circuito do amplificador de instrumentação.

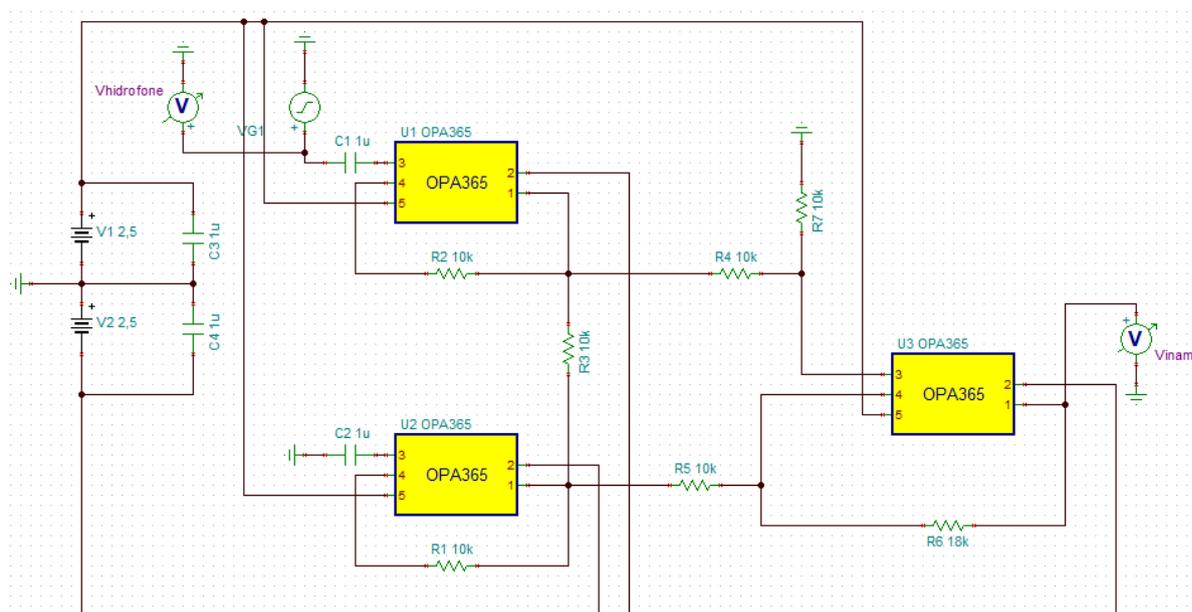


Figura 26 – Circuito do amplificador de instrumentação simulado.

Fonte: Autoria própria.

Na Figura 27 verifica-se o funcionamento adequado do amplificador de instrumentação projetado. A forma de onda aplicada na entrada no amplificador de instrumentação possui aproximadamente 20mVpp. A saída do amplificador possui aproximadamente 120mVpp, condizendo com o ganho calculado. O cálculo do ganho do amplificador de instrumentação projetado é dado pela Equação (4.1).

$$G = \left(1 + 2 \times \frac{10\text{k}\Omega}{10\text{k}\Omega}\right) \times \left(\frac{18\text{k}\Omega}{10\text{k}\Omega}\right) = 5,4 \quad (4.1)$$

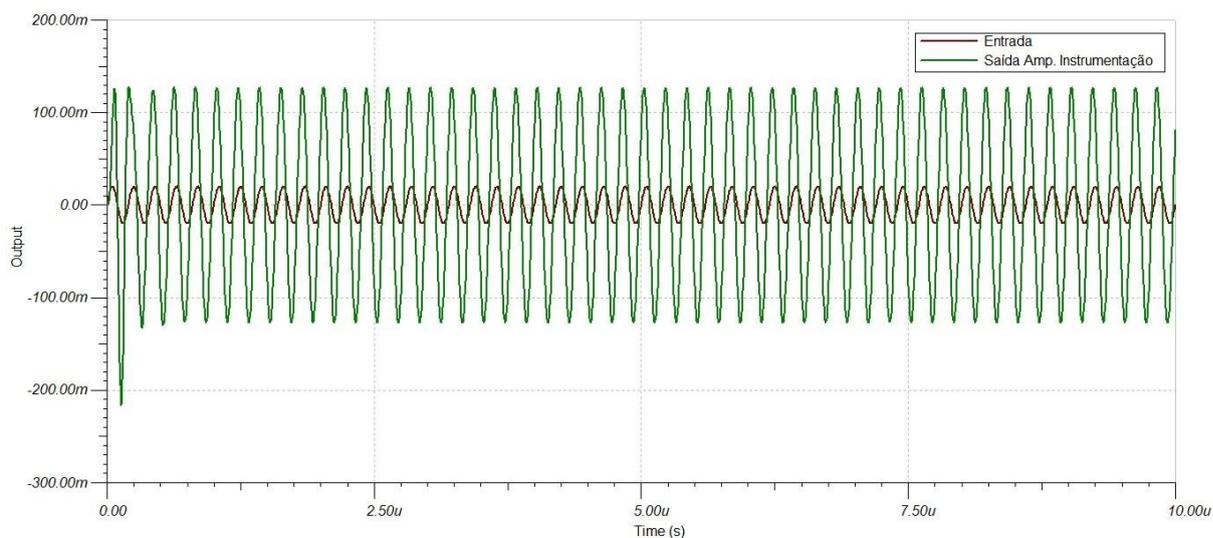


Figura 27 – Sinal de saída do amplificador de instrumentação.

Fonte: Autoria própria.

#### 4.3 FILTRO PASSA-FAIXA

A simulação do filtro passa-faixa projetado foi realizada no *software TINA*. O subcircuito referente ao filtro passa-faixa simulado pode ser observado na Figura 28. Esse filtro apresenta um ganho unitário em uma faixa de 1 MHz à 10 MHz.

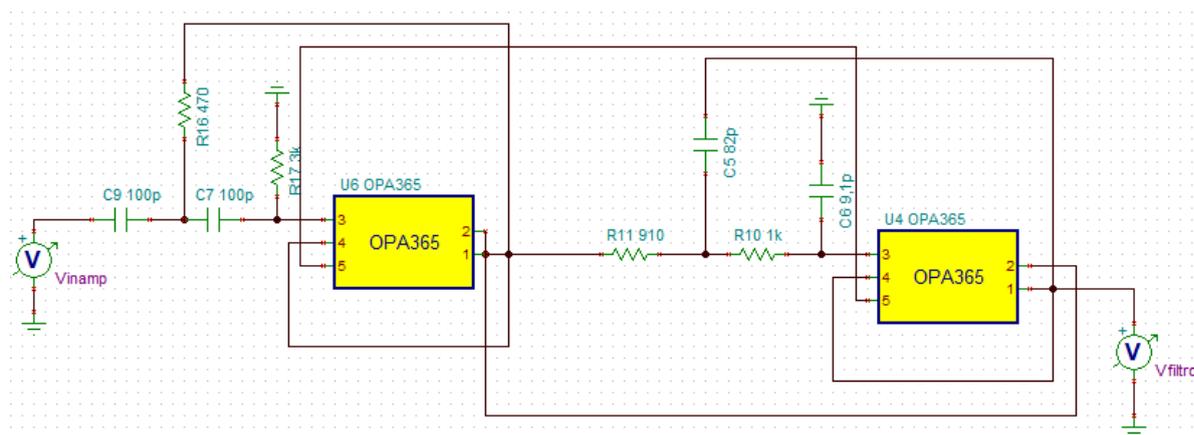


Figura 28 – Circuito do filtro passa-faixa simulado.

Fonte: Autoria própria.

A Figura 29 apresenta o gráfico de resposta em frequência do filtro passa-faixa, sua simulação foi realizada no *software TINA* e nele é possível observar que as frequências de corte 1 MHz e 10 MHz estão com atenuação em aproximadamente -3 dB. A fase não é importante para esta aplicação.

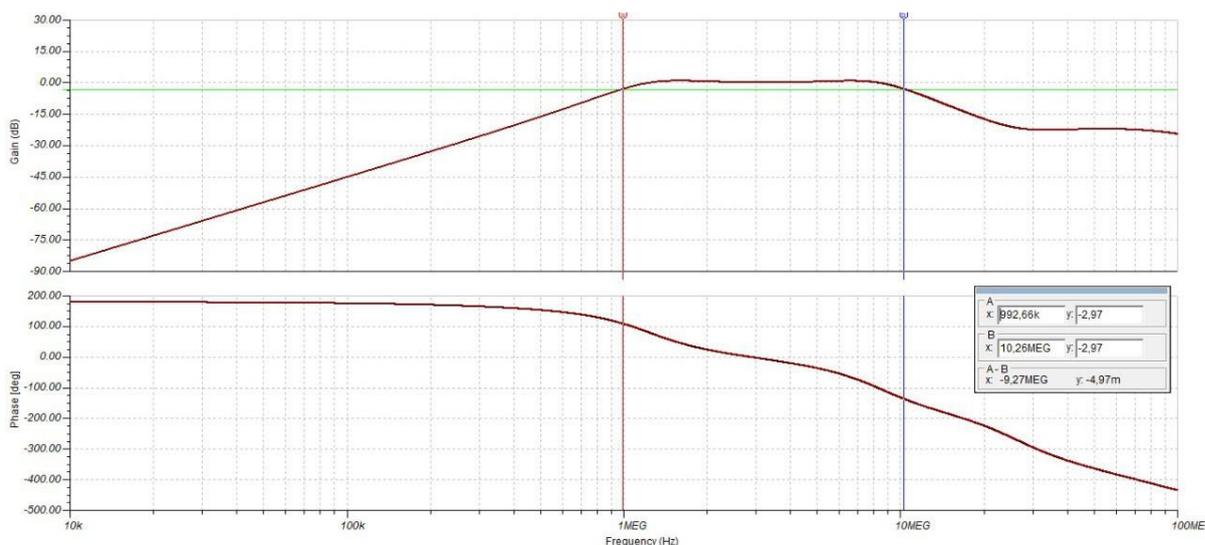


Figura 29 – Gráfico de resposta em frequência do filtro passa-faixa.

Fonte: Autoria própria.

A seguir serão apresentados os gráficos das simulações do filtro passa-faixa em frequências críticas de projeto. A Figura 30 apresenta o gráfico do comportamento do filtro passa-faixa uma década abaixo da frequência de corte de 1 MHz estabelecida, observa-se que o sinal foi completamente atenuado. A Figura 31 apresenta o gráfico do comportamento do filtro passa-faixa um pouco acima da frequência de corte de 10 MHz estabelecida, sendo possível observar que o sinal foi atenuado consideravelmente.

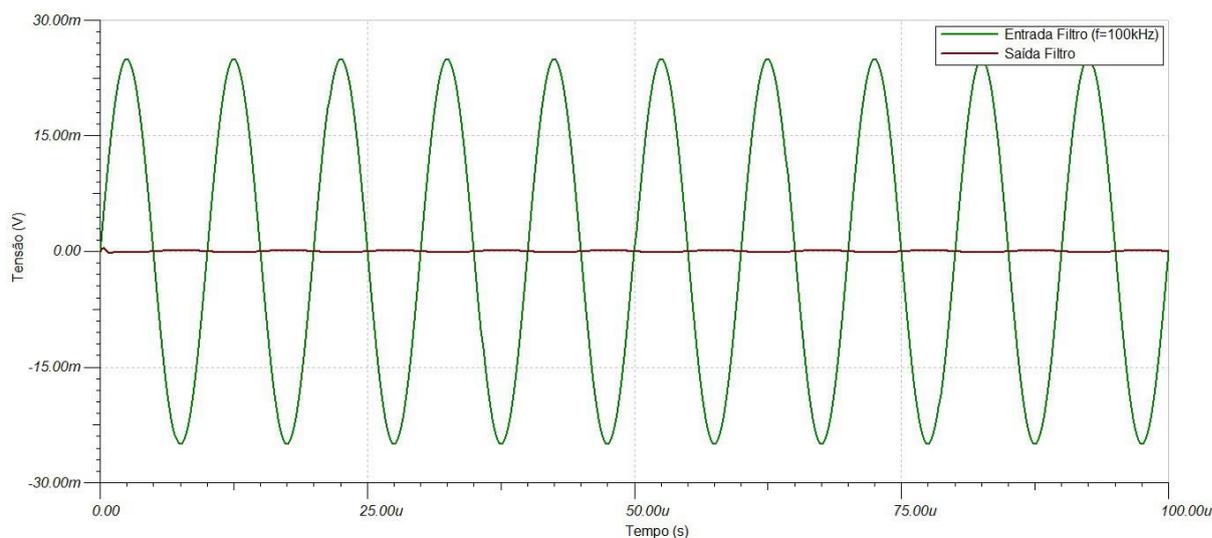


Figura 30 – Sinal de saída do filtro passa-faixa para frequência de 100 kHz.

Fonte: Autoria própria.

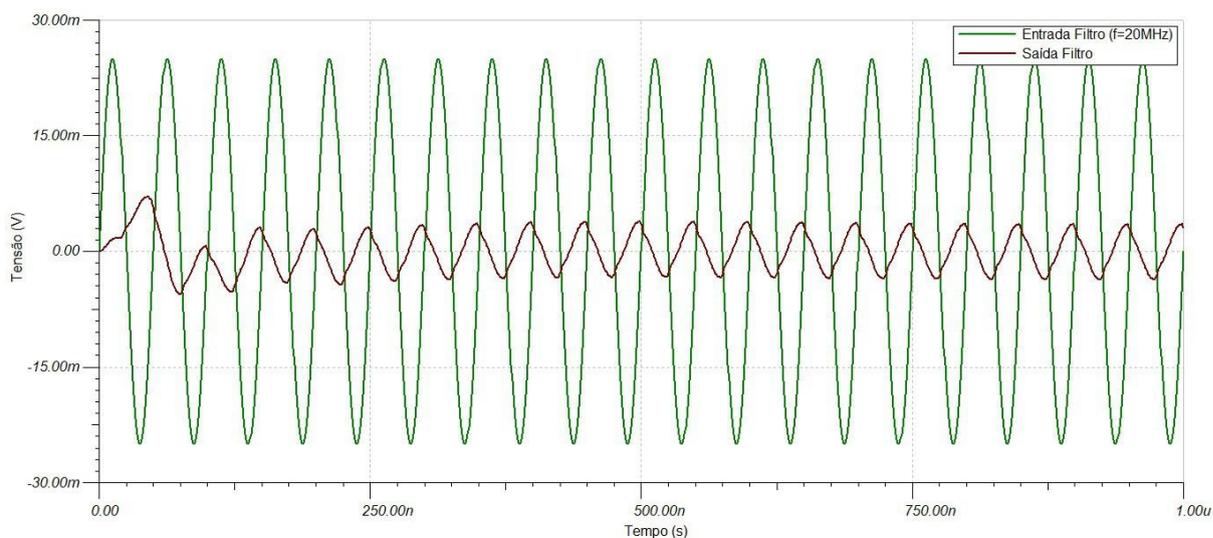


Figura 31 – Sinal de saída do filtro passa-faixa para frequência de 20 MHz.

Fonte: Autoria própria.

A Figura 32 apresenta o gráfico do comportamento do filtro passa-faixa exatamente na frequência de corte de 1 MHz e a Figura 33 apresenta o gráfico do comportamento do filtro passa-faixa exatamente na frequência de corte de 10 MHz.

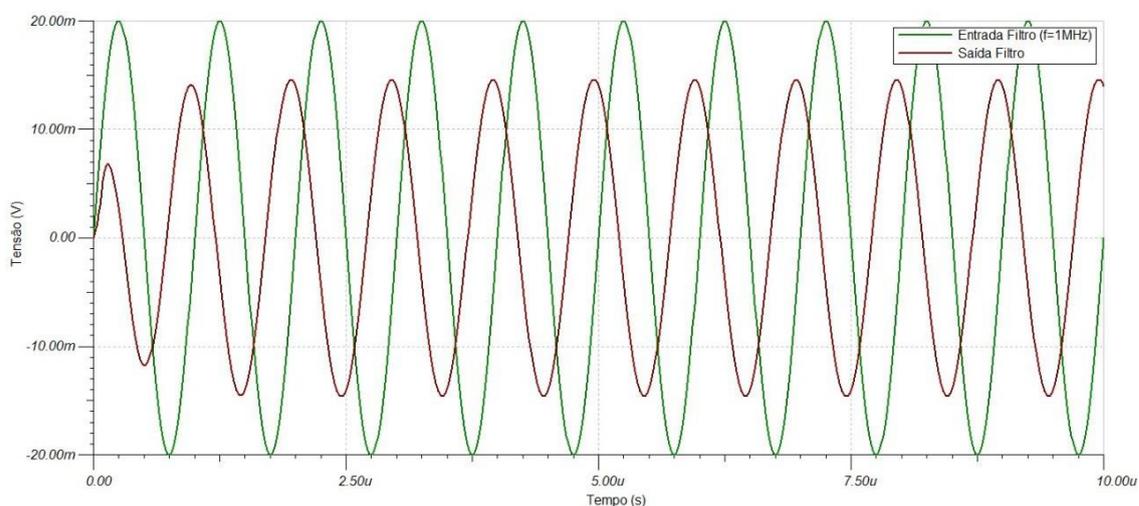


Figura 32 – Sinal de saída do filtro passa-faixa para frequência de corte de 1 MHz.

Fonte: Autoria própria.

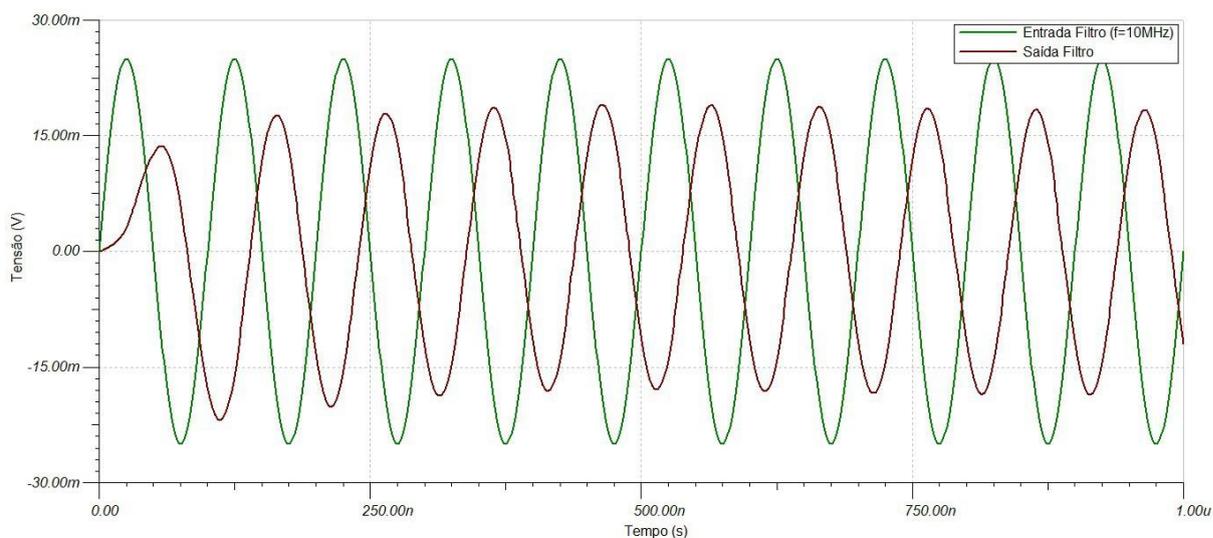


Figura 33 – Sinal de saída do filtro passa-faixa para frequência de corte de 10 MHz.

Fonte: Autoria própria.

Na Figura 34 onde a simulação é realizada na frequência central de 5 MHz verifica-se o funcionamento adequado do filtro passa-faixa projetado.

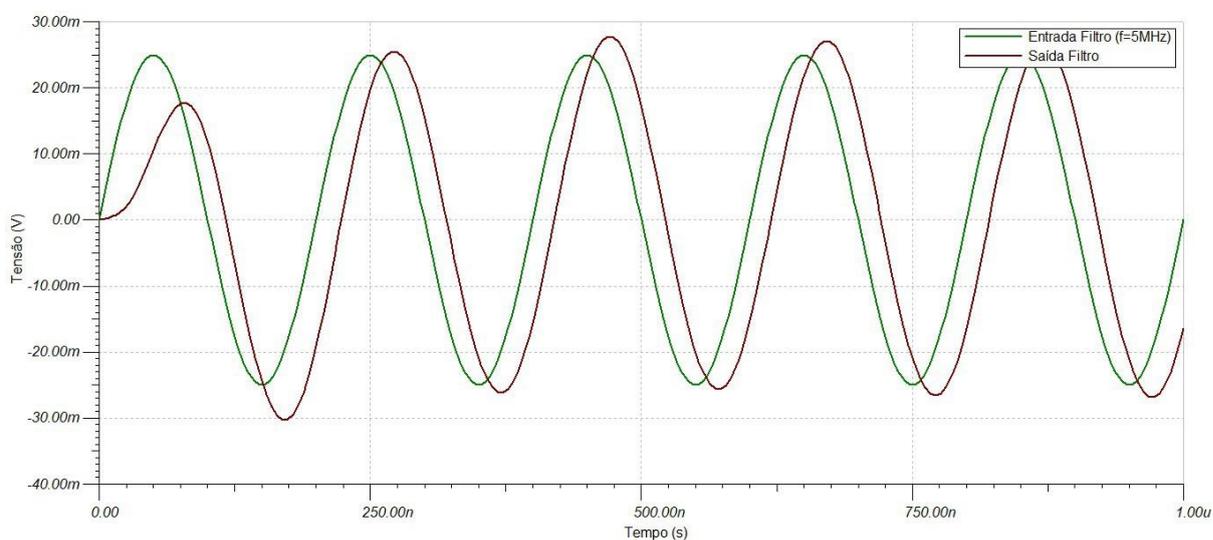


Figura 34 – Sinal de saída do filtro passa-faixa para frequência central de 5 MHz.

Fonte: Autoria própria.

#### 4.4 AMPLIFICADOR DE POTÊNCIA

A simulação do amplificador projetado foi realizada no *software TINA*, o subcircuito referente ao amplificador inversor simulado pode ser observado na Figura 35.

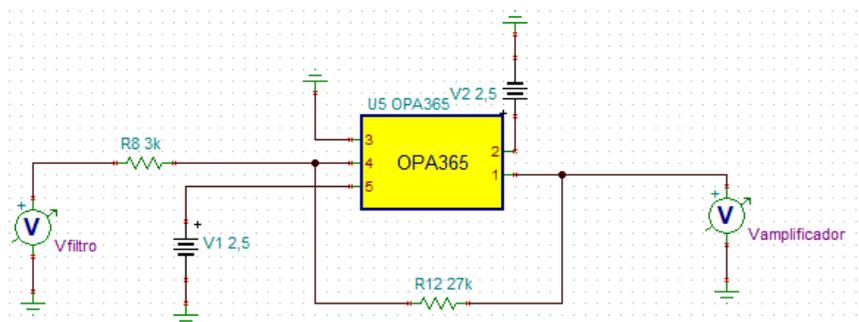


Figura 35 – Circuito do amplificador inversor simulado.

Fonte: Autoria própria.

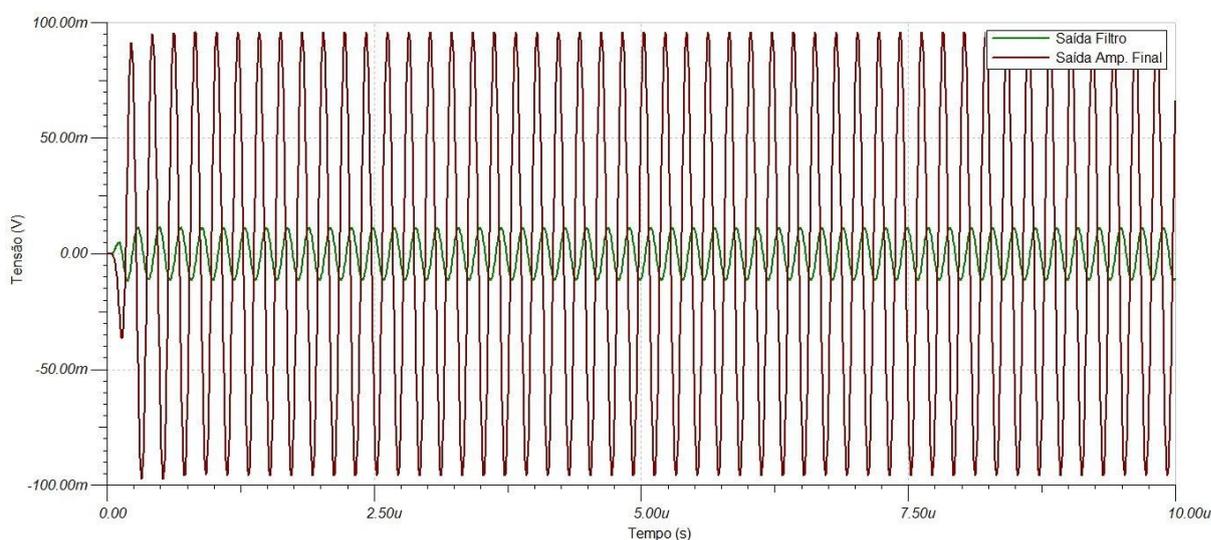


Figura 36 – Sinal de saída do amplificador e circuitos de instrumentação.

Fonte: Autoria própria.

Graficamente, na Figura 36, podemos conferir que conforme esperado o sinal de aproximadamente 10 mV de amplitude aplicado na entrada do amplificador sofreu o ganho projetado de 10 vezes. Obteve-se na saída do amplificador inversor um sinal com amplitude de aproximadamente 100 mV.

#### 4.5 ENSAIOS DO CIRCUITO SIMULADO COM A ENTRADA DO HIDROFONE

A simulação do circuito de instrumentação projetado foi realizada no *software TINA*, utilizou-se o sinal importado obtido durante os ensaios com o hidrofone tipo agulha apresentado na Figura 25 como entrada dos circuitos de instrumentação.

A Figura 37 apresenta o sinal do hidrofone tipo agulha amplificado pelo amplificador de instrumentação projetado.

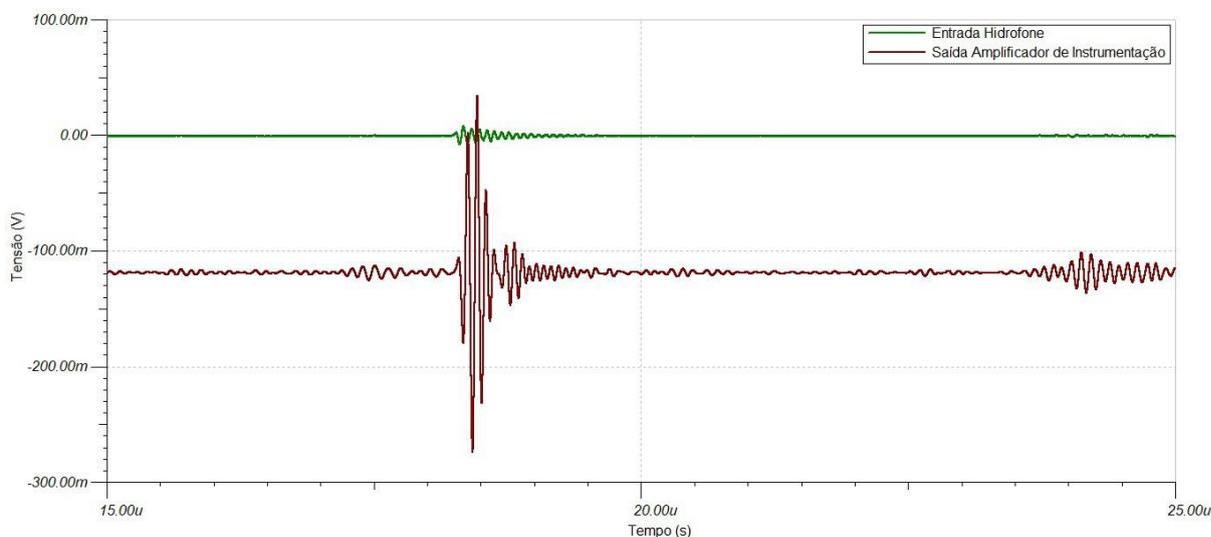


Figura 37 – Detalhe do sinal de saída do amplificador de instrumentação.

Fonte: Autoria própria.

A Figura 38 apresenta o gráfico do comportamento do filtro passa-faixa. A diminuição da amplitude do sinal é devido ao baixo valor de ganho do filtro.

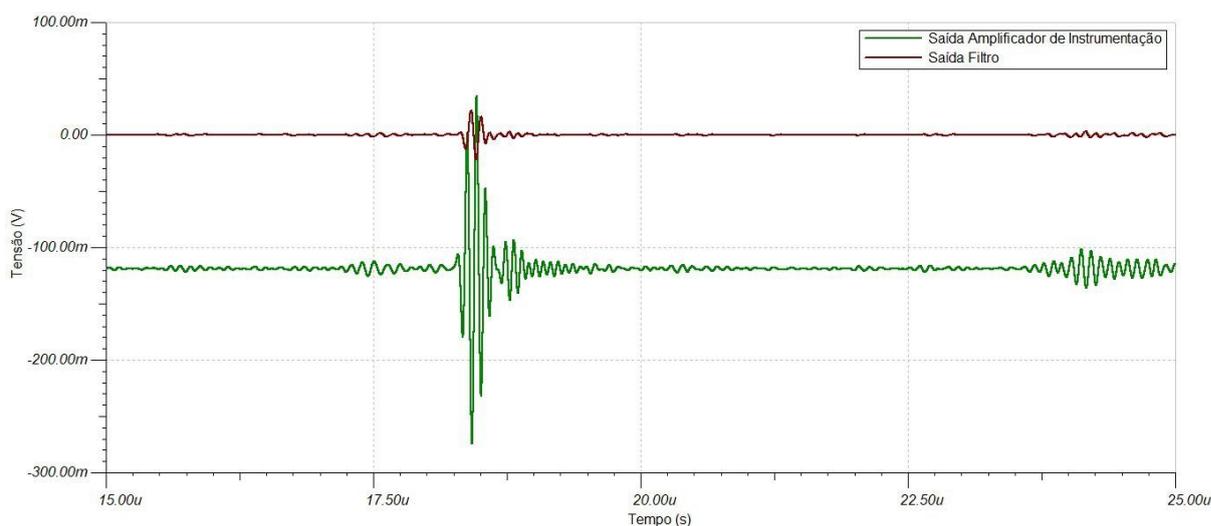


Figura 38 – Detalhe do sinal de saída do filtro passa-faixa.

Fonte: Autoria própria.

A Figura 39 apresenta o gráfico do comportamento do amplificador projetado.

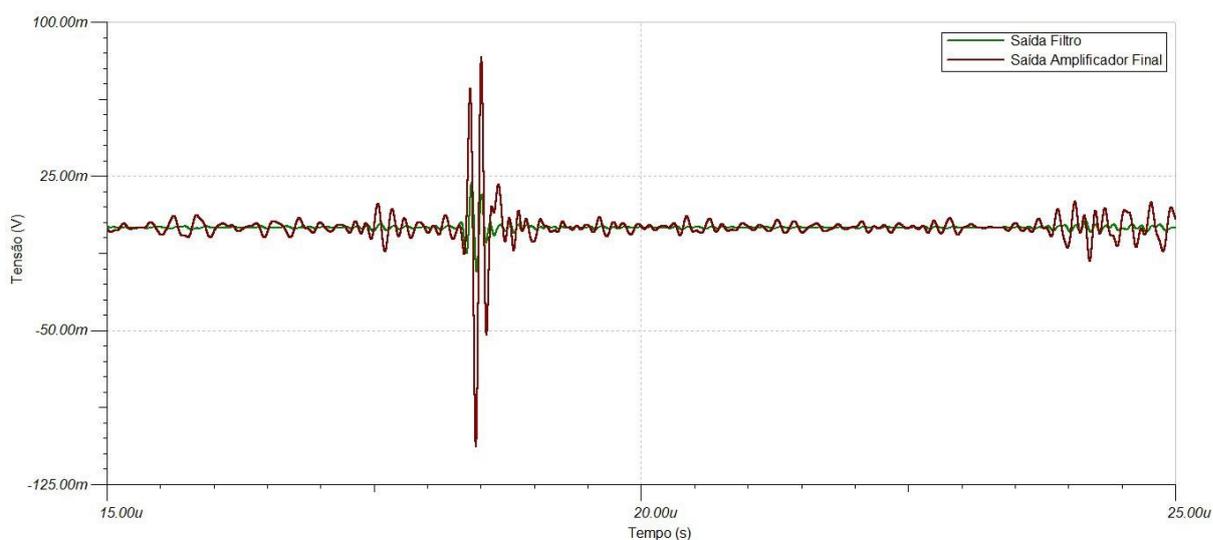


Figura 39 – Detalhe do sinal de saída do amplificador de potência.

Fonte: Autoria própria.

A Figura 40 apresenta o gráfico do comportamento do circuito de instrumentação completo em relação ao sinal de entrada do hidrofone tipo agulha.

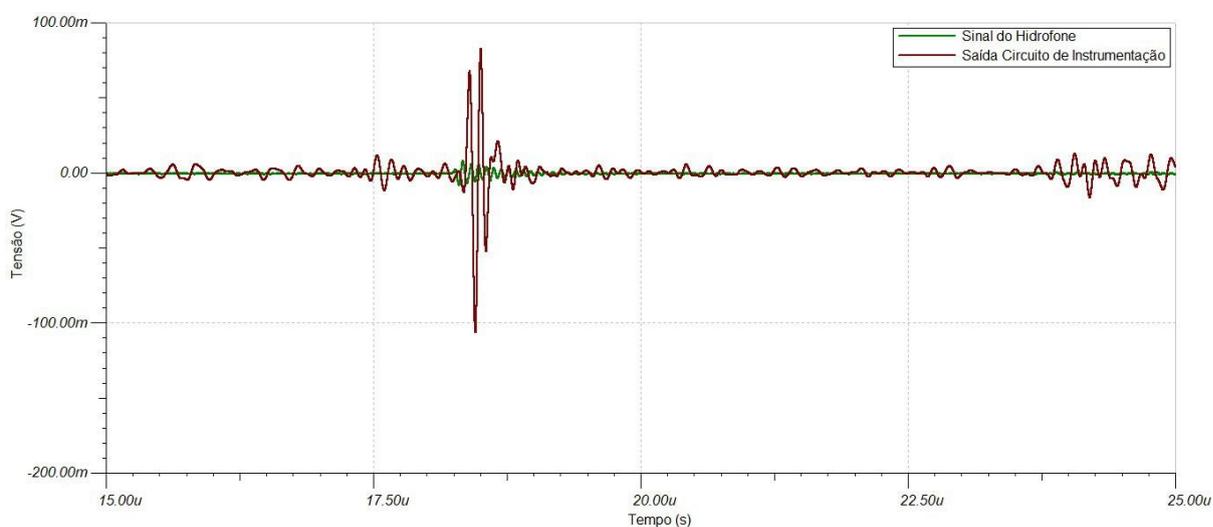


Figura 40 – Detalhe do sinal de saída do circuito de instrumentação completo.

Fonte: Autoria própria.

#### 4.6 ENSAIOS COM O HIDROFONE E CIRCUITOS DE INSTRUMENTAÇÃO

Após a construção das primeiras placas de circuito impresso dos circuitos de instrumentação projetados foram realizados ensaios no sistema montado no Laboratório, POLITEC-UTFPR/PR. O transdutor emissor utilizado e o hidrofone foram posicionados

na bancada de testes, assim como no procedimento realizado e descrito anteriormente para validação do transdutor construído, foram imersos em água no tanque de ensaios acústicos e ligados a um conjunto de equipamentos. Porém, nesse caso, o sinal de saída do hidrofone não foi conectado diretamente ao sistema de aquisição, passando portanto pelos circuitos de instrumentação para ter seu sinal só então captado pelo osciloscópio.

Os procedimentos para varreduras do campo acústico com o hidrofone foram os mesmos apresentados na Seção 4.1 para validação do hidrofone tipo agulha construído. O sinal gerado pelo pulsador ultrassônico excita o transdutor e produz uma onda de pressão, que se propaga na água (meio com baixa perda de energia). O sinal emitido é captado pelo hidrofone tipo agulha que tem sua saída conectada ao circuito do amplificador de instrumentação, seguido do filtro passa-faixa, e então a entrada do osciloscópio utilizado como sistema de aquisição.

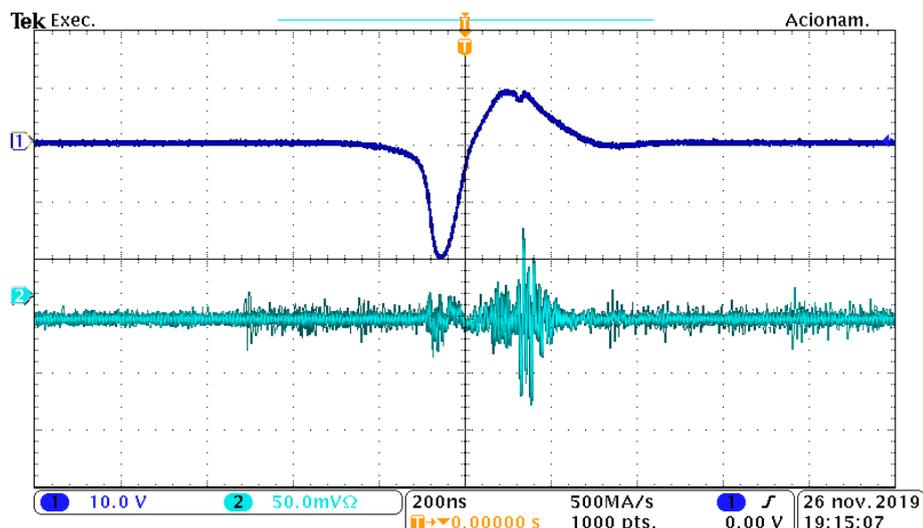


Figura 41 – (1) Pulso de tensão aplicado ao transdutor emissor. (2) Sinal de saída do hidrofone tipo agulha.

Fonte: Autoria própria.

A Figura 41 apresenta o sinal captado pelo hidrofone tipo agulha construído nesse ensaio. O resultado gráfico obtido nos ensaios com o hidrofone também é coerente com a teoria. Esse sinal foi adquirido com o posicionamento do hidrofone ao longo do eixo axial, na região de campo distante, a aproximadamente 150 mm da face do transdutor.

A relação sinal-ruído é a comparação do nível de um sinal (neste caso seria o do captado pelo hidrofone tipo agulha) com o nível de sinal do ruído presente. Este conceito chega a ser utilizado por várias áreas da engenharia, desde telecomunicações

até a parte musical. Na física, este valor é medido por uma equação onde a relação sinal-ruído é chamada de SNR (*signal-to-noise ratio*). A Equação (4.2) apresenta o cálculo aproximado de sinal-ruído para o sinal captado pelo hidrofone.

$$SNR = \frac{P_{sinal}}{P_{ruído}} = 3,2 \tag{4.2}$$

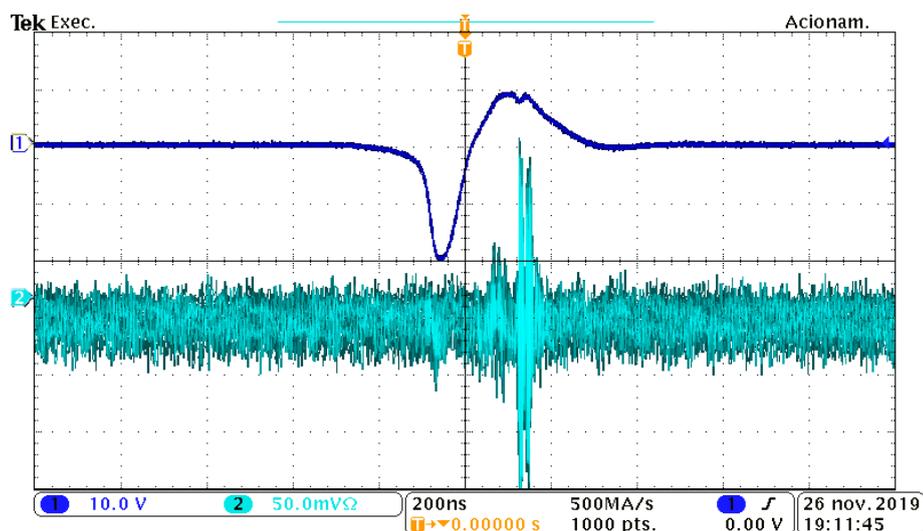


Figura 42 – (1) Pulso de tensão aplicado ao transdutor emissor. (2) Sinal de saída do amplificador de instrumentação.

Fonte: Autoria própria.

A Figura 42 apresenta o sinal captado pelo amplificador de instrumentação conectado à saída do hidrone tipo agulha; e a Figura 43 apresenta o sinal captado pelo filtro passa-faixa conectado a saída do amplificador de instrumentação, que por sua vez está conectado a saída do hidrofone tipo agulha.

A Equação (4.3) apresenta o cálculo aproximado de sinal-ruído para o sinal de saída do amplificador de instrumentação.

$$SNR = \frac{P_{sinal}}{P_{ruído}} = 3,6 \tag{4.3}$$

A Equação (4.4) apresenta o cálculo aproximado de sinal-ruído para o sinal de saída do filtro passa-faixa.

$$SNR = \frac{P_{sinal}}{P_{ruído}} = 7,7 \tag{4.4}$$

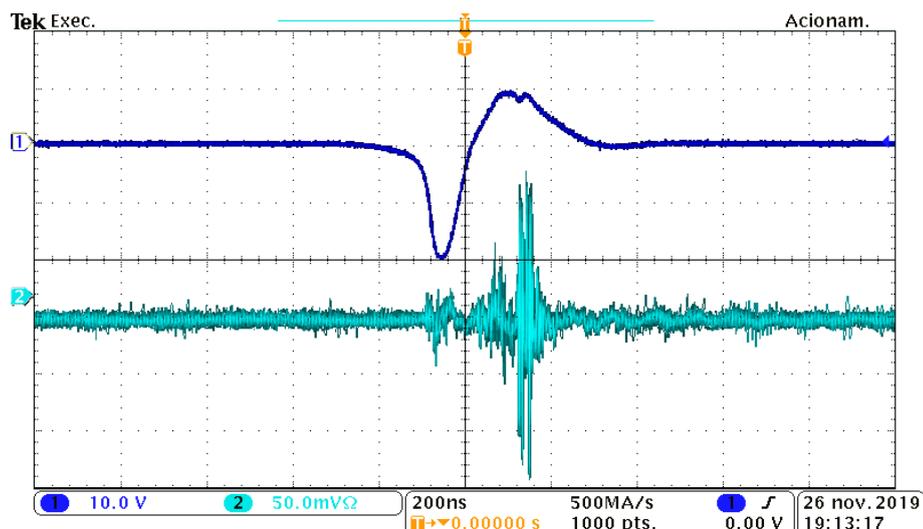


Figura 43 – (1) Pulso de tensão aplicado ao transdutor emissor. (2) Sinal de saída do filtro passa-faixa.

Fonte: Autoria própria.

O resultado gráfico obtido não foi coerente com a resposta esperada pelo circuito projetado. Portanto, tornou-se necessário o estudo de um conjunto de técnicas que possibilitassem a utilização de trilhas e componentes em altas frequências para que a resposta obtida durante os ensaios tivesse sua integridade mantida.

Uma solução encontrada na literatura para minimizar esses efeitos negativos seria a construção das placas de circuito impresso em múltiplas camadas. Entretanto, as placas de circuito impresso de múltiplas camadas se tornam cada vez mais complexas, já que é necessário um maior número de linhas e vias para interligar um número grande de componentes, surgindo então outros problemas que prejudicariam a integridade do sinal como apresentado na Seção 3.8.

Além disso, como os componentes eletrônicos se tornam cada vez menores com o aumento da frequência de operação, componentes SMD deveriam ser substituídos dos componentes convencionais utilizados na placa de testes. Além da substituição de materiais, seria recomendado também a substituição do material usado para a fabricação da placa de circuito impresso construída, isso porque foi utilizado uma chapa de fenolite que, para aplicações em frequências muito elevadas, pode apresentar problemas de polarização dielétrica. Como alternativa existem chapas para circuito impresso em que o material isolante utilizado é o politetrafluoroetileno (PTFE), porém, são placas muito caras e o custo do projeto já estava elevado devido a compra da cola epóxi (em torno de US\$ 120,00). Chapas de circuito impresso de fibra de vidro (FR-4) poderiam ser substituídas mais acessíveis para as chapas tradicionais de fenolite utilizadas.

Como mencionado anteriormente, outra solução seria a substituição da topologia empregada caso os problemas com as placas de circuito impresso não fossem corrigidos com as soluções apresentadas anteriormente, já que existem diversas topologias para os circuitos de instrumentação projetados. Por fim, uma fonte projetada especialmente para os ensaios com o hidrofone do tipo agulha seria uma solução para a diminuição dos ruídos encontrados durante os testes.

Devido a situação em que nos encontramos mundialmente de pandemia, tornou-se inviável a construção de uma placa adequada para os circuitos de instrumentação, já que os componentes e a placa em múltiplas camadas teriam que ser encomendados para só então serem realizados os ensaios.

#### 4.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo apresenta, os resultados obtidos durante as etapas de projeto, construção e ensaios com o hidrofone tipo agulha, a bancada de testes montadas para a realização dos ensaios e posicionamento dos equipamentos utilizados. O sinal captado do hidrofone construído foi coerente com a teoria. Foram apresentados também os resultados e discussões das simulações necessárias para a validação do circuito do amplificador de instrumentação, filtro passa-faixa e amplificador inversor projetado. Apesar da validação por meio de simulações computacionais dos circuitos de instrumentação, durante os ensaios com o hidrofone tipo agulha, os resultados gráficos obtidos e apresentados não foram coerentes com os resultados esperados, por isso, foram apresentadas as principais soluções encontradas nas bibliografias para manter a integridade dos sinais durante os ensaios. Porém, não foi possível realizar a construção das novas placas de circuito impresso, podendo ser corrigidas em trabalhos futuros.

## 5 CONCLUSÃO

Este trabalho foi desenvolvido com o objetivo de testar a tecnologia envolvida no processo de construção e instrumentação de um hidrofone tipo agulha de PVDF, de face circular plana com elemento ativo de 1 mm de diâmetro. Na construção do hidrofone, vários tópicos foram abordados, como por exemplo, técnicas de colagem e corte, limpeza e preparação das peças, manuseio de instrumentos e soldagem dos fios condutores. O desenvolvimento desse processo de construção constitui um significativo avanço e uma busca para aperfeiçoar constantemente o processo de fabricação de hidrofones. Ainda em relação a parte de construção, é preciso ressaltar as dificuldades técnicas encontradas durante a execução do trabalho. Os resultados gráficos obtidos nos ensaios com o hidrofone e apresentados no Capítulo 4 foram coerentes com a teoria.

Pode-se concluir que o objetivo traçado do presente trabalho foi parcialmente alcançado e considerações importantes foram apresentadas com o intuito de se melhorar alguns pontos, sendo a metodologia desenvolvida confiável na construção de hidrofones ultrassônicos.

No projeto dos circuitos de instrumentação, vários tópicos também foram abordados, como por exemplo, as topologias dos circuitos utilizada e escolha de seus componentes, incluindo o amplificador de instrumentação. A validação das suas funcionalidades foi apresentada e discutida por meio dos resultados gráficos obtidos quando aplicado na sua entrada um sinal de sincronismo externo fornecido por um gerador de funções que simulou o sinal captado pelo hidrofone durante os ensaios.

Porém, os circuitos de instrumentação do hidrofone tipo agulha confeccionados não apresentaram a resposta esperada nos ensaios com o hidrofone, apesar de terem a funcionalidade de seus projetos comprovada pelas simulações realizadas e apresentadas. Por isso, verificou-se a necessidade de um estudo para observar quais seriam os prováveis motivos e então soluções para os problemas encontrados.

Entre os possíveis problemas que prejudicaram a integridade do sinal encontrados estão as descontinuidades de impedância nas conexões entre linhas, capacitores e soldas que provocam reflexões que atenuam o sinal transmitido, as impedâncias características dos componentes eletrônicos e das cargas de terminações e a proximidade entre as linhas e vias que causam interferência. Além disso, para circuitos que trabalhem em alta frequência existem algumas regras que devem ser respeitadas, como por exemplo, definir uma distância mínima entre as trilhas do circuito para evitar interferência, sendo essa distância calculada a partir da corrente do sinal que se propaga

na via e o campo magnético gerado por essa corrente, de acordo com as dimensões físicas da via.

Uma provável solução seria a de uma montagem das placas de circuito impresso em múltiplas camadas. Entretanto, as placas de circuito impresso de múltiplas camadas se tornam cada vez mais complexas, já que é necessário um maior número de linhas e vias para interligar um número grande de componentes. Como os componentes eletrônicos se tornam cada vez menores com o aumento da frequência de operação, uma possível solução seria a utilização de apenas componentes SMD.

Como solução, a substituição da topologia empregada poderia ser outro caminho a ser adotado caso os problemas com as placas de circuito impresso não fossem corrigidos com as soluções apresentadas anteriormente, já que existem diversas topologias para os circuitos de instrumentação projetados. Por fim, uma fonte projetada especialmente para os ensaios com o hidrofone do tipo agulha seria uma solução para a diminuição dos ruídos encontrados durante os testes.

Porém, devido a situação em que nos encontramos mundialmente de pandemia, tornou-se inviável a construção de uma placa adequada para os circuitos de instrumentação, já que os componentes substitutos e a placa em múltiplas camadas teriam que ser encomendados para só então serem realizados os ensaios.

Como trabalhos futuros, pode-se fabricar os circuitos aqui projetados para a instrumentação do hidrofone tipo agulha, de modo a ser possível uma melhor caracterização do campo acústico mantendo a integridade do sinal captado utilizando o transdutor construído.

## REFERÊNCIAS

- AIUM/NEMA. Acoustic output measurement and labelling standard for diagnostic ultrasound equipment. American Institute of Ultrasound in Medicine, National Electrical Manufacturers Association, 1991.
- ALVES, C. H. F.; SNOOK, K. A.; ZHAO, J. Z. Projeto, fabricação e testes de transdutores de ultra-som de alta frequência (50 mhz) utilizando diferentes materiais piezoelétricos para aplicações em sistemas ubm. Congresso Brasileiro de Engenharia Biomédica, 2002.
- CARRIJO, G. N. d. A. *Mapeamento de Campo Acústico de Transdutores de Utra-som Utilizando Telas de Poliuretano*. Dissertação (Mestrado) — UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, São Carlos, Brasil, 2008.
- COULON, J. *A low power noise instrumentation amplifier for ecg recording applications*. Dissertação (Mestrado) — Texas A&M University, 2012.
- DUARTE, L. R. *Estimulação Ultra-Sônica do Calo Osseo*. Dissertação (Mestrado) — EESC/USP, Brasil, 1977.
- FABBRO, P. A. D. *PROJETO DE UM AMPLIFICADOR DE INSTRUMENTAÇÃO CMOS INTEGRADO*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual de Campinas, São Carlos, Brasil, 2002.
- FABBRO, P. A. D. Projeto de um amplificador de instrumentação cmos integrado. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, UNICAMP, Campinas, SP, 2002.
- FILHO, J. C. *Metologia Ultra-Sônica Para Caracterização de Escoamento Bi- Fásico*. Dissertação (Mestrado) — PPTec/CEFET/RJ, Brasil, 2004.
- GIACOMIN, J. F. *Amplificadores Operacionais*. [S.l.]: Universidade Federal de Lavras, 2018.
- GOEL AKSHAY, G. ovel high gain low noise cmos instrumentation amplifier for biomedical applications. nternational Conference on Machine Intelligence and Research Advancement on IEEE, 2013.
- HA, S. et al. Integrated circuits and electrode interfaces for noninvasive physiological monitoring. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, v. 61, n. 5, p. 1522–1537, 2014.
- HELLEPUTTE, N. V. et al. A 345  $\mu$ w multi-sensor biomedical soc with bio-impedance, 3-channel ecg, motion artifact reduction, and integrated dsp. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, v. 50, n. 1, p. 230–244, 2015.
- MAIA, J. M. *Sistema ultra-sônico para auxílio ao diagnóstico da osteoporose*. 158 p. Tese (Doutorado) — Universidade Estadual de Campinas, Brasil, 2001.
- MALVINO, A. P. *Eletrônica*. 4 ed. . [S.l.]: Makron Books, 1997.

MEDEIROS, L. J. *Hidrofone Ultrassônico com Piezoeletrito como Elemento Transdutor*. 109 p. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, Brasil, 2014.

MILLMAN, J. *Eletrônica: Dispositivos e Circuitos. Volume 2.* [S.l.]: McGraw-Hill do Brasil, 1981. 611–616 p.

NICACIO, H. *Simulação e Mapeamento de Campos Ultra-Sônicos para Caracterização de Transdutores Utilizando os Métodos Pontual e Angular*. Dissertação (Mestrado) — Faculdade de Engenharia e de Computação, Campinas, SP, Brasil, 2002.

NOKES, L. et al. *Introduction to medical electronics applications*. Butterworth-Heinemann, 1995.

OLIVEIRA, E. G. *CALIBRAÇÃO DA SENSIBILIDADE, EM MÓDULO E FASE, DE HIDROFONES ULTRASSÔNICOS NA FAIXA DE 1 A 7 MHz PELO MÉTODO DA RECIPROCIDADE*. 108 p. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil, 2014.

OPETRÓLEO. *Afinal, o que onshore e offshore?* [S.l.], 2017. Disponível em: <<https://www.opetroleo.com.br/afinal-o-que-onshore-e-offshore/>>.

PANCOTTO, C. *Desenvolvimento de um amplificador de baixo ruído para sinais provenientes de matrizes multi-eletrodos (meas)*. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, UNICAMP, Campinas, SP, 2017.

PERTENCE, A. J. *Amplificadores Operacionais. 5 ed.* [S.l.]: Makron Books, 1996.

PRIOR, C. A. et al. *Design of an integrated low power high cmrr instrumentation amplifier for biomedical applications*. *Analog Integrated Circuits and Signal Processing* 57, 2008.

SHARMA BUDDHI, R. *Design of cmos instrumentation amplifier with improved gain & cmrr for low power sensor applications*. 2nd International Conference on IEEE, 2016.

SILVA, G. *CONSTRUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE TRANSDUTOR FOCALIZADO PARA APLICAÇÃO EM TERAPIA ULTRASSÔNICA DE BAIXA INTENSIDADE*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil, 2011.

THAKOR, N. *The measurement, instrumentation and sensors handbook. The Biomedical Engineering Handbook*, CRC Press, Boca Raton, capítulo 74: Biopotentials and Electrophysiology Measurement., 1999.

VALENTE, G. d. O. *Construção e avaliação experimental de um hidrofone tipo agulha utilizando PVDF*. 111 p. Tese (Doutorado) — Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca – CEFET/RJ, Brasil, 2006.

WELLS, P. *Biomedical ultrasonics*. New York, USA, Academic Press Inc, 1977.

YAZICIOGLU, R. F.; HOOFF, C. V.; PUERS, R. *Biopotential readout circuits for portable acquisition systems*. Springer Science & Business Media, 2008.