

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”  
FACULDADE DE ENGENHARIA  
CÂMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

**GABRIELLE CEOLA CAMARGO**

**MEDIÇÃO DE MISTURAS DE GLICEROL E ÁGUA USANDO ESPECTROSCOPIA  
ULTRASSÔNICA**

**Ilha Solteira  
2024**

**GABRIELLE CEOLA CAMARGO**

**MEDIÇÃO DE MISTURAS DE GLICEROL E ÁGUA USANDO ESPECTROSCOPIA  
ULTRASSÔNICA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado  
à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira –  
Unesp como parte dos requisitos para  
obtenção do título de bacharel em  
Engenharia Elétrica.

Nome do orientador  
**Ricardo Tokio Higuti**

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

C173m Camargo, Gabrielle Ceola.  
Medição de misturas de glicerol e água usando espectroscopia ultrassônica /  
Gabrielle Ceola Camargo. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2024  
55 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Elétrica) -  
Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2024

Orientador: Ricardo Tokio Higuti

Inclui bibliografia

1. Ultrassom. 2. Espectroscopia. 3. Atenuação.

  
Amanda Sertori dos Santos  
Bibliotecária - CRB/8-9061  
Serviço Técnico de Referência, Atendimento ao  
Usuário e Documentação  
Diretoria Técnica de Bibliotecas e Documentação

## ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE GRADUAÇÃO

Aos cinco dias do mês de janeiro do ano de dois mil e vinte e quatro, a discente **Gabrielle Ceola Camargo**, matriculada sob o nº 171050452, tendo como banca examinadora o seu orientador, o Prof. Dr. Ricardo Tokio Higuti, o Prof. Dr. Rodrigo Cardim e o Dr. Júlio César Eduardo de Souza, apresentou o Trabalho de Graduação intitulado "**Medição de misturas de glicerol e água usando espectroscopia ultrassônica**", obtendo a nota 9,5 (nove e meio) e conceito **aprovada**.

Documento assinado digitalmente  
**gov.br** RICARDO TOKIO HIGUTI  
Data: 09/01/2024 09:44:44-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Prof. Dr. Ricardo Tokio Higuti  
- Orientador -

Documento assinado digitalmente  
**gov.br** GABRIELLE CEOLA CAMARGO  
Data: 09/01/2024 05:49:42-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Gabrielle Ceola Camargo  
- Discente -

Documento assinado digitalmente  
**gov.br** RODRIGO CARDIM  
Data: 05/01/2024 13:39:02-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Prof. Dr. Rodrigo Cardim  
- Membro da Banca -

Documento assinado digitalmente  
**gov.br** JULIO CESAR EDUARDO DE SOUZA  
Data: 05/01/2024 12:44:46-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Dr. Júlio César Eduardo de Souza  
- Membro da Banca -

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço e dedico este trabalho a Deus, por possibilitar a oportunidade e coragem de superar os desafios. Aos meus pais, Maria Cristina e Laércio, e meu irmão, Diego, que me apoiaram em todos os momentos, e me incentivaram a estudar; e aos meus amigos, colegas de turma e colegas do PET.

Agradeço à FAPESP, pelo apoio financeiro no período de iniciação científica durante a graduação (Processo FAPESP 2020/16099-0).

Por fim, agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Ricardo Tokio Higuti pela paciência; e agradeço ao meu colega de laboratório Dr. Julio Cesar Eduardo de Souza pela assistência e mentoria.

“A tarefa não é tanto ver aquilo que ninguém viu, mas pensar o que ninguém ainda pensou sobre aquilo que todo mundo vê”. Arthur Schopenhauer.

## RESUMO

A medição de propriedades de líquidos por ultrassom é amplamente empregada no controle de processos industriais, permitindo-se a medição de parâmetros acústicos como a velocidade de propagação e o coeficiente de atenuação em função da frequência e temperatura, beneficiando-se do caráter não-invasivo e não-destrutivo das técnicas de ultrassom. No trabalho apresentado, aplica-se a técnica chamada relativa ou de substituição para a medição dos parâmetros acústicos das amostras, sendo caracterizado pela medição de uma amostra de referência com propriedades já conhecidas para a comparação com a amostra do líquido de interesse. Um dos escopos propostos na metodologia é solucionar as limitações de banda de frequência do líquido de interesse que possui maior coeficiente de atenuação, e consequentemente menor amplitude em relação ao sinal do líquido de referência, por meio da aplicação de ganho no sinal, e principalmente uso de outras amostras de referências com maior coeficiente de atenuação, como por exemplo, o glicerol, que é vastamente utilizado em vários campos da indústria, devido ao seu potencial como biomolécula e baixo custo. O sistema de medição utilizado no desenvolvimento do projeto destaca-se pela facilidade de troca de amostras, higienização do sistema, pouca complexidade de manuseio, além do controle de temperatura com variações menores que  $0,01^{\circ}\text{C}$  de erro de regime permanente. Por conseguinte, os resultados foram obtidos através do programa de controle e aquisição de dados, junto à interface gráfica intuitiva ao usuário desenvolvida no ambiente do Matlab, gerando-se curvas de velocidade de propagação do som e coeficiente de atenuação em função da frequência para amostras compostas por misturas de água destilada e glicerol, e verificando-se o resultado aplicável e semelhante à água destilada, quando utilizadas como referência para medição de líquidos mais atenuantes, como óleos, visto que, as curvas de atenuação mostram-se sobrepostas, com distanciamento inferior a 2% para uma frequência de 50 MHz.

**Palavras-chave:** ultrassom; espectroscopia; atenuação.

## ABSTRACT

The measurement of liquid properties by ultrasound is widely used in the control of industrial processes, allowing the measurement of acoustic parameters such as propagation speed and attenuation coefficient as a function of frequency and temperature, benefiting from its non-invasive nature, and non-destructive ultrasound techniques. In this work, the relative or substitution technique is applied to measure the acoustic parameters of samples, characterized by the measurement of a reference sample with known properties for comparison with the liquid sample of interest. One of the scopes proposed in the methodology is to solve the frequency band limitations from the liquid of interest, which has a higher attenuation coefficient, and consequently lower amplitude in relation to the reference liquid signal, by the application of gain to the generated signal, and mainly the use of other reference samples with a higher attenuation coefficient, such as glycerol, which is widely used in various fields of industry, due to its potential as a biomolecule and low cost. The measurement system used in the development of the project stands out for its ease of exchanging samples, system cleaning, low handling complexity, in addition to temperature control with variations of less than  $0.01^{\circ}\text{C}$  of steady-state error. Therefore, the results were obtained through the control and data acquisition program, together with the intuitive graphical user interface developed in the Matlab environment, generating sound propagation velocity curves and attenuation coefficient as a function of frequency for samples of distilled water and glycerol mixtures, verifying that the result is applicable and similar to distilled water, when used as a reference for measuring more attenuating liquids, such as oils, since the attenuation curves appear to overlap, with a difference of less than 2% for a frequency of 50 MHz.

**Keywords:** ultrasound; spectroscopy; attenuation.

## LISTA DE FIGURAS

|                  |                                                                                                                               |    |
|------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figura 1</b>  | - Elemento de volume de fluido com a resultante do fluxo na direção x.....                                                    | 20 |
| <b>Figura 2</b>  | - Reflexão e Transmissão de uma onda plana incidente no plano entre dois meios diferentes.....                                | 23 |
| <b>Figura 3</b>  | - Vista superior explodida e representação tridimensional da célula de medição.....                                           | 26 |
| <b>Figura 4</b>  | - Vista em corte lateral da célula de medição.....                                                                            | 27 |
| <b>Figura 5</b>  | - Instrumentação utilizada para ultrassom e controle de temperatura.....                                                      | 32 |
| <b>Figura 6</b>  | - Foto do sistema de medição.....                                                                                             | 33 |
| <b>Figura 7</b>  | - Cubetas de quartzo com 10 mm, 2 mm e 4 mm de comprimento interno.....                                                       | 35 |
| <b>Figura 8</b>  | - Velocidade de propagação em função da frequência para as misturas glicerol/água.....                                        | 39 |
| <b>Figura 9</b>  | - Coeficiente de atenuação em função da frequência para as misturas glicerol/água.....                                        | 39 |
| <b>Figura 10</b> | - Coeficiente de atenuação em 30 MHz em função da concentração de glicerol.....                                               | 40 |
| <b>Figura 11</b> | - Velocidade de propagação em 30 MHz em função da concentração de glicerol.....                                               | 41 |
| <b>Figura 12</b> | - Velocidade de propagação em função da frequência para as misturas glicerol/água variando o ganho no pulsador.....           | 41 |
| <b>Figura 13</b> | - Coeficiente de atenuação em função da frequência para as misturas glicerol/água variando o ganho no pulsador.....           | 42 |
| <b>Figura 14</b> | - Velocidade de propagação em função da frequência para as misturas glicerol/água variando o ganho na placa de aquisição..... | 43 |
| <b>Figura 15</b> | - Coeficiente de atenuação em função da frequência para as misturas glicerol/água variando o ganho na placa de                | 44 |

|                  |                                                                                                                                                                                                                |    |
|------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
|                  | aquisição.....                                                                                                                                                                                                 |    |
| <b>Figura 16</b> | - Coeficiente de atenuação em função da frequência para as misturas glicerol/água para todos os casos.....                                                                                                     | 46 |
| <b>Figura 17</b> | - Coeficiente de atenuação em função da frequência para óleo de rícino utilizando-se diferentes concentrações de GA e água destilada como referência (cubeta 2 mm).....                                        | 50 |
| <b>Figura 18</b> | - Coeficiente de atenuação em função da frequência para óleo de semente de uva e EMCA plus utilizando-se GA 50/50 com ganho 30 dB, GA 75/25 com ganho 45 dB e água destilada como referência (cubeta 2mm)..... | 51 |
| <b>Figura 19</b> | - Coeficiente de atenuação em função da frequência para óleo de semente de uva e EMCA plus utilizando-se GA 50/50 com ganho 30 dB, GA 75/25 com ganho 45 dB e água destilada como referência (cubeta 4mm)..... | 51 |

## LISTA DE SÍMBOLOS

|               |                                                                                                                       |
|---------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $\alpha_l$    | Coeficiente de atenuação do som no líquido de interesse                                                               |
| $\alpha_r$    | Coeficiente de atenuação na água                                                                                      |
| $\alpha_{0r}$ | Coeficiente da água destilada                                                                                         |
| $\Delta t$    | Atraso de propagação através da distância L                                                                           |
| $\Delta t_0$  | Tempo de propagação entre o emissor e receptor, desconsiderando o atraso da propagação do som na amostra              |
| $\Delta t_l$  | Atraso de propagação através do líquido de interesse                                                                  |
| $\rho$        | Densidade                                                                                                             |
| $\rho_0$      | Densidade de equilíbrio                                                                                               |
| $\phi_{1r}$   | Fase espectral de $a_{1r}$                                                                                            |
| $\phi_{2r}$   | Fase espectral de $a_{2r}$                                                                                            |
| $\phi_{1l}$   | Fase espectral de $\alpha_{1l}(t)$                                                                                    |
| $a_{1r}$      | Sinal do primeiro sinal                                                                                               |
| $a_{2r}$      | Sinal do segundo sinal                                                                                                |
| $A_{1r}$      | Transformada de Fourier de $a_{1r}$                                                                                   |
| $A_{2r}$      | Transformada de Fourier de $a_{2r}$                                                                                   |
| $A_t$         | Espectro do sinal transmitido                                                                                         |
| B             | Módulo volumétrico                                                                                                    |
| c             | Velocidade de propagação do som                                                                                       |
| $c_r$         | Velocidade de propagação do som na água destilada                                                                     |
| E%            | Erro percentual                                                                                                       |
| $K_{1r}$      | Coeficiente de transmissão entre os transdutores emissor e receptor para o líquido de referência                      |
| $K_{2r}$      | Produto entre $K_{1r}$ e o quadrado do coeficiente de reflexão entre a amostra de água destilada e a parede da cubeta |
| $K_{1l}$      | Coeficiente de transmissão entre os transdutores emissor e receptor para o líquido de interesse                       |
| MAPE          | Erro percentual absoluto médio                                                                                        |
| n             | Número total de concentrações                                                                                         |
| P             | Pressão                                                                                                               |
| $P_0$         | Pressão de equilíbrio                                                                                                 |

|            |                                                 |
|------------|-------------------------------------------------|
| $p$        | Pressão acústica                                |
| $R_{12}$   | Coeficiente de reflexão entre os meios 1 e 2    |
| $s$        | Condensação                                     |
| $T$        | Temperatura                                     |
| $T_{12}$   | Coeficiente de transmissão entre os meios 1 e 2 |
| $\vec{u}$  | Velocidade de propagação da partícula           |
| $V_{MED}$  | Valor medido                                    |
| $V_{REF}$  | Valor de referência                             |
| $V_{MEDt}$ | Valor medido da concentração $t$                |
| $V_{REFt}$ | Valor de referência da concentração $t$         |
| $Z$        | Impedância acústica                             |

## SUMÁRIO

|          |                                                                                                              |           |
|----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>INTRODUÇÃO.....</b>                                                                                       | <b>14</b> |
| 1.1      | OBJETIVOS.....                                                                                               | 16        |
| 1.2      | ESTRUTURA DO TRABALHO DE GRADUAÇÃO.....                                                                      | 17        |
| <b>2</b> | <b>CONCEITOS DE ACÚSTICA E CÉLULA DE MEDIÇÃO.....</b>                                                        | <b>18</b> |
| 2.1      | CONCEITOS DE ACÚSTICA.....                                                                                   | 18        |
| 2.1.1    | Teoria da propagação ultrassônica.....                                                                       | 18        |
| 2.1.2    | Reflexão e Transmissão.....                                                                                  | 22        |
| 2.2      | CÉLULA DE MEDIÇÃO.....                                                                                       | 25        |
| 2.2.1    | Princípio de Operação.....                                                                                   | 27        |
| 2.2.2    | Calibração.....                                                                                              | 28        |
| 2.2.3    | Medição.....                                                                                                 | 30        |
| 2.3      | INSTRUMENTAÇÃO E PROGRAMA DE CONTROLE                                                                        | 31        |
| <b>3</b> | <b>METODOLOGIA.....</b>                                                                                      | <b>34</b> |
| 3.1      | PREPARAÇÃO DE AMOSTRAS E PROCEDIMENTOS DE<br>MEDIÇÃO.....                                                    | 34        |
| 3.2      | APLICAÇÃO DE GANHO NO PULSADOR E SISTEMA DE<br>AQUISIÇÃO.....                                                | 36        |
| 3.3      | PREPARAÇÃO DE AMOSTRAS DE ÓLEOS.....                                                                         | 37        |
| <b>4</b> | <b>RESULTADOS.....</b>                                                                                       | <b>38</b> |
| 4.1      | PROCESSAMENTO DE MISTURAS DE GLICERINA E ÁGUA<br>DESTILADA.....                                              | 38        |
| 4.2      | PROCESSAMENTO DE MISTURAS DE GLICERINA E ÁGUA DESTILADA<br>COM APLICAÇÃO DE GANHO NO PULSADOR.....           | 41        |
| 4.3      | PROCESSAMENTO DE MISTURAS DE GLICERINA E ÁGUA DESTILADA<br>COM APLICAÇÃO DE GANHO NA PLACA DE AQUISIÇÃO..... | 43        |
| 4.4      | ANÁLISE DO PROCESSAMENTO DE MISTURAS DE GLICERINA E ÁGUA<br>DESTILADA EM TODOS OS CASOS.....                 | 45        |
| 4.5      | MEDIÇÃO DE AMOSTRAS DE ÓLEO.....                                                                             | 49        |
| <b>5</b> | <b>CONCLUSÃO.....</b>                                                                                        | <b>53</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

A medição de propriedades de líquidos por ultrassom é amplamente utilizada no controle de processos industriais, permitindo a medição da velocidade de propagação, atenuação ou amplitude recebida (dispositivo de medição ultrassônica para a caracterização de processos microbiológicos e bioquímicos em meios líquidos) de amostras em função da frequência. As características não-invasiva e não-destrutiva das técnicas de ultrassom tornam o uso deste método favorável, uma vez que evita o perigo de contaminação do produto, tornando-se adequado para diversas aplicações relacionadas ao controle de qualidade devido a sua acurácia, rapidez, confiança e custo relativamente baixo (ELVIRA et al. 2009, FIGUEIREDO et al. 2017). Outros setores também se beneficiam das aplicações do ultrassom, como química, biologia, alimentos, engenharias, medicina e outros (DUKHIN & GOETZ 2010, POVEY 1997, KAATZE et al. 2008, BAESSO et al. 2019).

Em alguns casos, como na determinação da compressibilidade adiabática dos materiais, utilizada para caracterizar materiais, a medição da velocidade de propagação do som é a única forma possível de determinar alguns parâmetros de processo, sendo o único caminho direto para determinação de alguns parâmetros, a medição deste parâmetro abre oportunidades para a caracterização de diversos materiais e substâncias (POVEY, 1997).

Em muitos trabalhos utilizam-se do método de ultrassom para estudos de emulsões por intermédio da análise da velocidade de propagação e atenuação com a concentração e atenuação da partícula. Observa-se que em parte, têm-se projetos com sistemas de medição bastante simples, que operam de maneira a requerer ajustes devido a ruídos e distorções causados pela incapacidade de interceptar totalmente o feixe acústico devido à dispersão causada pela difração acústica na recepção; em contrapartida, outros projetos representam sistemas com extrema acurácia, contudo caracterizados pela complexidade no uso em laboratórios além da aplicação de altas frequências (HIGUTI, 2001).

No trabalho de doutorado de Tiago (2018), desenvolveu-se uma célula de medição de propriedades de líquidos por ultrassom que apresenta características atraentes, como fácil troca de amostras e excelente controle de temperatura.

A troca de cubetas que contem amostras da célula utilizada ocorre de forma fácil e acessível, podendo ser facilmente retiradas ou inseridas no sistema, ou

mesmo descartadas dependendo da amostra, além da facilidade de limpeza da câmara de medição, tornando o sistema mais seguro perante possíveis falhas na higienização, ou complicações oriundas de amostras de origem biológica.

A característica de controle de temperatura também é fundamental, pois os parâmetros acústicos variam com a temperatura, principalmente a velocidade de propagação. Portanto, é necessário medir e controlar a temperatura de modo que mudanças nas propriedades do material sejam provocadas por alterações no próprio material (concentração, por exemplo), e não por variação de temperatura. Na célula desenvolvida em (TIAGO 2018), a temperatura no interior da amostra varia menos que  $0,01^{\circ}\text{C}$  em condições de estabilidade. Isso foi conseguido por meio do uso de células de efeito Peltier e controle digital.

O controle de temperatura representa um processo fundamental para a medição de parâmetros acústicos como a velocidade de propagação, oferecendo alta precisão para sistemas ultrassônicos. Alguns sistemas de controle de temperatura agem através da imersão da amostra e célula de medição em líquidos de recirculação termostático, necessitando em alguns casos, de volumes de água, sistemas térmicos ruidosos.

Para medição da velocidade de propagação e coeficiente de atenuação da amostra contendo o líquido de interesse, utiliza-se a técnica de medição relativa ou substituição, e inicia-se pelo processo de calibração da célula de medição, onde comumente é empregada água destilada como líquido de referência, uma vez que para determinadas temperaturas possui parâmetros conhecidos, medindo-se as variações no tempo de propagação dos sinais e amplitude. Este procedimento deve ser realizado anteriormente à medição, admitindo-se a mesma cubeta e utilizando a relação entre o sinal da amostra de calibração e do líquido de interesse. As propriedades acústicas (velocidade de propagação e coeficiente de atenuação) da amostra de interesse são medidas de forma relativa às da amostra de referência, medindo-se as variações no tempo de propagação dos sinais (para cálculo da velocidade de propagação) e na amplitude (para coeficiente de atenuação).

No desenvolvimento do trabalho de Tiago (2018), utiliza-se uma banda de frequências que é relativa aos espectros de magnitude dos sinais da amostra de referência (água destilada) e do líquido de interesse. Entretanto se as amostras do líquido de interesse possuírem um coeficiente de atenuação muito maior que a referência, as bandas de frequência podem ter pouca sobreposição. Por exemplo, a

banda de -6 dB do sinal de referência pode situar-se entre 20 e 100 MHz, enquanto que para uma amostra de óleo de rícino, essa banda pode ser entre 10 e 20 MHz. Isso afeta a relação sinal-ruído dos resultados, e, portanto a confiabilidade das medidas. Para solucionar este problema, podem-se aplicar outras amostras de líquido de referência, que diferentes da água destilada, possuem maior atenuação, como por exemplo, o glicerol em água.

O glicerol é um líquido viscoso e oleoso, sem cheiro, com maior densidade que a água, incolor e com grande solubilidade em água e em álcool devido à presença de três grupos de hidroxila na sua estrutura, sendo utilizado em diversos campos da indústria, como em cosméticos, fármacos, alimentos, tabaco, explosivos, entre outros. Devido ao seu potencial como biomolécula, baixo custo, fácil acesso e manipulação, cada vez mais surgem novas aplicações para esse subproduto (BEATRIZ et al. 2011). O glicerol é o principal coproduto gerado na produção de biodiesel, sendo cerca de 10% do volume total de biodiesel, e sua aplicação em novas tecnologias usos auxiliam a minimizar os impactos negativos gerados pelo seu descarte (DASARI et al., 2005).

## 1.1 OBJETIVOS

Neste trabalho objetiva-se o estudo de amostras de diferentes concentrações de glicerol em água como líquido de referência, que diferente da água destilada, possuem maior atenuação, beneficiando-se de sua fácil obtenção, controle, e ausência de riscos na manipulação, para a comparação de medição dos parâmetros acústicos de outras amostras mais atenuantes como óleo de rícino. Por meio desta modificação, intenciona-se reduzir o ruído e aumentar a banda de frequências, facilitando a análise dos resultados, em conjunto com a aplicação de um ganho durante a aquisição do sinal, permitindo a identificação de componentes importantes no procedimento experimental. Assim, levantando-se dados de velocidade de propagação e coeficiente de atenuação em função da frequência e temperatura, compara-se o desempenho do sistema quando se utiliza água destilada e outras amostras de referência, na medição de líquidos com atenuação mais elevadas, como óleos.

## 1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO DE GRADUAÇÃO

No Capítulo 1 apresentam-se a introdução e justificativa do trabalho, evidenciando a necessidade da investigação dos dados de velocidade de propagação e coeficiente de atenuação em função da frequência e temperatura para misturas de diferentes concentrações de glicerol em água, para ser utilizadas como líquido de referência para fluidos mais atenuantes.

No Capítulo 2 fundamenta-se a revisão de literatura, desenvolvendo-se os conceitos de teoria acústica e demonstrando-se os princípios de funcionamento da célula de medição.

No Capítulo 3 apresenta-se a metodologia utilizada do desenvolvimento do trabalho, que está subdividida em: a) preparação de amostras de referência e procedimentos de medição; b) aplicação de ganho no pulsador e sistema de aquisição; e c) preparação de amostras de óleos.

No Capítulo 4 os resultados obtidos são apresentados por gráficos, demonstrando-se os dados de velocidade de propagação e coeficiente de atenuação em função da frequência e temperatura para a água destilada e misturas de glicerol em água, comparando-se o desempenho das mesmas quando utilizadas como líquido de referência na medição dos parâmetros de líquidos mais atenuantes como óleos.

No Capítulo 5 contêm as considerações finais e as conclusões deste trabalho notabilizando-se os resultados e análises realizadas, bem como conhecimento adquirido por meio deste trabalho de graduação.

## **2 CONCEITOS DE ACÚSTICA E CÉLULA DE MEDIÇÃO**

Neste capítulo descrevem-se os fundamentos teóricos aplicados neste trabalho, sendo apresentados os conceitos de acústica e a análise do funcionamento da célula de medição, compreendendo os procedimentos de calibração e medição, processamentos de sinais e instrumentação do sistema.

### **2.1 CONCEITOS DE ACÚSTICA**

Nesta primeira etapa, apresenta-se os conceitos básicos envolvendo propagação de ondas acústicas e fenômenos de transmissão e reflexão (KINSLER et al., 2000), que são fundamentais para entender o funcionamento da célula de medição.

#### **2.1.1 Teoria da propagação ultrassônica**

Os sons configuram-se como ondas mecânicas, que são definidas como perturbações que se propagam em um meio material dotado de massa e elasticidade, e podem ser classificados em três faixas (KINSLER et al., 2000). Os sons audíveis são interpretados como o conjunto de ondas mecânicas cujo espectro de frequências é compreendido entre os limites da audição humana, entre 20 Hz a 20 kHz, sendo que, abaixo desta faixa as ondas mecânicas são nomeadas infrassom, e acima, ultrassom.

Dentro do espectro de frequência das ondas ultrassônicas, categorizam-se três modos de vibração das partículas do meio em relação à direção de propagação das ondas, sendo estes, ondas longitudinais e de cisalhamento (transversal). Neste projeto serão estudadas as ondas longitudinais, caracterizadas pela velocidade de deslocamento das partículas paralela à direção de propagação da onda.

Ondas acústicas são caracterizadas por constituírem um tipo de distúrbio de pressão em meios fluidos ao se propagarem. Para meios fluidos, a equação de estado deve relacionar três grandezas físicas que descrevem o comportamento termodinâmico do mesmo, como a equação de estado para um gás perfeito que relaciona a pressão total, a densidade e a temperatura para gases em equilíbrio.

$$P = \rho r T \quad (1).$$

Sendo:

P: Pressão;

r : Constante específica do gás;

$\rho$ : Densidade;

T: Temperatura.

Para os casos em que o gás perfeito é descrito como isotérmico ou adiabático obtém-se uma maior simplificação nas equações que relacionam a pressão e a densidade, necessitando para o segundo caso o conhecimento da proporção de calor específico. Todavia, para fluídos diferentes de um gás perfeito, é mais adequado determinar experimentalmente a relação isentrópica entre as oscilações de pressão e densidade (KINSLER et al., 2000). Esta relação pode ser descrita por meio da expansão em série de Taylor.

$$P = P_0 + \left( \frac{\partial P}{\partial \rho} \right)_{\rho_0} (\rho - \rho_0) + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial^2 P}{\partial \rho^2} \right)_{\rho_0} (\rho - \rho_0)^2 + \dots \quad (2).$$

Sendo:

$\rho_0$ : Densidade de equilíbrio;

$P_0$ : Pressão de equilíbrio.

Para os casos que as oscilações forem pequenas, considera-se apenas o termo de ordem mais baixa, trazendo uma relação linear entre as variações de pressão e as alterações na densidade.

$$P - P_0 \approx B \frac{(\rho - \rho_0)}{\rho_0} \quad (3).$$

Sendo  $B$  o módulo volumétrico, também denominado como módulo de Bulk, descrito por:

$$B = \rho_0 \left( \frac{\partial P}{\partial \rho} \right)_{\rho_0} \quad (4).$$

Considerando-se a pressão acústica  $p$  especificada em (5) e a condensação  $s$  em (6), pode-se representar em (7) a aproximação descrita em (3).

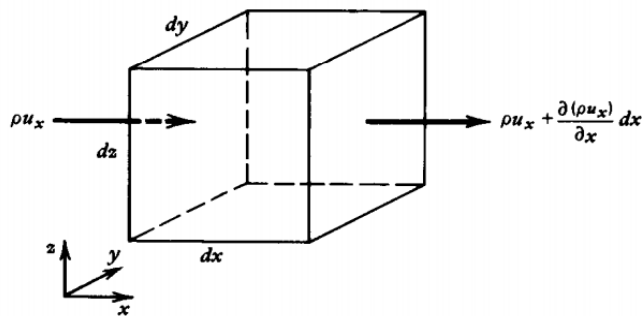
$$p = P - P_0 \quad (5).$$

$$s = \frac{(\rho - \rho_0)}{\rho_0} \quad (6).$$

$$p \approx Bs \quad (7).$$

Para compreender a variação do volume do fluido faz-se necessário desenvolver uma equação da velocidade de propagação da partícula  $\vec{u}$  e densidade instantânea do mesmo. Para isto, considera-se um diferencial de volume representado por um paralelepípedo retangular na Figura 1, onde admite-se que a taxa na qual a massa flui através volume através de sua superfície é igual a variação de massa dentro do volume. Assim, o fluxo total de massa no volume resultante do fluxo na direção  $x$  é determinado pela diferença entre a vazão mássica de entrada e a vazão mássica de saída.

Figura 1 – Elemento de volume de fluido com a resultante do fluxo na direção  $x$ .



Fonte: (KINSLER et al., 2000).

$$\left[ \rho u_x - \left( \rho u_x + \frac{\partial(\rho u_x)}{\partial x} dx \right) \right] dydz = - \frac{\partial(\rho u_x)}{\partial x} dV \quad (8).$$

Como as expressões são similares para as direções y e z, tem-se o fluxo total:

$$-\left(\frac{\partial(\rho u_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho u_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho u_z)}{\partial z}\right)dV = -\nabla \cdot (\rho \vec{u})dV \quad (9).$$

Pelo princípio da continuidade, a somatória de todos os fluxos deve ser igual ao acúmulo, que representa a variação da massa no volume em relação ao tempo. Desta forma, adapta-se a equação:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \quad (10).$$

A equação (10) descreve a equação de continuidade exata, contudo, isolando-se a densidade  $\rho$  na equação da condensação  $s$  caracterizada em (6), obtendo-se (11), e considerando-se  $\rho_0$  em função do tempo irrisório, e o valor de  $s$  razoavelmente pequeno, aproxima-se a equação da continuidade em (12).

$$\rho = \rho_0(1 + s) \quad (11).$$

$$\rho_0 \frac{\partial s}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_0 \vec{u}) = 0 \quad (12).$$

De acordo com Kinsler et al. (2000), a equação linear de Euler, aplicada para sistemas acústicos de pequena amplitude pode ser simplificada em (13),

$$\rho_0 \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} = -\nabla \cdot p = 0 \quad (13).$$

É possível produzir uma equação diferencial com apenas uma variável dependente combinando-se (7), (12) e (13). Primeiro, faz-se o divergente da equação apresentada em (13) obtém-se:

$$\nabla \cdot \left( \rho_0 \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} \right) = -\nabla^2 p \quad (14).$$

Posteriormente, deriva-se a equação encontrada em (12):

$$\rho_0 \frac{\partial^2 s}{\partial t^2} + \nabla \cdot \left( \rho_0 \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} \right) = 0 \quad (15).$$

Comparando-se as equações (14) e (15), é possível especificar (16), assim utilizando-se a afirmação em (7) em termos da condensação  $s$ , e considerando que o módulo volumétrico  $B$  não depende significativamente do tempo, a velocidade termodinâmica do som  $c$  é apresentada em (17).

$$\nabla^2 p = \rho_0 \frac{\partial^2 s}{\partial t^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (16).$$

$$c^2 = \frac{B}{\rho_0} \quad (17).$$

A igualdade (17) representa a equação para a propagação do som em fluidos com velocidade de fase sem perdas (KINSLER et al., 2000). Ao analisar as variáveis envolvidas na equação da velocidade de propagação do som, nota-se que o módulo volumétrico  $B$  e a densidade de equilíbrio  $\rho_0$  são restritas ao meio em que se propagam e, no caso desta última, há variação também em função da temperatura. Desta forma, para uma temperatura definida, a determinação da velocidade de propagação do som pode ser precisamente empregada na caracterização de materiais.

### 2.1.2 Reflexão e Transmissão

As ondas refletidas e transmitidas são geradas no processo de propagação de uma onda acústica em um meio quando esta encontra uma interface com um segundo meio. As razões das amplitudes de pressão e intensidade das ondas refletidas e transmitidas em relação à onda incidente dependem de determinadas particularidades físicas e acústicas. Uma dessas são as impedâncias acústicas características, que se trata de uma propriedade do material que representa a facilidade que um material em transmitir uma onda acústica, podendo ser definida de

acordo com (18) para um determinado meio (SILVA, 2020). Outras propriedades relacionadas são velocidade do som nos meios, ângulo de incidência com a interface e densidade do meio (KINSLER et al., 2000).

$$Z = \rho c \quad (18).$$

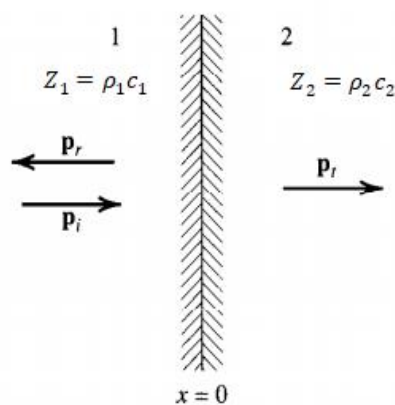
Sendo:

Z: Impedância acústica;

$\rho$ : Densidade do meio;

A Figura 2 representa uma onda incidente e refletida propagando-se no meio 1 de impedância acústica  $Z_1$  e densidade  $\rho_1$ , e consequentemente a onda transmitida propagando-se no meio 2 de impedância acústica  $Z_2$  e densidade  $\rho_2$ , sendo a incidência paralela à normal entre os meios; Considerando-se a amplitude de pressão acústica da onda incidente  $p_i$ , e das ondas refletida  $p_r$  e transmitida  $p_t$ , e as velocidades de propagação da onda incidente  $c_i$ , e das ondas refletida  $c_r$  e transmitida  $c_t$ , respectivamente, tem-se as equações (19) e (20) (KINSLER et al., 2000).

Figura 2 – Reflexão e Transmissão de uma onda plana incidente no plano entre dois meios diferentes.



Fonte: Adaptada de Kinsler et al. (2000).

$$p_i + p_r = p_t \quad (19).$$

$$c_i + c_r = c_t \quad (20).$$

Dividindo-se as equações (19) e (20), obtém-se (21):

$$\frac{p_i + p_r}{c_i + c_r} = \frac{p_t}{c_t} \quad (21).$$

Para uma onda plana, tem-se a relação em (22), (23) e (24) referentes à onda incidente, refletida e transmitida respectivamente, cujo sinal das impedâncias acústicas  $Z_1$  e  $Z_2$  depende da direção de propagação.

$$\frac{p_i}{c_i} = Z_1 \quad (22).$$

$$\frac{p_r}{c_r} = -Z_1 \quad (23).$$

$$\frac{p_t}{c_t} = Z_2 \quad (24).$$

Substituindo-se as equações (22), (23) e (24) na equação (21), obtém-se (25).

$$Z_1 \frac{p_i + p_r}{p_i - p_r} = Z_2 \quad (25).$$

Determinam-se os coeficientes de reflexão e transmissão  $R_{12}$  e  $T_{12}$  entre os meios 1 e 2 em (26) e (27) por intermédio da razão entre as pressões acústicas, utilizando-se a equação (25) para o coeficiente de reflexão, e considerando-se que a diferença entre o coeficiente de transmissão e o coeficiente de reflexão é igual a um (KINSLER et al., 2000).

$$R_{12} = \frac{p_r}{p_i} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} = \frac{\frac{Z_2}{Z_1} - 1}{\frac{Z_2}{Z_1} + 1} \quad (26).$$

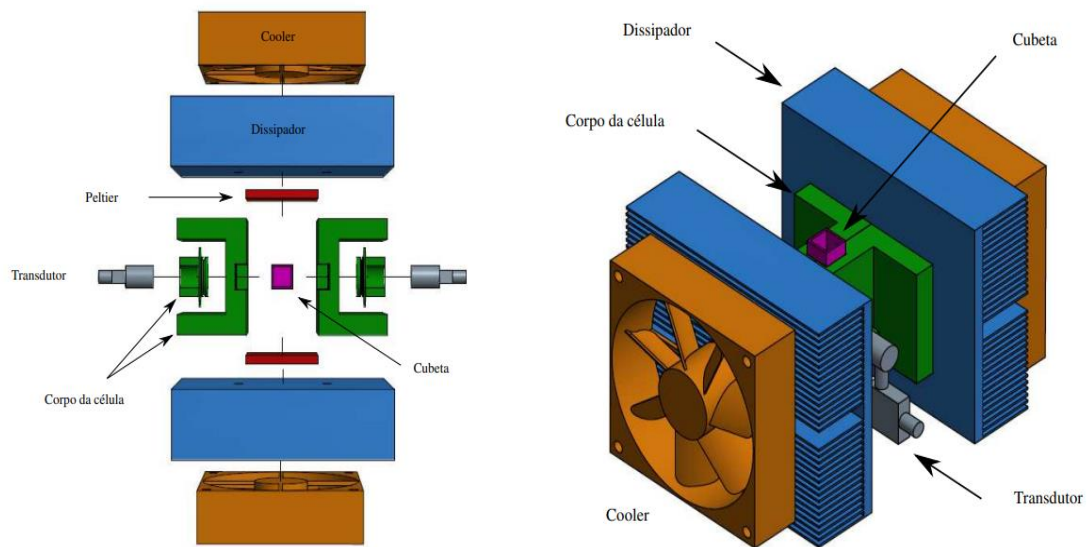
$$T_{12} = \frac{p_t}{p_i} = 1 + R_{12} = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} = \frac{\frac{2Z_2}{Z_1}}{\frac{Z_2}{Z_1} + 1} \quad (27).$$

Analisando-se as equações (19) e (20), verifica-se que, nos casos em que as impedâncias acústicas  $Z_1$  e  $Z_2$  forem próximas, haverá predominantemente a transmissão da onda, enquanto que, para os casos que  $Z_1$  for muito maior que  $Z_2$ , prevalecerá a reflexão da onda.

## 2.2 CÉLULA DE MEDIÇÃO

Dentro da proposta do trabalho utiliza-se a célula de medição projetada a partir do trabalho de doutorado de Tiago (2018), desenvolvido para medição de propriedades de líquidos por ultrassom por meio de dois transdutores operando em modo transmissão-recepção. A Figura 3 apresenta a vista superior explodida e a representação tridimensional do projeto mecânico da célula de medição proposta por Tiago (2018). Na célula, dois transdutores operam em modo transmissão-recepção, e a amostra é colocada dentro de uma cubeta, no caminho de propagação acústico. Entre a cubeta e os transdutores, existe uma pequena camada de água, que funciona como camada de acoplamento acústico.

Figura 3 – Vista superior explodida e representação tridimensional da célula de medição.



Fonte: (TIAGO, 2018).

As principais vantagens do sistema desenvolvido são o uso de frequências elevadas (de 10 a 100 MHz), o controle de temperatura (variações menores que  $0,01^{\circ}\text{C}$ ) e a facilidade de troca de amostras por meio do uso das cubetas, podendo simplesmente trocar a cubeta por outra com a nova amostra, ou trocar a amostra utilizando-se a mesma cubeta, após limpeza ou esterilização.

Um dos pontos fundamentais da estrutura da célula é a garantia do paralelismo entre as superfícies dos transdutores e cubetas, para isto, o módulo foi construído de maneira a acoplar a cubeta em um furo quadrado na região central contendo uma fina camada de água destilada, gerando um erro de paralelismo de no máximo  $4,78^{\circ}$ , criando um aumento de  $0,035\text{mm}$  no comprimento da amostra ( $L$ ), tendo o ajuste desta questão na etapa de alinhamento proposta pelo programa de controle e aquisição do sistema.

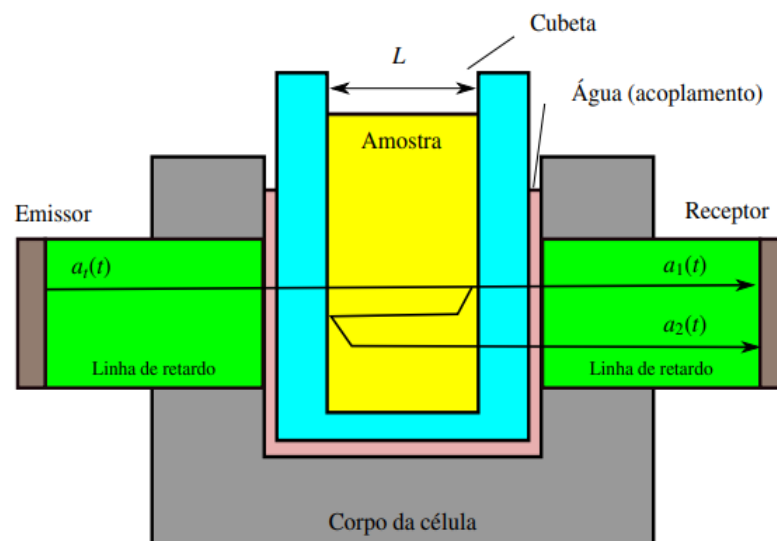
Nas faces perpendiculares aos transdutores são colocadas duas células de efeito Peltier, acopladas a dissipadores e ventiladores, que são dispositivos que atuam como bomba de calor, com o intuito de atender a estabilidade térmica requisitada pelo processo de determinação da velocidade de propagação, garantindo uma faixa de  $0,01^{\circ}\text{C}$  de erro de regime permanente. Para assegurar a manutenção da temperatura, as células Peltier foram posicionadas externamente do bloco do sistema de medição, sendo este último dotado de dissipadores e localizado

em uma caixa térmica com ventiladores emparelhados próximos aos dissipadores e fixados na caixa.

### 2.2.1 Princípio de Operação

Para determinar os parâmetros acústicos de interesse aplicou-se o método relativo ou de substituição, necessitando-se das etapas de medição do líquido de referência, denominada calibração, e do líquido de interesse, além do alinhamento da cubeta contendo as amostras. A Figura 4 representa um corte transversal na célula de medição de modo a possibilitar a visualização do sentido de propagação dos sinais. Durante ambas as etapas, tem-se o sinal  $a_t(t)$  propagando-se através de todas as camadas do emissor ao receptor em modo transmissão, este sinal recebe o nome de primeiro sinal ou sinal direto, e é representado por  $a_1(t)$ . Por meio da múltipla reflexão no interior da amostra, gera-se o sinal  $a_2(t)$  na primeira etapa, denominado segundo sinal ou primeira reflexão, que se propaga duas vezes a mais que o primeiro sinal pela camada da amostra até atingir o receptor. Durante a calibração, por meio da diferença de tempo entre  $a_1(t)$  e  $a_2(t)$  calcula-se o tamanho da camada da amostra  $L$ , uma vez que se conhece a velocidade de propagação do som em água destilada (líquido de referência) em função da temperatura (BILANIUK & WONG 1993).

Figura 4 – Vista em corte lateral da célula de medição.



Fonte: (TIAGO, 2018).

Na segunda etapa, após o procedimento de calibração, troca-se a amostra de água destilada (referência), pela amostra do líquido de interesse, e de maneira análoga, adquire-se o primeiro sinal relativo ao líquido de interesse, e utilizam-se as aquisições dos sinais para gerar os parâmetros acústicos como apresentado na próxima seção.

### 2.2.2 Calibração

Na etapa de calibração, a amostra deve ser preenchida com água destilada, e os sinais do primeiro sinal e segundo sinal são medidos, para melhor compreensão. Nesta etapa serão denominados  $a_{1r}(t)$  e  $a_{2r}(t)$ , e suas transformadas de Fourier  $A_{1r}(f)$  e  $A_{2r}(f)$  respectivamente representadas por (28) e (29) (TIAGO, 2018).

$$A_{1r}(f) = K_{1r}A_t(f)e^{-\alpha_r(f)L}e^{j\phi_{1r}(f)} \quad (28).$$

$$A_{2r}(f) = K_{2r}A_t(f)e^{-\alpha_r(f)3L}e^{j\phi_{2r}(f)} \quad (29).$$

Sendo:

$K_{1r}$ : Coeficiente de transmissão entre os transdutores emissor e receptor para o líquido de referência;

$K_{2r}$ : Produto entre  $K_{1r}$  e o quadrado do coeficiente de reflexão entre a amostra de água destilada e a parede da cubeta;

$A_t$ : Espectro do sinal transmitido;

$\alpha_r(f)$ : Coeficiente de atenuação da água;

$\phi_{1r}$ : Fase espectral de  $a_{1r}(t)$ ;

$\phi_{2r}$ : Fase espectral de  $a_{2r}(t)$ .

As fases espectrais de  $a_{1r}(t)$  e  $a_{2r}(t)$  são determinadas em (30) e (31) respectivamente.

$$\phi_{1r}(f) = -2\pi f (\Delta t_0 + \Delta t) \quad (30).$$

$$\phi_{2r}(f) = -2\pi f (\Delta t_0 + 3\Delta t) \quad (31).$$

Sendo:

$\Delta t$ : Atraso de propagação através da distância  $L$ ;

$\Delta t_0$ : Tempo de propagação entre o emissor e receptor, desconsiderando o atraso da propagação do som na amostra.

O tempo de diferença entre os sinais  $a_{1r}(t)$  e  $a_{2r}(t)$  também pode ser calculado por meio de (32), e a partir deste, conhecendo-se a velocidade de propagação do som na água destilada  $c_r(T)$  em função da temperatura (BILANIUK & WONG 1993), determina-se a distância  $L$  através de (33).

$$\Delta t(f, T) = \frac{\phi_{1r}(f) - \phi_{2r}(f)}{2\pi f} \quad (32).$$

$$L(T) = \Delta t(f, T) \frac{c_r(T)}{2} \quad (33).$$

O coeficiente de atenuação da água destilada em função da temperatura pode ser calculado utilizando-se a expressão (34), assumindo-se uma dependência quadrática do coeficiente de atenuação com a frequência (POVEY, 1997).

$$\alpha_r(f, T) = \alpha_{0r}(T) f^2 \quad (34).$$

Sendo:

$\alpha_{0r}(T)$ : Coeficiente da água destilada, aproximadamente igual a  $1,85 \cdot 10^{-15}$  dB.s<sup>2</sup>/cm para uma temperatura de 25°C (HOLMES; PARKER; POVEY, 2011).

No final do procedimento, são armazenados os valores de temperatura  $T$ , o comprimento da camada da amostra  $L(T)$ , o primeiro sinal para o cálculo dos parâmetros acústicos do líquido de interesse na medição, e o alinhamento da cubeta na camada de acoplamento para maior acurácia nos resultados da medição.

### 2.2.3 Medição

Após o processo de calibração, troca-se a amostra de água destilada pelo líquido de interesse. Para garantir a exatidão dos resultados obtidos, faz-se necessário a aplicação da mesma cubeta de ensaio ou cubetas de material e proporção semelhantes que garantam o menor desvio nos parâmetros determinados. Seguindo-se o procedimento, no modo transmissão, tem-se o sinal direto recebido pelo receptor  $\alpha_{1l}(t)$  no domínio da frequência definido em (35) (TIAGO, 2018).

$$A_{1l}(f) = K_{1l}A_t(f)e^{-\alpha_l(f)L}e^{j\phi_{1l}(f)} \quad (35).$$

Sendo:

$K_{1l}$ : Coeficiente de transmissão entre os transdutores emissor e receptor para o líquido de interesse;

$\alpha_l(f)$ : Coeficiente de atenuação do som no líquido de interesse;

$\phi_{1l}$ : Fase espectral de  $\alpha_{1l}(t)$ ;

Ao se propagar o sinal através da amostra do líquido de interesse, tem-se o sinal  $a_{1r}(t)$ , cuja fase espectral de  $a_{1r}(t)$  é escrita em (36).

$$\phi_{1l}(f) = -2\pi f (\Delta t_0 + \Delta t_l) \quad (36).$$

Sendo:

$\Delta t_l$ : Atraso de propagação através do líquido de interesse.

A velocidade de fase do líquido de interesse em função da frequência e temperatura é obtida por meio da diferença entre as fases espectrais do líquido de referência e o líquido de interesse:

$$c_l(f, T) = \frac{c_r(f, T)}{1 + \left[ \frac{\phi_{1r}(f) - \phi_{1l}(f)}{2\pi f} \right] \frac{c_r(f, T)}{L}} \quad (37).$$

Onde:

$c_r(f, T)$ : velocidade de propagação do som na água destilada.

Para o cálculo do coeficiente de atenuação do líquido de interesse, consideram-se as magnitudes dos espectros do primeiro sinal de ambas as amostras:

$$\alpha_l(f, T) = \alpha_r(f, T) + \frac{1}{L} \ln \frac{|A_{1r}(f, T)|}{|A_{1l}(f, T)|} + \frac{1}{L} \ln \frac{K_l}{K_r} \quad (38).$$

Sendo:

$$\frac{K_l}{K_r} = \frac{(Z_c + Z_r)^2}{(Z_c + Z_l)^2} \cdot \frac{Z_l}{Z_r} \quad (39).$$

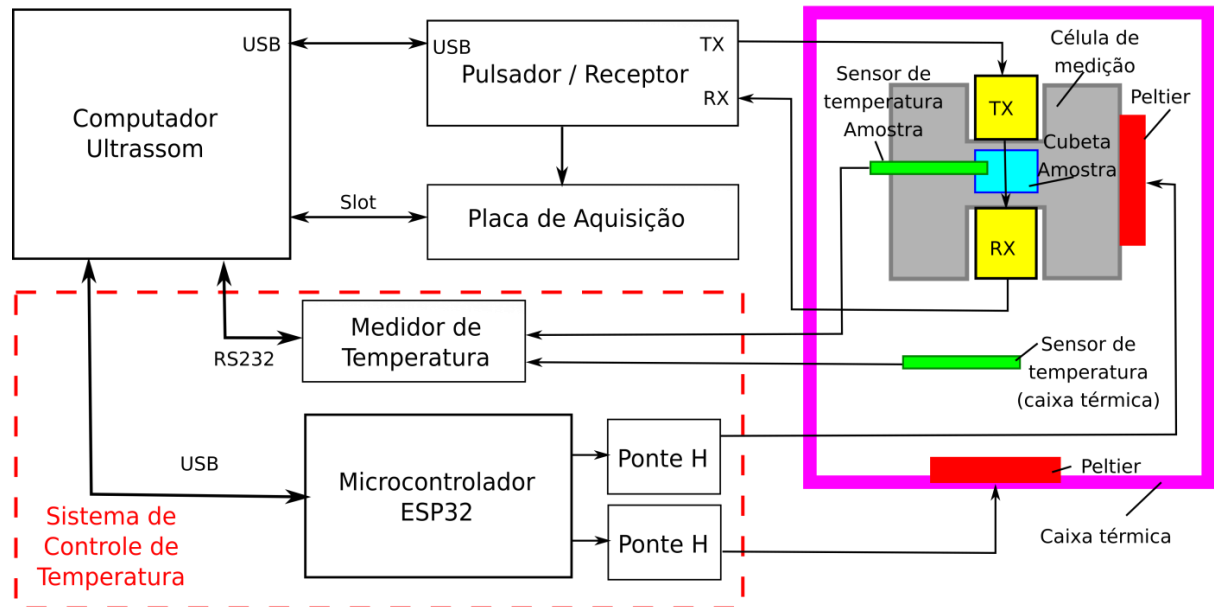
Sendo  $Z_c$ ,  $Z_r$  e  $Z_l$  as impedâncias acústicas da cubeta, amostra de referência, e líquido de interesse respectivamente. Nos casos em que as medições envolvem amostras de soluções aquosas semelhantes à água destilada, a razão entre os coeficientes de transmissão dada em (39) pode ser aproximada para 1 (um). (TIAGO, 2018). Neste trabalho, considera-se também o uso de outras amostras de referência além da água destilada com maior coeficiente de atenuação, determinando-se seus parâmetros acústicos.

### 2.3 INSTRUMENTAÇÃO E PROGRAMA DE CONTROLE

O esquema da Figura 5 representa a instrumentação utilizada para o funcionamento do sistema. O sistema acústico foi projetado para operar no modo transmissão-recepção, sendo utilizado dois transdutores não focalizados modelo V3320 (Olympus IMS, Japão) com diâmetro do elemento piezoelétrico de 6 mm, linha de retardo de 19,5  $\mu$ s, frequência central de 75 MHz e largura de banda de 59,8 MHz a meia potência (-6 dB). O sinal de excitação do transdutor emissor foi gerado por um pulsador programável (JSR, modelo DPR500), que opera em conjunto com um pulsador/amplificador remoto (JSR, modelo RP-H2), com receptor com banda de 500 MHz e ganho de até 50 dB, alocado próximo ao sistema, uma vez que trabalhando na faixa de frequência aplicada, utilizam-se cabos curtos devido a reflexões na interface cabo/transdutor oriundo do descasamento de impedâncias. O sinal recebido pelo transdutor receptor é digitalizado e armazenado para

processamento pela placa de aquisição de sinais (Signatec, modelo PX14400) com 14 bits de resolução e frequência de amostragem de 400 MHz. (TIAGO, 2018).

Figura 5 – Instrumentação utilizada para ultrassom e controle de temperatura.



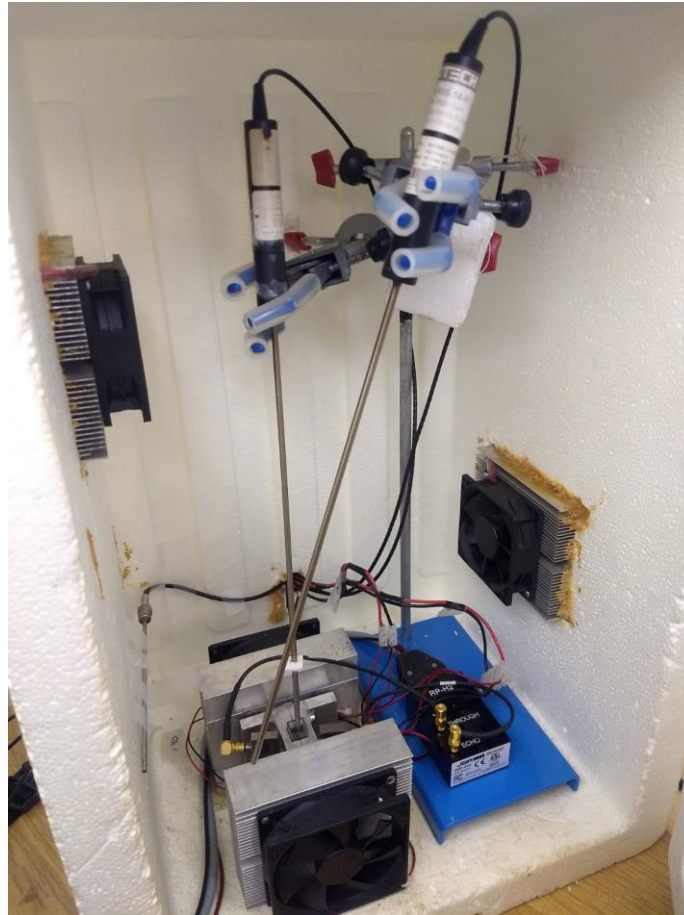
Fonte: Elaborado pelo autor.

Para controlar o processo de aquisição de dados utilizou-se um software escrito em linguagem C orientado através de uma função do Matlab. Para gerenciar os processos de alinhamento, calibração e medição descritos na seção anterior, e tornar prático o uso da célula de medição aplicou-se o ambiente GUIDE, que utiliza programação orientada ao objeto (POO) no Matlab para criar uma interface visual para o usuário.

O sistema de controle de temperatura originalmente era composto por um computador e geradores de funções, e estes três equipamentos foram substituídos por um microcontrolador (ESP32), permitindo maior economia de recursos e de espaço na bancada. O sistema trabalha com um medidor de temperatura de precisão (Isotech, modelo Millik), que mede a temperatura da amostra, que é transferida para o computador. O microcontrolador lê esse valor de temperatura e por meio de um algoritmo de controle PID gera um sinal PWM para uma ponte H, que por sua vez aciona células Peltier que são responsáveis por aquecer ou resfriar a célula de medição, fechando a malha de controle. Um sistema semelhante é utilizado para controlar a temperatura do ar no interior de uma caixa térmica, cujo

objetivo é diminuir as oscilações de temperatura e melhorar o controle de temperatura da amostra. A Figura 6 apresenta uma foto do sistema utilizado neste trabalho.

Figura 6 – Foto do sistema de medição.



Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3 METODOLOGIA

Para o desenvolvimento deste trabalho, definiu-se o procedimento experimental iniciando-se pela preparação de amostras de glicerol e água em diferentes concentrações e realização do processo de medição das amostras; seguidos pela aplicação de ganho no pulsador e sistema de aquisição utilizando-se as mesmas amostras. Posteriormente, preparou-se o sistema para a substituição da água destilada como líquido de referência por determinadas misturas de glicerol/água, para medição de óleos de origem vegetal e mineral.

#### 3.1 PREPARAÇÃO DE AMOSTRAS E PROCEDIMENTOS DE MEDIÇÃO

Foram preparadas misturas de glicerol/glicerina (Synth, Glicerina Vegetal Bi-destilada USP) e água destilada em diferentes proporções em massa, utilizando-se uma balança de precisão (Marte, modelo AS500, resolução 0,01 g). As misturas, em porcentagem de massa, foram as seguintes, para Glicerol(G)/Água(A): 25/75, 50/50, 75/25, 85/15 e 100/0. Com isso, têm-se propriedades acústicas variadas para os estudos. Fez-se uma agitação manual vigorosa para realizar a mistura, após a qual deve-se aguardar algumas horas para a eliminação de bolhas de ar. As amostras foram armazenadas em vidros fechados à temperatura ambiente, com exceção da concentração 25/75, que necessitou armazenamento em refrigerador devido à maior suscetibilidade à contaminação por microrganismos. Desta forma, as amostras das misturas preparadas foram constantemente checadas evitando-se a medição de amostras contaminadas por substâncias externas.

O procedimento experimental para a medição das amostras da mistura glicerol/água, bem como outras amostras, segue uma metodologia que intenta a acurácia nos resultados obtidos. Desta forma, para evitar a interferência e contaminação da célula e cubeta pelos resíduos e oleosidade do corpo humano, o uso de luvas e higienização com álcool é imprescindível. As cubetas utilizadas para inserção das amostras devem estar totalmente secas, utilizando-se um aparelho de secagem improvisado para este procedimento. Para introduzir o líquido na cubeta foi utilizada uma micropipeta de volume variável (PipetPlus), auxiliando na precisão do volume inserido (3,0mL), além de evitar a introdução de bolhas de ar na amostra em

análise. Para cada concentração, foram realizadas pelo menos três medições alterando-se a amostra, para uma mesma cubeta e temperatura.

Realizaram-se diferentes medições de acordo com a concentração, caminho acústico das cubetas de quartzo (10 mm, 2 mm e 4 mm de comprimento interno, respectivamente apresentadas na Figura 7). Os resultados foram gerados a 25°C, considerando-se que o sistema de controle manteve o líquido nesta temperatura, com oscilações de no máximo 0,01°C em regime permanente, e idealizando-se que, estando o procedimento validado para uma temperatura, será válido para outras também. Durante o processo de medição, especificamente na etapa de identificação do primeiro sinal (sinal que se propaga através de todas as camadas do emissor ao receptor), a modificação do ganho do sinal pode ser realizada através das mudanças de escala de aquisição referente à placa de aquisição de sinais, ou no pulsador em modo recepção, sendo necessário para esta última à correção de ganho no cálculo da atenuação. As caracterizações realizadas consideram as medições sem ganho e com ganho no sinal através do pulsador em modo recepção.

Figura 7 – Cubetas de quartzo com 10 mm, 2 mm e 4 mm de comprimento interno.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Durante as medições, adaptou-se o uso de cada cubeta de acordo com a concentração de glicerol em água, visto que ao utilizar uma cubeta de 2 mm para as concentrações mais baixas, o sistema mede atenuações negativas para frequências mais baixas, sendo decorrente do fato que o sinal, nessas condições, não sofre suficiente atenuação para ser detectado pelo sistema de medição; da mesma forma, para concentrações mais altas, o uso das cubetas de 4 mm e 10 mm dificultou a identificação do primeiro e segundo sinal, atenuando-se o sinal de forma

significativa. Por esse motivo, para as concentrações de 25/75 e 50/50 foi utilizada uma cubeta de 10 mm, enquanto que para 75/25 foi usada a cubeta de 4 mm e para as concentrações maiores foi utilizada a cubeta de 2 mm, como apresentado no Quadro 1.

Quadro 1 – Cubetas utilizadas para cada concentração.

| <b>Concentração glicerol/água (%)</b> | <b>Cubeta (mm)</b> |
|---------------------------------------|--------------------|
| 25/75                                 | 10                 |
| 50/50                                 | 10                 |
| 75/25                                 | 4                  |
| 85/15                                 | 2                  |
| 100/0                                 | 2                  |

Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3.2 APLICAÇÃO DE GANHO NO PULSADOR E SISTEMA DE AQUISIÇÃO

Com o intuito de apurar a identificação do primeiro e segundo sinal durante as medições das amostras composta por misturas de GA, verificou-se os resultados gerados pela aplicação do ganho no sinal de duas formas, através do pulsador e da placa de aquisição.

Para o caso de aplicação de ganho no pulsador, lembra-se que, no procedimento de medição proposto por Tiago (2019), deve-se utilizar o mesmo ganho para as etapas de calibração e medição. No caso, o ganho usado na calibração foi igual a 30 dB, e aumentou-se o ganho na medição para 45 dB, e esses 15 dB correspondem a um ganho de 5,62. Desta forma, compensou-se no procedimento de cálculo do coeficiente de atenuação, não influenciando na velocidade, pois a mudança ocorre apenas na amplitude do sinal, e não na fase. Para a variação do ganho por meio da placa de aquisição, aumentou-se a amplitude dos sinais através da mudança de escala no programa de aquisição, logo, não houve necessidade de compensar o ganho durante os cálculos envolvidos na medição.

De forma análoga a etapa anterior, seguiu-se o Quadro 1, utilizando-se para a concentração 50/50 a cubeta de 10 mm, enquanto que para 75/25 foi usada a cubeta de 4 mm e para as concentrações maiores foi utilizada a cubeta de 2 mm.

### 3.3 PREPARAÇÃO DE AMOSTRAS DE ÓLEOS

Nesta etapa da metodologia proposta, utilizou-se apenas as cubetas de 2mm e 4 mm de comprimento interno, visto que os óleos utilizados possuem propriedades muito atenuantes. Para a execução do escopo envolvido no projeto, mediu-se a 25°C, três óleos diferentes, sendo estes o óleo de rícino (Rioquímica), óleo de semente de uva (Hidramais) e óleo mineral EMCA plus (Oxiten). Para possibilitar a comparação, processaram-se as medições dos óleos utilizando-se a água destilada como referência, e em seguida modificou-se o arquivo de calibração, isto é, o líquido de referência, para as misturas de glicerol/água com diferentes concentrações. A preparação das amostras, bem como o procedimento experimental da medição no sistema foi semelhante à seção anterior.

Os resultados anteriores, de caracterização de amostras de GA, especificamente de coeficiente de atenuação, foram utilizados para substituir os dados de água destilada, para verificar se há melhoria nas medições de coeficiente de atenuação dos óleos. Como a velocidade não é influenciada por esse fator, dá-se mais ênfase aos resultados de atenuação. Para isto, primeiramente é necessário armazenar o coeficiente de atenuação da concentração de GA utilizada com referência e substituí-la posteriormente pelo coeficiente de atenuação da água destilada. A partir disto, faz-se necessário conhecer as estruturas matriciais de dados (struct) armazenada na medição para que sejam calculados os dados de velocidade do líquido de referência assim como os sinais recebidos no domínio da frequência e suas respectivas fases espectrais.

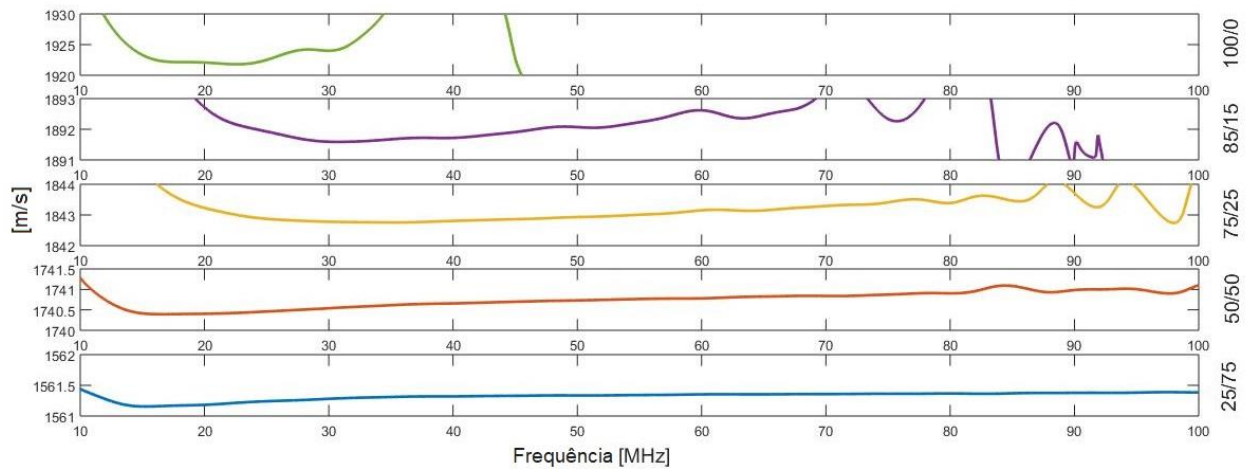
## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção, apresentam-se os resultados de velocidade de propagação e coeficiente de atenuação em função da frequência das amostras de misturas de glicerol/água com diferentes concentrações, comparando-se o desenvolvimento do sistema quando utilizado água destilada e as amostras de glicerol/água como líquido de referência, para a medição de líquidos mais atenuantes, como óleos. Verifica-se também a influência da aplicação do ganho no pulsador e placa de aquisição.

### 4.1 PROCESSAMENTO DE MISTURAS DE GLICERINA E ÁGUA DESTILADA

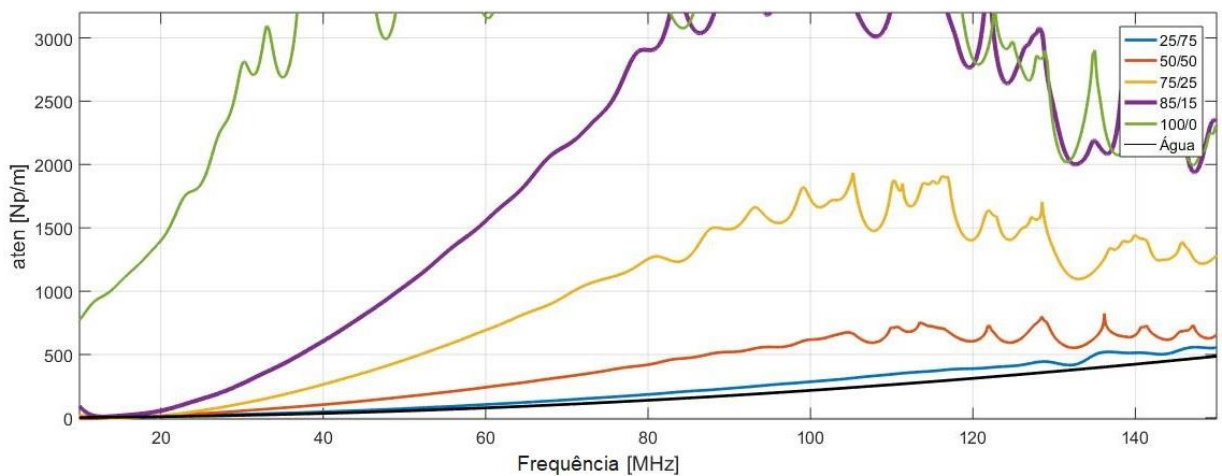
Nas Figuras 8 e 9, são apresentados os gráficos de velocidade de fase e atenuação em função da frequência para as cinco misturas de glicerol e água (GA) a 25°C, diferenciando-se pelo tipo cubeta aplicada. Nota-se que, como esperado, a velocidade aumenta conforme aumenta a concentração de glicerol, uma vez que, o valor da velocidade de propagação do glicerol a 25°C deve estar dentro do intervalo de  $1964 \pm 10$  m/sec, enquanto que para a água destilada nas mesmas condições este valor aproxima-se de  $1496,70 \pm 0,03$  (FERGUSSON, GUPTILL, MACDONALD, 1954; BILANIUK, WONG, 1993). Além disso, pela questão da atenuação, a banda é mais limitada à medida que a concentração aumenta, por exemplo entre 15 e 100 MHz para 25/75, 15 e 80 MHz para 50/50, 30 e 60 MHz para 75/25 e 85/15, e uma banda bem estreita para 100/0, entre 20 e 30 MHz, aproximadamente. A dispersão, que é a variação da velocidade com a frequência, também aumenta com a concentração.

Figura 8 - Velocidade de propagação em função da frequência para as misturas glicerol/água.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 9 - Coeficiente de atenuação em função da frequência para as misturas glicerol/água.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Analisando-se os resultados para o coeficiente de atenuação, nota-se que, como esperado, o aumento da concentração de glicerol aumenta a atenuação e diminui a faixa de frequência, pois à medida que a frequência aumenta há maior atenuação das componentes de frequência do sinal que se propaga pela amostra. Para efeito de análise e comparação com os resultados na sequência, gerou-se a Tabela 1, com os dados de velocidade de propagação e coeficiente de atenuação para todas as concentrações de glicerol em água para a frequência de 25 MHz. Esta frequência foi escolhida com o intuito de evitar a avaliação de ruídos nas curvas.

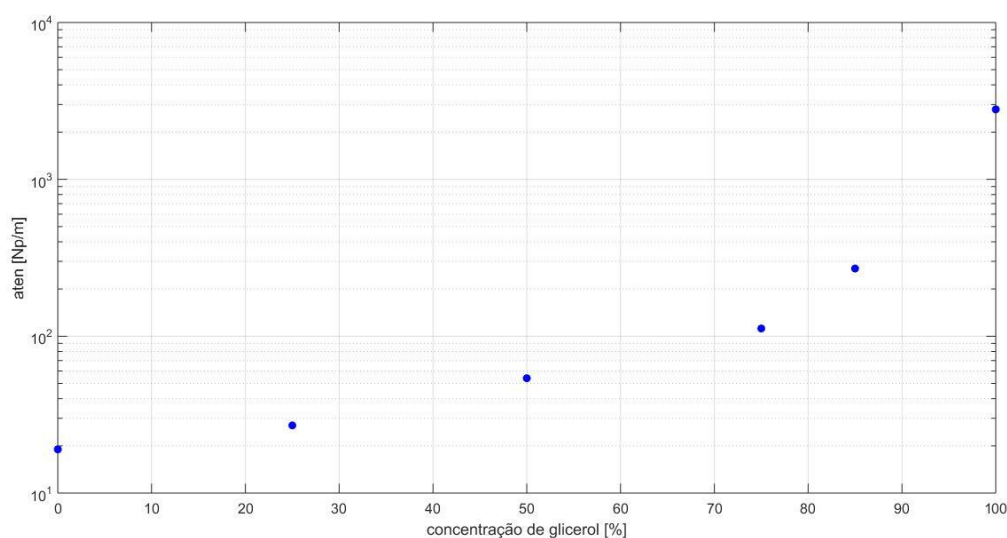
Tabela 1 – Valores de velocidade de propagação e coeficiente de atenuação de amostras de diferentes concentrações de GA para a frequência de 25 MHz.

| Concentração<br>glicerol/água (%) | Velocidade de<br>propagação (m/s) | Coeficiente de<br>atenuação (Np/m) |
|-----------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|
| 25/75                             | 1561,00                           | 19,17                              |
| 50/50                             | 1740,00                           | 43,34                              |
| 75/25                             | 1843,00                           | 55,11                              |
| 85/15                             | 1892,00                           | 101,90                             |
| 100/0                             | 1923,00                           | 1585,00                            |

Fonte: Elaborado pelo autor.

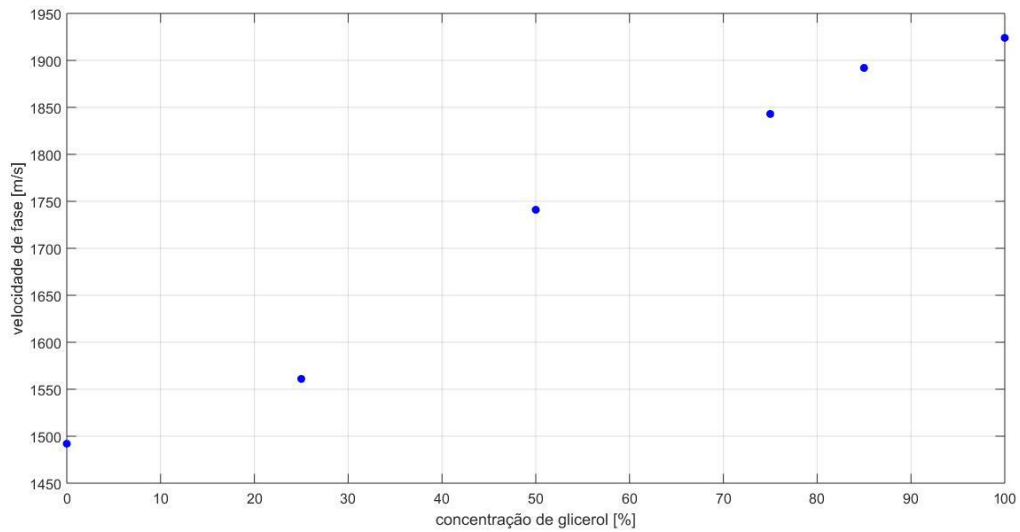
Como comparação, também se mostra no gráfico a velocidade de propagação e o coeficiente de atenuação da água destilada em função da frequência, observando-se que há uma relação de dependência entre estes parâmetros e a concentração do glicerol em água. Nota-se também que não há aumento com tendência linear da atenuação com a concentração, como apresenta a Figura 10. Já para a velocidade, observa-se na Figura 11, que essa dependência é quase linear. Esses dados podem ser usados para escolher a concentração para um coeficiente de atenuação e/ou velocidade desejados.

Figura 10 - Coeficiente de atenuação em 30 MHz em função da concentração de glicerol.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 11 - Velocidade de propagação em 30 MHz em função da concentração de glicerol.

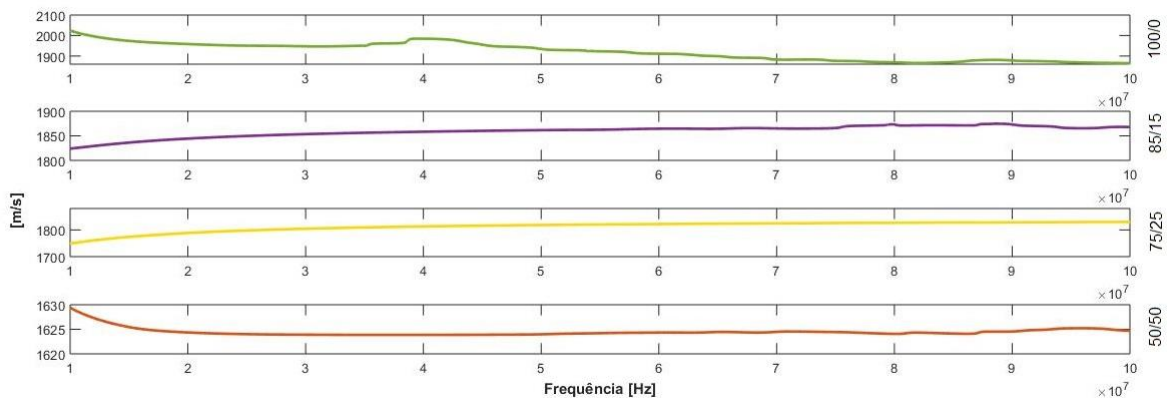


Fonte: Elaborado pelo autor.

#### 4.2 PROCESSAMENTO DE MISTURAS DE GLICERINA E ÁGUA DESTILADA COM APLICAÇÃO DE GANHO NO PULSADOR

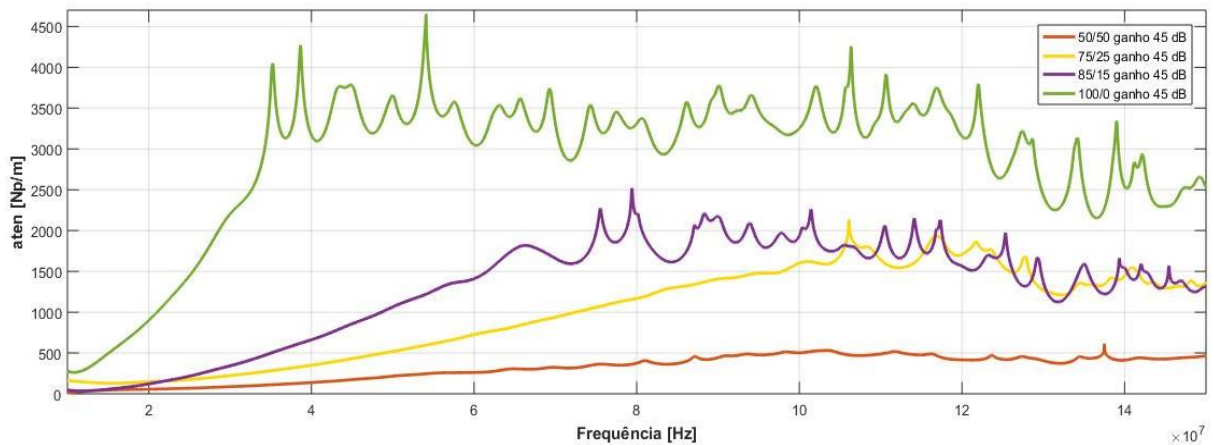
Variando-se o ganho do pulsador em recepção, de modo a aumentar a amplitude dos sinais, gerou-se nas Figuras 12 e 13 os gráficos de velocidade de fase e atenuação em função da frequência para as quatro maiores concentrações de GA.

Figura 12 - Velocidade de propagação em função da frequência para as misturas glicerol/água variando o ganho no pulsador.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 13 – Coeficiente de atenuação em função da frequência para as misturas glicerol/água variando o ganho no pulsador.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Assim como os resultados sem a aplicação do ganho, constata-se que o aumento da concentração de glicerol aumenta a atenuação e diminui a faixa de frequência, sendo este aumento não linear. Comparando-se os gráficos de velocidade de propagação das Figuras 8 e 10, percebe-se que, com a aplicação do ganho no pulsador a banda de frequência tornou-se mais ampla para a concentração 75/25 de GA, de forma a apresentar uma menor faixa de ruído para frequências mais altas, na faixa de 60 a 100 MHz, em relação à concentração inferior (50/50 GA), indo contra a tendência demonstrada na Figura 8. A Tabela 2 apresenta os valores de velocidade de propagação e coeficiente de atenuação para todas as concentrações de glicerol em água para a frequência de 25 MHz quando aplicado o ganho no pulsador.

Tabela 2 – Valores de velocidade de propagação e coeficiente de atenuação de amostras de diferentes concentrações de GA para a frequência de 25 MHz com aplicação de ganho no pulsador.

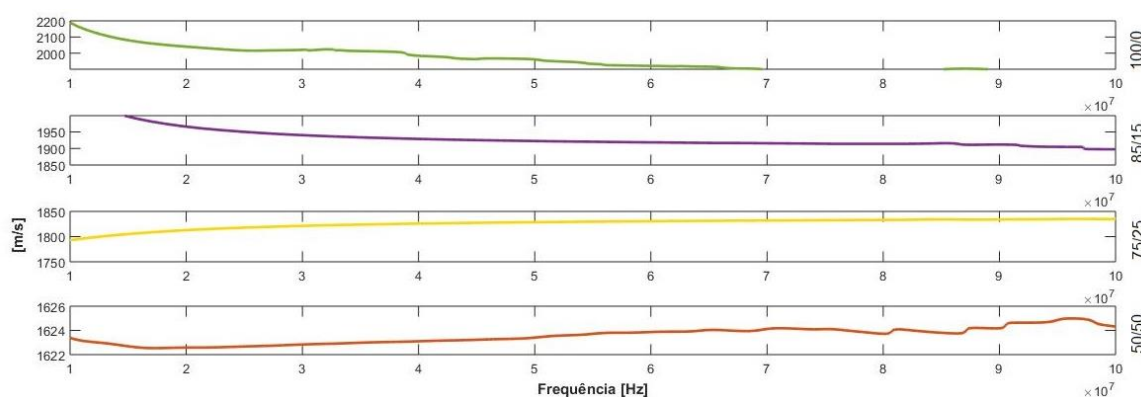
| Concentração glicerol/água (%) | Velocidade de propagação (m/s) | Coeficiente de atenuação (Np/m) |
|--------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|
| 50/50                          | 1624,00                        | 68,28                           |
| 75/25                          | 1798,00                        | 174,60                          |
| 85/15                          | 1850,00                        | 215,50                          |
| 100/0                          | 1950,00                        | 1445,00                         |

Fonte: Elaborado pelo autor.

#### 4.3 PROCESSAMENTO DE MISTURAS DE GLICERINA E ÁGUA DESTILADA COM APLICAÇÃO DE GANHO NA PLACA DE AQUISIÇÃO

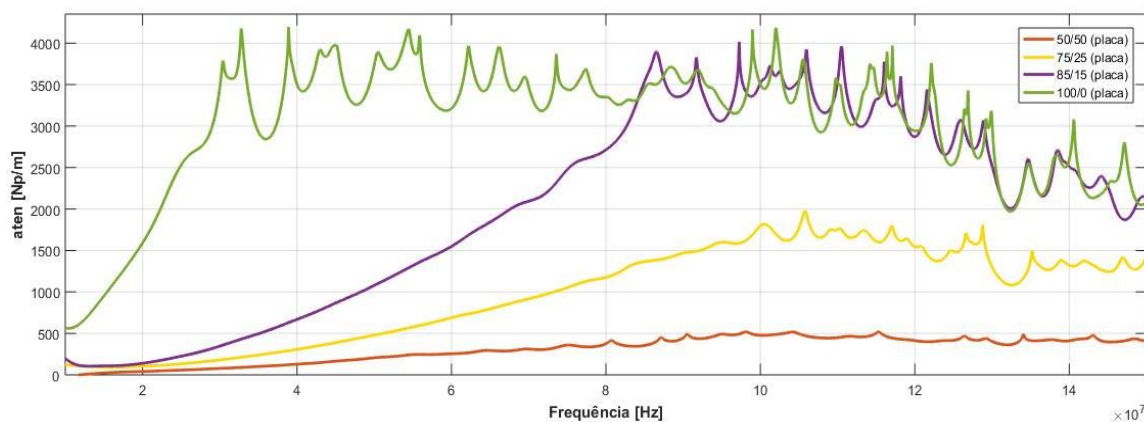
Na segunda etapa, variou-se ganho por meio da placa de aquisição gerando-se as Figuras 14 e 15 os gráficos de velocidade de fase e atenuação em função da frequência para as quatro maiores concentrações de GA.

Figura 14 - Velocidade de propagação em função da frequência para as misturas glicerol/água variando o ganho na placa de aquisição.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 15 – Coeficiente de atenuação em função da frequência para as misturas glicerol/água variando o ganho na placa de aquisição.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao analisar os gráficos de velocidade de propagação e coeficiente de atenuação em função da frequência para todas as medições de diferentes concentrações nas seções 4.1 e 4.2, verifica-se que em todos os casos as amostras medidas apresentam a tendência de aumento dos parâmetros conforme o aumento da concentração do glicerol em relação à água, demonstrando a clara dependência dos parâmetros em relação a este primeiro. Nota-se que, assim como os resultados gerados com a aplicação do ganho no pulsador, a banda de frequência tornou-se mais ampla para a concentração 75/25 de GA em relação à concentração 50/50. A Tabela 3 apresenta os valores de velocidade de propagação e coeficiente de atenuação para todas as concentrações de glicerol em água para a frequência de 25 MHz quando aplicado o ganho na placa de aquisição.

Tabela 3 – Valores de velocidade de propagação e coeficiente de atenuação de amostras de diferentes concentrações de GA para a frequência de 25 MHz com aplicação de ganho na placa de aquisição.

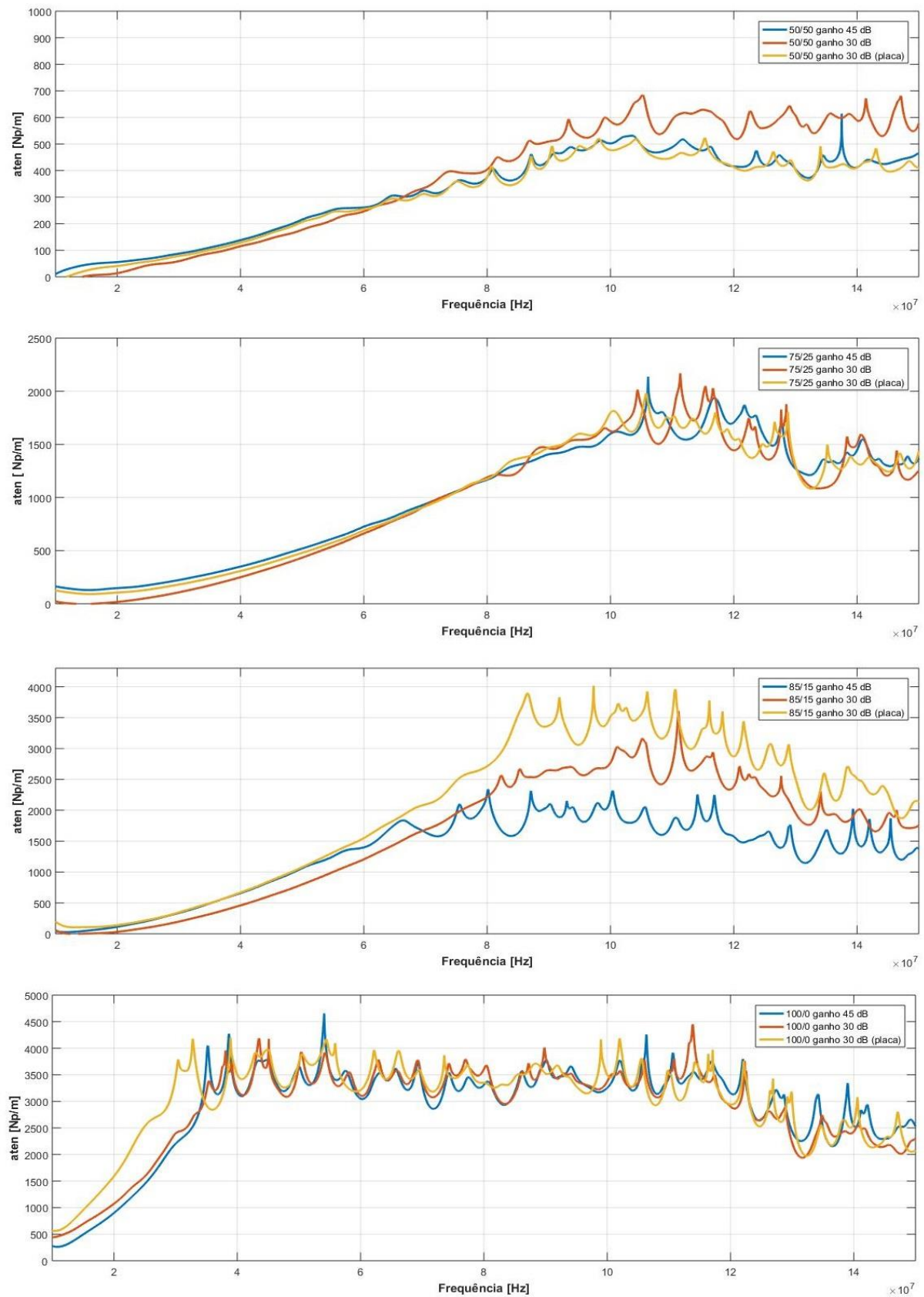
| Concentração<br>glicerol/água (%) | Velocidade de<br>propagação (m/s) | Coeficiente de<br>atenuação (Np/m) |
|-----------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|
| 50/50                             | 1623,00                           | 57,47                              |
| 75/25                             | 1818,00                           | 132,60                             |
| 85/15                             | 1950,00                           | 224,80                             |
| 100/0                             | 2017,00                           | 2529,00                            |

Fonte: Elaborado pelo autor.

#### 4.4 ANÁLISE DO PROCESSAMENTO DE MISTURAS DE GLICERINA E ÁGUA DESTILADA EM TODOS OS CASOS

Para analisar os resultados obtidos nas seções anteriores, na Figura 16, comparam-se as distinções entre os resultados de coeficiente de atenuação em função da frequência para as misturas de GA para todos os casos examinados neste trabalho.

Figura 16 - Coeficiente de atenuação em função da frequência para as misturas glicerol/água para todos os casos.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Por intermédio da análise dos gráficos apresentados na Figura 16, optou-se pela utilização das amostras de concentração de glicerol em água 50/50 com ganho de 30 dB e 75/25 com ganho de 45 dB para o emprego de líquidos de referência para a medição de líquidos de interesse mais atenuantes, como óleos, devido a maior banda de frequências apresentada pelos mesmos. Para esta seleção, considerou-se também o uso da amostra de GA de concentração 85/15 e ganho de 30 dB, entretanto, posteriormente a mesma gerou resultados quase idênticos à concentração 50/50 selecionada, considerando-se somente esta última em alguns resultados seguintes.

Observando-se a Figura 16, nota-se que, em alguns casos, principalmente para a concentração de 85/15 GA, com a aplicação do ganho no pulsador, obtiveram-se resultados heterogêneos, uma vez que apresentou ruídos na faixa de frequências entre 60 e 80 MHz, esse comportamento pode significar que houve algum erro sistemático durante o procedimento experimental, demonstrando também, que o ganho efetivamente fornecido pelo receptor não corresponde ao valor nominal (neste caso um aumento de 15 dB ou 5,62 vezes). Entretanto, com uma maior amplitude do sinal recebido, para as amostras de GA de concentração 75/25, a aplicação do ganho resultou em um sinal menos ruidoso, atuando-se na banda de frequências mais elevadas, entre 60 e 95 MHz.

Visando comparar os dados de velocidade de propagação e coeficiente de atenuação para a frequência de 25 MHz, obtidos em todos os casos anteriores, gerou-se a Tabela 4, 5 e 6, apresentando-se o erro percentual relativo, calculado em (40), entre os valores dos parâmetros determinados, e o erro percentual absoluto médio (MAPE), em (41), que prevê a média da diferença entre o valor de referência e o medido do sistema de forma geral. Para verificar o distanciamento entre os valores em forma percentual, consideraram-se como medida de referência os dados relativos à medição sem aplicação do ganho, para a comparação com os valores medidos com aplicação de ganho; enquanto que, para comparação entre os dados medidos com aplicação de ganho no pulsador e na placa de aquisição, considerou-se o primeiro como valor de referência.

$$E\% = \frac{|V_{MED} - V_{REF}|}{V_{REF}} \cdot 100 \quad (40).$$

Sendo:

$V_{MED}$  = Valor medido;

$V_{REF}$  = Valor de referência.

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \left| \frac{V_{MEDt} - V_{REFt}}{V_{REFt}} \right| \quad (41).$$

Sendo:

$n$  = Número total de concentrações;

$V_{MEDt}$  = Valor medido da concentração  $t$ ;

$V_{REFt}$  = Valor de referência da concentração  $t$ .

Tabela 4 – Erro percentual relativo e absoluto médio entre os parâmetros medidos com ganho de 30 dB e ganho no pulsador em 45 dB para frequência de 25 MHz.

| Concentração glicerol/água (%) | E% Velocidade de propagação (%) | E% Coeficiente de atenuação (%) | MAPE Velocidade de propagação (%) | MAPE Coeficiente de atenuação (%) |
|--------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| 50/50                          | 6,67                            | 57,54                           | 2,55                              | 78,93                             |
| 75/25                          | 2,44                            | 216,82                          |                                   |                                   |
| 85/15                          | 2,22                            | 111,48                          |                                   |                                   |
| 100/0                          | 1,40                            | 8,83                            |                                   |                                   |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 5 – Erro percentual relativo e absoluto médio entre os parâmetros medidos com ganho de 30 dB e ganho na placa em 30 dB para frequência de 25 MHz.

| Concentração glicerol/água (%) | E% Velocidade de propagação (%) | E% Coeficiente de atenuação (%) | MAPE Velocidade de propagação (%) | MAPE Coeficiente de atenuação (%) |
|--------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| 50/50                          | 6,72                            | 32,60                           | 3,21                              | 70,67                             |
| 75/25                          | 1,36                            | 140,61                          |                                   |                                   |
| 85/15                          | 3,07                            | 120,61                          |                                   |                                   |
| 100/0                          | 4,89                            | 59,56                           |                                   |                                   |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 6 – Erro percentual relativo e absoluto médio entre os parâmetros medidos com ganho no pulsador em 45 dB e ganho na placa em 30 dB para frequência de 25 MHz.

| <b>Concentração glicerol/água (%)</b> | <b>E% Velocidade de propagação (%)</b> | <b>E% Coeficiente de atenuação (%)</b> | <b>MAPE Velocidade de propagação (%)</b> | <b>MAPE Coeficiente de atenuação (%)</b> |
|---------------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------|------------------------------------------|------------------------------------------|
| 50/50                                 | 0,06                                   | 15,83                                  | 2,00                                     | 23,84                                    |
| 75/25                                 | 1,11                                   | 24,05                                  |                                          |                                          |
| 85/15                                 | 5,40                                   | 4,31                                   |                                          |                                          |
| 100/0                                 | 3,43                                   | 75,02                                  |                                          |                                          |

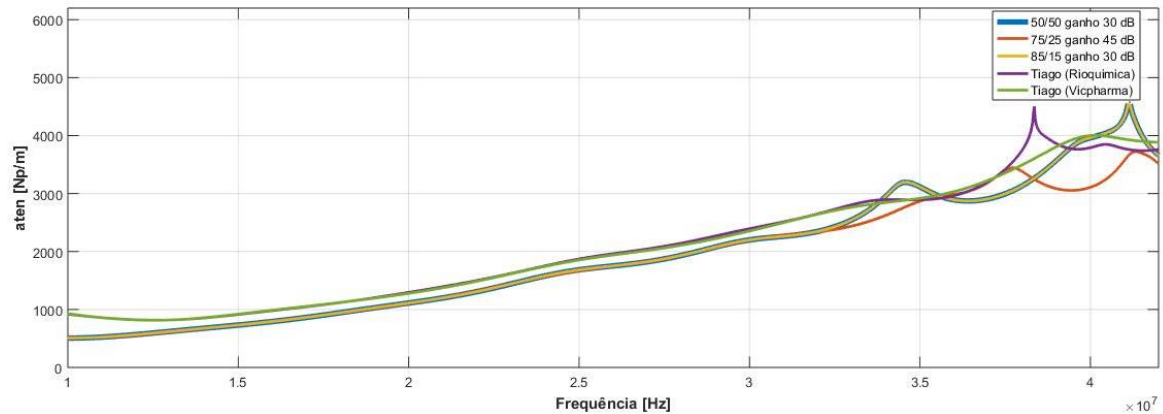
Fonte: Elaborado pelo autor.

Analisando-se as Tabelas 4 e 5, observa-se que para a frequência de 25 MHz, de forma geral, os resultados de coeficiente de atenuação divergem de forma significativa, demonstrando a possibilidade do ganho efetivamente fornecido pelo receptor não corresponder ao valor nominal. Por outro lado, para a frequência selecionada, os dados de velocidade de propagação em todas as concentrações de GA não se diferem significativamente com a mudança do modo de processamento. Nota-se também, que há maior similaridade entre os parâmetros medidos para os dois casos de ganho (pulsador e placa de aquisição).

#### 4.5 MEDIÇÃO DE AMOSTRAS DE ÓLEO

A Figura 17 apresenta a comparação entre o coeficiente de atenuação em função da frequência para o óleo de rícino utilizando-se misturas de GA como referência e o obtido por Tiago (2019) que utiliza água destilada como referência.

Figura 17 - Coeficiente de atenuação em função da frequência para óleo de rícino utilizando-se diferentes concentrações de GA e água destilada como referência (cubeta 2 mm).

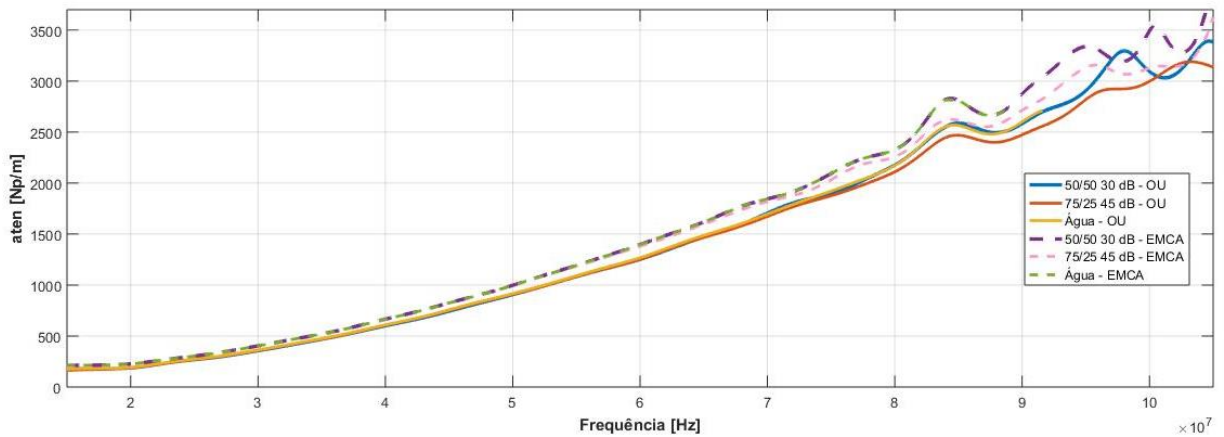


Fonte: Elaborado pelo autor.

Analisando as curvas de atenuação, verifica-se que não há grande variação quando se utilizam diferentes líquidos de referência, em termos de redução do ruído. No gráfico também se mostra a curva obtida por Tiago (2019) utilizando água destilada como referência, mas à temperatura de 23°C (25°C neste trabalho). Nota-se que as curvas obtidas neste trabalho resultaram em um pequeno aumento da banda para frequências baixas, iniciando-se agora em 10 MHz. No entanto, não ocorreu aumento significativo da banda para frequências altas, isto devido ao fato que a largura de banda do sinal do óleo de rícino está limitando essa faixa. Ressalta-se que possíveis fontes de variação podem ser oriundas da amostra, pois trata-se de um óleo que não possui uma elevada padronização em termos da composição.

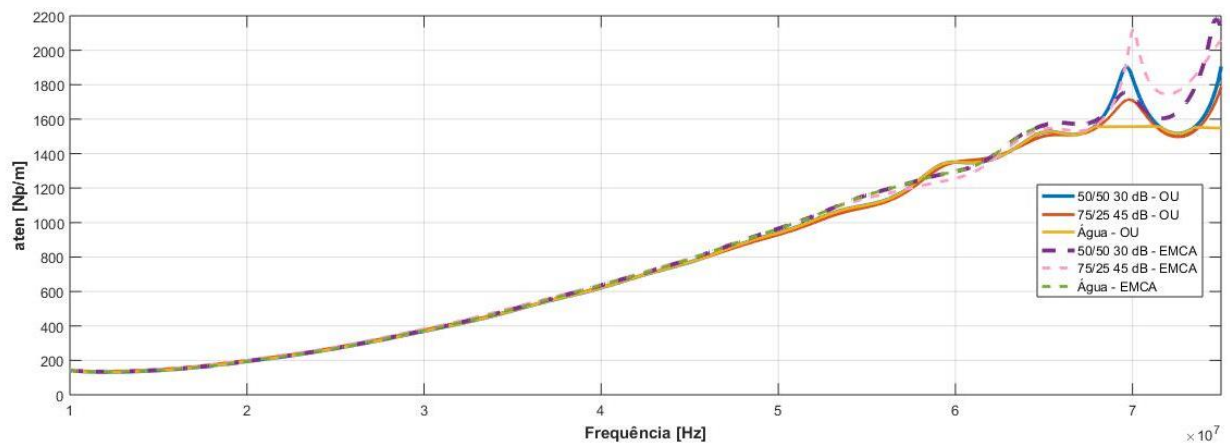
As Figura 18 e 19 apresentam o coeficiente de atenuação em função da frequência para o óleo de semente de uva (OU) e EMCA plus, utilizando-se as cubeta de 2mm e 4mm respectivamente, variando entre GA 50/50 com ganho 30 dB, GA 75/25 com ganho 45 dB e água destilada como líquido de referência.

Figura 18 - Coeficiente de atenuação em função da frequência para óleo de semente de uva e EMCA plus utilizando-se GA 50/50 com ganho 30 dB, GA 75/25 com ganho 45 dB e água destilada como referência (cubeta 2mm).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 19 - Coeficiente de atenuação em função da frequência para óleo de semente de uva e EMCA plus utilizando-se GA 50/50 com ganho 30 dB, GA 75/25 com ganho 45 dB e água destilada como referência (cubeta 4mm).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Observando-se o comportamento descrito pelos gráficos das Figuras 18 e 19, verifica-se que não houve mudanças significativas nos valores do coeficiente de atenuação e banda de trabalho através do uso de GA 50/50 e GA 75/25 (ganho 45 dB) como líquido de referência, uma vez que as curvas para um mesmo óleo e cubeta variando apenas a referência estão quase sobrepostas. Para demonstrar a similaridade entre os valores do coeficiente de atenuação obtido para todos os casos

demonstrados nas Figuras 18 e 19, gerou-se as Tabela 7 e 8, referentes as cubetas de 2mm e 4mm respectivamente, contento o erro percentual relativo entre os valores do coeficiente de atenuação dos óleos quando utilizado GA 50/50 e GA 75/25 (ganho 45 dB) comparando-se com o caso da água destilada como líquido de referência (LR), para a frequência de 50 MHz.

Tabela 7 - Erro percentual relativo entre o coeficiente de atenuação dos óleos utilizado diferentes amostras de líquido de referência para a frequência de 50 MHz (cubeta 2mm).

| Líquido de referência   | Coeficiente de atenuação (Np/m) - OU | Coeficiente de atenuação (Np/m) - EMCA plus | E% (OU) | E% (EMCA) |
|-------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------------|---------|-----------|
| Água destilada          | 916,00                               | 997,60                                      | 0%      | 0%        |
| GA 50/50<br>ganho 30 dB | 907,20                               | 997,60                                      | 0,96%   | 0%        |
| GA 75/25<br>ganho 45 dB | 909,00                               | 993,30                                      | 0,76%   | 0,43%     |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 8 - Erro percentual relativo entre o coeficiente de atenuação dos óleos utilizado diferentes amostras de líquido de referência para a frequência de 50 MHz (cubeta 4mm).

| Líquido de referência   | Coeficiente de atenuação (Np/m) - OU | Coeficiente de atenuação (Np/m) - EMCA plus | E% (OU) | E% (EMCA) |
|-------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------------|---------|-----------|
| Água destilada          | 940,00                               | 964,50                                      | 0%      | 0%        |
| GA 50/50<br>ganho 30 dB | 940,00                               | 964,50                                      | 0%      | 0%        |
| GA 75/25<br>ganho 45 dB | 929,10                               | 963,20                                      | 1,16%   | 0,13%     |

Fonte: Elaborado pelo autor.

## 5 CONCLUSÃO

Considerando-se todos os resultados obtidos referentes às diferentes concentrações da mistura glicerina/água e óleos de rícino, semente de uva e EMCA plus, pode-se aferir que a utilização de diferentes cubetas interfere nas respostas, tendo neste caso uma precisão maior para os resultados relativos às cubetas de 4 mm e 10 mm sem a mudança do ganho em recepção. Observou-se também que o uso da ferramenta ganho para o pulsador e placa de aquisição não implicou na melhora significativa da qualidade do resultado. O escopo principal do projeto foi executado, verificando-se a eficácia do uso de misturas de GA com diferentes concentrações como líquido de referência para medição de amostras mais atenuantes, concluindo-se que para os dados de atenuação o resultado é semelhante ao uso de água destilada, ou seja, a aplicação é tão viável quanto, podendo trazer melhoras em poucos casos selecionados.

Ao final deste trabalho, foi possível a compreensão de conceitos acústicos, assim como parte dos princípios envolvidos em processamento digital de sinais, além de agregar ferramentas que auxiliam na formação técnico-científica como o uso do software Matlab e entendimento da metodologia científica. Pensando-se em possíveis trabalhos futuros recomenda-se a efetivação do procedimento para outras temperaturas, além da idealização de projetos que auxiliem o processo de alinhamento das cubetas no sistema, sendo uma das principais complicações no processo de calibração e medição. Outro trabalho possível é a variação do ganho de entrada da placa de aquisição, com o intuito de reduzir o ruído de quantização na aquisição.

## REFERÊNCIAS

- BAESSO, R. M., COSTA-FELIX, R. P. B., MILORO, P. & ZEQUIRI, B. (2019). **Ultrasonic parameter measurement as a means of assessing the quality of biodiesel production**, Fuel 241: 155–163.
- BEATRIZ, A., ARAUJO, Y. J. K. & LIMA, D. P. (2011). **Glicerol: um breve histórico e aplicação em sínteses estereosseletivas**, Química Nova 34(2): 306 – 319.
- BILANIUK, N. & WONG, G. S. K. (1993). **Speed of sound in pure water as a function of temperature**, The Journal of the Acoustical Society of America 93(3): 1609–1612.
- CHEEKE, J. **Fundamentals and applications of ultrasonic waves**. Boca Raton, 2002.
- DUKHIN, A. & GOETZ, P. J. (2010). **Characterization of liquids, nano- and microparticulates, and porous bodies using ultrasound**, Elsevier.
- ELVIRA, L., RODRÍGUEZ, J. & LYNNWORTH, L. (2009). **Sound speed and density characterization of milk adulterated with melamine**, The Journal of the Acoustical Society of America 125(5): 177–182
- FERGUSON, F. A. A.; GUPTILL, E. W.; MACDONALD, A. D. **Velocity of Sound in Glycerol**. *The Journal Of The Acoustical Society Of America*, [S.L.], v. 26, n. 1, p. 67-69, 1 jan. 1954. Acoustical Society of America (ASA). <http://dx.doi.org/10.1121/1.1907292>.
- FIGUEIREDO, M. K., ALVARENGA, A. V. & COSTA-FÉLIX, R. P. (2017). **Ultrasonic attenuation and sound velocity assessment for mixtures of gasoline and organic compounds**, Fuel 191: 170–175.  
URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2016.11.076>
- HIGUTI, R. T. & ADAMOWSKI, J. C. (2002). **Ultrasonic densitometer using a multiple reflection technique**, IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control 49(9): 1260–1268.
- KAATZE, U., EGGERS, F. & LAUTSCHAM, K. (2008). **Ultrasonic velocity measurements in liquids with high resolution - techniques, selected applications and perspectives**, Measurement Science and Technology 19: 062001–062021.
- POVEY, M. J. W. (1997). **Ultrasonic Techniques for Fluids Characterization**, Academic Press, San Diego.
- SCHOPENHAUER, A. **Parerga e Paralipomena**. Trad. M. L. M. O. Cacciola. SP: Nova Cultural. 1988. (Col. Os Pensadores)
- SILVA, CARLOS ADRIANO MOREIRA DA. **Desenvolvimento de um sistema computacional e experimental para caracterização de emulsões por meio da**

**técnica de espectroscopia ultrassônica.** 2020. 277 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2020.

TIAGO, M. M. (2018). **Desenvolvimento de uma célula para medição de propriedades de líquidos por ultrassom com manipulação de amostras através de cubetas**, PhD thesis, FEIS - UNESP - Universidade Estadual Paulista.

TIAGO, M. M., HIGUTI, R. T., SEGURA, L. E., KITANO, C., ASSUNÇÃO, E. & OLIVEIRA, S. L. (2019). **Versatile ultrasonic spectrometer for liquids with practical sample handling by using standard cuvettes**, IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control 66(1): 109–118.