



Universidade Federal de Ouro Preto
Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas
Departamento de Engenharia Elétrica



Trabalho de Conclusão de Curso

Estudo de técnicas para medição da velocidade de propagação do som em líquidos

Ygor Luccianni Souza e Costa

João Monlevade, MG
2022

Ygor Luccianni Souza e Costa

**Estudo de técnicas para medição da velocidade
de propagação do som em líquidos**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos
requisitos para obtenção do Título de Bacharel em
Engenharia Elétrica pelo Instituto de Ciências Exatas
e Aplicadas da Universidade Federal de Ouro Preto.
Orientador: Prof. Marcelo Moreira Tiago

Universidade Federal de Ouro Preto
João Monlevade
2022

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

C837e Costa, Ygor Luccianni Souza e.
Estudo de técnicas para medição da velocidade de propagação do som em líquidos. [manuscrito] / Ygor Luccianni Souza e Costa. - 2022. 55 f.: il.: , gráf., tab..

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Moreira Tiago.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas. Graduação em Engenharia Elétrica .

1. Instrumentação. 2. Medição. 3. Propagação - Som - Líquidos. 4. Transdutores. 5. Transdutores ultrassônicos. 6. Ultrassom. I. Tiago, Marcelo Moreira. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 681.2

Bibliotecário(a) Responsável: Flavia Reis - CRB6-2431



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
REITORIA
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS E APLICADAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELETRICA



FOLHA DE APROVAÇÃO

Ygor Luccianni Souza e Costa

Estudo de técnicas para medição da velocidade de propagação do som em líquidos

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Elétrica

Aprovada em 26 de maio de 2022

Membros da banca

Dr. Marcelo Moreira Tiago - Orientador - Universidade Federal de Ouro Preto
Dra. Sarah Negreiros de Carvalho Leite - Universidade Federal de Ouro Preto
Dra. Wendy Yadira Eras Herrera - Universidade Federal de Ouro Preto

Marcelo Moreira Tiago, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 09/06/2022



Documento assinado eletronicamente por **Marcelo Moreira Tiago, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 09/06/2022, às 17:25, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0342407** e o código CRC **8B4E4F8F**.

Referência: Caso responda este documento, indicar expressamente o Processo nº 23109.007609/2022-11

SEI nº 0342407

R. Diogo de Vasconcelos, 122, - Bairro Pilar Ouro Preto/MG, CEP 35400-000
Telefone: (31)3808-0818 - www.ufop.br

Agradecimentos

Agradeço a Deus, força criadora universal, por permitir que este momento chegasse.

À minha mãe agradeço de corpo e alma, por ter me feito quem sou, por me ensinar e educar, por me amar, incentivar e sempre acreditar em mim. Obrigado mãe!

Aos meus familiares, pelo apoio cotidiano e conselhos nos momentos difíceis.

Ao meu orientador, Professor Doutor Marcelo Moreira Tiago, que com conhecimento, empenho e paciência contribuiu para a realização deste trabalho. Obrigado por todo apoio Marcelo!

Agradeço também aos professores e técnicos dos laboratórios da Universidade Federal de Ouro Preto que possibilitaram minha formação acadêmica.

Resumo

Este trabalho apresenta um estudo relacionando diferentes técnicas de medição ultrassônica da velocidade de propagação do som em líquidos. A análise levou em consideração as diferenças entre métodos utilizados na literatura para calcular as velocidades de fase e de grupo em meios com e sem dispersão. Além disso, foram avaliados os efeitos da relação sinal-ruído (SNR, do inglês *Signal-to-Noise Ratio*) e da largura de banda dos sinais envolvendo diferentes métodos de cálculo. Inicialmente, ensaios foram realizados usando como base sinais sintéticos em MatLab, onde os efeitos da dispersão não foram adicionados. Testes iniciais mostraram que os métodos baseados nas técnicas de correlação cruzada e fase espectral são mais promissores do que os métodos que utilizam apenas valores de pico ou cruzamento com zeros. Após a etapa de simulação das técnicas com sinais sintéticos, foram utilizados dados reais obtidos a partir de um modelo de um sistema de medição ultrassônico operando no modo transmissão-recepção para calcular a velocidade de propagação do som em misturas de água e etanol. Técnicas de medição da velocidade de propagação do som em líquidos, como fase espectral e correlação cruzada, foram usadas variando-se a concentração de água e etanol das amostras.

Palavras-chave: Ultrassom, Velocidade de Propagação do Som, Fase Espectral, Correlação Cruzada, Transdutores.

Abstract

This work presents a study relating different techniques of ultrasonic measurement of the speed of sound propagation in liquids. The analysis took into account the differences between methods used in the literature to calculate phase and group velocities in media with and without dispersion. In addition, the effects of the relationship signal-to-noise ratio (SNR) and the bandwidth of the signals involving different calculation methods. Initially, tests were carried out using as a basis synthetic signals in MatLab, where the effects of dispersion were not added. Initial tests showed that methods based on cross-correlation and spectral phase techniques are more promising than methods that use only peak or zero crossing values. After the simulation stage of the techniques with synthetic signals, real data obtained from a model of a system of ultrasonic measurement operating in transmit-receive mode to calculate speed of sound propagation in mixtures of water and ethanol. Speed measurement techniques of sound propagation in liquids, such as spectral phase and cross correlation, were used varying the concentration of water and ethanol in the samples.

Keywords: Ultrasound, Sound Propagation Velocity, Spectral Phase, Cross-Correlation, Transducers.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Força de compressão em uma barra linear elástica.	8
Figura 2 – Propagação de uma onda transversal por uma corda.	9
Figura 3 – Transdutores ultrassônicos de contato e imersão.	10
Figura 4 – Propagação de uma onda acústica em meios distintos.	13
Figura 5 – Coeficiente de transmissão de uma onda em uma propagação perpendicular ao meio.	13
Figura 6 – Medição por onda contínua.	15
Figura 7 – Picos de magnitude da impedância.	16
Figura 8 – Medição por onda pulsada - método pulso-eco.	17
Figura 9 – Medição por onda pulsada - método transmissão e recepção.	18
Figura 10 – Método de medição por cruzamento com o zero.	21
Figura 11 – Método de Detecção de Pico.	22
Figura 12 – Método de Pico da Envolvória.	22
Figura 13 – Método Fase Espectral.	24
Figura 14 – Câmara de medição.	27
Figura 15 – Pulsador-receptor DPR500.	29
Figura 16 – Sistema de medição.	31
Figura 17 – Sinais de Referência adquiridos durante o processo de calibração com água deionizada.	32
Figura 18 – Sinais obtidos após o processo de medição de misturas de água em etanol, considerando amostras com concentração de 80% (w/w).	33
Figura 19 – Sinal Simulado.	36
Figura 20 – Sinais Simulados Defasados.	37
Figura 21 – Medição usando valores de pico dos sinais.	37
Figura 22 – Medição usando valores de picos das envoltórias dos sinais.	38
Figura 23 – Medição de pico da envoltória com ruídos.	38
Figura 24 – Forma de onda obtida após o cálculo da correlação cruzada dos sinais.	39
Figura 25 – Fase dos sinais de referência e medido.	40
Figura 26 – Sinais utilizados para o cálculo de velocidade de propagação do som, representados nos domínios do tempo e da frequência.	41
Figura 27 – Espectros dos sinais de referência e medido para uma mistura de água em etanol, com concentração de 80% (w/w).	42
Figura 28 – Resposta em frequência do filtro gaussiano com frequência central de 45 MHz e sinal filtrado.	43
Figura 29 – Velocidade de fase para uma amostra com concentração de 50% de etanol em água.	44

Figura 30 – Velocidade de Fase para amostras de água e etanol. Nas imagens, o valor de <i>bias</i> obtido após o cálculo da correlação cruzada foi adicionado aos valores medidos.	45
Figura 31 – Velocidade de Grupo para amostras de água e etanol. Nas imagens, o valor de <i>bias</i> obtido após o cálculo da correlação cruzada foi adicionado aos valores medidos.	46
Figura 32 – Velocidade de propagação medida e de referências em função da concentração de água e etanol a uma temperatura de 25°C.	47

Lista de tabelas

Tabela 1 – Valores de velocidade de fase obtidos a partir de misturas de água e etanol para frequência de 45 MHz.	44
Tabela 2 – Valores de velocidade de grupo obtidos a partir de misturas de água e etanol para frequência de 45 MHz.	45

Sumário

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Objetivos	4
1.2	Revisão Bibliográfica	4
1.3	Estrutura do Trabalho	6
2	REVISÃO TEÓRICA	8
2.1	Sistemas Acústicos	8
2.2	Sistemas de Excitação e Aquisição	11
2.3	Impedância Acústica, Coeficiente de Reflexão e Transmissão	12
2.4	Métodos de Medição	14
2.4.1	Método de Onda Contínua	15
2.4.2	Método de Onda Pulsada	16
2.5	Técnicas para Calcular a Velocidade de Propagação do Som	19
2.5.1	Método de Cruzamento com o Zero	20
2.5.2	Método de Detecção de Pico	20
2.5.3	Método da Correlação Cruzada	21
2.5.4	Método da Fase Espectral	23
2.6	Considerações Parciais	25
3	METODOLOGIA	26
3.1	Sistema Acústico	26
3.2	Sistema de Excitação e Aquisição	28
3.3	Preparação das Amostras	29
3.4	Calibração	30
3.5	Medição	32
3.6	Considerações Parciais	33
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	35
4.1	Simulação	35
4.1.1	Método de Detecção de Pico	36
4.1.2	Método de Correlação Cruzada	39
4.1.3	Método de Fase Espectral	40
4.2	Medições realizadas com misturas de água e etanol	41
4.2.1	Comparação entre resultados obtidos a partir da utilização das duas técnicas	43
4.3	Considerações Parciais	47

5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	49
5.1	Sugestões Para Trabalhos Futuros	49
	REFERÊNCIAS	51
	ANEXO A – SINAL TÍPICO GERADO PELO PULSADOR DPR- 500 HP-R2	53
	ANEXO B – FICHAS DE CALIBRAÇÃO DOS TRANSDUTORES	54

1 Introdução

O processo de caracterização de líquidos em ambiente industrial é frequentemente utilizado quando se deseja analisar parâmetros relativos à qualidade do processo de produção. Para isso, sistemas de medição são empregados para monitorar grandezas físico-químicas usadas como parâmetros para esse processo de avaliação.

Como exemplo, pode-se citar as grandes indústrias produtoras de biocombustíveis, que utilizam diferentes tipos de sistemas de medição para monitorar a qualidade dos produtos e identificar adulterações em todas as etapas do processo industrial, e as indústrias alimentícias (como laticínios e grandes produtores de suco, por exemplo), que utilizam esse tipo de caracterização para identificar contaminações ao longo do processo de produção.

Vários tipos de sistemas de medição, com princípios de funcionamento distintos, podem ser utilizados ao longo desse processo. Como exemplo, pode-se citar os densímetros, cromatógrafos, viscosímetros, espectrofotômetros, entre outros.

Métodos cromatográficos e técnicas de espectroscopia óptica são amplamente utilizados na caracterização de materiais em diferentes estados da matéria, porém, devido à alta complexidade e custo desses sistemas, cada vez mais, métodos alternativos vêm ganhando espaço no meio metrológico.

Nesse contexto, sistemas de medição acústicos vem ganhando espaço nas indústrias ao longo dos últimos anos. Esses sistemas operam com transdutores ultrassônicos, e podem ser utilizados para medir parâmetros acústicos dos líquidos que se deseja caracterizar, tais como velocidade de propagação do som e atenuação acústicas.

Uma das vantagens de se utilizar sistemas de medições ultrassônicos nesse processo de caracterização é que eles podem ser implementados de forma não invasiva, não destrutiva e podem ser utilizados para medir propriedades físicas de forma direta ou indireta. De forma direta, como já mencionado, pode-se medir a velocidade de propagação e atenuação do som. De forma indireta, pode-se obter parâmetros como a densidade, viscosidade, compressibilidade e concentração, entre outros. Além disso, essa técnica pode ser utilizada para caracterizar emulsões opacas, não sendo necessária qualquer preparação anterior da amostra.

Ao se utilizar sistemas de medição acústicos, um parâmetro importante que deve ser levado em consideração é a temperatura, que afeta de forma direta os parâmetros acústicos. Como exemplo, pode-se citar a variação da velocidade de propagação (BILANIUK; WONG, 1993) e a variação da atenuação (HOLMES; PARKER; POVEY, 2011) acústica em amostras de água destilada em função da temperatura. Um outro ponto a ser considerado é que sistemas de medição acústicos sofrem forte influência de bolhas de ar, que podem alterar os resultados das análises (CHANAMAI; MCCLEMENTS, 1998).

O trabalho realizado por Figueiredo et al. (2012) propõe um sistema de monitoramento para avaliar a qualidade de biocombustíveis. O objetivo desse estudo é caracterizar o etanol hidratado por meio de parâmetros físicos, como a velocidade de propagação e atenuação do som. O sistema proposto utiliza dois transdutores operando no modo transmissão e recepção, com frequência central de 15 MHz. Um gerador de sinais foi utilizado para excitar o transdutor emissor, e o sinal recebido pelo transdutor receptor foi adquirido por meio de um osciloscópio digital. O procedimento experimental foi realizado num ambiente com temperatura controlada, onde os autores utilizaram um termômetro digital para monitorar a temperatura das amostras, que permaneceu entre 22°C e 23°C. Após uma calibração inicial usando água destilada, os autores relatam que foi possível medir velocidades de misturas de água e etanol com diferentes concentrações, com uma incerteza média de 0,6 m/s.

Dukhin e Goetz (2002) monitoraram a deterioração do leite em função do teor de gordura por meio de técnicas ultrassônicas. Foram utilizados transdutores operando no modo transmissão e recepção num sistema com temperatura controlada, e um agitador magnético foi empregado para manter a homogeneidade da amostra em análise. Os autores mediram a velocidade do som através da amostra durante 10 horas, com intervalos de 1 minuto entre cada medição, e encontraram uma relação entre variação de velocidade e degradação de amostras de leite em função do tempo, para uma temperatura constante.

A medição da velocidade de propagação do som em óleos foi o foco do estudo desenvolvido por Javanaud e Rahalkar (1988). Nesse trabalho, foram caracterizadas amostras de óleo de cártamo, girassol, milho, soja, vegetal, amendoim e oliva, usando diferentes frequências (2, 6 e 10 MHz) e temperaturas (19,4°C, 22°C e 23,90°C). Ao final, os autores apresentaram medições com uma acurácia média de 0,3 m/s, e apresentam um modelo para relacionar velocidade, densidade e compressibilidade da mistura, podendo assim, estimar a composição química dos óleos em função dos parâmetros medidos.

A velocidade de propagação do som na água destilada é de grande importância para auxiliar no cálculo e calibração de diversos sistemas de medição. Esse foi o tema do trabalho apresentado por Bilaniuk e Wong (1993), que apresenta uma expressão algébrica para relacionar a velocidade de propagação do som na água em função da temperatura, com incertezas experimentais na ordem de 1,5 cm/s para uma faixa de temperaturas compreendida entre 0 e 100°C.

Como observado, uma parcela significativa de trabalhos utiliza a velocidade de propagação do som em função da temperatura como parâmetro para caracterizar as propriedades dos líquidos analisados. Dessa forma, medir corretamente essa velocidade é fundamental para garantir a qualidade do processo de caracterização.

Para calcular a velocidade de propagação do som, considera-se inicialmente que a distância da camada de líquido através da qual o som irá se propagar é conhecida. É possível operar esse sistema usando um transdutor (que atuará como emissor e recep-

tor) ou com um par de transdutores. Para determinar o tempo que o som leva para se propagar pelo meio (tempo de voo), pode-se adquirir os primeiros dois sinais recebidos pelo transdutor receptor e calcular a diferença de tempo entre eles ou pode-se realizar uma medida relativa, onde adquire-se inicialmente o primeiro sinal recebido usando um líquido de referência (por exemplo, água) e, posteriormente, adquire-se o primeiro sinal recebido ao se utilizar o líquido de interesse. A velocidade de propagação pode ser obtida relacionando-se a distância do caminho de propagação com o tempo de propagação medido.

Vários métodos diferentes podem ser usados para calcular os valores do tempo de voo a partir dos sinais acústicos adquiridos. Dentre os principais, pode-se destacar o método da correlação cruzada e o método da fase espectral.

O estudo desenvolvido por Hull, Kautz e Vary (1984) propõe três métodos de medição da velocidade de propagação do som através de um material sólido, onde os sinais emitidos pelo transdutor são de baixa potência ou possuem algum tipo de atenuação. Os autores comparam a eficiência de medição entre os métodos de sobreposição, decaimento de fase e correlação cruzada em materiais metálicos, realizadas utilizando transdutores piezelétricos operando em modo pulso-eco, com faixa de frequência de 5 a 50 MHz. O método de medição através da correlação cruzada apresentou resultados semelhantes aos outros dois métodos, entretanto, além de não depender de fatores arbitrários que são necessários nos outros dois, esse método apresentou uma melhor eficiência quando se trata de uma baixa relação sinal-ruído.

O trabalho desenvolvido por Khyam et al. (2017) utiliza o método da fase espectral para determinar a velocidade de propagação do som, visando minimizar erros que podem surgir ao se utilizar sinais com grande largura de banda. De acordo com os autores, o método de fase espectral permite determinar com grande precisão o tempo de atraso entre os sinais analisados e, com isso, obter a distância entre o transdutor transmissor e receptor.

O estudo de sistemas de medição e técnicas para determinação de valores precisos de velocidade de propagação motivaram o desenvolvimento deste trabalho, que propõe avaliar métodos de cálculos distintos, principalmente o método de correlação cruzada e fase espectral, para determinar a velocidade de propagação do som em líquidos.

Como exemplo de aplicação, serão analisadas amostras de água e etanol a diferentes concentrações, obtidas a partir de um sistema de medição acústico operando em modo transmissão recepção, com transdutores de 75 MHz e um sistema de controle térmico com erro de regime permanente de, aproximadamente, $0,01^{\circ}\text{C}$. Os resultados obtidos serão comparados a valores de referência, obtidos a partir de outros trabalhos previamente publicados.

1.1 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo geral o estudo de técnicas de medição por ultrassom de sinais para determinar a velocidade de propagação do som em líquidos. Os objetivos específicos são:

- Compreender as diferenças entre a velocidade de fase e velocidade de grupo;
- Determinar a velocidade de fase e grupo utilizando métodos de fase espectral e de correlação cruzada;
- Analisar os efeitos do bias e interpolações nos cálculos de velocidade utilizando a correlação cruzada;
- Analisar os efeitos dos saltos de fase durante os cálculos ao utilizar o método de fase espectral, discutindo métodos para correção destes efeitos.

1.2 Revisão Bibliográfica

No processo de caracterização dos líquidos, pode-se medir diversos parâmetros, como a densidade, viscosidade, velocidade de propagação, fase e atenuação. Esses parâmetros estão relacionados às propriedades físico-químicas dos materiais, podendo ser comprovadas por meio de experimentos em laboratório. Os métodos ultrassônicos utilizados para caracterizar fluidos consistem no uso da espectroscopia acústica e da espectroscopia eletroacústica, que relacionam propriedades como velocidade de propagação e atenuação com a frequência. De acordo com Dukhin e Goetz (2002), a espectroscopia acústica é mais simples devido ao envolvimento de apenas um campo de estresse mecânico.

A caracterização por espectroscopia acústica pode operar com métodos de medição distintos: por onda contínua (também chamado de método de ressonância) ou por onda pulsada. Em geral, utilizam-se os métodos de onda contínua para sistemas que operam com frequência elevadas, da ordem de centenas de MHz.

O estudo realizado por Chanamai e McClements (1998) utiliza o método de medição pulsado para determinar o coeficiente de atenuação ultrassônica dos óleos de soja, milho, amendoim e azeite. Para isso, foram empregados dois pares de transdutores, com o propósito de analisar as baixas e altas frequências. A partir das medições realizadas, os autores estimaram os coeficientes de atenuação para cada óleo, utilizando para isso uma expressão do tipo $\alpha = \alpha_0 \cdot f^n$, em que α representa o coeficiente de atenuação e f a frequência. Os valores de α_0 e n foram obtidos a partir de uma aproximação exponencial relacionando os valores de atenuação medidos em função da frequência. Para líquidos, os valores de n variam entre 1 e 2.

No trabalho apresentado por McClements e Povey (1988), por meio do método pulso-eco, foram medidas velocidades de propagação para diferentes óleos vegetais, mantendo a temperatura de medição constante em 70° C. Os autores utilizam duas equações para relacionar a velocidade do triglicerídeo com sua fórmula molecular e com as componentes triglicerídicas dos óleos. O estudo apresenta um conjunto de expressões que relacionam a velocidade de propagação com a composição química dos óleos, ressaltando que esse método poderia ser empregado para caracterizar misturas de diferentes óleos vegetais.

Kushibiki et al. (1995) desenvolveram o projeto de um sistema de medição acústico de banda larga (10 MHz a 500 MHz), capaz de medir velocidade e atenuação do som em líquidos. Após um processo de calibração com água destilada, foram realizados testes usando inicialmente líquidos de referência, como óleo de silicone e de rícino. Ao final, o sistema projetado foi ajustado para caracterizar tecidos biológicos, com testes feitos usando como base fígado bovino.

Coupland e McClements (1997) apresentam em seu trabalho uma compilação de diversos parâmetros referentes à óleos comestíveis (como densidade, velocidade, atenuação e viscosidade) encontrados na literatura. Os dados utilizados foram obtidos a partir de medições feitas a temperatura ambiente (20°C), e os autores apresentaram propostas de expressões empíricas para estimar a dependência desses parâmetros com a temperatura.

O trabalho desenvolvido por Kuo e Weng (1975) utiliza o método pulsado, numa faixa de frequência de 1,5 MHz a 60 MHz, para determinar a velocidade de propagação do som em óleos. Os autores desenvolveram um sistema que permite variar a temperatura dos líquidos dentro de uma faixa entre 5°C e 55°C, ajustada por um controlador digital. Os autores analisaram o comportamento da velocidade em função da temperatura de um óleo extraído de focas, e constataram que o aumento da velocidade de propagação do som é inversamente proporcional à temperatura e diretamente proporcional ao aumento da frequência.

Elvira et al. (2020) apresentam uma metodologia de cálculo para estimar os valores de velocidade de fase e de grupo a partir do método da fase espectral. No trabalho, os autores discutem o problema causado pelos saltos de fase, provenientes de falhas do algoritmo de *unwrap* utilizado para remover os saltos de fase antes do cálculo dos tempos de voo, e propõe um método que pode ser utilizado para corrigir esse problema. A metodologia de cálculo da velocidade de propagação do som também foi tema do trabalho desenvolvido por Marple (1999), que apresenta um método baseado na utilização da correlação cruzada para estimar os atrasos de fase e grupo de sinais discretos.

No ambiente industrial, os sistemas de medição por ultrassom são bastantes utilizados, principalmente na área de controle da qualidade de produção. Esses equipamentos possuem características desejáveis pela indústria como, por exemplo, a alta eficiência, rapidez na medição, baixo custo de aplicação e ensaios não destrutivos.

Dentre as principais empresas que atuam neste segmento, pode-se destacar por exemplo a Olympus, um dos principais fabricantes de transdutores ultrassônicos do mercado e que também oferece soluções para atender as necessidades de medição de espessuras de materiais, incluindo plásticos, borracha, metais, entre outros. Esses medidores de espessura também podem ser utilizados para aferir espessuras de tubulações industriais, permitindo detectar qualquer tipo de efeito corrosivo e não conformidade existente.

Para aplicações industriais envolvendo líquidos, utiliza-se técnicas de medição ultrassônica para identificar proporções e concentrações precisas de diversos compostos químicos. Pode-se citar como exemplos grandes indústrias produtoras de leite, iogurte, suco ou refrigerante, que precisam analisar e acompanhar a concentração de determinado componente durante a fabricação desses produtos.

Soluções para atender a esse tipo de demanda são fornecidas por algumas empresas destinadas a fabricação de instrumentos de medição portáteis e de bancada. Como exemplo, pode-se citar a Anton Paar, que oferece sistemas de medição que, por meio da medição de parâmetros como a velocidade de propagação e densidade, permitem monitorar a qualidade e identificar adulterações nos produtos.

A revisão bibliográfica realizada nesta seção mostra a importância de se medir corretamente os parâmetros acústicos, em especial a velocidade de propagação, para que seja possível caracterizar amostras de líquidos utilizadas nas mais diversas aplicações da indústria. Os efeitos da temperatura nesse tipo de análise são bastante relevantes, uma vez que, como já observado, a temperatura influencia diretamente nos valores de velocidade de propagação medidos.

Portanto, as análises levarão em consideração os efeitos da temperatura e frequência, além das diferenças entre a velocidade de fase e a velocidade de grupo, que são discutidas nos próximos capítulos. Ao final, espera-se que seja possível definir as vantagens e desvantagens de cada método, ressaltando as diferenças entre os valores que de fato são medidos nos dois casos.

1.3 Estrutura do Trabalho

Este trabalho foi dividido em cinco capítulos. O Capítulo inicial apresenta introdução, motivação e justificativas que levaram ao desenvolvimento deste trabalho. Além disso, destacam-se os principais objetivos propostos e apresenta-se uma revisão bibliográfica.

O Capítulo 2 apresenta uma revisão teórica, descrevendo os conceitos básicos relacionados às ondas acústicas e suas características e definindo alguns conceitos que serão utilizados ao longo do trabalho, como velocidade de propagação, impedância acústica, coeficiente de reflexão e transmissão. Nesse capítulo também são apresentados alguns sistemas de medição ultrassônicos, e descritos métodos de medição usando onda pulsada. Ao final, são apresentadas técnicas de processamento digital de sinais aplicadas para de-

terminar os valores de velocidade de fase e grupo, com destaque para os métodos da fase espectral e da correlação cruzada.

O Capítulo 3 apresenta a metodologia utilizada ao longo do trabalho. Inicialmente, descrevem-se as técnicas de simulação empregadas para validar os algoritmos propostos para cálculo dos tempos de voo. Em seguida, descreve-se o processo de preparação das amostras de água e etanol, o procedimento adotado durante a etapa de medição e as técnicas adotadas para calcular os tempos de voo.

O Capítulo 4 apresenta os principais resultados obtidos a partir da metodologia proposta. Uma comparação entre os resultados encontrados a partir de diferentes métodos de cálculo é apresentada, e os valores de velocidade medidos foram comparados a valores de referência obtidos na literatura.

Finalmente, no Capítulo 5, são apresentadas as considerações finais, indicando possíveis pontos que podem ser abordados para o desenvolvimento de trabalhos futuros.

2 Revisão Teórica

A caracterização de fluidos por meio de técnicas de medição acústica consiste na obtenção de parâmetros físico-químicos dos materiais em função da frequência do sinal acústico utilizado. Sinais ultrassônicos são ondas mecânicas com frequência superior a 20 kHz decorrentes de deformações do meio em que se propagam.

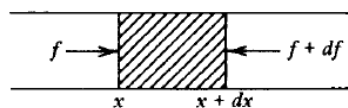
Este Capítulo descreve conceitos básicos sobre as ondas e sistemas de medição acústicos, bem como os métodos de operação desses sistemas para obtenção da velocidade de propagação do som em meios líquidos. Além disso, são descritos os modos de funcionamento e utilização dos transdutores nesses sistemas.

2.1 Sistemas Acústicos

De acordo com Kinsler et al. (2000), o termo acústico pode ser definido como a geração, transmissão e recepção de ondas vibracionais de energia que se propagam através da matéria. Dependendo da frequência dos sinais, essas ondas podem ser classificadas como infrassons (para frequências abaixo de 20 Hz), audíveis (para frequências entre 20 Hz e 20 kHz) ou ultrassons (para frequências superiores a 20 kHz).

As ondas acústicas também podem ser classificadas em função do sentido de propagação das mesmas em relação ao meio. Ondas longitudinais, também conhecidas por ondas de compressão, são caracterizadas pela oscilação de suas partículas paralelamente à direção de propagação da onda. Um exemplo de sistema físico que ilustra o comportamento desse tipo de onda pode ser observado na Figura 1, que apresenta uma barra linear elástica sendo tensionada após a aplicação de forças em suas extremidades.

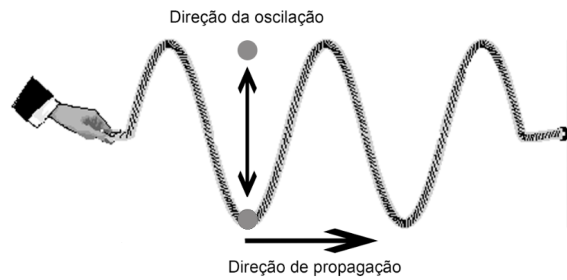
Figura 1 – Força de compressão em uma barra linear elástica.



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

Nas ondas transversais, também chamadas de ondas de cisalhamento, as oscilações das partículas ocorrem de forma perpendicular ao sentido de propagação da onda. Este fenômeno pode ser ilustrado por um sistema físico como o do exemplo apresentado na Figura 2. Nesse sistema, uma corda possui uma de suas extremidades fixadas a uma superfície, enquanto a outra extremidade é conectada a um oscilador, que movimenta a corda de forma perpendicular à direção de propagação da onda.

Figura 2 – Propagação de uma onda transversal por uma corda.



Fonte: do autor.

Uma característica importante das ondas transversais é que elas não se propagam com velocidade constante, diferentemente do que ocorre com as ondas longitudinais. Além disso, uma comparação entre os valores de velocidades de propagação de ondas longitudinais e transversais mostra que as vibrações geradas pelo oscilador (representado por uma mão na Figura 2) produzirão ondas transversais que se propagam pelo meio com uma velocidade mais baixa em comparação com a velocidade de propagação de uma onda longitudinal. Neste trabalho, são utilizados sistemas de medição ultrassônicos que funcionam com ondas longitudinais e operam com largura de banda entre 20 MHz e 100 MHz.

Para gerar as ondas mecânicas necessárias para caracterizar os materiais, são utilizados transdutores ultrassônicos. Os transdutores ultrassônicos são constituídos de materiais piezelétricos, e são responsáveis por converter um sinal de tensão numa onda mecânica, e vice-versa. Além disso, esses dispositivos possuem características pré-estabelecidas, como frequência de operação e níveis máximos de tensão suportados, que dependem das propriedades físicas das cerâmicas piezelétricas utilizadas.

Os transdutores podem ser excitados eletricamente através de dispositivos pulsadores, projetados para emitir pulsos estreitos de alta tensão (50 V a 400 V), ou por meio de geradores de sinais. Mais detalhes sobre o sistema de excitação serão descritos na próxima Seção. A Figura 3 apresenta imagens com três tipos diferentes de transdutores utilizados para caracterização de diferentes tipos de materiais.

Para aplicações que envolvem contato direto, pode-se utilizar transdutores de contato, que devem ser fixados ao meio que se deseja caracterizar. Esses transdutores são muito usados em aplicações envolvendo ensaios não destrutivos (END), onde deseja-se caracterizar um material sem provocar danos ao mesmo. Como exemplo, pode-se citar o processo de inspeção de tubulações de óleo e gás.

Mesmo com contato direto, é necessário garantir um bom acoplamento acústico entre transdutor e meio. Para isso, costuma-se utilizar materiais acoplantes, como água destilada, géis especiais ou óleos minerais, entre outros. Esse tipo de transdutor também pode ser utilizado para caracterizar líquidos, desde que as amostras de interesse sejam previamente armazenadas num recipiente ou estejam fluindo por uma tubulação.

Figura 3 – Transdutores ultrassônicos de contato e imersão.



(a) Transdutores de Contato.

(b) Transdutores de Imersão.

(c) Transdutor *Phased-Array* de 60 elementos.

Fonte: retirado de Olympus (2021).

Transdutores de imersão são projetados para operar em ambientes líquidos, possuindo uma camada de material de acoplamento (do inglês, *matching*) que ajuda no casamento de impedância acústica entre transdutor e líquido, aumentando a parcela de energia transmitida. Esse tipo de transdutor costuma ser utilizado em aplicações envolvendo caracterização de líquidos, e por trabalharem sob condição de imersão, podem ser fixados num recipiente e submersos pelo líquido de interesse, desde que os líquidos de interesse não sejam corrosivos ou danifiquem a camada de acoplamento ou o encapsulamento dos transdutores.

Os transdutores mencionados anteriormente podem operar a partir de diferentes configurações, sendo as mais comuns o modo transmissão/recepção e o modo pulso-eco. No modo transmissão/recepção, um transdutor irá emitir um sinal que se propagará pelo meio, e um segundo transdutor irá receber o sinal após a propagação. Em modo pulso-eco, o mesmo transdutor será utilizado para emitir e receber os sinais. Mais detalhes sobre essas configurações serão descritos posteriormente.

Há ainda uma terceira configuração envolvendo um conjunto de transdutores, chamada de *phased-array*. Nessa configuração, várias cerâmicas piezelétricas são conectadas de forma independente, permitindo que um sistema eletrônico possa controlar o processo de emissão e recepção de sinais. Esses dispositivos costumam ser usados em aplicações relacionadas à geração de imagens ultrassônicas, como detecção de falhas em estruturas ou aplicações médicas, por exemplo.

Neste trabalho, serão utilizados transdutores de contato, com frequência nominal de 75 MHz. Esses transdutores serão usados para caracterizar amostras de líquido arma-

zenadas numa cubeta de quartzo, e o acoplamento entre transdutor e cubeta será feito usando água destilada.

2.2 Sistemas de Excitação e Aquisição

Como mencionado anteriormente, pode-se excitar os transdutores ultrassônicos usando circuitos pulsadores ou geradores de sinais arbitrários. Esses equipamentos geram sinais elétricos que podem ser contínuos (sinais periódicos) ou pulsados (pulsos estreitos de tensão com amplitude e duração limitada), e que serão aplicados aos transdutores para que se possa controlar a intensidade e duração das ondas geradas.

Os pulsadores são usados para gerar pulsos estreitos com amplitude e largura variáveis, ajustados de acordo com a frequência central e limites de tensão de excitação do transdutor. A variação desses parâmetros é usada para aumentar ou reduzir a energia entregue ao transdutor que, após receber o sinal de excitação, irá emitir uma onda de pressão, com frequências variando dentro de uma banda específica definida pelas características do material piezoeletrico utilizado para fabricação do transdutor e pelas características do sinal elétrico de excitação aplicado.

Geradores de sinais programáveis podem ser configurados para gerar sinais com diferentes características, tais como sinais periódicos, como ondas senoidais, sinais pulsados de duração finita, como *bursts* com número de ciclos de senoide pré-definido, ou ainda sinais periódicos ou pulsados usando formas de onda arbitrárias, como sinais gaussianos ou sinais *chirp*. Esses sinais podem ser utilizados de forma direta, conectando o transdutor à saída do gerador de sinais, ou podem ser amplificados, visando aumentar os níveis de tensão aplicados aos transdutores e, conseqüentemente, aumentar a energia da onda mecânica gerada.

Antes do processo de aquisição, os sinais elétricos de tensão convertidos pelo transdutor receptor normalmente passam por um estágio de amplificação, que aplica um ganho pré-ajustado nos sinais. Esse sistema é importante principalmente para medições envolvendo meios com atenuação elevada, onde a relação sinal ruído do sinal recebido costuma ser muito baixa.

Para adquirir os sinais amplificados, pode-se utilizar osciloscópios digitais ou placas de aquisição. A escolha dos equipamentos deve levar em consideração a largura de banda do transdutor e a frequência de amostragem/resolução vertical dos equipamentos. A definição da frequência de amostragem deve ser ajustada em função da resposta em frequência do transdutor. Em geral, fabricantes de transdutores recomendam utilizar sistemas de aquisição com uma frequência de amostragem no mínimo cinco vezes maior do que a maior frequência do transdutor escolhido.

A resolução vertical é um parâmetro utilizado para definir a variação mínima de tensão que pode ser medida com o equipamento escolhido, e esse parâmetro é função

do número de bits do conversor analógico digital utilizado pelo osciloscópio/placa de aquisição. Em geral, sistemas que operam com maior resolução e frequência de amostragem (como placas de aquisição de alta performance, por exemplo) costumam ser utilizados em aplicações que envolvam transdutores de alta frequência. A combinação frequência de amostragem x resolução influencia de forma direta no custo dos sistemas de aquisição.

Uma das vantagens de se utilizar placas de aquisição é que elas possuem memória interna e podem ser conectadas diretamente à placa-mãe dos computadores usando barramentos de alta velocidade (como o PCI *Express*, por exemplo), permitindo taxas de transferência de dados elevadas em comparação com as obtidas por osciloscópios digitais e, conseqüentemente, reduzindo os tempos envolvidos no processo de aquisição de dados.

2.3 Impedância Acústica, Coeficiente de Reflexão e Transmissão

A impedância acústica é uma propriedade física do meio, obtida a partir da relação entre densidade e velocidade de propagação do som:

$$Z = \rho c, \quad (2.1)$$

sendo ρ a densidade do meio (kg/m^3), c a velocidade de propagação da onda (m/s) e Z a impedância acústica (Rayls).

Essa propriedade pode ser utilizada para caracterizar o comportamento das ondas acústicas no momento em que atingem uma interface formada por dois meios com impedâncias acústicas diferentes. Nessas situações, uma parcela da energia da onda será transmitida e outra, refletida.

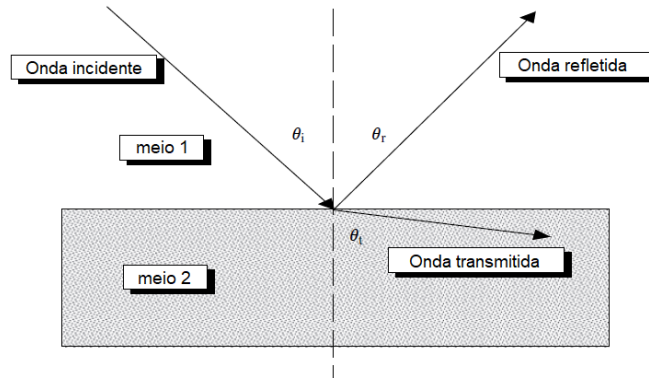
De acordo Dukhin e Goetz (2002), existe uma certa similaridade entre a onda ultrassônica longitudinal e a transmissão e reflexão da luz através de uma superfície, onde o ângulo de incidência θ_i de um sinal ultrassônico em uma superfície plana é igual ao ângulo de reflexão θ_r . A Figura 4 representa uma onda acústica com frequência angular w se propagando através do meio 1 com velocidade constante c_1 .

Observa-se que quando a onda incidente com ângulo θ_i encontra a interface entre os meios 1 e 2, uma parcela de sua energia é transmitida (com um ângulo θ_t) e outra é refletida (com um ângulo θ_r). A onda transmitida deve satisfazer o princípio de Huygens, que afirma que a onda refratada resultante apresenta a mesma frequência da onda incidente. A relação entre as pressões das ondas incidente e refletida, em função do ângulo de incidência, pode ser definida como

$$\frac{\sin \theta_i}{\sin \theta_r} = \frac{p_i}{p_r}, \quad (2.2)$$

sendo θ os ângulos de incidência e reflexão (rad), e p as pressões incidida e refletida (N/m^2).

Figura 4 – Propagação de uma onda acústica em meios distintos.



Fonte: adaptado de Dukhin e Goetz (2002).

A partir dessa relação, pode-se definir o coeficiente de reflexão R_{12} como

$$R_{12} = \frac{p_i}{p_r} = \frac{Z_2 \cos \theta_i - Z_1 \cos \theta_t}{Z_2 \cos \theta_i + Z_1 \cos \theta_t}, \quad (2.3)$$

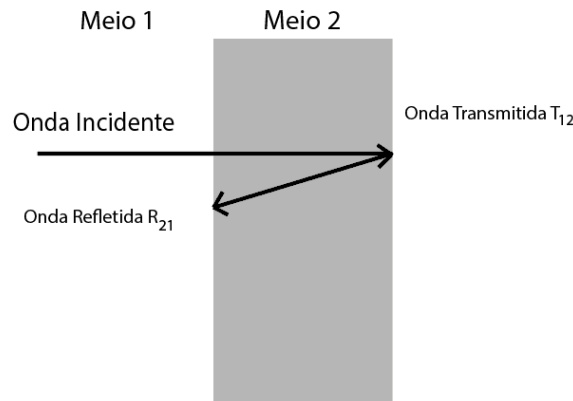
sendo Z as impedâncias acústicas dos meios 1 e 2 (Rayls).

Considerando um ângulo de incidência da onda perpendicular à interface, a equação (2.3) pode ser resumida como

$$R_{12} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}. \quad (2.4)$$

Nessa condição, pode-se representar os coeficientes de transmissão e reflexão da onda por meio de um diagrama simplificado, como apresentado na Figura 5.

Figura 5 – Coeficiente de transmissão de uma onda em uma propagação perpendicular ao meio.



Fonte: do autor.

Para esta representação, a onda incidente é transmitida do meio 1 para o meio 2, e a parcela de energia transmitida pode ser calculada a partir do coeficiente de transmissão

T_{12} . A onda transmitida irá se propagar pelo meio 2 até encontrar uma nova interface composta por meios com impedâncias acústicas diferentes. Nesse momento, parte da energia será refletida (R_{21}) e parte transmitida T_{21} . Esse processo será repetido até que a parcela da energia da onda transmitida ou refletida seja desprezível.

É importante mencionar que na Figura 5, todas as ondas se propagam de forma perpendicular à interface entre os meios 1 e 2, de forma que a inclinação que aparece na seta usada para indicar a reflexão foi adicionada visando simplificar a compreensão da imagem.

De acordo com Selfridge (1985), as amplitudes dos coeficientes de transmissão T_{12} e T_{21} da onda podem ser obtidos por

$$T_{12} = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} = 1 + R_{12}, \quad (2.5)$$

$$T_{21} = \frac{2Z_1}{Z_2 + Z_1} = 1 - R_{12}, \quad (2.6)$$

que relacionam a impedância acústica Z_1 do meio 1 com a impedância acústica Z_2 do meio 2.

Esses conceitos serão aplicados ao longo do trabalho, na utilização de métodos de medição por reflexão relativa e múltiplas reflexões para calcular parâmetros como velocidade de propagação, atenuação e densidade.

2.4 Métodos de Medição

Como mencionado anteriormente, métodos de medição ultrassônicos podem ser usados para caracterizar as propriedades físicas de materiais em análise. Essa caracterização pode ser feita de forma direta, por meio da velocidade de propagação do som ou do coeficiente de atenuação, por exemplo, ou de forma indireta, onde os dados medidos são usados para estimar outros parâmetros como a compressibilidade adiabática.

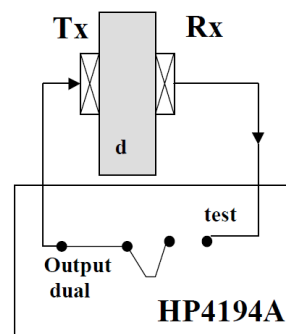
A medição da velocidade de propagação do som é um parâmetro muito utilizado em aplicações industriais, seja para medições de espessura em peças ou para detecção de propriedades de líquidos. Há vários sistemas de medição comerciais no mercado como o DSA5000 da Antoon Par, capaz de medir densidade e velocidade de propagação do som em líquidos, projetado para operar em laboratórios químicos ou de análise de qualidade.

As medições das propriedades acústicas mencionadas podem ser realizadas por meio do método de onda contínua ou pelo método de onda pulsada. A escolha do método de medição dependerá da faixa de frequências de interesse e das propriedades do líquido em análise. Nas próximas seções, serão descritos os principais pontos relacionados a esses dois métodos.

2.4.1 Método de Onda Contínua

Neste método, também conhecido como método de ressonância, pode-se utilizar um transdutor operando em modo pulso-eco, ou dois transdutores, operando em transmissão e recepção. Os transdutores podem ser posicionados em contato direto com o líquido em análise, ou podem ser acoplados a uma célula de medição fabricada com materiais escolhidos de acordo com as características da impedância acústica do líquido que se deseja analisar. Um esboço desse tipo de sistema pode ser visto na Figura 6.

Figura 6 – Medição por onda contínua.



Fonte: retirado de Adamowski et al. (1990).

No exemplo, o ressonador é composto por uma cavidade cilíndrica que deverá ser preenchida com o líquido de interesse. Dois transdutores operando em modo transmissão e recepção foram posicionados nas faces opostas do cilindro, fechando o circuito hidráulico. O transdutor emissor recebe um sinal de excitação de onda contínua (como um sinal senoidal, por exemplo) e converte o sinal recebido numa onda de pressão. A onda mecânica gerada irá se propagar pelo meio, até alcançar o transdutor receptor, que converterá novamente o sinal mecânico num sinal elétrico.

Ao longo desse processo, o sinal acústico presente dentro da cavidade do ressonador começará a reverberar. Nesse instante, é necessário analisar com cautela os sinais gerados, pois haverá influência da frequência de ressonância do transdutor nos múltiplos ímpares da frequência fundamental.

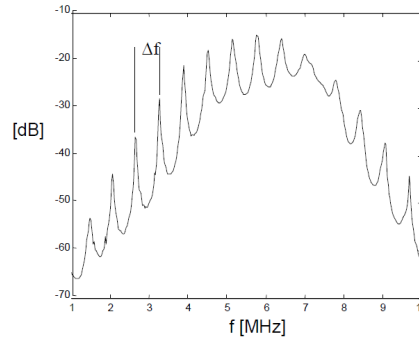
A partir do sinal elétrico recebido, pode-se calcular o fator de mérito Q , que relaciona a frequência de ressonância com a largura de banda (B) do sinal medido. Esse fator pode ser relacionado com a velocidade de propagação do som a partir da expressão

$$Q = \pi \frac{B}{c}. \quad (2.7)$$

Utilizando-se o analisador de impedâncias em conjunto com os transdutores, é possível determinar a velocidade de propagação do som ou a espessura da câmara de medição (d) a partir de dois ou mais picos de magnitude da impedância. Como já mencionado, os

picos de magnitude da impedância ocorrem nas frequências de ressonância, como pode ser visto na Figura 7.

Figura 7 – Picos de magnitude da impedância.



Fonte: retirado de Adamowski et al. (1990).

Finalmente, a relação entre os intervalos de frequência dos picos de magnitude, a velocidade de propagação do som e a espessura da câmara de medição pode ser definida a partir da expressão

$$\Delta f = \frac{c}{2d}. \quad (2.8)$$

A difração acústica, que representa a abertura do feixe em função da distância propagada pelo som, deve ser levada em consideração no projeto de um ressonador. Os efeitos da difração podem ser minimizados quando se utiliza um transdutor de larga abertura como receptor, mas esse tipo de alteração resultará num sistema com maiores dimensões. Atualmente, há ressonadores que operam com frequências de centenas de MHz, utilizados para caracterizar amostras de forma direta e indireta.

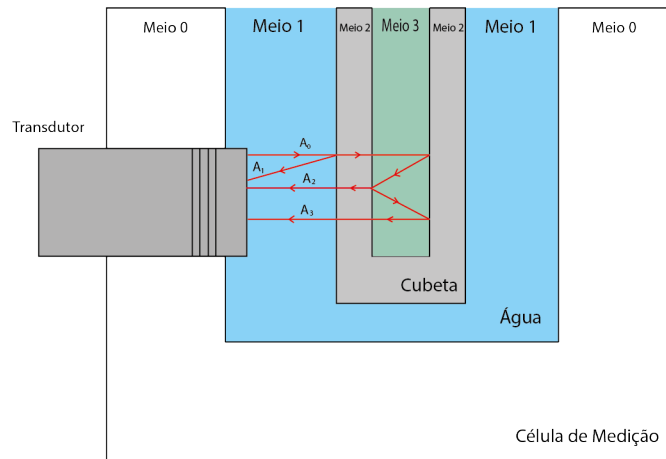
2.4.2 Método de Onda Pulsada

Essa técnica de medição permite utilizar um transdutor operando no modo pulso-eco ou dois transdutores operando no modo transmissão e recepção. Assim como no caso anterior, os transdutores devem estar acoplados à câmara através de um gel ou com água destilada.

O sistema mostrado na Figura 8 pode ser usado como exemplo para explicar esse método de medição. Nessa configuração, o transdutor opera no modo pulso-eco, ou seja, o mesmo transdutor será responsável por emitir e receber os sinais que irão se propagar pela amostra.

O sistema apresentado na Figura 8 é composto por um bloco de sustentação (meio 0), normalmente fabricado em material metálico como alumínio ou latão, uma cubeta (meio 2), que pode ser de plástico, vidro ou vidro quartzo, uma camada de água de acoplamento (meio 1) e amostra (meio 3). Quando a onda emitida atinge a interface água

Figura 8 – Medição por onda pulsada - método pulso-eco.



Fonte: do autor.

/ parede da cubeta, parte do sinal será refletido de volta para o transdutor e a outra será transmitida através da parede da cubeta. A componente transmitida através da parede da cubeta encontrará uma nova interface (parede da cubeta / amostra), e novamente uma parte do sinal irá se propagar pela amostra e outra parte será refletida e retornará ao transdutor. Esse processo irá se repetir continuamente por todas as interfaces, até que a onda seja completamente atenuada pelo meio através do qual se propaga.

Para calcular a velocidade de propagação do som na amostra, inicialmente deve-se conhecer a largura interna da cubeta L , chamada de caminho de propagação (em m). Esse parâmetro normalmente é determinado numa etapa de calibração, que utiliza água destilada (cuja velocidade pode ser calculada a partir do valor da temperatura) como referência para o cálculo da distância. Pode-se realizar medições de forma direta ou de forma relativa.

Para uma medição direta, deve-se determinar o tempo levado pelo som para se propagar pela amostra, definido na literatura como tempo de voo. Isso pode ser feito a partir do cálculo do tempo de voo entre os sinais A_2 e A_3 , que representam o primeiro e segundo ecos, respectivamente.

Como neste caso, a diferença entre o caminho de propagação percorrido pelos sinais A_2 e A_3 é de $2L$, sendo L a espessura da cubeta (m), e assumindo que o tempo de voo entre os dois sinais pode ser medido, pode-se calcular a velocidade de propagação do som no meio a partir da relação

$$c = \frac{2d}{\Delta t}. \quad (2.9)$$

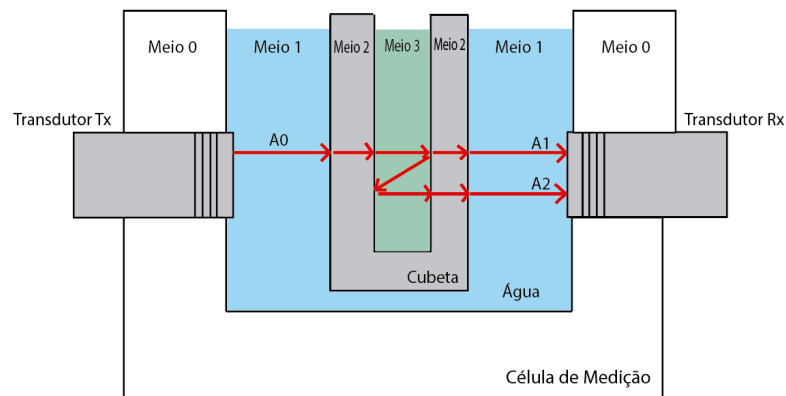
Para medições relativas, o procedimento é dividido em duas etapas. Na primeira, adquire-se o sinal A_2 utilizando como amostra um líquido de referência com propriedades conhecidas (normalmente água destilada). Em seguida, o líquido de referência deve ser substituído pela amostra de interesse, e o novo sinal A_2 é adquirido. Para minimizar os er-

ros experimentais, é importante que as duas aquisições sejam feitas considerando líquidos na mesma temperatura e garantindo um alinhamento preciso da cubeta. O alinhamento da cubeta é um dos pontos críticos deste procedimento, pois variações na posição da cubeta afetariam o valor de L , que afetaria de forma direta o valor de tempo de voo relativo medido.

Ao final, calcula-se o tempo de voo entre as duas amostras (referência e interesse), e acrescenta-se ao resultado o valor do tempo de voo estimado para a propagação do som pela amostra de referência. A vantagem desse método em relação ao anterior é que pode-se utilizar um sinal que se propagou por menos tempo pela amostra de interesse. Dessa forma, pode-se medir propriedades de líquidos mais atenuantes com uma melhor relação sinal-ruído.

Uma outra opção de configuração utiliza um par de transdutores, sendo um emissor (T_x) e um receptor (R_x), como mostrado a Figura 9.

Figura 9 – Medição por onda pulsada - método transmissão e recepção.



Fonte: do autor.

Nesta configuração, o transdutor emissor é excitado por um sinal elétrico pulsado, produzindo um sinal acústico que irá se propagar pela amostra. O sinal gerado irá se propagar através das camadas de material até atingir o transdutor receptor, resultando no sinal A_1 . Uma parte do sinal que se propagou pelo líquido é refletida novamente dentro da cubeta, alcançando o transdutor receptor após se propagar três vezes pelo meio analisado (sinal A_2). Calculando-se o tempo de voo entre os sinais A_1 e A_2 , e sabendo que a diferença de distância entre eles é de $2L$, pode-se calcular o valor de velocidade de propagação do som no meio a partir da equação (2.9).

Assim como no caso anterior, pode-se trabalhar com um método de medição relativo, onde um líquido de referência é utilizado numa condição inicial e, posteriormente, é substituído pelo líquido de interesse. Nesse caso, a vantagem é que nos dois casos, o sinal irá se propagar somente uma vez pela amostra, permitindo que líquidos ainda mais atenuantes possam ser caracterizados.

2.5 Técnicas para Calcular a Velocidade de Propagação do Som

Para medir corretamente a velocidade de propagação do som no meio, é necessário determinar com precisão o tempo de voo do sinal que se propaga pela amostra analisada. Essa medição deve levar em consideração que tipo de atraso está sendo determinado: o atraso de grupo ou o atraso de fase.

O atraso de fase está relacionado com a variação do tempo de propagação associado a uma única frequência, enquanto o atraso de grupo está relacionado ao atraso do tempo de propagação da envoltória do sinal completo, composto por todas as frequências (OPPENHEIM, 2011).

Para analisar os efeitos desses atrasos, considera-se inicialmente um sinal contínuo no tempo $x(t)$ aplicado na entrada de um sistema linear invariante no tempo (SLIT). Ao analisar o comportamento do sistema no domínio da frequência, verifica-se que a saída do sistema ($Y(j\omega)$) pode ser relacionada com a Transformada de Fourier do sinal de entrada ($X(j\omega)$) e com a resposta em frequência do sistema ($H(j\omega)$) através da expressão

$$Y(j\omega) = H(j\omega)X(j\omega). \quad (2.10)$$

Reescrevendo a expressão anterior em termos de magnitude e fase, tem-se

$$|Y(j\omega)| = |H(j\omega)||X(j\omega)|, \quad (2.11)$$

e

$$\angle Y(j\omega) = \angle H(j\omega) + \angle X(j\omega). \quad (2.12)$$

A mudança de fase do sistema pode alterar a relação de fase relativa entre as componentes de entrada, o que possibilita modificações expressivas nas características da entrada do sistema no domínio do tempo. As mudanças não desejadas são definidas como distorções de magnitude e fase.

Definindo o valor principal da fase da resposta em frequência como $\arg[H(j\omega)]$ dentro do intervalo $[-\pi, \pi]$, pode-se definir a fase de $H(j\omega)$ como

$$\angle H(j\omega) = \arg[H(j\omega)] + 2\pi r(\omega), \quad (2.13)$$

onde o termo 2π pode ser interpretado como o efeito de enrolar da fase em uma circunferência, ou seja, fase enrolada (do inglês, *wrapped phase*).

Em uma representação de magnitude e fase, a função $H(j\omega)$ pode ser ajustada (*unwrapped*) em uma curva de fase contínua em ω , onde a curva de fase desenrolada passa a ser definida como $\arg[H(j\omega)]$. Matematicamente, o atraso de fase pode ser definido como

$$\tau_{\phi}(\omega) = -\frac{1}{\omega} \angle[H(j\omega)], \quad (2.14)$$

e o atraso de grupo pode ser definido a partir da derivada do atraso de fase, ou seja

$$\tau_{gr}(\omega) = -\frac{d}{d\omega} \arg[H(j\omega)]. \quad (2.15)$$

2.5.1 Método de Cruzamento com o Zero

Na literatura é possível encontrar vários métodos de medição propostos para se estimar o tempo de voo de sinais acústicos. Uma técnica bastante simples utiliza o conceito de cruzamento com o zero para detectar o primeiro ponto em que os dois sinais cruzam o eixo das abscissas pela primeira vez. A Figura 10a mostra o sinal de referência ampliado, sendo possível estimar o ponto exato onde ocorre o cruzamento com o eixo das abscissas.

O problema dessa técnica é que ela é sensível a ruídos elétricos, que poderiam atrapalhar a identificação correta dos pontos de cruzamento, como mostra a Figura 10b.

Além disso, não seria possível determinar a velocidade de fase de sinais de banda larga utilizando essa metodologia.

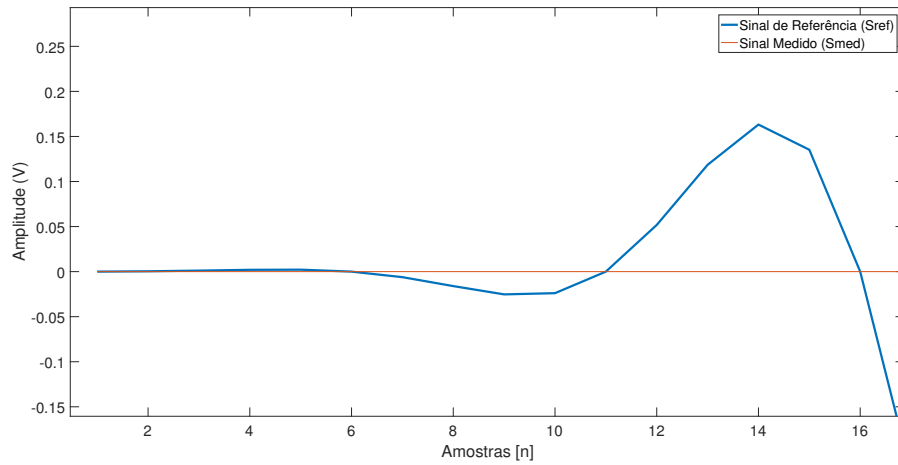
2.5.2 Método de Detecção de Pico

Outro método bastante simples baseia-se na detecção de pico para calcular o tempo de voo entre os sinais. A Figura 11 apresenta um exemplo desse método de medição, onde o atraso é calculado a partir da diferença de tempo Δt entre os picos máximos dos sinais.

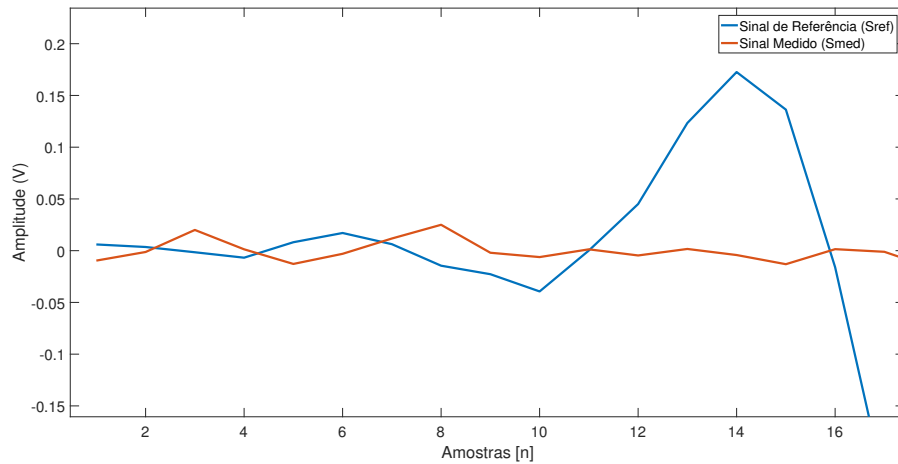
Como pode ser visto na Figura 11, os pontos máximos dos sinais podem assumir valores negativos, ou seja, o módulo deve ser considerado nesse tipo de análise. Outro fator que pode afetar o desempenho desse método é a frequência de amostragem do sistema de aquisição, pois haveria o risco de o sistema não adquirir o ponto de máximo.

Uma das propostas de melhoria para este método envolve a utilização de sinais interpolados, assumindo que ao interpolar os sinais, as chances de se detectar de forma correta os valores de pico aumentariam. Outra opção consiste em empregar a envoltória dos sinais, utilizando o pico das envoltórias ao invés do pico dos sinais como parâmetro para determinação do tempo de voo. A Figura 12 mostra este método utilizando sinais com ruído. A envoltória pode ser calculada a partir do módulo do sinal analítico, cuja parte imaginária é a Transformada de Hilbert e a parte real o sinal de interesse (ADAMOWSKI et al., 1990).

Figura 10 – Método de medição por cruzamento com o zero.



(a) Método de cruzamento com o zero para um sinal sem ruído.



(b) Método de cruzamento com o zero para um sinal com ruído.

Fonte: do autor.

2.5.3 Método da Correlação Cruzada

Um terceiro método, utilizado com mais frequência na literatura, consiste na determinação do tempo de voo a partir do cálculo da correlação cruzada dos dois sinais. Esse método verifica o grau de similaridade entre dois sinais, e relaciona a diferença de tempo entre eles usando como referência o ponto máximo da correlação cruzada.

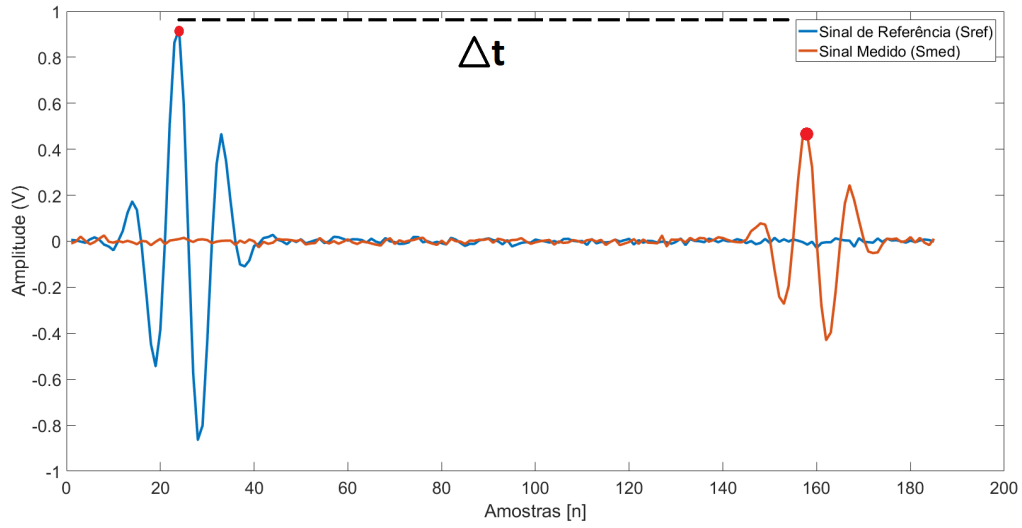
Para analisar essa técnica, considera-se inicialmente dois sinais, como os apresentados na Figura 11. A correlação cruzada pode ser definida por (OPPENHEIM, 2011)

$$c_{xy}[l] = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x[n]y[n+l], \quad l = \dots - 2, -1, 0, 1, 2, \dots, \quad (2.16)$$

onde l indica o defasamento entre os sinais.

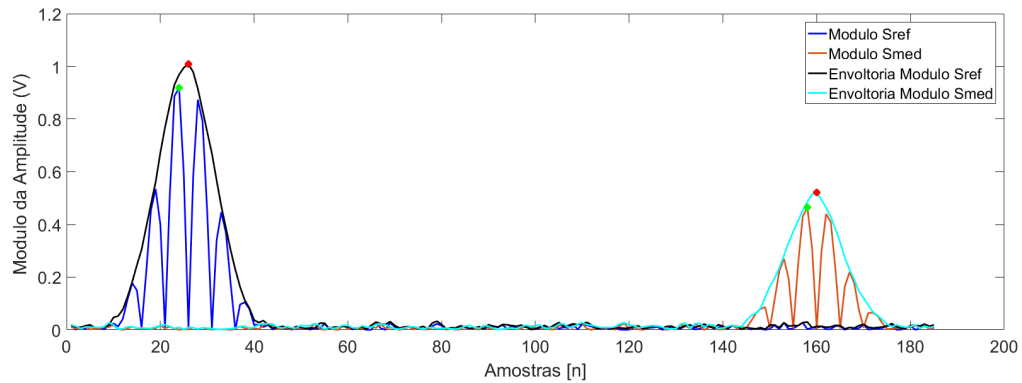
Assumindo que o sinal $x[n]$ é equivalente ao sinal de referência e o sinal $y[n]$

Figura 11 – Método de Detecção de Pico.



Fonte: do autor.

Figura 12 – Método de Pico da Envoltória.



Fonte: do autor.

equivalente ao primeiro eco, pode-se reescrever a equação (2.16) em função da atenuação α do som se propagando pelo líquido e da diferença D do número de amostras entre o sinal de referência e o eco.

$$y[n] = \alpha x[n - D]. \quad (2.17)$$

Considerando que o sinal $y[n]$ não apresente distorção, pode-se escrevê-lo em função do sinal de referência com D amostras subtraídas, ou seja

$$y[n + l] = \alpha x[n + l - D]. \quad (2.18)$$

Por fim, substituindo a equação (2.18) em (2.16), obtém-se a equação da correlação entre dois sinais de duração finita com N amostras em função da autocorrelação $c_{xx}[n]$ do sinal $x[n]$.

$$c_{xy}[l] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n]\alpha x[n+l-D] = \alpha c_{xx}[l-D], \quad 0 \leq l < 2N-2. \quad (2.19)$$

Com base nas equações anteriores, localiza-se o ponto máximo da autocorrelação em $l = D$. A desvantagem deste tipo de técnica digital é a baixa resolução, uma vez que não é possível garantir que o ponto máximo esteja representado na amostra do sinal. Por isso, utilizam-se técnicas de interpolação e Transformada de Hilbert para detectar com maior precisão o pico da envoltória do sinal de correlação (ADAMOWSKI et al., 1990). Além disso, o método considera que os dois sinais apresentam formato semelhante, algo que pode ser um problema para casos envolvendo medições em meios muito atenuantes.

2.5.4 Método da Fase Espectral

Finalmente, um método mais eficiente para se medir a velocidade de propagação do som em líquidos utiliza o método da fase espectral. Essa técnica tem como objetivo medir a velocidade em função da frequência utilizando a fase espectral dos sinais, obtida a partir da Transformada de Fourier.

Para utilizar esse método, deve-se considerar novamente sinais defasados no tempo, como os apresentados na Figura 11. Considerando uma defasagem Δt , pode-se relacionar os sinais a partir da expressão

$$A_2(t) = A_1(t - \Delta t), \quad (2.20)$$

onde A_1 e A_2 são os sinais recebidos pelo transdutor receptor.

Representando os sinais no domínio da frequência, tem-se

$$A_2(f) = A_1(f)e^{-j2\pi f\Delta t}. \quad (2.21)$$

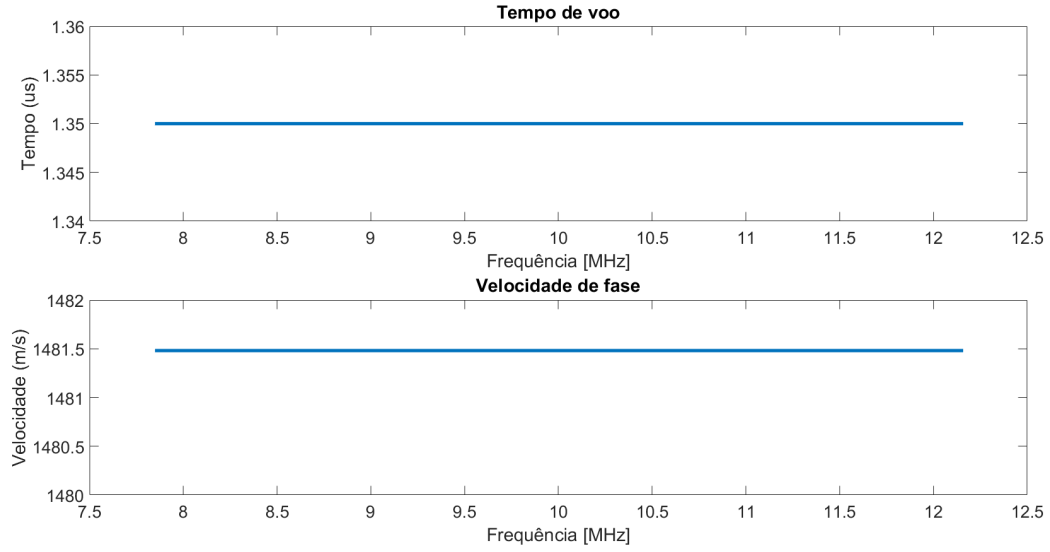
O intervalo de tempo entre os dois sinais pode ser obtido a partir da relação das diferenças de fase entre eles, ou seja

$$\Delta t = \frac{\angle A_1(f) - \angle A_2(f)}{2\pi f}. \quad (2.22)$$

A partir desse resultado, pode-se calcular a velocidade de propagação do som. A Figura 13 apresenta gráficos com o tempo de voo e velocidade de fase calculados usando a água como líquido em análise e desconsiderando os efeitos de ruído.

Esse método tem como desvantagem problemas relacionados ao algoritmo de *unwrapp*, que pode gerar saltos de fase indevidos no momento da determinação do ponto de fase inicial, provocando assim um erro nas medições. Esse problema foi tema do trabalho apresentado por Elvira et al. (2020), que a partir de uma relação entre velocidade de grupo e atenuação, calcula um valor estimado de velocidade de fase. Comparando o valor

Figura 13 – Método Fase Espectral.



Fonte: do autor.

estimado com o valor medido de velocidade de fase, esse método permite que o número de saltos de fase seja calculado. Conhecendo-se o número de saltos de fase gerado, pode-se corrigir os valores de velocidade de fase, compensando esses efeitos.

Uma abordagem alternativa para medir a velocidade de fase e de grupo utilizando usando o método da correlação cruzada é proposta por Marple (1999). Nessa abordagem, considera-se inicialmente dois sinais de duração finita, $x[n]$ e $y[n]$. Calcula-se a Transformada de Fourier dos sinais ($X[k]$ e $Y[k]$) e, em seguida, no domínio da frequência, calcula-se o sinal C_{yx}

$$C_{yx} = Y[k] \prod \text{conj}(X[k]), \quad (2.23)$$

sendo C_{yx} a representação no domínio da frequência da correlação cruzada dos sinais.

A partir do sinal C_{yx} , deve-se construir um novo sinal, chamado de sinal analítico, a partir da expressão

$$C_{yx_anal} = [C_{yx}(1); 2 * C_{yx}(2 : N); C_{yx}(N + 1); \text{zeros}(N - 1, 1)], \quad (2.24)$$

onde N representa o número de pontos dos sinais.

Em seguida, utilizando a Transformada Rápida de Fourier Inversa, deve-se converter o sinal analítico gerado do domínio da frequência para o domínio do tempo

$$c_{yx_anal} = \text{fftshift}(\text{ifft}(C_{yx_anal})). \quad (2.25)$$

Finalmente, para que seja possível determinar os atraso de grupo (t_g) e de fase (t_p), inicialmente deve-se determinar o ponto de máximo (m) do sinal analítico c_{yx_anal} .

Em seguida, considerando o período de amostragem dos sinais (T) e a frequência (f_c), referente ao ponto cuja velocidade se deseja determinar, pode-se calcular os valores de t_g e t_p a partir das expressões

$$t_g = (m - N - 1) * T, \quad (2.26)$$

$$t_p = \frac{\arg(\text{imag}(c_{yx_anal}(m)), \text{real}(c_{yx_anal}(m)))}{(2\pi f_c)}. \quad (2.27)$$

O autor informa que esse método é válido para sinais de banda estreita, mas não deixa claro qual é o limite máximo de largura de banda que pode ser utilizado. Neste trabalho, foram realizados testes considerando diferentes valores de largura de banda, chegando a um limite de 5 MHz, que foi o valor utilizado nos cálculos descritos nos próximos capítulos.

2.6 Considerações Parciais

Este capítulo apresentou uma revisão teórica envolvendo os principais conceitos necessários para o desenvolvimento da metodologia proposta neste trabalho. Além disso, foram descritos diferentes métodos de medição e técnicas para cálculo de velocidade de propagação do som no meio.

O método de medição por onda pulsada apresenta como vantagem a possibilidade de se excitar o transdutor emissor com um pulso estreito. Essa característica permite que os sinais recebidos pelo transdutor receptor (e convertidos novamente em sinais elétricos) possam ser separados no domínio do tempo de acordo com a distância de propagação percorrida, simplificando a metodologia para cálculo da velocidade de propagação do som. Em relação aos métodos de medição direto e relativo, a técnica de medição relativa apresenta vantagens principalmente quando se deseja caracterizar líquidos muito atenuantes, mas como desvantagem, é mais afetada por problemas de alinhamento entre transdutores e amostra.

Várias técnicas para cálculo de velocidade de propagação foram descritas. Como mencionado, algumas delas apresentam baixa resolução, como o caso da detecção por cruzamento com zeros ou detecção de pico. Há ainda casos onde não se pode determinar com precisão os valores de velocidade em função da frequência, impossibilitando os cálculos dos atrasos de fase e grupo.

Dentre as técnicas citadas, o método da fase espectral e o método da correlação cruzada apresentaram resultados mais promissores, e devido a isso, foram escolhidas para calcular os valores de velocidade de fase e de grupo deste trabalho.

3 Metodologia

Este Capítulo descreve a metodologia utilizada para caracterizar misturas de água e etanol a partir de medições de velocidade de propagação do som.

Inicialmente, apresenta-se o sistema acústico, composto por célula de medição, cubeta e um par de transdutores de alta frequência (75 MHz) operando em modo transmissão recepção. A temperatura do sistema é monitorada usando um sistema de medição de precisão (1 mK), e controlada por um sistema eletrônico microcontrolado, composto por *drivers* de potência e células Peltier.

Um pulsador eletrônico é usado para excitar o transdutor emissor e amplificar o sinal recebido pelo transdutor receptor, e uma placa de aquisição de alta frequência (400 MHz) é usada para adquirir os sinais amplificados obtidos a partir do transdutor receptor.

Na sequência, descreve-se o processo de calibração do sistema de medição, bem como a metodologia usada para preparação e validação de amostras compostas por misturas de água e etanol com diferentes concentrações. Finalmente, apresenta-se os procedimentos usados durante o processo de medição da velocidade de propagação do som nas amostras, além das técnicas de processamento de sinais empregadas para calcular os valores de velocidade de fase e de grupo em função da frequência.

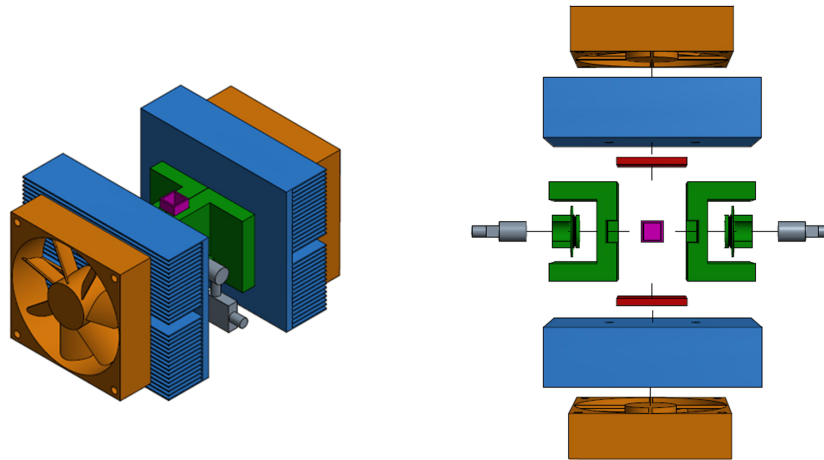
3.1 Sistema Acústico

A Figura 14 apresenta o desenho da célula de medição utilizada neste trabalho. O sistema é composto por um bloco de alumínio (verde) em formato H, usado para sustentar o suporte dos transdutores (verde), a cubeta (rosa), os transdutores (cinza) e os atuadores térmicos, composto por células Peltier (vermelho), dissipadores de calor (azul) e ventiladores (laranja).

O formato em H do bloco foi escolhido devido as dimensões bastante reduzidas dos transdutores utilizados (Olympus, modelo V2022). Foram escolhidos transdutores de contato com frequência central de 75 MHz e que contam com uma linha de retardo de 6 μ s fabricada em sílica. As fichas de calibração fornecidas pelo fabricante podem ser verificadas no Anexo B.

A vantagem de se utilizar transdutores de alta frequência é que pode-se realizar medições considerando uma ampla faixa de frequências (entre 20 MHz e 80 MHz para este sistema). Essas medidas em banda larga podem ser utilizadas para analisar o comportamento da velocidade de propagação ou atenuação do som em função da frequência, por exemplo. Em contrapartida, o aumento da frequência torna mais complexo o processo de alinhamento dos transdutores e, como mencionado anteriormente, é fundamental garantir

Figura 14 – Câmara de medição.



Fonte: retirado de Tiago et al. (2019).

um alinhamento adequado, principalmente quando se pretende realizar medições usando o método relativo à água.

Uma cubeta de quartzo, com dimensões de 12,5 mm x 12,5 mm x 45 mm, posicionada no centro do bloco foi utilizada para armazenar as amostras a serem caracterizadas. A vantagem de se utilizar cubetas durante o processo de medição é que o processo de limpeza e troca das amostras se torna bastante simples em comparação com células que trabalham com transdutores em contato direto com o líquido de interesse. Entretanto, ao inserir a cubeta no sistema, adicionam-se duas novas camadas de quartzo ao sistema, dificultando um pouco mais o alinhamento e provocando perdas causadas pela reflexão das ondas ao se propagarem por interfaces com impedâncias acústicas diferentes.

A célula possui um sistema de controle de temperatura de precisão, com erro de regime permanente menor do que $0,01^{\circ}\text{C}$. Esse sistema utiliza um medidor de temperatura de referência (Isotech, modelo Millik), capaz de realizar medições com resolução de até 1 mK, operando em conjunto com um sensor RTD do tipo Pt100 previamente calibrado.

Células Peltier, dispositivos semicondutores que tem como principal característica converter energia elétrica em calor, foram utilizadas como atuadores térmico. Esses dispositivos possuem duas faces, chamadas de face quente e face fria, que podem ser controladas a partir da variação da intensidade e sentido da corrente elétrica aplicada.

Para controlar a corrente, e conseqüentemente a temperatura, utilizou-se um algoritmo PID (Proporcional, Integral, Derivativo) digital, implementado a partir de um microcontrolador (Espressif, modelo ESP32-WROOM32). Uma ponte H (Infineon, modelo

BTS7960) foi utilizada como *driver* de potência, e a intensidade da corrente foi ajustada usando modulação PWM (do inglês, *Pulse Width Modulation*). Dissipadores e Ventiladores foram adicionados para melhorar a troca de calor entre o lado das células Peltier que não está em contato direto com o bloco de alumínio e o ar.

3.2 Sistema de Excitação e Aquisição

Como mencionado, neste trabalho optou-se por utilizar um par de transdutores ultrassônicos operando em modo transmissão recepção. Para controlar o sinal de excitação aplicado ao transdutor emissor, utilizou-se um pulsador receptor programável desenvolvido para operações envolvendo transdutores de alta frequência (Imaginant, modelo DPR500), capaz de operar com transdutores com frequência central de até 300 MHz. Por ser um módulo pulsador e receptor, o DPR500 pode ser usado para gerar os sinais elétricos de excitação aplicados ao transdutor emissor e para amplificar os sinais recebidos pelo transdutor receptor.

Um dos desafios envolvendo sistemas de medição ultrassônicos de alta frequência diz respeito ao casamento de impedâncias entre transdutor e sistema de excitação e aquisição. O descasamento entre as impedâncias de entrada e saída pode provocar reflexões nos cabos e perdas por transmissão, entre outros efeitos. Esses efeitos podem reduzir a parcela de energia entregue ao transdutor emissor ou circuito amplificador, ou ainda, no pior dos casos, danificar os sistemas de excitação e amplificação. Esse desafio aumenta quando se trabalha com sistemas de banda larga, como é o caso do sistema de medição utilizado neste trabalho, que opera numa faixa entre 20 MHz e 80 MHz.

Para minimizar esses efeitos, o fabricante do pulsador optou por dividir o equipamento em duas partes, sendo a primeira chamada apenas de pulsador e a segunda, chamada de pulsador remoto, como pode ser visto na Figura 15.

O pulsador remoto foi projetado para permanecer próximo aos transdutores, e tem como funções emitir sinais elétricos de tensão negativa e curta duração e pré-amplificar os sinais recebidos pelo transdutor receptor. A ligação entre pulsador remoto e transdutores é feita a utilizando cabos curtos (aproximadamente 7 cm), cujas dimensões são definidas em função da frequência central dos transdutores que serão utilizados.

O pulsador remoto usado neste trabalho (Imaginant, modelo RP-H2) foi projetado para operar com transdutores com frequência central entre 40 MHz e 165 MHz. Esses dispositivos são conectados ao pulsador DPR500 através de um cabo com maiores dimensões (aproximadamente 2 m), permitindo que o sistema possa ser distribuído de forma adequada sobre a bancada.

Todo o controle do sistema de excitação e aquisição é feito pelo DPR500, que irá enviar e receber sinais elétricos para o módulo pulsador remoto RP-H2 em função das configurações definidas pelo usuário. O processo de configuração é feito de forma remota,

Figura 15 – Pulsador-receptor DPR500.



Fonte: retirado de JSR Ultrasonics (2011).

através de um sistema de comunicação serial entre computador e módulo DPR500. O fabricante disponibiliza um *software* que permite ao usuário ajustar os níveis de tensão de excitação, frequência de repetição do pulso, *damping* e energia, além dos níveis de ganho de tensão (em dB) do amplificador de recepção. Além disso, o fabricante também fornece a lista de comandos para que o controle possa ser feito usando um outro *software* desenvolvido pelo usuário.

Uma imagem da forma de onda do pulso de excitação utilizado ao longo deste trabalho pode ser vista no Anexo A. O sistema de excitação foi ajustado para que esse pulso fosse repetido em intervalos de 1 ms. O amplificador de recepção foi ajustado para aplicar um ganho de 30 dB ao sinal recebido. Esse sinal foi adquirido usando uma placa de aquisição de dados (Signatec, modelo PX14400) com frequência de amostragem de 400 MHz e resolução vertical de 14 bits.

Para simplificar o processo de medição, um *software* em Matlab foi desenvolvido para gerenciar todo o processo. Através dessa ferramenta, pode-se definir as configurações dos sistemas de excitação, aquisição e controle térmico, bem como visualizar em tempo real as formas de onda que estão sendo adquiridas.

3.3 Preparação das Amostras

Para que fosse possível avaliar o desempenho das técnicas de cálculo de velocidade de propagação do som a partir do método da fase espectral e da correlação cruzada, foram analisadas amostras compostas por misturas de água em etanol. A caracterização desse tipo de mistura tem um forte apelo da indústria de biocombustíveis, uma vez que a técnica pode ser utilizada para identificar possíveis adulterações.

As amostras usadas foram preparadas de acordo com o procedimento descrito por Tiago (2018), usando água deionizada e etanol HPLC (Merck, 99,9% de pureza). Por simplicidade, optou-se por utilizar concentrações em massa (w/w), definidas a partir da relação entre as massas de etanol HPLC e água deionizada. Uma balança digital de precisão (Shimadzu, modelo ATX224) foi utilizada para medir os valores das massas dos líquidos.

Um dos desafios ao se trabalhar com misturas de água e etanol é que o processo de preparo das amostras é complexo. Esse efeito está relacionado ao fator de empacotamento atômico das moléculas de água e etanol, que indica basicamente quantos átomos podem ser reorganizados numa nova estrutura. Ao se misturar esses dois líquidos simplesmente adicionando ambos num mesmo recipiente, parte dos átomos se rearranja, mas parte permanece sem alterações. Dessa forma, para forçar o processo de recombinação, é necessário agitar fortemente a mistura antes de utilizá-la.

Neste trabalho, foram preparadas amostras com concentrações variando entre 10% e 99,9% (w/w), em volumes de aproximadamente 100 ml. Essas amostras foram fortemente agitadas por um período de aproximado de 5 minutos e, posteriormente, mantidas em repouso por um período de 24 horas. O período de descanso é importante para garantir que as bolhas de ar geradas durante o período de agitação sejam dissipadas. Convém ressaltar que as bolhas de ar poderiam influenciar os resultados obtidos a partir das medições acústicas, uma vez que a impedância acústica do ar é muito diferente das impedâncias acústicas das misturas analisadas.

Após o período de repouso, mediu-se a densidade das amostras usando um densímetro de bancada (Anton Paar, modelo DMA 4500). A densidade é um parâmetro adotado pela indústria para caracterização das misturas de água em etanol. A partir dos valores de densidade, pode-se utilizar uma tabela para se relacionar densidade, temperatura e concentração das amostras.

Todas as medições de densidade foram realizadas a temperatura ambiente (25°C) e os valores de concentração foram estimados a partir da expressão definida por (International Organisation of Legal Metrology (IOLM), 1973). Ao longo do processo de medição, alíquotas de 3 ml de líquido foram utilizadas, e o processo foi repetido em triplicata.

3.4 Calibração

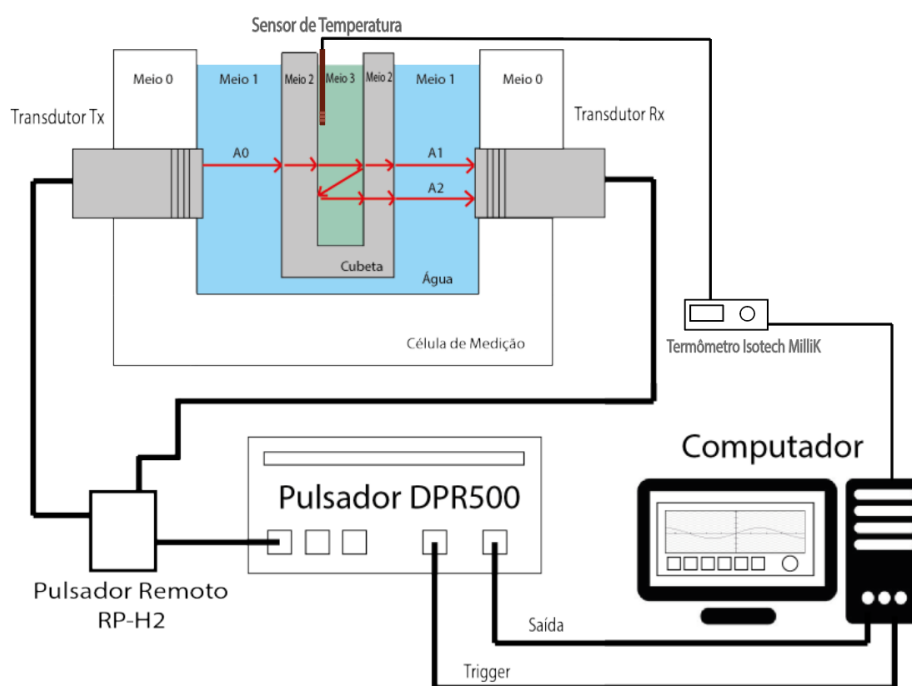
Como mencionado anteriormente, os resultados apresentados neste trabalho foram obtidos utilizando-se o método de medição relativo. Nesse método, o cálculo da velocidade de propagação do som é feito relacionando um sinal de referência (obtido usando uma amostra de água deionizada) com um sinal adquirido após o processo de medição de um líquido de interesse. É importante ressaltar que os parâmetros de configuração usados nos sistemas de excitação, aquisição e controle térmico devem ser os mesmos nos processos de

calibração e medição.

Uma das funções do processo de calibração é permitir que o usuário possa adquirir o sinal de referência em água. Além disso, pode-se utilizar os sinais medidos em água para determinar o tamanho do caminho de propagação do sinal acústico L , uma vez que os valores de velocidade de propagação do som na água são conhecidos e definidos em função da temperatura.

Ao longo dos ensaios, foram utilizadas cubetas de quartzo, com caminho de propagação de 10 mm e paredes com espessura de 1 mm. Apesar de não serem descartáveis, essas cubetas apresentam boa qualidade no que diz respeito as dimensões e ao paralelismo entre as paredes. Um diagrama com o sistema utilizado nas etapas de calibração e medição pode ser visto na Figura 16.

Figura 16 – Sistema de medição.



Fonte: do autor.

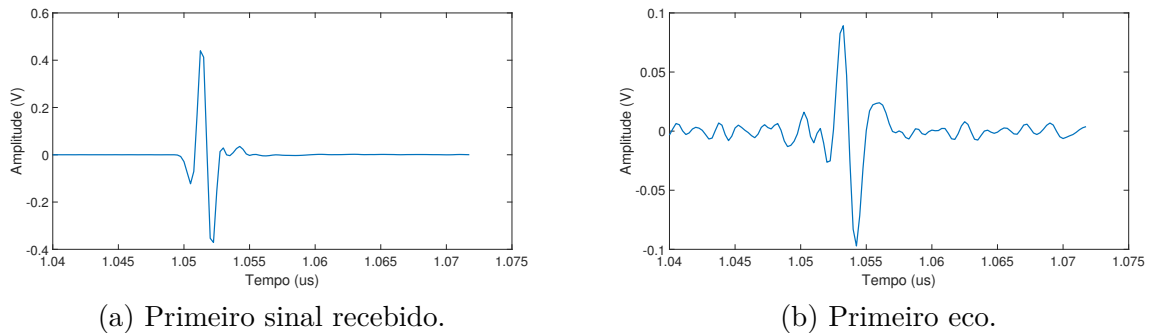
Inicialmente, a câmara de medição foi preenchida com água, utilizada para acoplamento entre cubeta e transdutores. Em seguida, a cubeta foi preenchida com água e depositada na câmara de medição. Uma pequena barra magnética revestida com PVC foi usada para homogeneizar a temperatura do líquido e reduzir os efeitos dos gradientes de temperatura.

O sistema de excitação acústica foi ajustado para emitir sinais pulsados com amplitude de -330 V e frequência de repetição de 1 kHz. O ganho em recepção foi ajustado em 30 dB, e a placa de aquisição foi programada para adquirir os dados com frequência

de amostragem de 400 MHz. O *setpoint* do sistema de controle térmico foi ajustado em 25°C, e a temperatura foi monitorada em tempo real.

Com a temperatura estável (considerando um erro em regime permanente menor do que 0,01°C), foram adquiridos o primeiro sinal recebido e o primeiro eco. A Figura 17 apresenta as formas de onda típicas obtidas ao longo desse processo.

Figura 17 – Sinais de Referência adquiridos durante o processo de calibração com água deionizada.



Fonte: do autor.

A partir dos dois sinais, e assumindo os valores de velocidade de propagação do som na água em função da temperatura definidos no trabalho de Bilaniuk e Wong (1993), calculou-se o tamanho do caminho de propagação do som L usando o método da fase espectral. O valor de L calculado e o primeiro sinal recebido foram armazenados para serem usados posteriormente na etapa de medição.

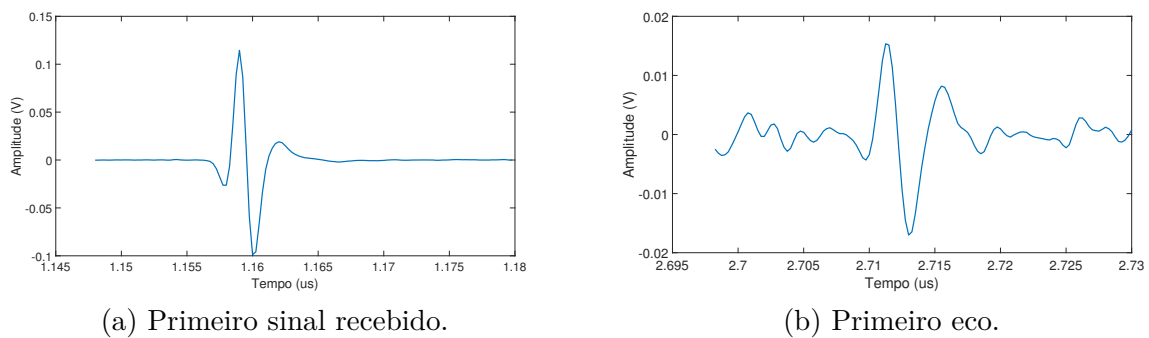
3.5 Medição

Após calibrar o sistema, inicia-se o processo de medição das amostras. Durante este trabalho, serão realizadas diversas medições para diferentes concentrações de água e etanol, com o objetivo de identificar o comportamento da velocidade de propagação do som nas amostras em função da variação da concentração das mesmas.

O procedimento para realizar as medições é semelhante ao descrito na seção de calibração. Inicialmente, deve-se substituir a água deionizada armazenada na cubeta pelo líquido cujas propriedades se deseja determinar. Todas as demais etapas, incluindo configurações dos sistemas de excitação, aquisição e controle térmico, devem ser mantidas. A Figura 18 apresenta exemplos de sinais típicos obtidos ao longo desse processo de medição.

Como já mencionado, a proposta deste trabalho é utilizar o método de medição relativo. Esse método é vantajoso para casos como o apresentado na Figura 18, onde observa-se grande diferença de amplitude, os efeitos das múltiplas reflexões nas paredes de quartzo (cubeta) e sílica (linha de retardo dos transdutores) e uma queda na relação sinal ruído quando se compara o primeiro sinal recebido ao primeiro eco.

Figura 18 – Sinais obtidos após o processo de medição de misturas de água em etanol, considerando amostras com concentração de 80% (w/w).



Fonte: do autor.

Como desvantagens, pode-se citar questões referentes a problemas de alinhamento, que podem ocorrer tanto na etapa de calibração quanto na de medição, além da influência do sistema de controle térmico, que se mal ajustado, pode afetar de formas diferentes os sinais nas etapas de calibração e medição.

Os sinais adquiridos foram processados usando os métodos de fase espectral e correlação cruzada. Os sinais foram usados de forma direta ao aplicar o método de cálculo por fase espectral, e o algoritmo de correção de saltos de fase proposto por Elvira et al. (2020) foi usado para corrigir os erros do algoritmo de *unwrap*.

O mesmo procedimento não pode ser repetido ao aplicar o método da correlação cruzada pois, como mencionado no trabalho de Marple (1999), essa técnica deve ser utilizada em sinais com banda limitada. Dessa forma, antes de iniciar o processo de cálculo, os sinais foram filtrados usando um filtro do tipo FIR (do inglês, *Finite Impulse Response*) gaussiano, com largura de banda de 5 MHz e frequência central variando entre 30 MHz e 65 MHz. Uma comparação entre os resultados obtidos será apresentada no próximo capítulo.

3.6 Considerações Parciais

Neste capítulo, apresentou-se a célula de medição ultrassônica empregada para adquirir os sinais analisados ao longo deste trabalho. Além disso, foram descritos os instrumentos de bancada usados para monitorar e controlar todo o processo de medição, destacando o fato de que esse processo foi realizado de forma remota, por meio de um *software* desenvolvido em Matlab.

Ao longo da seção que descreve a etapa de preparação das amostras, foram destacadas as dificuldades relacionadas a esse processo, que exigiram cuidados envolvendo o processo de agitação e verificação da concentração das amostras antes de iniciar o processo de medição das mesmas.

Finalmente, foram descritas as etapas de calibração e medição, necessárias para a realização de medidas de velocidade relativas, destacando-se as vantagens e desvantagens de se utilizar esse método de medição considerando amostras com atenuação intermediária, como é o caso das misturas de água e etanol.

4 Resultados e Discussões

Este Capítulo apresenta uma comparação entre os principais resultados obtidos a partir do cálculo da velocidade de propagação do som em líquidos usando as técnicas de medição descritas anteriormente. O Capítulo foi dividido em três seções, e os resultados foram agrupados nas duas seções iniciais, que envolvem as etapas de simulação e medição.

Na etapa de simulação, as técnicas de medição descritas foram aplicadas a sinais acústicos simulados em ambiente Matlab. Nessa etapa, por simplicidade, não foram considerados alguns efeitos que afetariam os sinais reais, tais como difração, problemas de alinhamento e variações térmicas, entre outros. Nas simulações realizadas foram considerados transdutores de 10 MHz, e água destilada foi utilizada como amostra de interesse. Essas condições permitiram que os efeitos da dispersão, representada pela variação da velocidade em função da frequência, fossem desprezados. Foram realizados testes considerando sinais com e sem a adição de ruído, comparando o desempenho dos métodos caso a caso.

Na etapa de medição, foram utilizados sinais reais, obtidos a partir de medições de amostras compostas por misturas de água em etanol, com diferentes concentrações. Essas medições foram realizadas usando o sistema de medição descrito no capítulo anterior, e a temperatura das amostras foi controlada em $25 \pm 0,01^\circ\text{C}$. Nessa etapa, foram utilizados apenas os métodos da correlação cruzada e da fase espectral, por terem apresentado resultados melhores em comparação com os demais métodos levando-se em consideração apenas os sinais simulados.

Finalmente, são apresentadas as considerações parciais, descrevendo-se os principais pontos observados ao longo da análise realizada.

4.1 Simulação

Inicialmente, as técnicas de medição descritas na revisão teórica foram analisadas usando como referência sinais sintéticos, gerados através do *software* Matlab. Esse procedimento foi adotado pois usando sinais sintéticos, pode-se realizar testes comparativos entre as diferentes técnicas propostas considerando sinais em situação ideal e sinais com ruído pré-definido.

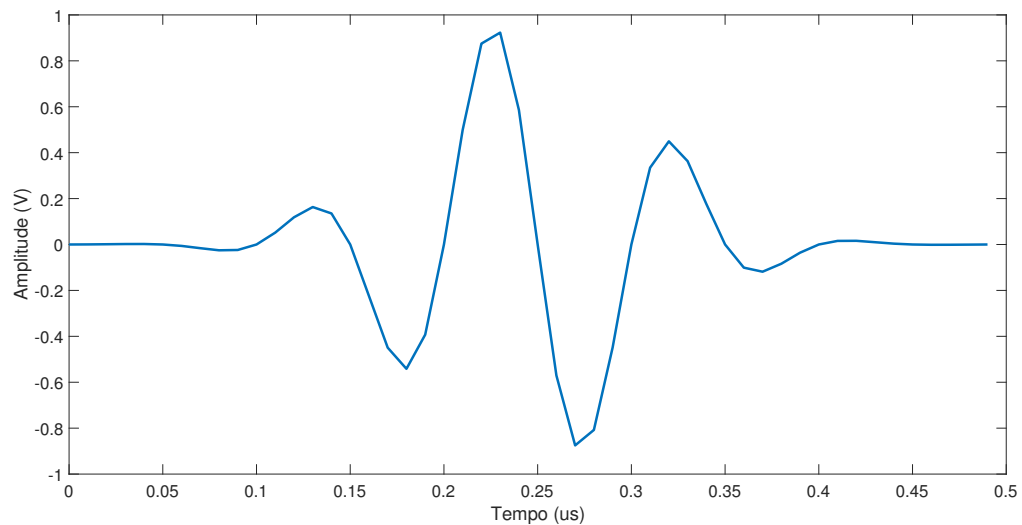
As simulações foram realizadas empregando sinais pulsados, gerados a partir do janelamento gaussiano de uma onda senoidal, cujas especificações foram definidas da seguinte forma:

- Frequência do sinal senoidal (f_c): 10 MHz
- Número de ciclos de senoide (n_c): 5

- Frequência de amostragem (f_s): 100 MHz
- Parâmetro α para a janela gaussiana: 4
- Tamanho da janela gaussiana: $n_c * f_s / f_c$

A Figura 19 apresenta o sinal gerado. Este sinal foi utilizado como o sinal de referência (Sref) ao longo dos cálculos apresentados na sequência.

Figura 19 – Sinal Simulado.



Fonte: do autor.

Para simular o sinal referente ao primeiro eco, utilizou-se uma cópia do sinal Sref defasada com um número conhecido de amostras. Por opção, adicionou-se uma defasagem de 135 amostras, o que corresponde a um tempo de atraso de $1,35 \mu s$, considerando a frequência de amostragem pré-definida. Para que fosse mais fácil identificar os dois sinais, a amplitude do sinal defasado (Smed) foi atenuada em 50%. Além disso, um pequeno nível de ruído (-40 dB) foi adicionado tanto a Sref quanto a Smed.

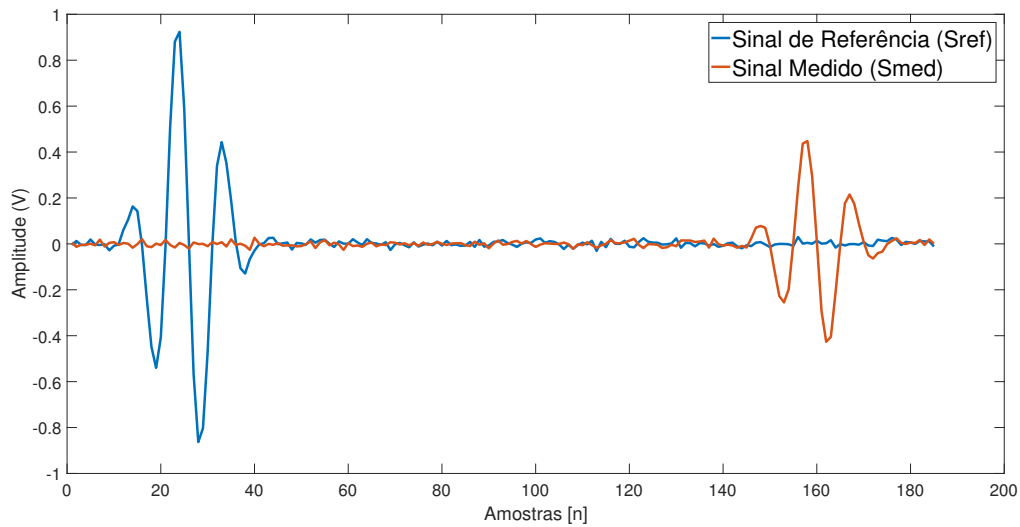
A Figura 20 apresenta os sinais de referência e primeiro eco em função do número de amostras. Os sinais apresentados foram utilizados em todos os testes realizados nesta Seção.

4.1.1 Método de Detecção de Pico

A primeira técnica de medição avaliada considera a detecção de pico dos sinais. Para facilitar a análise, utilizou-se o módulo de ambos os sinais, evitando picos máximos negativos. A Figura 21 apresenta os picos máximos de cada sinal.

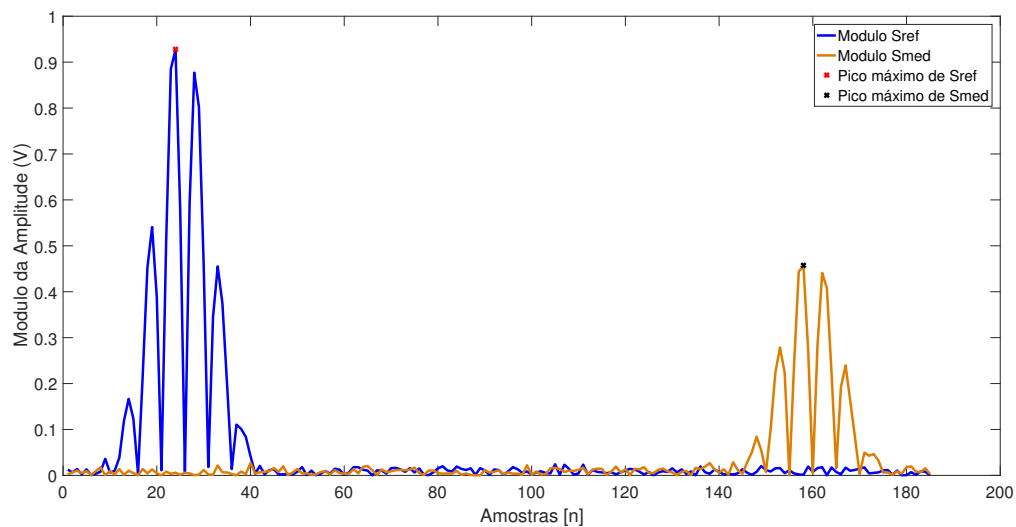
Para a condição apresentada na Figura 21, o valor de defasagem medido foi de 134 amostras. Essa diferença entre valor ajustado e valor medido está relacionada à definição do ponto de máximo, que nem sempre é precisa, visto que erros podem ocorrer

Figura 20 – Sinais Simulados Defasados.



Fonte: do autor.

Figura 21 – Medição usando valores de pico dos sinais.

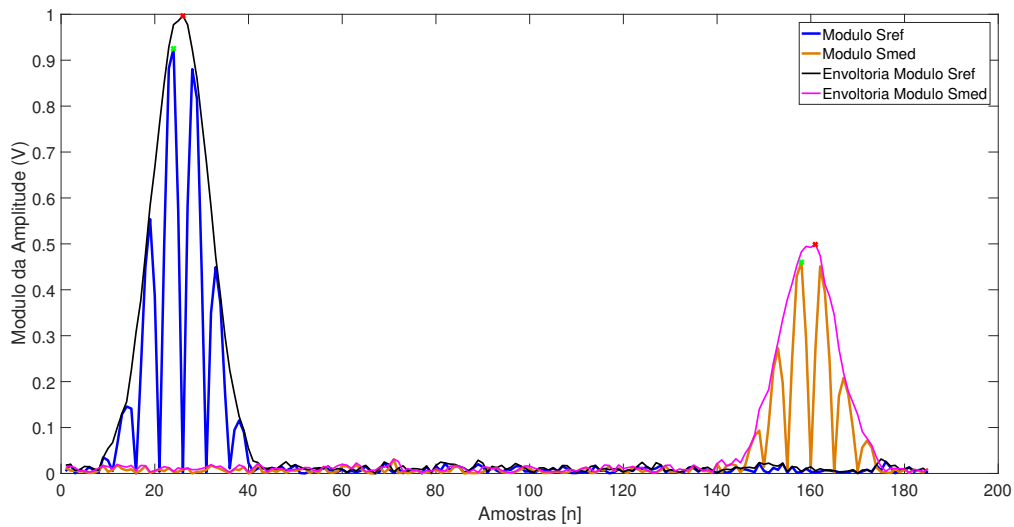


Fonte: do autor.

na amostragem dos sinais. Essas variações são resultado dos efeitos da quantização e da amostragem dos sinais, e como observado, afetam de forma direta os resultados obtidos através desse método.

Como mencionado na revisão teórica, a resolução deste método poderia melhorar caso os sinais fossem interpolados antes do cálculo dos pontos de máximo ou caso fossem detectados os picos da envoltória dos sinais. Considerando a segunda opção, foram calculadas as envoltórias dos sinais apresentados anteriormente e determinados os valores de pico dessas envoltórias. Para isso, utilizou-se o módulo da Transformada de Hilbert dos sinais apresentados, e o resultado pode ser visto na Figura 22.

Figura 22 – Medição usando valores de picos das envoltórias dos sinais.

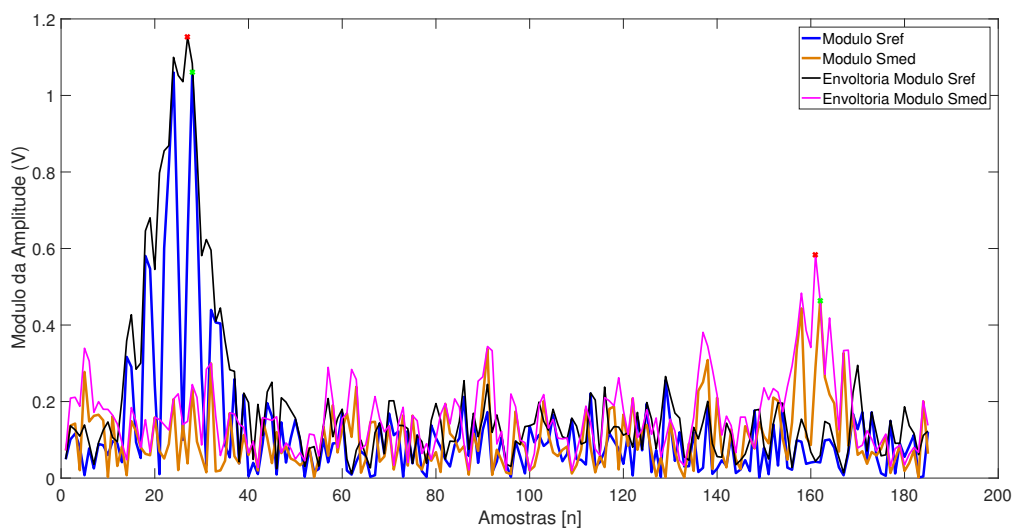


Fonte: do autor.

Ao aplicar essa metodologia, foi possível identificar o valor de defasagem pré-ajustado (135 amostras), indicando que de fato, essa abordagem é mais viável do que a anterior.

Na sequência, avaliou-se a eficiência deste método para casos aonde o nível de ruído dos sinais é maior. Para isso, o nível de ruído dos sinais foi elevado de -40 dB para -20 dB, e o resultado pode ser visto na Figura 23.

Figura 23 – Medição de pico da envoltória com ruídos.



Fonte: do autor.

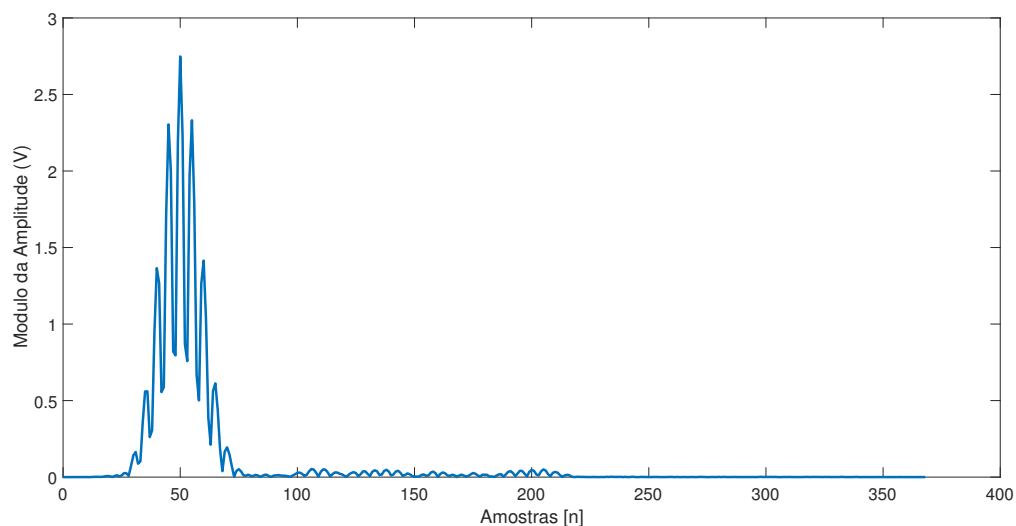
Como pode-se observar, ao elevar o nível de ruído os valores de pico não puderam mais ser identificados de forma correta, indicando que a técnica está limitada para casos

nos quais a relação sinal ruído (SNR, do inglês *Signal to Noise Ratio*) é elevada.

4.1.2 Método de Correlação Cruzada

O segundo método avaliado foi o da correlação cruzada. Como já mencionado, a vantagem desse método é que o ponto de máximo obtido após o cálculo da correlação indica a posição de máxima similaridade entre os sinais, minimizando assim os efeitos do ruído nos cálculos do ponto de máximo. A Figura 24 apresenta o módulo do resultado obtido após o cálculo da correlação cruzada dos sinais utilizados anteriormente, considerando -20 dB de ruído.

Figura 24 – Forma de onda obtida após o cálculo da correlação cruzada dos sinais.



Fonte: do autor.

Sabendo-se que o tamanho dos sinais simulados (185 pontos) e a defasagem adicionada (135 amostras) são conhecidos, pode-se utilizar a equação (2.19) para estimar o ponto correspondente ao valor de pico da correlação:

$$l = 2 * (185) - 1 - 185 - 135 + 1 = 50, \quad (4.1)$$

onde, l representa a amostra de maior amplitude da correlação cruzada.

Ao analisar a forma de onda apresentada no gráfico da Figura 24, observa-se que a amostra 50 corresponde exatamente ao valor de pico da correlação, conforme esperado.

Embora a técnica de correlação cruzada seja mais complexa do que os outros métodos descritos anteriormente, ela apresenta melhores resultados quando se deseja estimar o tempo de atraso entre dois sinais. Para sinais amostrados, essa técnica é limitada em relação à frequência de amostragem, pois não é possível garantir que o pico do sinal esteja representado na amostra.

Para melhorar a resolução do sinal, é possível utilizar a correlação cruzada em conjunto com técnicas de interpolação e até mesmo com a Transformada de Hilbert para detectar o pico da envoltória (ADAMOWSKI et al., 1990).

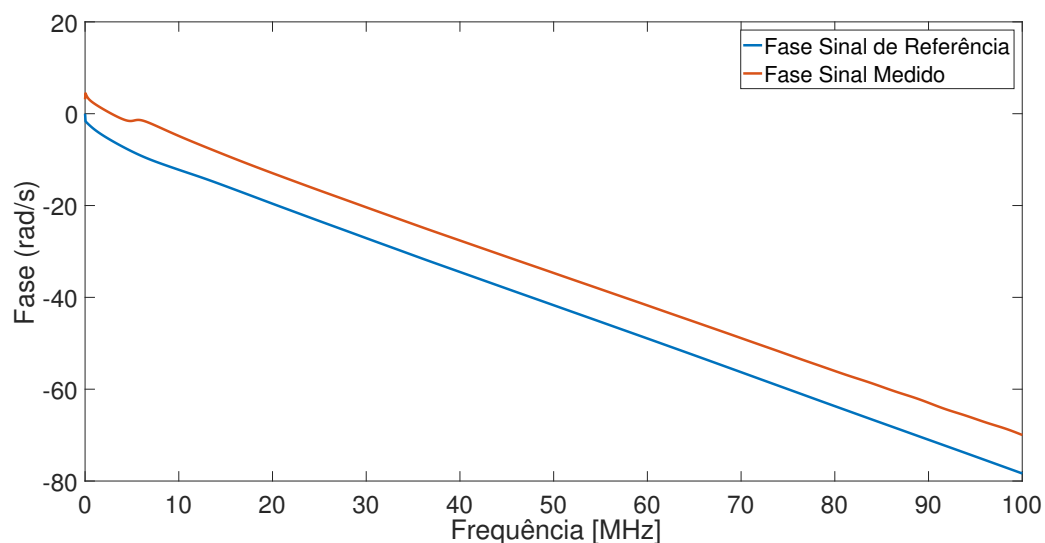
O problema da utilização dessa técnica de forma direta é que, como já mencionado, não se pode determinar de forma correta os valores da velocidade de fase e de grupo, utilizados para caracterizar os líquidos de interesse. Esses pontos motivaram o estudo apresentado por Marple (1999), que apresenta uma metodologia de cálculo para determinar os valores de atrasos de fase e de grupo a partir do cálculo da correlação cruzada. Essa metodologia não é avaliada nesta Seção pois, como mencionado, foram considerados sinais sem dispersão nesta etapa.

4.1.3 Método de Fase Espectral

O último método avaliado por meio de simulação foi o da fase espectral, onde os valores dos atrasos de fase e de grupo podem ser calculados a partir da fase dos sinais S_{ref} e S_{med} . Como já mencionado, para as simulações foram considerados sinais sem dispersão, cujo atraso de grupo é igual ao atraso de fase.

Para calcular a fase dos sinais, inicialmente calculou-se a Transformada Rápida de Fourier dos mesmos, cujo resultado foi usado para cálculo da fase. Foram considerados 8192 pontos para o cálculo da FFT, e o algoritmo de *unwrap* foi usado para compensar os saltos de fase antes do cálculo do tempo de voo. A Figura 25 mostra o resultado das fases de cada sinal.

Figura 25 – Fase dos sinais de referência e medido.



Fonte: do autor.

Usando essa técnica foi possível detectar corretamente o tempo de atraso entre os dois sinais considerando níveis de ruído de até -30 dB. Níveis de ruído mais eleva-

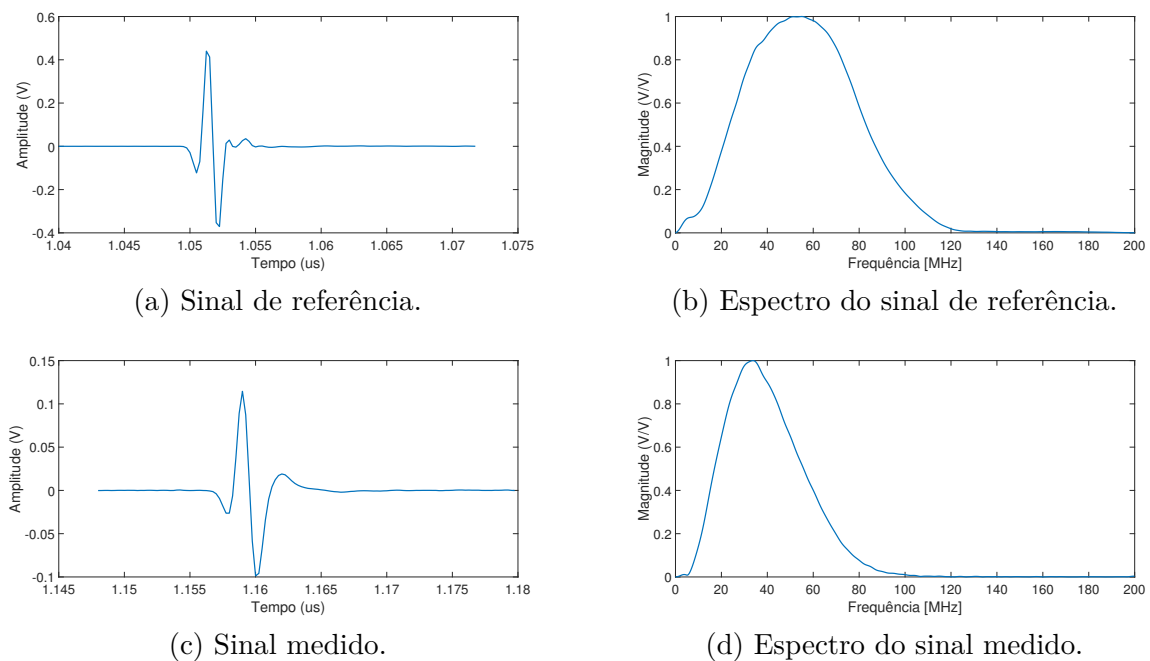
dos causaram modificações no comportamento da fase, resultando em erros de medição elevados.

4.2 Medições realizadas com misturas de água e etanol

Após a etapa de simulação, as técnicas baseadas no método da correlação cruzada e fase espectral foram aplicadas a sinais reais, obtidos após medições de amostras compostas por misturas de água e etanol. Nessa etapa, optou-se por não utilizar o método de detecção de pico pelo fato de que, dentre os métodos avaliados, ele foi o que apresentou o desempenho mais baixo.

A Figura 26 apresenta as formas de onda do sinal de referência em água (S_{ref}) e de um sinal medido (S_{med}), considerando uma amostra composta por uma mistura de água e etanol, com concentração de 80% (w/w) de etanol, onde o símbolo (w/w) representa a concentração em massa. Na parte direita, são apresentados os espectros de magnitude normalizados dos sinais S_{ref} e S_{med} . Nos dois casos, os sinais apresentados representam o primeiro sinal recebido pelo transdutor receptor.

Figura 26 – Sinais utilizados para o cálculo de velocidade de propagação do som, representados nos domínios do tempo e da frequência.



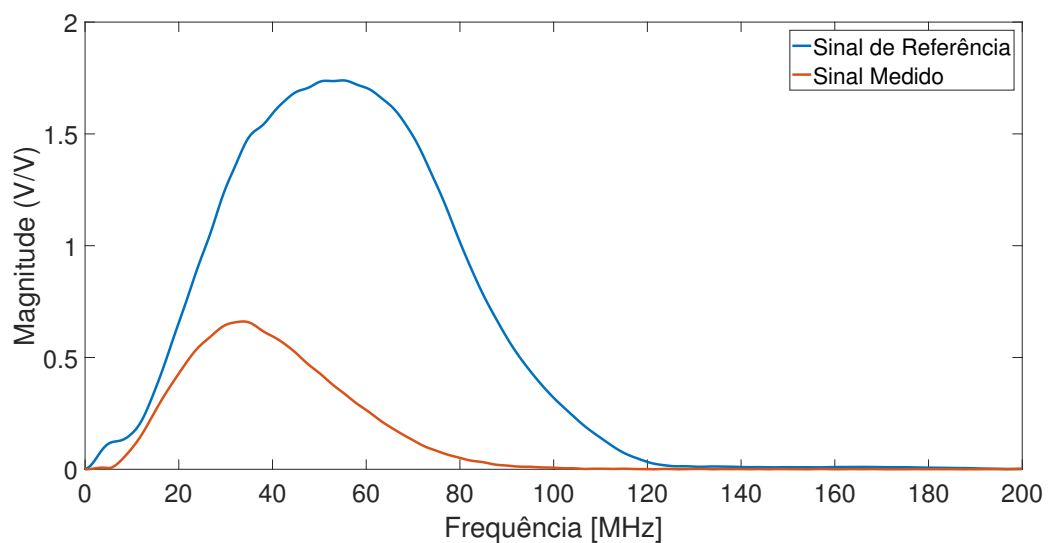
Fonte: do autor.

Comparando-se os dois sinais, observa-se que a amplitude do sinal medido é muito menor do que a amplitude do sinal de referência. Essa diferença é causada pelos efeitos da atenuação do som nas amostras de água e etanol, que é maior do que a atenuação na

água. Além disso, os níveis de atenuação mudam em função da concentração de água em etanol.

Ao analisar os espectros de magnitude, observa-se que os efeitos da atenuação aumentam em função da frequência, de modo que o espectro do sinal de referência apresenta uma banda muito mais larga do que o espectro do sinal medido. A Figura 27 apresenta uma comparação entre esses dois espectros. Nessa imagem, a magnitude dos dois espectros não foi normalizada para que fosse possível realçar as diferenças entre os sinais.

Figura 27 – Espectros dos sinais de referência e medido para uma mistura de água em etanol, com concentração de 80% (w/w).



Fonte: do autor.

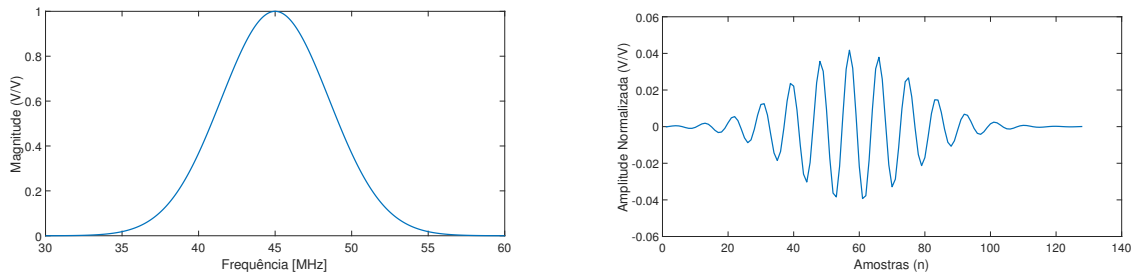
As diferenças de magnitude e largura de banda apresentadas pelos dois sinais, S_{ref} e S_{med} , justificam a utilização do método de medição relativo, onde apenas o primeiro sinal recebido para cada caso foi considerado. Ressalta-se que a atenuação seria ainda maior, caso os sinais de eco fossem utilizados num processo de medição direta.

O processo de cálculo das velocidades de fase e de grupo usando o método da fase espectral foi realizado usando diretamente os espectros de magnitude e fase dos sinais S_{ref} e S_{med} , de acordo com o procedimento descrito no Capítulo de revisão teórica. Para o cálculo usando o método da correlação cruzada, seguiu-se a abordagem proposta por Marple (1999).

Em seu trabalho, o autor informa que a metodologia apresentada deve ser aplicada a sinais com banda estreita, mas não define um valor específico para essa largura de banda. Nos ensaios realizados neste trabalho, foram realizados testes considerando uma largura de banda de 5 MHz, e a faixa de interesse foi limitada entre 30 MHz e 65 MHz. Optou-se por limitar a faixa de interesse dentro desse intervalo de forma empírica, após a analisar os espectros dos sinais adquiridos. Seria possível aumentar um pouco mais essa faixa, mas nessas condições, a relação sinal ruído seria reduzida.

Foram utilizados oito filtros gaussianos, com frequência central variando entre 30 MHz e 65 MHz em passos de 5 MHz. Um exemplo do espectro do magnitude de um dos filtros aplicados pode ser visto na Figura 28, que também apresenta a forma de onda do sinal de referência após o processo de filtragem.

Figura 28 – Resposta em frequência do filtro gaussiano com frequência central de 45 MHz e sinal filtrado.



(a) Resposta em frequência do filtro gaussiano.

(b) Sinal de referência filtrado.

Fonte: do autor.

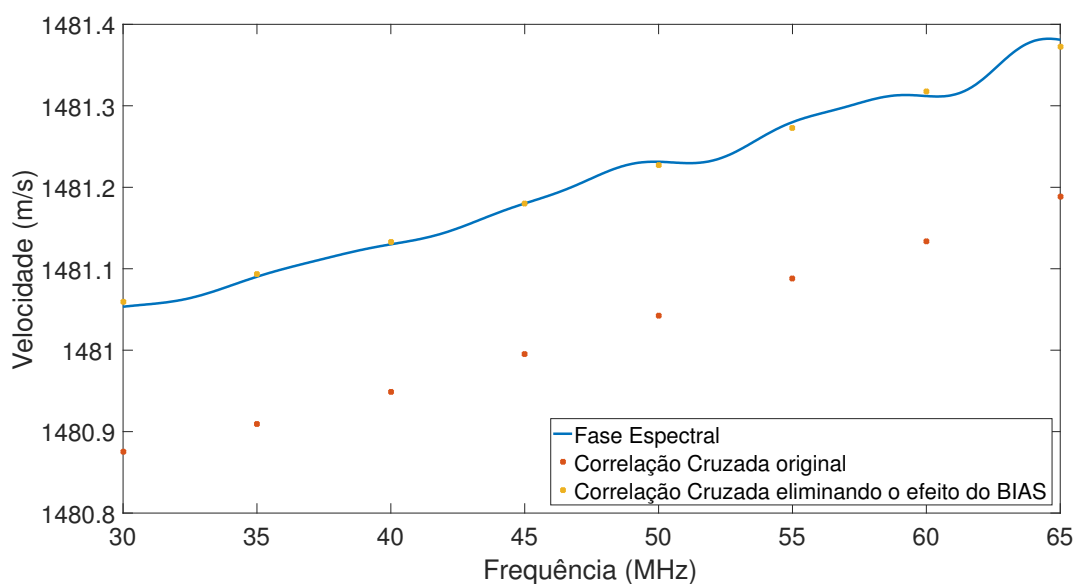
Sinais Sref e Smed filtrados foram utilizados nos cálculos de velocidade de fase e grupo pelo método da correlação cruzada.

4.2.1 Comparação entre resultados obtidos a partir da utilização das duas técnicas

Os métodos de cálculo de velocidade de fase e grupo usando fase espectral e correlação cruzada foram aplicados a um conjunto de amostras composto por misturas de água e etanol a diferentes concentrações. Nessa etapa, para os cálculos usando o método da fase espectral, foram considerados 8192 pontos para cálculo da FFT, e os erros causados por saltos de fase foram corrigidos usando a técnica proposta por Elvira et al. (2020). Para os cálculos usando o método da correlação cruzada, aplicou-se uma interpolação linear com três amostras aos sinais filtrados antes da realização dos cálculos. Esse procedimento foi adotado visando melhorar a resolução do método no que diz respeito à detecção dos valores de pico da correlação. A Figura 29 apresenta o resultado obtido ao calcular-se a velocidade de fase a partir das duas abordagens propostas.

Ao analisar o resultado apresentado, observa-se que os valores obtidos a partir do método da correlação cruzada apresentam um *bias*, que faz com que os valores permaneçam ligeiramente abaixo daqueles obtidos a partir do método da fase espectral. Esse comportamento é descrito no trabalho de Marple (1999), mas de acordo com o autor, os efeitos deveriam ter sido minimizados usando a técnica proposta. Adicionando-se um valor constante, calculado a partir da média entre o valor encontrado do método da fase espectral e da correlação cruzada, ao resultado encontrado, obtém-se o resultado apresen-

Figura 29 – Velocidade de fase para uma amostra com concentração de 50% de etanol em água.



Fonte: do autor.

tado em amarelo no gráfico, que mostra que os pontos coincidem com a curva obtida pelo método da fase espectral.

O efeito do *bias* foi observado tanto no cálculo da velocidade de fase quanto no cálculo da velocidade de grupo. Para efeito de comparação, esses valores de *bias* foram adicionados aos resultados calculados, gerando os resultados apresentados nas Figuras 30 e 31, onde foram analisadas amostras com concentração de etanol de 10%, 50%, 70% e 99,9%.

Para efeito de comparação, os dados obtidos considerando-se apenas a frequência de 45 MHz foram tabulados, e podem ser observados nas Tabelas 1 e 2.

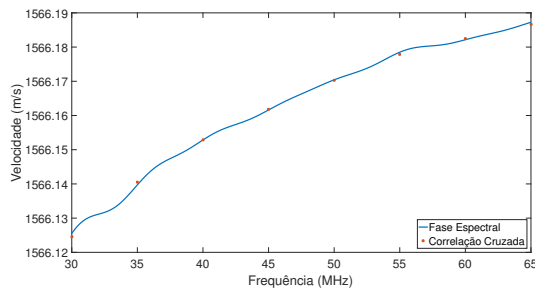
Tabela 1 – Valores de velocidade de fase obtidos a partir de misturas de água e etanol para frequência de 45 MHz.

Concentração de etanol em Água (w/w)	Velocidade de Propagação (m/s)		
	Fase Espectral	Correlação Cruzada	
		Somando <i>bias</i>	Calculado
10%	1566,18	1566,16	1565,96
50%	1480,97	1481,18	1480,99
70%	1350,27	1350,28	1350,13
100%	1143,41	1143,42	1143,32

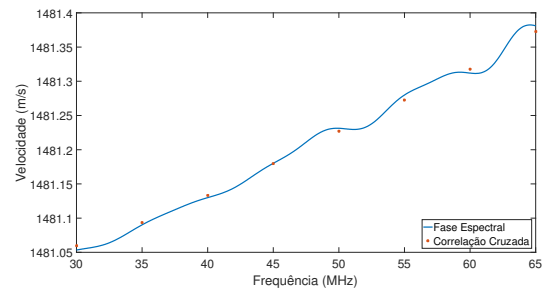
Fonte: do autor.

Os efeitos do *bias* foram observados em todas as amostras analisadas. É importante ressaltar que apesar de próximos, esses valores apresentaram variações em função da concentração das amostras analisadas, o que possivelmente indica que esse efeito pode

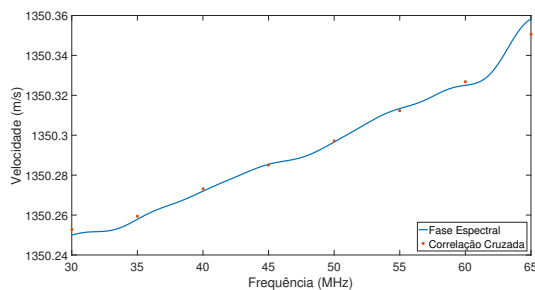
Figura 30 – Velocidade de Fase para amostras de água e etanol. Nas imagens, o valor de *bias* obtido após o cálculo da correlação cruzada foi adicionado aos valores medidos.



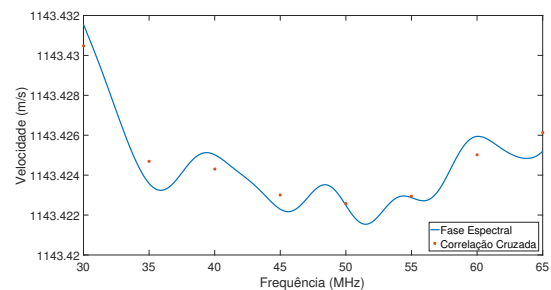
(a) Amostra com concentração de 10% de etanol.



(b) Amostra com concentração de 50% de etanol.



(c) Amostra com concentração de 70% de etanol.



(d) Amostra com concentração de 100% de etanol.

Fonte: do autor.

Tabela 2 – Valores de velocidade de grupo obtidos a partir de misturas de água e etanol para frequência de 45 MHz.

Concentração de etanol em Água (w/w)	Velocidade de Propagação (m/s)		
	Fase Espectral	Correlação Cruzada	
		Somando <i>bias</i>	Calculado
10%	1566,26	1566,25	1566,04
50%	1481,41	1481,66	1481,44
70%	1350,34	1350,37	1350,20
100%	1143,40	1143,40	1143,30

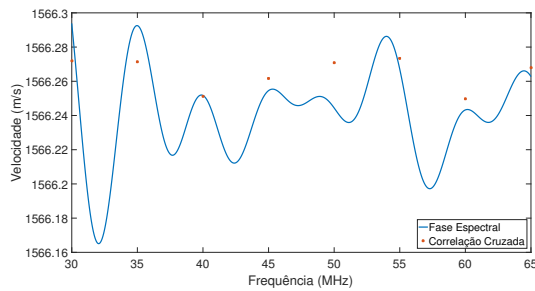
Fonte: do autor.

estar relacionado com alguma características envolvendo o formato dos sinais, que muda em função do aumento dos efeitos da atenuação do líquido analisado.

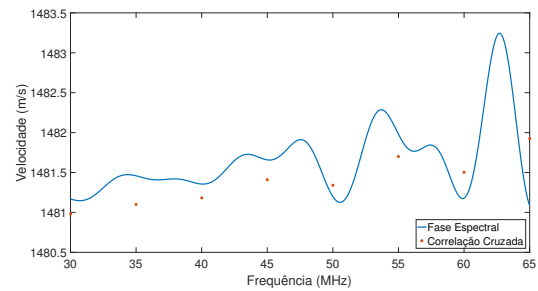
O mesmo processo foi repetido para amostras com concentrações de etanol em água variando entre 10% e 99,9%. Os valores de velocidade de fase obtidos a partir do método da fase espectral, considerando uma frequência de 45 MHz e temperatura de medição de 25°C, foram comparados à valores de referência disponíveis na literatura.

Para comparação, duas referências distintas foram consideradas. A primeira, referente ao trabalho desenvolvido por Tong et al. (2011), apresenta uma expressão que

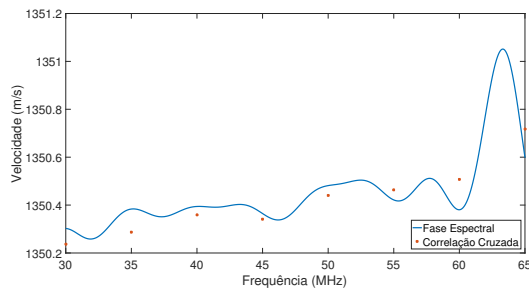
Figura 31 – Velocidade de Grupo para amostras de água e etanol. Nas imagens, o valor de *bias* obtido após o cálculo da correlação cruzada foi adicionado aos valores medidos.



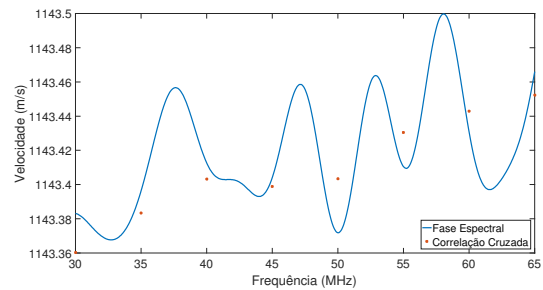
(a) Amostra com concentração de 10% de etanol.



(b) Amostra com concentração de 50% de etanol.



(c) Amostra com concentração de 70% de etanol.



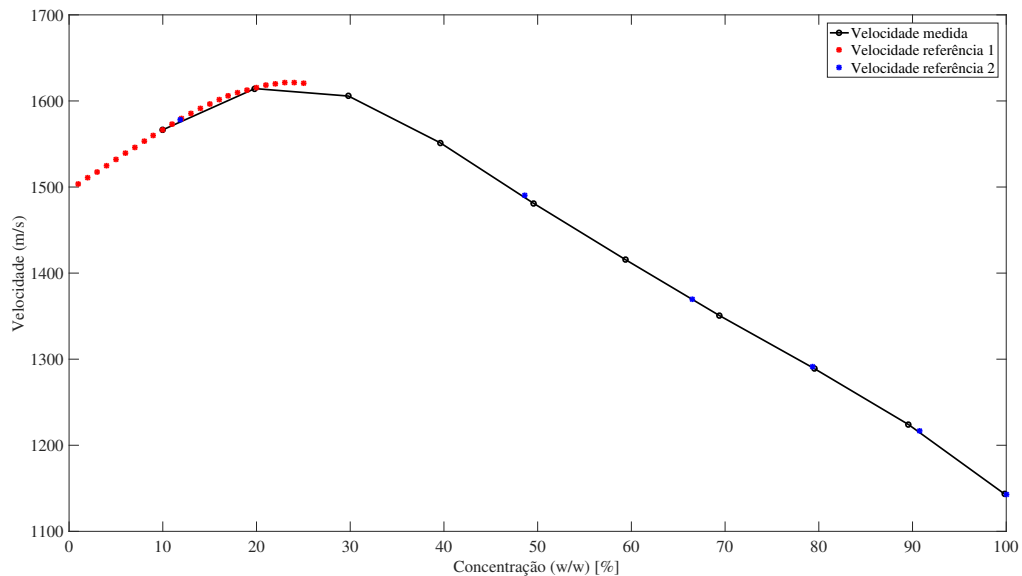
(d) Amostra com concentração de 100% de etanol.

Fonte: do autor.

relaciona a velocidade de propagação do som em amostras de água e etanol em função da temperatura, para concentrações de etanol em água de até 40% (w/w). A segunda, referente ao trabalho apresentado por Brai e Kaatze (1992), apresenta valores de velocidade de propagação medidos em misturas com concentrações mais elevadas de etanol em água. A Figura 32 apresenta o resultado dessa comparação. Na imagem, os pontos em vermelho foram obtidos a partir da referência 1, os pontos em azul foram obtidos a partir da referência 2 e a linha preta representa os valores obtidos utilizando-se o método da fase espectral.

É importante observar que usando-se somente as informações da velocidade de propagação, não seria possível diferenciar amostras de baixas e altas concentrações de etanol em água, pois a curva de velocidade apresenta uma inversão com valor de pico próximo a 25% de concentração (w/w) de etanol em água. Dessa forma, outros parâmetros acústicos, como atenuação, deveriam ser considerados para que fosse possível caracterizar essas amostras por ultrassom. Finalmente, os resultados mostram que os valores calculados neste trabalho estão de acordo com os apresentados por artigos de referência disponíveis na literatura.

Figura 32 – Velocidade de propagação medida e de referências em função da concentração de água e etanol a uma temperatura de 25°C.



Fonte: do autor.

4.3 Considerações Parciais

Neste capítulo foram apresentados os principais resultados obtidos ao longo do desenvolvimento deste trabalho. Na parte inicial, técnicas de medição de velocidade de propagação do som foram comparadas usando como parâmetro de entrada sinais simulados em ambiente Matlab. Os resultados mostraram que o método de detecção de pico apresenta uma menor resolução em comparação aos demais, pois além de ser afetado pelos efeitos da quantização e amostragem, também é bastante sensível ao ruído. A medição de velocidade a partir da detecção do pico da envoltória apresentou resultados melhores, mas ainda assim, apresentou resultados piores quando o nível de ruído adicionado foi maior.

O método da correlação cruzada foi menos afetado pelo aumento do nível de ruído dos sinais mas, assim como o método que utiliza detecção de pico, foi afetado pelos efeitos da quantização e amostragem, que em determinadas situações impedem que o pico do sinal de correlação seja determinado de forma precisa. O método da fase espectral, apesar de mais complexo, tem como vantagem o fato de possibilitar a determinação da velocidade em função da frequência de forma direta, a partir da relação entre as fases dos dois sinais. Como desvantagem, o método se mostrou bastante sensível ao aumento dos níveis de ruído, uma vez que a fase foi diretamente afetada.

As medições usando sinais reais mostraram que o método da correlação cruzada é uma alternativa viável para se determinar velocidades de fase e de grupo de sinais acústicos, desde que os mesmos apresentem banda limitada. Como desvantagem, pode-se citar a necessidade de se filtrar os sinais de banda larga antes dos cálculos e os efeitos do

bias, que foi observado tanto nos cálculos de velocidade de fase quanto de velocidade de grupo.

Os valores de *bias* encontrados apresentaram variação em função da frequência analisada e da concentração de etanol das amostras. Isso indica que, possivelmente, não se trata de um erro sistemático, mas de algum efeito que envolve mais de um parâmetro. Foram encontrados alguns trabalhos que relatam esse efeito na literatura, mas ao longo do desenvolvimento deste trabalho não foram encontradas soluções capazes de minimizar esses efeitos.

5 Considerações finais

Ao longo deste trabalho, foram apresentadas algumas técnicas para medição da velocidade de propagação do som em líquidos. Inicialmente, foram abordadas técnicas mais simples, como detecção de cruzamentos com zeros e detecção de pico. Os resultados obtidos por meio dessas técnicas não apresentaram boa resolução, sendo muito afetados pelos efeitos da amostragem e quantização, além de apresentarem alta sensibilidade ao ruído adicionado durante a etapa de simulação.

A grande vantagem de se utilizar o método da fase espectral é que pode-se calcular os valores de velocidade de fase e de grupo usando os sinais de banda larga de forma direta, sem que seja necessário filtrar ou aplicar outra técnica de processamento de sinais. As desvantagens do método são a baixa imunidade ao ruído, que ao afetar a fase irá provocar erros na medição, e os erros causados pelo problema dos saltos de fase gerados pelo algoritmo de *unwrap*. Ressalta-se que o problema dos saltos de fase pode ser resolvido usando a técnica proposta por Elvira et al. (2020), que permite determinar o número de saltos de fase gerado a partir de uma estimativa do valor da velocidade de fase.

O método da correlação cruzada, embora mais trabalhoso, apresentou resultados com comportamento semelhante aos obtidos usando o método da fase espectral. Entretanto, observou-se em todos os casos analisados a presença de um *bias*, cuja natureza não foi identificada ao longo deste trabalho. Destaca-se que os valores de *bias* encontrados apresentaram diferenças em função da concentração das amostras e frequência analisada, indicando que possivelmente o comportamento não é sistemático.

Finalmente, a comparação entre os resultados obtidos após o cálculo da velocidade de fase estão de acordo com os valores de referência obtidos a partir de trabalhos encontrados na literatura, validando assim os resultados obtidos. Ressalta-se que seria importante repetir essa análise considerando outros líquidos com densidades e coeficientes de atenuação diferentes, a fim de se avaliar principalmente os efeitos dessas propriedades nos cálculos de velocidade usando o método da correlação cruzada. Nesse sentido, seria interessante avaliar líquidos com menor atenuação, como misturas de água e cloreto de sódio, e líquidos mais atenuantes, como óleos de rícino ou silicone.

5.1 Sugestões Para Trabalhos Futuros

Como sugestão para desenvolvimento de trabalhos futuros, pode-se citar o estudo do efeito do *bias* gerado pelo uso da correlação cruzada durante cálculo das velocidades de fase e de grupo. Essa proposta envolveria tanto a identificação das causas que levam ao surgimento desse efeito quanto uma proposta de metodologia para correção desses problemas.

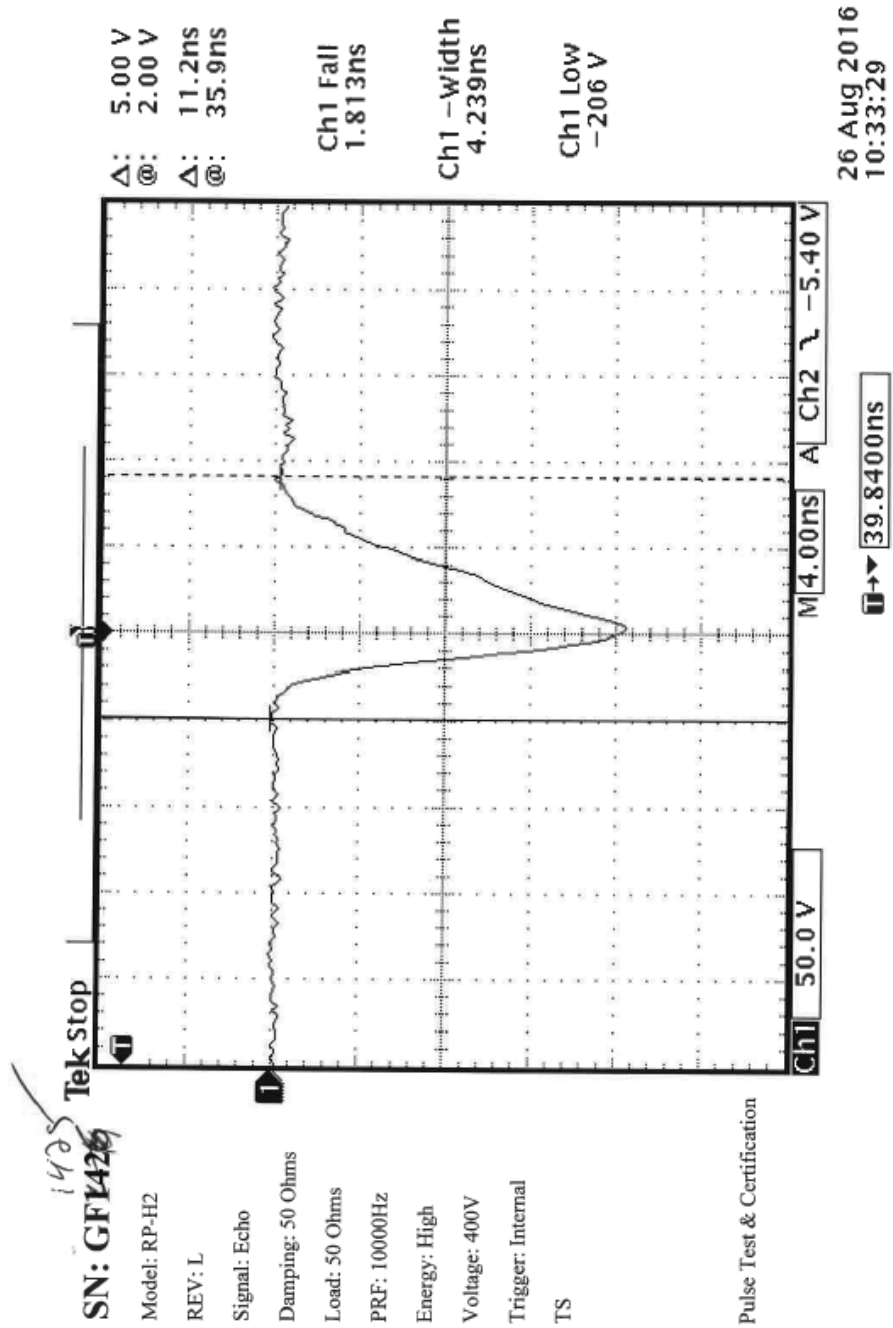
Também pode-se citar uma modificação no procedimento utilizado para adquirir os sinais, substituindo o sinal de excitação pulsado por um sinal gaussiano com número fixo de ciclos de senoide, frequência central pré-definida e largura de banda reduzida. Com essa configuração, seria possível analisar os sinais adquiridos usando os dois métodos, fase espectral e correlação cruzada, sem a necessidade de utilização dos filtros gaussianos, uma vez que os sinais seriam limitados em banda em função das características do sinal de excitação. A partir desse método, seria possível avaliar se o efeito do *bias* permanece com as mesmas características, ou se está sendo afetado pelo processo de excitação e filtragem aplicado ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

Referências

- ADAMOWSKI, J. C. et al. Sensores: Tecnologias & aplicações. In: EPUSP. *cap. 4 - Caracterização de Líquidos por Ultra-Som*. [S.l.], 1990. v. 1.
- BILANIUK, N.; WONG, G. S. K. Speed of sound in pure water as a function of temperature. *JAOCs*, Institute for National Measurement Standards, v. 93, n. 3, p. 1609–1612, 1993.
- BRAI, M.; KAATZE, U. Ultrasonic and hypersonic relaxations of monohydric alcohol/water mixtures. *The Journal of Physical Chemistry*, Washington DC, v. 96, n. 22, p. 8946–8955, 1992.
- CHANAMAI, R.; MCCLEMENTS, D. J. Ultrasonic attenuation of edible oils. *JAOCs*, University of Massachusetts, v. 75, n. 10, p. 1447–1448, 1998.
- COUPLAND, J. N.; MCCLEMENTS, D. J. Physical properties of liquid edible oils. *JAOCs*, Biopolymers and Colloids Research Laboratory, v. 74, n. 12, p. 1559–1564, 1997.
- DUKHIN, A. S.; GOETZ, P. J. *Characterization of Liquids, Nano- and Microparticulates, and Porous Bodies Using Ultrasound*. [S.l.]: Elsevier, 2002.
- ELVIRA, L. et al. Determination of phase jumps in the measurement of phase velocity of samples obeying a frequency power-law attenuation coefficient using kramers–kronig relations. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, v. 67, n. 7, p. 1438–1447, 2020.
- FIGUEIREDO, M. K. et al. Biofuel ethanol adulteration detection using an ultrasonic measurement method. *Fuel*, Elsevier Ltd, v. 91, n. 1, p. 209–212, 2012.
- HOLMES, M. J.; PARKER, N. G.; POVEY, M. J. W. Temperature dependence of bulk viscosity in water using acoustic spectroscopy. *Journal of Physics: Conference Series* 269, IOP Publishing, 2011.
- HULL, D. R.; KAUTZ, H. E.; VARY, A. Ultrasonic velocity measurement using phase-slope and cross-correlation methods. *NASA Technical Memorandum*, National Aeronautics and Space Administration, 1984.
- International Organisation of Legal Metrology (IOLM). *International Alcoholometry Tables*. 1973.
- JAVANAUD, C.; RAHALKAR, R. R. Velocity of sound in vegetable oils. *Fat Sci. Technol*, Food Research Institute, v. 90, n. 2, p. 73–75, 1988.
- JSR Ultrasonics. DPR500 Dual Pulser-Receiver Operator Manual. 2011.
- KHYAM, M. O. et al. Highly Accurate Time-of-Flight Measurement Technique Based on Phase-Correlation for Ultrasonic Ranging. *IEEE Sensors Journal*, v. 17, n. 2, p. 434–443, 2017.
- KINSLER, L. E. et al. *Fundamentals of Acoustics*. [S.l.]: John Wiley & Sons, Inc, 2000.

- KUO, H.-L.; WENG, J.-S. Temperature and frequency dependence of ultrasonic velocity and absorption in sperm and seal oils. *JAOCS*, Chung Yuan College of Science and Engineering, v. 52, p. 166–169, 1975.
- KUSHIBIKI, J. ichi et al. Vhf/uhf range bioultrasonic spectroscopy system and method. *IEEE Trans. Son. Ultrason.*, v. 42, n. 6, p. 1028–1039, 1995.
- MARPLE, S. L. Estimating group delay and phase delay via discrete-time analytic cross-correlation. *IEEE Transactions on Signal Processing*, v. 47, n. 9, p. 2621, 1999.
- MCCLEMENTS, D. J.; POVEY, M. J. W. Ultrasonic velocity measurements in some liquid triglycerides and vegetable oils. *JAOCS*, Procter Department of Food Science, v. 65, n. 11, p. 1787–1790, 1988.
- OLYMPUS. *Transdutores de Contato*. 2021. Disponível em: <<https://www.olympus-ims.com/pt/ultrasonic-transducers/contact-transducers>>.
- OPPENHEIM, A. V. *Discrete-Time Signal Processing*. [S.l.]: Pearson Education, 2011.
- SELFRIDGE, A. R. Approximate material properties in isotropic materials. *IEEE TRANSACTIONS ON SONICS AND ULTRASONICS*, v. 32, n. 3, p. 381–394, 1985.
- TIAGO, M. M. *Desenvolvimento de uma célula para medição de propriedades de líquidos por ultrassom com manipulação de amostras através de cubetas*. 94 f. Doutorado — Faculdade de Engenharia Campus de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Ilha Solteira, 2018.
- TIAGO, M. M. et al. Versatile ultrasonic spectrometer for liquids with practical sample handling by using standard cuvettes. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, v. 66, n. 1, p. 109–118, 2019.
- TONG, J. et al. Speed of sound and density of ethanol-water mixture across the temperature range 10 to 50 degrees Celsius. *Journal of Physics: Conference Series*, v. 279, n. 1, 2011.

ANEXO A – Sinal Típico Gerado pelo Pulsador DPR-500 HP-R2



ANEXO B – Fichas de Calibração dos Transdutores

OLYMPUS

Tel: 781-419-3900
www.olympusndt.com

TRANSDUCER DESCRIPTION

PART NO.: V2022
SERIAL NO.: 871099
DESIGNATION: CONTACT

FREQUENCY: 75.00 MHz
ELEMENT SIZE: .25 in. DIA.

TEST INSTRUMENTATION

PULSER/RECEIVER: PANAMETRICS 5628RPP
DIGITAL OSCILLOSCOPE: LeCroy LC564A / SN: LC56410253
TEST PROGRAM: TP103-3
CABLE: NONE

TEST CONDITIONS

PULSER SETTING: ENERGY: 1; DAMPING: 50
RECEIVER SETTING: ATTN: 46dB; GAIN: 20dB
TARGET: DELAY END
JOB CODE: TP200

MEASUREMENTS PER ASTM E1065

WAVEFORM DURATION:
-14DB LEVEL - 0.017 US
-20DB LEVEL - 0.019 US
-40DB LEVEL - 0.037 US

SPECTRUM MEASUREMENTS:
CENTER FREQ. - 76.68 MHz
PEAK FREQ. - 73.20 MHz
-6DB BANDWIDTH - 89.57 %

COMMENTS:

TESTED WITH 30DB ATTENUATOR
DAMPING=LESSENERGY+MORE
2.693 us SILICA DELAY LINE

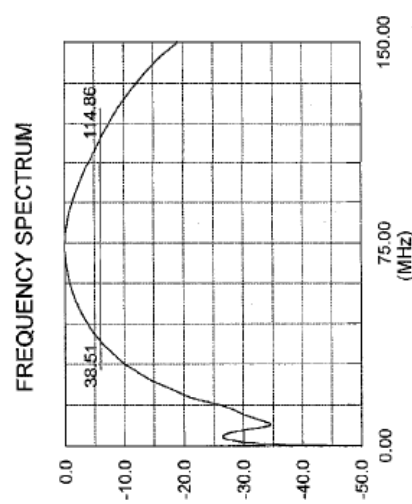
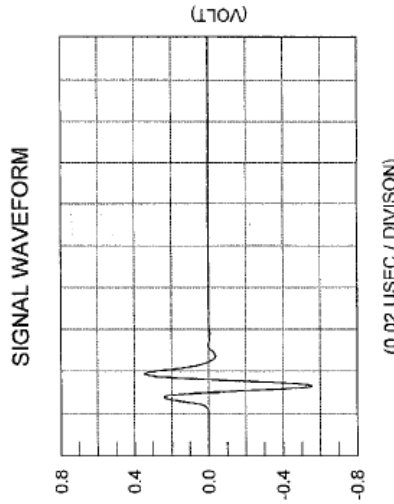
** ACCEPTED

TECHNICIAN (7)



DATE: 03-16-2016

This Certificate may not be reproduced except in full without written approval of Olympus NDT



TP103-WLM Rev. A





Tel: 781-419-3800
www.olympusndt.com

TRANSDUCER DESCRIPTION

PART NO.: V2022
SERIAL NO.: 971100
DESIGNATION: CONTACT

FREQUENCY: 75.00 MHz
ELEMENT SIZE: 25 ft. DIA.

TEST INSTRUMENTATION

PULSER/RECEIVER: PANAMETRICS-5628RPP
DIGITAL OSCILLOSCOPE: LeCroy LC564A / SN: LC56410263
TEST PROGRAM: TP103-3
CABLE: NONE

TEST CONDITIONS

PULSER SETTING: ENERGY: 1 ; DAMPING: 50
RECEIVER SETTING: ATTN: 46dB ; GAIN: 20dB
TARGET: DELAY END
JOB CODE: TP200

MEASUREMENTS PER ASTM E1065

WAVEFORM DURATION:
-14DB LEVEL - 0.020 US
-20DB LEVEL - 0.021 US
-40DB LEVEL - 0.035 US

SPECTRUM MEASUREMENTS:
CENTER FREQ. --- 79.60 MHz
PEAK FREQ. --- 83.70 MHz
-6DB BANDWIDTH - 96.07 %

COMMENTS:

TESTED WITH 3DB ATTENUATOR
DAMPING=LESS/ENERGY=MORE
2.559 us SILICA DELAY LINE

** ACCEPTED

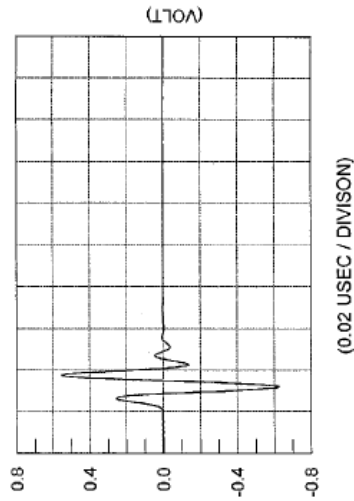
TECHNICIAN (7)

DATE: 03-16-2015

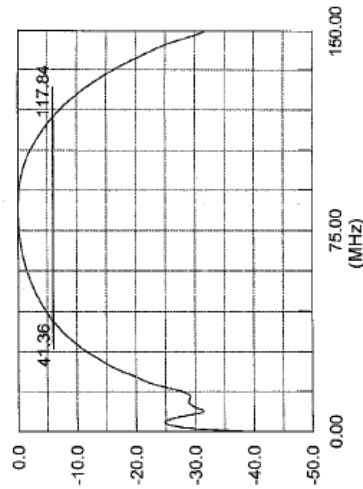
This Certificate may not be reproduced except in full without written approval of Olympus NDT



SIGNAL WAVEFORM



FREQUENCY SPECTRUM



TP1XX-WMM Rev. A






TERMO DE RESPONSABILIDADE

O texto do trabalho de conclusão de curso intitulado “Estudo de Técnicas para Medição da Velocidade de Propagação do Som em Líquidos” é de minha inteira responsabilidade. Declaro que não há utilização indevida de texto, material fotográfico ou qualquer outro material pertencente a terceiros sem a devida citação ou consentimento dos referidos autores.

João Monlevade, 26 de maio de 2022.


Ygor Luccianni Souza e Costa