



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



## **Trabalho de Conclusão de Curso**

# **Determinação do teor de gordura em amostras de leite por ultrassom**

**Gabriel Lacerda Faria**

João Monlevade, MG  
2022

**Gabriel Lacerda Faria**

# **Determinação do teor de gordura em amostras de leite por ultrassom**

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

F224d Faria, Gabriel Lacerda.  
Determinação do teor de gordura em amostras de leite por ultrassom.  
[manuscrito] / Gabriel Lacerda Faria. - 2022.  
48 f.: il.: color., gráf..

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

1. Instrumentos de medição. 2. Leite. 3. Processamento de sinais -  
Técnicas digitais. 4. Som - Velocidade. 5. Ultrassom. I. Tiago, Marcelo  
Moreira. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 681.2

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



## FOLHA DE APROVAÇÃO

**Gabriel Lacerda Faria**

### **Determinação do teor de gordura em amostras de leite por ultrassom**

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 30 de setembro 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 18/10/2022



Documento assinado eletronicamente por **Marcelo Moreira Tiago, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 18/10/2022, às 15:21, 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](http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **0413910** e o código CRC **805BB13D**.

# Agradecimentos

Agradeço primeiramente a mim, por não ter desistido nos momentos difíceis e por ter encontrado forças para perseverar por todos os obstáculos, agradeço a meus pais, minha irmã, meu amor e familiares, que me apoiaram e me incentivaram nos momentos difíceis e compreenderam minha ausência enquanto me dedicava a este projeto, aos meus amigos que me ajudaram nessa caminhada e compartilharam muitos momentos de alegria e dificuldades.

Aos professores, pelos ensinamentos e orientações que me trouxeram conhecimento, ao meu supervisor que me deu a oportunidade de aprender na prática e ainda me ensina sobre como ser um engenheiro.

A todos aqueles que contribuíram, de alguma forma, para a realização deste trabalho.

*"Good, is not a thing you are. It is a thing you do."  
– Kamala Khan*

# Resumo

Neste trabalho, métodos de medição de propriedades de líquidos por ultrassom foram utilizados para analisar amostras de leite UHT com teores de gordura variando entre 0,5% e 3%. Para isso, amostras de leite foram preparadas 24 horas antes de serem medidas e, durante o tempo de repouso, foram mantidas num refrigerador com temperatura controlada. Após o período de repouso, a temperatura das amostras foi ajustada em 23°C e a densidade das mesmas foi determinada a partir de um densímetro portátil. Em seguida, uma célula de medição ultrassônica equipada com transdutores de alta frequência (75 MHz) e sistema de controle térmico com erro de regime permanente menor do que 0,01°C foi usada para se determinar os valores de velocidade de propagação e coeficiente de atenuação em função da frequência, para uma temperatura de 25°C. Os resultados obtidos para este conjunto de amostras, e considerando uma frequência de 50 MHz, mostram que a velocidade de propagação do som diminui a medida que o teor de gordura das amostras de leite aumenta, numa relação de, aproximadamente, -1,64 ((m/s)/%). Em contrapartida, os valores obtidos para os coeficientes de atenuação, considerando a mesma frequência, aumentam em função do aumento do teor de gordura, numa relação de, aproximadamente, 51,3 ((Np/m)/%).

**Palavras-chave:** Ultrassom, velocidade de propagação, coeficiente de atenuação, células de medição, leite.

# Abstract

In this work, liquid properties measurement methods through ultrasound were used to analyze UHT milk samples with fat percentages varying from 0.5% to 3%, these samples were prepared 24 hours before the tests and, during the resting period, were kept in a refrigerator under control temperatures. After the resting period, the sample temperatures were adjusted to 23°C and their density were determined through the use of a portable hydrometer. Following the procedure, the ultrasonic measurement cell equipped with the high frequency transducers(75 MHz) and the thermal controlled system with an error below 0,01°C was used to determine the values of propagation velocity and attenuation coefficient in terms of frequency, to a 25°C sample. The results obtained for this set of samples, considering a central frequency of 50MHz, show us that the sound propagation velocity decreases as the fat percentage of the milk samples rises, in a ratio of approx. -1,64((m/s)%). In contrast to the values obtained for the attenuation coefficient, considering the same frequency, those rises with the increase of fat percentages, in a ratio of approx. 51,3((Np/m)/%).

**Keywords:** Ultrasound, Milk, Propagation Velocity, Atenuation, Measurement Cell.

# Lista de ilustrações

Figura 1 – Desenho esquemático da célula de medição para líquidos estacionários.	5
Figura 2 – Desenho esquemático da célula de medição de múltiplas reflexões. . . .	6
Figura 3 – Vista explodida da célula de medição. . . . .	6
Figura 4 – Célula de medição proposta por Dukhin e Goetz (2002). . . . .	7
Figura 5 – Ondas longitudinais e transversais. . . . .	9
Figura 6 – Corte longitudinal de um transdutor ultrassônico. . . . .	10
Figura 7 – Coeficientes de reflexão e transmissão. . . . .	11
Figura 8 – Sinais de excitação gaussianos. . . . .	12
Figura 9 – Método de medição por pulso-eco. . . . .	13
Figura 10 – Método de inspeção por transmissão. . . . .	14
Figura 11 – Célula de medição com a cubeta preenchida com ar. . . . .	15
Figura 12 – Célula de medição com a cubeta preenchida com o líquido de interesse.	16
Figura 13 – Método das múltiplas reflexões. . . . .	17
Figura 14 – Representação do campo acústico gerado por um transdutor. . . . .	18
Figura 15 – Tela principal do aplicativo desenvolvido. . . . .	24
Figura 16 – Vista em corte da célula de medição utilizada neste trabalho. . . . .	25
Figura 17 – Sinais de água deionizada e leite desnatado. . . . .	28
Figura 18 – Sinais de água deionizada e leite integral. . . . .	29
Figura 19 – Densidade das amostras de leite . . . . .	31
Figura 20 – Velocidade de propagação em amostras de leite . . . . .	33
Figura 21 – Velocidade de propagação em amostras de leite para $f = 50$ MHz . . . .	34
Figura 22 – Dispersão das curvas de velocidade . . . . .	35
Figura 23 – Coeficiente de atenuação das amostras de leite. . . . .	36
Figura 24 – Coeficiente de atenuação em amostras de leite para $f = 50$ MHz . . . .	37
Figura 25 – Valores de $\alpha_0$ obtidos a partir das curvas de atenuação. . . . .	38
Figura 26 – Interface inicial do aplicativo. . . . .	43
Figura 27 – Interface da aba osciloscópio. . . . .	44
Figura 28 – Interface da aba temperatura. . . . .	44
Figura 29 – Interface da aba transmissão. . . . .	44
Figura 30 – Interface da aba carregamento. . . . .	45
Figura 31 – Interface da aba frequência. . . . .	46

# Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
1.1	Objetivo	4
1.2	Revisão bibliográfica	4
1.3	Estrutura do trabalho	8
<b>2</b>	<b>REVISÃO TEÓRICA</b>	<b>9</b>
2.1	Transdutores ultrassônicos	9
2.2	Sistemas de medição acústicos	12
2.2.1	Método pulso-eco	13
2.2.2	Método transmissão	14
2.3	Métodos de medição	15
2.3.1	Método de reflexões relativas	15
2.3.2	Método de múltiplas reflexões	17
2.4	Efeitos causados pela difração, paralelismo e temperatura	18
2.5	Cálculo da velocidade de propagação do som	19
2.6	Cálculo dos coeficiente de atenuação	21
2.7	Considerações parciais	22
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>23</b>
3.1	Sistema de medição ultrassônico	23
3.2	Calibração do sistema e medição das amostras	24
3.2.1	Calibração do sistema	25
3.2.2	Procedimento de medição	26
3.3	Preparação das amostras	27
3.4	Definição do método de medição	28
3.5	Considerações parciais	29
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>31</b>
4.1	Densidade das amostras de leite analisadas	31
4.2	Velocidade de propagação do som em amostras de leite	32
4.3	Coefficiente de atenuação acústico em amostras de leite	35
4.4	Considerações parciais	37
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>	<b>39</b>
5.1	Propostas para desenvolvimento de próximos trabalhos	40
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>41</b>

	<b>APÊNDICE A – APLICATIVO . . . . .</b>	<b>43</b>
<b>A.1</b>	<b>Instrumentos . . . . .</b>	<b>43</b>
<b>A.2</b>	<b>Configuração do sistema de medição . . . . .</b>	<b>44</b>
	<b>ANEXO A – FICHAS DE CALIBRAÇÃO DOS TRANSDUTORES</b>	<b>47</b>

# 1 Introdução

O leite bovino é um produto que faz parte da alimentação da população e é utilizado como matéria prima para produção de diversos outros tipos de alimentos, tais como queijos, iogurtes, doces, entre outros. Em sua forma natural (cru), o leite bovino pode apresentar micro-organismos que, quando consumidos, podem causar mal a saúde do consumidor. Para eliminar a presença desses micro-organismos, o leite cru deve ser submetido a um processo de tratamento antes de ser consumido. Atualmente, dois tipos de tratamento são utilizados pela indústria, a pasteurização e a esterilização, e os dois processos possuem regulamentação definida pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento a partir das Instruções Normativas MAPA Nº 59/2019 e MAPA Nº 55/2020 e (MAPA, 2019; MAPA, 2020).

Em geral, o processo de pasteurização utilizado por empresas do setor lácteo é o chamado processo rápido, onde o leite deve ser aquecido a temperaturas entre 72 °C e 75 °C por um período de tempo de 15 s a 20 s e, na sequência, resfriado a uma temperatura entre 2 ° e 4 °C num intervalo de tempo máximo de 10 s.

O processo de esterilização mais usado em aplicações industriais é baseado no método de temperatura ultra rápido (UHT, do inglês *Ultra High Temperature*). Convém ressaltar que o leite deve ter sido submetido a uma primeira etapa de tratamento (incluindo filtragem e pasteurização) antes de ser submetido ao processo de esterilização. Nesse processo, inicialmente o leite recebe a adição de estabilizantes, que visam evitar a sedimentação de caseínas, passa por um processo de pré-aquecimento a uma temperatura de 80°C por dois minutos. Em seguida, o leite é aquecido a altas temperaturas (entre 130 °C e 150 °C) por um período de tempo de 3s a 5s e. Finalmente, o leite é depositado numa câmara de vácuo, onde passa por um processo de resfriamento rápido até atingir uma temperatura de 32 °C. Nesse instante são removidos os vapores de água gerados e o leite é envasado.

O leite disponível para consumo comercializado em supermercados costuma ser dividido em três categorias: A, B e C. Essa distinção, regulamentada pela Instrução Normativa MAPA Nº59/2019, foi definida em função do modo de produção adotado pelos produtores, sendo considerados os processos de ordenha, transporte e tratamento do leite. É importante ressaltar que as diferenças no processo de produção podem influenciar a carga bacteriana do leite.

O leite de vaca é um produto consumido diariamente no país e, portanto, deve ser submetido a um intenso controle de qualidade. A Instrução Normativa MAPA Nº55/2020 define os métodos oficiais para análise da qualidade do leite e seus derivados. Todos os processos indicados por esta resolução envolvem métodos físico-químicos, que requerem alterações nas propriedades do leite. Em geral, essas análises são feitas a partir de equipa-

mentos específicos que utilizam as amostras de leite e reagentes químicos para identificação de diferentes características do material.

Para avaliar a qualidade do leite, devem ser analisados parâmetros físico-químicos distintos, tais como densidade relativa ou índice crioscópico, parâmetros higiênico-sanitários, como a contagem total bacteriana e a detecção de resíduos de antibióticos, e parâmetros de composição, como gordura e extrato seco desengordurado.

A Instrução Normativa MAPA N<sup>o</sup>55/2020 também classifica o leite em função de seu teor de gordura. De acordo com esta definição, considera-se leite desnatado aquele que apresenta um teor de gordura máximo de 0,5%, leite semidesnatado aquele que apresenta teores de gordura entre 0,6% e 2,9%, e leite integral aquele que apresenta um teor de gordura de 3%. A Instrução Normativa também prevê que estas e outras informações relevantes sejam divulgadas nos rótulos das embalagens de leite comercializadas.

Os métodos regulamentados para análise do leite brasileiro dependem de um conjunto de vários processos físico-químicos utilizados para determinar as diferentes características mencionadas anteriormente. Dentre os métodos mais utilizados para se determinar o teor de gordura, pode-se destacar o método de Gerber e o método Rose-Gottlieb.

O método de Gerber (ou butirométrico) é realizado a partir de um processo químico utilizando ácido sulfúrico. O ácido ataca a matéria orgânica com exceção da gordura, que é separada posteriormente através de um processo de centrifugação. Trata-se de um processo que causa severa alteração na amostra para a medição do teor de gordura (Alves D.; Goldschmidt A., 2014).

O método Rose-Gottlieb é frequentemente utilizado como referência pela indústria nacional por ser mais simples e barato (Alves D.; Goldschmidt A., 2014). Nesse método, a gordura do leite é extraída através de um processo químico, que pode ser conduzido de formas diferentes dependendo dos reagentes e equipamentos utilizados. Em seguida, a gordura extraída é pesada, e o teor de gordura é calculado relacionando à massa inicial da amostra de leite com a massa de gordura medida.

Métodos físico-químicos também podem ser usados para determinar a quantidade de extrato seco total (EST), usado para determinar a concentração total de componentes sólidos presentes no leite. Relacionando-se os valores de extrato seco total e teor de gordura, pode-se determinar a quantidade de extrato seco desengordurante (ESD), que representa a parcela de sólidos não gordurosos presentes no líquido.

Vários métodos podem ser empregados para se determinar o EST, mas uma das opções mais utilizadas devido a sua simplicidade é o método gravimétrico. Nesse método, a água presente no leite é separada da mistura, e a diferença de massa entre a amostra resultante e a amostra original indica a quantidade de extrato seco total. Esse é um dos métodos analíticos mais precisos para medição do EST, mas como desvantagem, requer um tempo elevado para que o processo de separação seja finalizado devido aos diversos processos laboratoriais que devem ser realizados (Alves D.; Goldschmidt A., 2014).

Um segundo método muito utilizado em aplicações industriais para a determinação do EST baseia-se na aplicação de uma expressão matemática que relaciona EST, densidade e teor de gordura da amostra. Essa expressão, conhecida como fórmula de Fleishmann (Alves D.; Goldschmidt A., 2014), é definida como:

$$\text{EST} = 1,2G + 2,665(100D - 100)/D, \quad (1.1)$$

onde,  $D$  representa a densidade do leite em relação à água a uma temperatura de  $15^{\circ}\text{C}$ , e  $G$  é o teor de gordura da amostra, sendo ambos os parâmetros representados de forma percentual.

Observa-se que para que seja possível aplicar essa equação, é necessário medir a densidade e o teor de gordura do leite usando métodos físico-químicos. Métodos alternativos, preferencialmente não-destrutivos e não-invasivos, tem sido estudados por vários autores ao longo dos anos. Essas pesquisas resultaram no desenvolvimento de novos equipamentos, muitos deles utilizados atualmente por indústrias do setor lácteo.

Um dos métodos propostos na literatura baseia-se na análise via infravermelho, e consiste na absorção de energia infravermelha pelas partículas do leite. Um exemplo desse tipo de sistema é apresentado por Barbano e Clark (1989), que descreve uma célula de medição por infravermelho (IRMA) capaz de emitir dois feixes ópticos distintos de forma simultânea. Esses feixes se propagam por dois líquidos distintos, sendo um deles de referência e o outro a amostra de leite. A partir da diferença de absorção medida entre a amostra e o material de referência, obtém-se um parâmetro óptico que pode ser relacionado a um dos métodos tradicionais de análise. Nesse processo, considera-se uma amostra de leite homogênea e a temperatura constante.

Por se tratar de uma abordagem simples e não destrutiva, essa metodologia vem sendo utilizada para a fabricação de alguns equipamentos disponíveis no mercado. Como exemplo, pode-se citar o MilkoScan-FT1 fabricado pela empresa FOSS, que é capaz de analisar um total de 15 parâmetros do leite, além de analisar também alguns derivados (FOSS, 2018). Entretanto, ressalta-se que são métodos secundários e requerem a calibração à partir de resultados das análises químicas.

Nas últimas décadas, essas análises também passaram a ser realizadas a partir de sistemas de medição ultrassônicos. Assim como no caso dos sistemas de medição ópticos, os sistemas ultrassônicos podem ser utilizados de forma não-invasiva e não-destrutiva. Essa caracterização pode ser realizada através de parâmetros obtidos de forma direta como, por exemplo, a velocidade de propagação e o coeficiente de atenuação acústicos, ou de forma indireta, a partir de parâmetros como impedância acústica, a densidade e a compressibilidade adiabática. A partir desses parâmetros, pode-se determinar o teor (ADAMOWSKI et al., 2002; NAZÁRIO et al., 2009) e o tamanho das moléculas de gordura (DUKHIN; GOETZ, 2002; DORABIATO, 2007) presentes no leite.

A medição desses parâmetros de forma não-destrutiva e sem a necessidade de utilização de reagentes químicos ou soluções de alto risco motivou o desenvolvimento deste trabalho, cujo objetivo é relacionar as propriedades acústicas do leite ao seu teor de gordura. Para isso, utilizando o sistema de medição acústico proposto por Tiago (2018), foram realizadas medições de amostras de leite UHT com diferentes valores de teor de gordura a uma temperatura constante. Os resultados obtidos após os cálculos realizados usando os sinais adquiridos serão apresentados nos próximos capítulos deste trabalho.

## 1.1 Objetivo

O objetivo principal deste trabalho é determinar o teor de gordura de amostras de leite pasteurizado através de ensaios não destrutivos por ultrassom, usando transdutores de alta frequência (75 MHz). Os objetivos específicos são:

- Desenvolver um *software* para controle do sistema de excitação e medição acústico;
- Preparar amostras de leite com diferentes teores de gordura;
- Analisar diferentes técnicas para cálculo de velocidade de propagação e atenuação do som em líquidos;
- Analisar o desempenho do sistema de medição acústico operando com apenas um transdutor (modo pulso-eco) em relação ao desempenho usando dois transdutores (transmissão);
- Avaliar os efeitos do teor de gordura das amostras nos valores de velocidade e coeficiente de atenuação acústicos em função da frequência;

## 1.2 Revisão bibliográfica

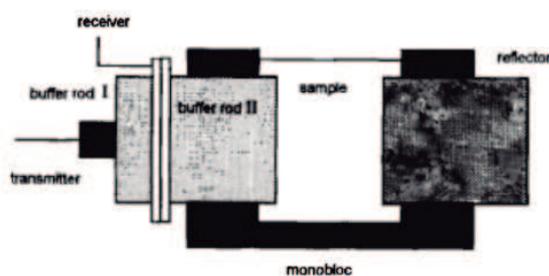
Sinais ultrassônicos são compostos por ondas mecânicas com diferentes características, que operam numa faixa de frequências superior aos limites da audição humana, ou seja, acima de 20 kHz. Essas ondas podem se propagar através de materiais sólidos, líquidos e gasosos com diferentes níveis de viscosidade, densidade, opacidade e impedância acústica. Essas características possibilitam a utilização de sistemas ultrassônicos para caracterização de materiais em aplicações industriais (POVEY, 1997a).

O objetivo deste trabalho é caracterizar amostras de líquidos com diferentes características por ultrassom. Para isso, é necessário compreender o funcionamento dos sistemas de medição acústicos usados para esse tipo de aplicação. Para o projeto de uma célula de medição, deve-se levar em consideração vários parâmetros, tais como o tipo de líquido que será analisado e suas propriedades físicas, o tipo de onda que será usado para caracterizar

o material, o tipo de transdutor, a faixa de frequências a ser considerada, o método de medição (usando onda contínua, onda pulsada, com transdutores operando em transmissão ou pulso-eco), as propriedades físicas dos materiais usados para fabricar a célula de medição, o método de acoplamento acústico entre transdutor e amostra, as características do sistema de controle térmico, entre outros.

O modelo de célula proposto por Adamowski et al. (1995) (Figura 1) faz uso de um transdutor de elemento duplo, que pode funcionar tanto como transmissor quanto como receptor. Nesse sistema, a medição da velocidade do som na amostra é feita utilizando as reflexões que ocorrem quando a onda emitida atinge a parede oposta da célula e retorna para o transdutor. A célula foi desenvolvida para medir a densidade em líquidos estacionários e em movimento, a partir das relações entre o coeficiente de reflexão e a velocidade de propagação.

Figura 1 – Desenho esquemático da célula de medição para líquidos estacionários.

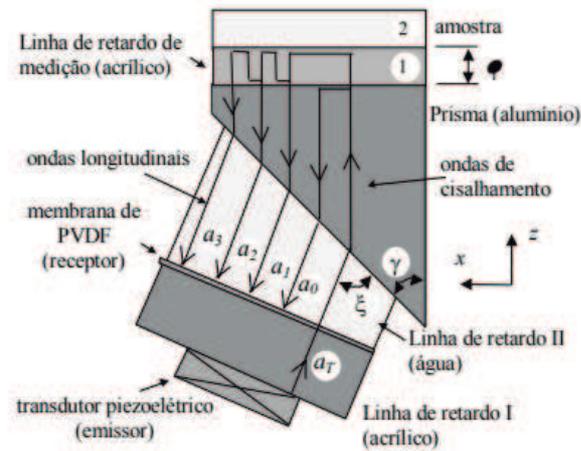


Fonte: Retirado de Adamowski et al. (1995).

Adamowski et al. (2002) também propôs uma variação da primeira célula de medição apresentada (Figura 2). O novo modelo também faz uso das reflexões das ondas para obter medições de densidade e viscosidade a partir das informações de velocidade de propagação e coeficiente de atenuação dos sinais, mas diferentemente do modelo anterior, essa célula foi projetada com camadas de materiais com propriedades conhecidas, que podem ser utilizadas para se estimar os coeficientes de reflexão e transmissão entre camadas e amostra de interesse. A medida que o sinal se propaga pelos meios, o ângulo de abertura do feixe acústico aumenta devido aos efeitos da difração acústica. Devido a essa característica, a célula proposta foi projetada com um receptor de PVDF (do inglês *Polyvinylidene fluoride*) de larga abertura, que aumenta a área do elemento receptor, minimizando os efeitos da difração. Além disso, o sistema permite a realização de um ajuste angular do transdutor emissor, que pode ser usado para melhorar o alinhamento do elemento transmissor em relação ao receptor.

A célula de medição proposta por Tiago (2018) (Figura 3) utiliza dois transdutores para realizar as medições, aplicando conceitos de múltiplas reflexões e medições relativas à água para obtenção das características dos fluídos. O modelo apresentado pelos autores possui um sistema de controle de temperatura a seco, composto por células de efeito Pel-

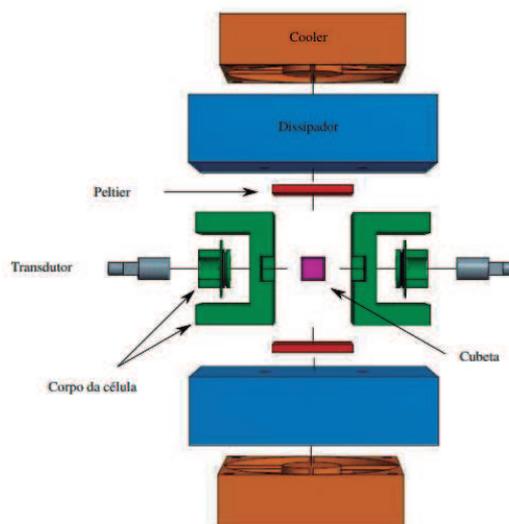
Figura 2 – Desenho esquemático da célula de medição de múltiplas reflexões.



Fonte: Retirado de Adamowiski et al. (2002).

tier acionadas eletronicamente e um medidor de temperatura de precisão, com resolução de 1 mK. O sistema de controle apresentado pode ser usado para ajustar a temperatura da amostra dentro de uma faixa valores entre 15°C e 50°C, com um erro em regime permanente menor do que 0,01°C. Os resultados obtidos mostram que o sistema de medição é capaz de medir velocidade de propagação e coeficiente de atenuação acústicos, com incertezas da ordem de 1 cm/s e 1 Np/m, respectivamente.

Figura 3 – Vista explodida da célula de medição.

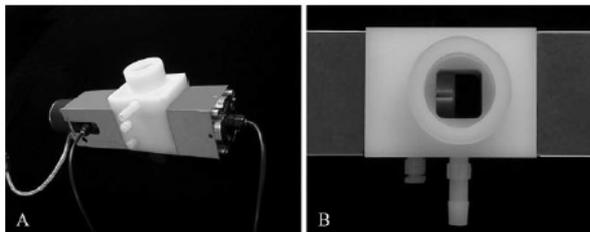


Fonte: Retirado de Tiago (2018)

Dukhin e Goetz (2002) apresenta uma proposta de análise do coeficiente de atenuação e do tamanho de moléculas de gordura para amostras de leite e seus derivados. As medições reportadas pelo autor foram realizadas usando a célula de medição apresentada na Figura 4, onde dois transdutores com as mesmas características, separados por um

vão ajustável controlado por um motor de passo, foram utilizados. No sistema, um dos transdutores foi mantido fixo, e o segundo foi ajustado de forma a manter o paralelismo entre os dois transdutores. Este modelo de célula foi projetado para caracterizar sistemas homogêneos particulados e emulsões, como leite, por exemplo.

Figura 4 – Célula de medição proposta por Dukhin e Goetz (2002).



Fonte: Retirado de Dukhin e Goetz (2002)

A caracterização de amostras de leite por ultrassom foi tema do trabalho desenvolvido por Nazário et al. (2009), onde uma célula de medição foi usada para medir de forma direta a velocidade de propagação e o coeficiente de atenuação de amostras de leite com diferentes teores de gordura. Usando transdutores com frequência central de 5 MHz e um sistema composto por camadas fabricadas com materiais com propriedades acústicas conhecidas, os autores usaram o método de reflexões relativas para calcular a densidade das amostras. As análises foram realizadas usando amostras de leite UHT, com teores de gordura variando entre 0,5 e 3,0 %, e temperaturas entre 24°C e 30°C. Como resultado, os autores encontraram variações de velocidade de propagação em função da temperatura e teor de gordura das amostras, mas não encontraram variação considerável ao analisarem o coeficiente de atenuação das amostras para esta faixa de frequências.

De acordo com Dorabiato (2007), a quantidade de sólidos totais, a quantidade de água e o teor de gordura de amostras provocam alterações na compressibilidade, viscosidade e densidade do leite. Essas características estão diretamente relacionadas as medidas de velocidade de propagação e coeficiente de atenuação dessas amostras. O autor também relata que para temperaturas abaixo de 16,5°C, a velocidade de propagação som aumenta em função do aumento do teor de gordura e da concentração de ESD da amostra de leite analisada.

(DUKHIN; GOETZ, 2002) apresenta um estudo relacionado o teor de gordura de amostras de leite e seus derivados líquidos com a variação do coeficiente de atenuação em função da frequência. O autor utiliza um sistema de medição com transdutores de alta frequência (100 MHz), onde a temperatura das amostras foi controlada a partir da utilização de um banho termostático. A variação do coeficiente de atenuação foi utilizada pelo autor para calcular o tamanho das moléculas de gordura presentes nas amostras. Além disso, o autor também analisou os efeitos de um conjunto de reações químicas que resultam na deterioração do leite em função do tempo de armazenamento. O autor relata

que as alterações nos valores dos coeficientes de atenuação se devem principalmente à absorção que os glóbulos de gordura proporcionam. O espalhamento das ondas acústicas devido aos glóbulos de proteína também foi considerado mas, de acordo com o autor, os efeitos desse fenômeno apresentam impacto menos significativo.

Algumas empresas fornecem equipamentos para medição das propriedades do leite para laticínio. A CheeseLab fornece instrumentos de medição ultrassônicos voltados para esse tipo de análise. Esses equipamentos são capazes de medir teor de gordura, extrato seco, densidade, proteínas, lactose, água adicionada, ponto de congelamento, sólidos, sais e condutividade. Apesar de mencionar o princípio de funcionamento acústico em sua descrição, a empresa não informa se há alguma outra característica sendo determinadas por outro método de medição.

Outra empresa que fornece equipamentos para esse segmento é a Ekomilk, que fornece um produto com características semelhantes as do equipamento descrito anteriormente. O fabricante informa que o equipamento utiliza medições ultrassônicas para obter parte das medições do leite, mas usa um viscosímetro para complementar a análise.

Com base nos pontos levantados ao longo desta seção, nos próximos capítulos serão descritos métodos para se determinar o teor de gordura em amostras de leite a partir de métodos acústicos. Os detalhes da análise realizada serão descritos nos próximos capítulos.

### 1.3 Estrutura do trabalho

Este trabalho foi dividido em cinco capítulos. O Capítulo 1 apresenta uma introdução aos critérios definidos na legislação para caracterizar amostras de leite UHT. São apresentadas as motivações e justificativas para o desenvolvimento deste trabalho, os objetivos propostos e uma revisão bibliográfica, que contém referências utilizadas como base ao longo deste projeto.

No Capítulo 2, apresenta-se uma revisão teórica a respeito das técnicas de medição de propriedades de líquidos por ultrassom usadas ao longo deste trabalho. Neste capítulo são apresentados diferentes métodos de medição, os efeitos físicos que podem afetar as medições e os tipos de sistema usados para excitar os transdutores e adquirir os sinais recebidos após a propagação das ondas pelo meio.

No Capítulo 3, apresenta-se a metodologia utilizada para preparação das amostras, calibração do sistema de medição acústico e medição dos valores de velocidade de propagação e coeficiente de atenuação acústicos das amostras de interesse.

No Capítulo 4, são apresentados os principais resultados obtidos, apresentando as limitações dos métodos propostos e condições de contorno assumidas ao longo deste trabalho.

No Capítulo 5, são apresentadas as considerações finais e algumas propostas de continuação para o trabalho desenvolvido.

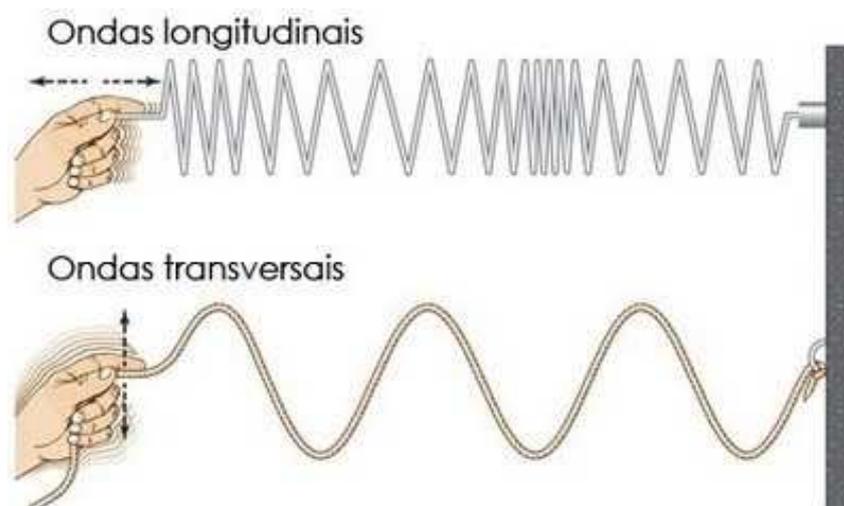
## 2 Revisão teórica

Neste capítulo são apresentadas as técnicas utilizadas ao longo do trabalho para caracterizar o teor de gordura de amostras de leite por ultrassom. Inicialmente, uma breve revisão envolvendo tipos de onda, transdutores e métodos de medição é apresentada. Na sequência, são apresentadas as expressões matemáticas e técnicas de processamento de sinais usadas para calcular os valores de velocidade de propagação e coeficiente de atenuação acústicos em função da frequência.

### 2.1 Transdutores ultrassônicos

Nos sistemas de medição ultrassônicos, transdutores são usados para emitir e receber ondas mecânicas através de um material cujas características se deseja determinar. Essas ondas se propagam através de meios materiais (tais como sólidos, líquidos ou gases), e podem ser classificadas em função da forma como se propagam pelo meio. Como exemplo, pode-se citar as ondas longitudinais, que se propagam na mesma direção do sinal de vibração gerado pelos transdutores, e as ondas transversais, que se propagam em direção perpendicular ao sinal de vibração aplicado. A representação gráfica desses dois tipos de onda pode ser visualizada na Figura 5. Neste trabalho, a caracterização das amostras de leite será realizada utilizando ondas longitudinais.

Figura 5 – Representação de ondas longitudinais e transversais se propagando por um meio.



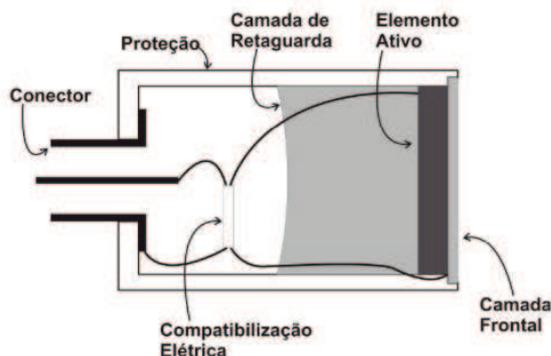
Fonte: Retirado de RESNICK, Robert; HALLIDAY (1981).

Transdutor é o equipamento responsável por converter sinais elétricos em uma outra forma de energia, e vice-versa. Transdutores ultrassônicos convertem energia elétrica

em mecânica, recebendo na entrada sinais de tensão contínuo ou pulsado, e fornecendo em sua saída ondas mecânicas contínuas ou pulsadas.

Um transdutor ultrassônico é composto, basicamente, por uma camada de retaguarda (do inglês, *backing*), uma camada frontal (do inglês, *wear plate*), e o elemento ativo, como pode ser visto na Figura 6 (DORABIATO, 2007).

Figura 6 – Corte longitudinal de um transdutor ultrassônico.



Fonte: Retirado de Dorabiato (2007).

O elemento ativo, normalmente fabricado usando materiais piezelétricos, é o componente responsável pela conversão dos sinais elétricos em ondas de pressão, e vice-versa. Esses materiais podem ser do tipo PVDF (do inglês, *Polyvinylidene Fluoride*), PZT (do inglês, *Lead zirconate titanate*), cristais de quartzo, óxido de zinco, entre outros.

A camada de retaguarda é responsável por prover suporte mecânico ao elemento ativo e reduzir a reverberação, aumentando a parcela de energia que efetivamente é transmitida para o meio em análise. A camada frontal é responsável por proteger o elemento ativo do meio externo, além de melhorar o acoplamento entre elemento ativo e meio em análise. Para isso, a impedância acústica dessa camada deve ser ajustada de modo a maximizar a parcela de energia transmitida para a amostra.

Alguns transdutores possuem ainda uma linha de retardo, normalmente fabricadas em quartzo ou vidro, que serve como uma camada intermediária. Essas linhas são bastante utilizadas em transdutores de alta-frequência para separar sinais pulsados e melhorar o casamento de impedância acústica.

O acoplamento direto entre transdutor e meio em análise pode provocar desgastes na camada frontal ou linha de retardo, dependendo do modelo de transdutor utilizado. Esse tipo de problema pode ocorrer, por exemplo, em sistemas de inspeção de tubulações por ultrassom. Nesses casos, seria necessário realizar uma calibração eletrônica do transdutor antes de iniciar o processo de medição (POVEY, 1997b).

Como mencionado, uma das características que deve ser observada durante o processo de fabricação dos transdutores é a impedância acústica. A impedância elétrica ( $Z$ ) é referida como a razão entre tensão e corrente, sendo normalmente representada a partir

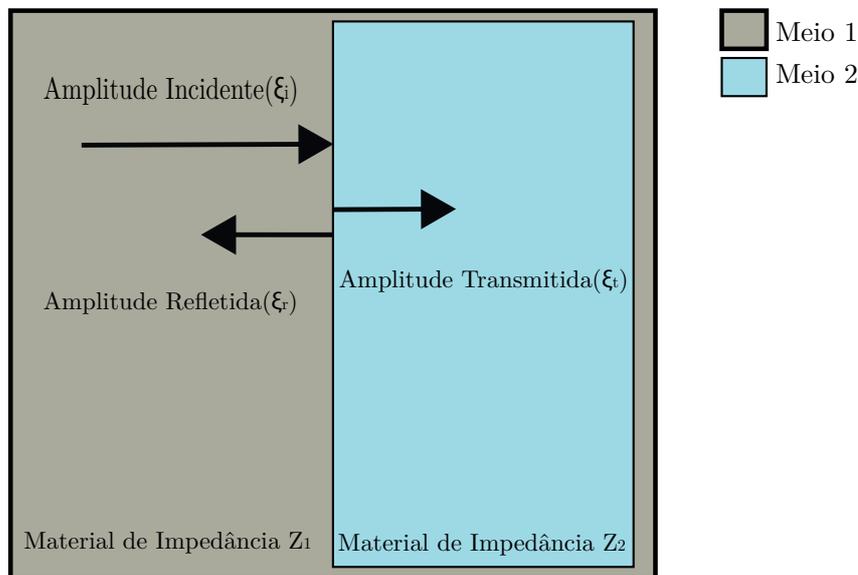
de um resultado complexo, com sua parte real sendo o que conhecemos como resistência ( $\Re(Z)$ ) e sua parte imaginária conhecida como reatância ( $\Im(Z)$ ). Analogamente, a impedância acústica pode ser definida pela relação entre a densidade  $\rho$  e a velocidade de propagação do som no meio  $c$

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

sendo  $\rho$  a densidade ( $kg/m^3$ ),  $c$  a velocidade (m/s) e  $Z$  a impedância acústica (Rayls).

Ao projetar um sistema de medição ultrassônico, as impedâncias dos materiais a serem utilizados nas camadas de acoplamento, linha de retardo e célula de medição devem ser ajustadas de forma a maximizar a parcela de energia transmitida através do material. Caso não ocorra um casamento entre as impedâncias, uma parcela significativa de energia poderá ser refletida, podendo causar mudanças na fase dos sinais e dificultando (ou inviabilizando) a realização das medições. Na Figura 7, podem ser observadas as relações entre a amplitude incidente e refletida, levando-se em consideração os coeficientes de reflexão, transmissão e as impedâncias acústicas dos meios.

Figura 7 – Relação entre coeficientes de transmissão, reflexão e impedâncias acústicas dos meios.



Fonte: Adaptado de Povey (1997b).

As parcelas de energia transmitida e refletida podem ser calculadas a partir dos coeficientes de transmissão e reflexão, que estão diretamente relacionados com os valores de impedância acústica dos meios pelos quais as ondas se propagam. Considerando ângulos de incidência e reflexão perpendiculares ao meio em análise, pode-se definir as parcelas de energia transmitida e refletida como

$$R = \frac{\xi_r}{\xi_i} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}, \quad (2.2)$$

e

$$T = \frac{\xi_t}{\xi_i} = \frac{2Z_1}{Z_1 + Z_2}, \quad (2.3)$$

sendo  $\xi_i$  é amplitude do sinal incidente,  $\xi_t$  a amplitude do sinal transmitido,  $\xi_r$  a amplitude do sinal refletido,  $Z_1$  e  $Z_2$  as impedâncias acústicas dos meios 1 e 2, respectivamente.

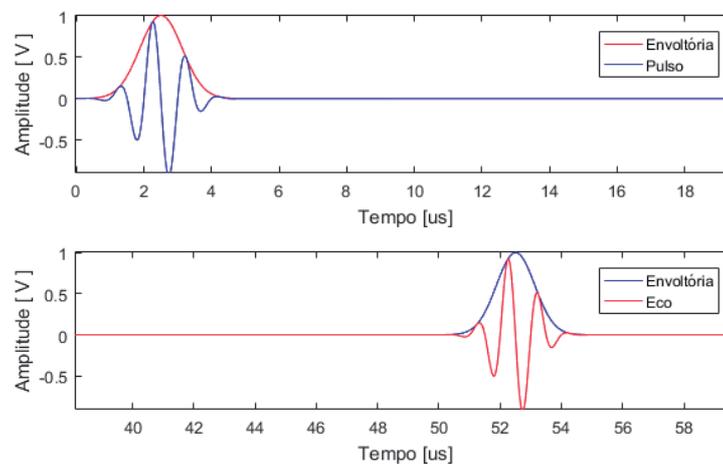
## 2.2 Sistemas de medição acústicos

Como já mencionado, transdutores ultrassônicos podem ser excitados usando sinais elétricos de onda contínua ou sinais pulsados. Neste trabalho, um sistema pulsado será utilizado para excitar transdutores de alta frequência (75 MHz).

As medições por métodos pulsados podem ser feitas usando apenas um transdutor, num método conhecido como pulso-eco, ou com um par de transdutores, com um elemento transmitindo e outro recebendo os sinais. As frequências utilizadas nesses casos podem variar entre alguns kHz até centenas de MHz (ADAMOWISKI et al., 2002).

A excitação dos transdutores pode ser realizada usando diferentes tipos de sinais, tais como sinais de pulso estreito, sinais gaussianos, sinais *chirp*, entre outros. A Figura 8 apresenta um exemplo com sinais gaussianos simulados. Essa simulação considerou um meio sem perdas, e dois transdutores operando em modo transmissão e recepção. O sinal gaussiano foi aplicado no transdutor emissor, responsável por converter o sinal elétrico numa onda de pressão. Essa onda se propaga pelo meio simulado com velocidade constante, até atingir o transdutor receptor, que converte novamente a onda mecânica num sinal elétrico. Na Figura, também foram representadas as envoltórias dos sinais transmitido e recebido.

Figura 8 – Sinais gaussianos usados para excitar transdutores ultrassônicos operando em modo transmissão. Também são representadas as envoltórias dos dois sinais.



Fonte: Do autor.

A vantagem de se utilizar sinais de excitação gaussianos é que eles apresentam o mesmo formato tanto no domínio do tempo quanto no domínio da frequência, o que torna possível ajustar o número de ciclos e o período do sinal no domínio do tempo para que, no domínio da frequência, o transdutor responda nas frequências desejadas.

Os sinais da Figura 8 possuem uma defasagem proporcional ao tempo de propagação do sinal pelo meio. Esse tempo de atraso entre um sinal e outro é chamado tempo de voo, e pode ser calculado de diversas maneiras. Como exemplo de técnicas para cálculo do tempo de voo, pode-se citar o método de detecção de pico das envoltórias dos sinais, correlação cruzada e fase espectral. Dessa forma, conhecendo-se o tempo de voo, e a distância de propagação, pode-se calcular o valor de velocidade de propagação do som a partir da relação

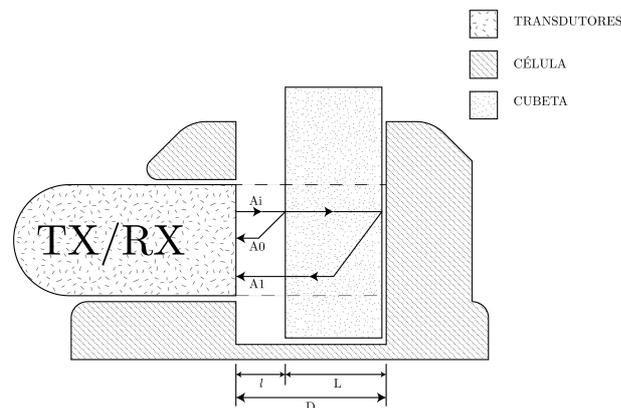
$$c = \frac{d}{\Delta t}, \quad (2.4)$$

sendo  $c$  a velocidade de propagação do som no meio (m/s),  $d$  a distância de propagação (m) e  $\Delta t$  o tempo de voo (s).

### 2.2.1 Método pulso-eco

No modo pulso-eco, um único transdutor opera como transmissor e receptor. Um exemplo deste arranjo de transdutores pode ser visto na Figura 9;

Figura 9 – Método de medição por pulso-eco.



Fonte: Do Autor.

A Figura 9 mostra uma cubeta sendo usada para armazenar a amostra de interesse. A cubeta foi posicionada dentro de uma célula de medição, paralelamente a face do transdutor emissor/receptor. O acoplamento acústico entre transdutor e cubeta/amostra pode ser feito usando um líquido com propriedades conhecidas, como água destilada, por exemplo. Na imagem,  $A_i$  representa o sinal correspondente à onda de pressão incidente,  $A_0$  o sinal refletido na parede da cubeta e  $A_1$  o sinal refletido após a propagação da onda pelo meio de interesse.

Como pode ser observado, para casos onde se utiliza somente um transdutor (modo pulso-eco), o primeiro sinal recebido será aquele que se propaga pelo meio até ser refletido por um material com impedância acústica diferente. Na prática, esse sinal irá se propagar no mínimo duas vezes pela amostra de interesse, ou seja,

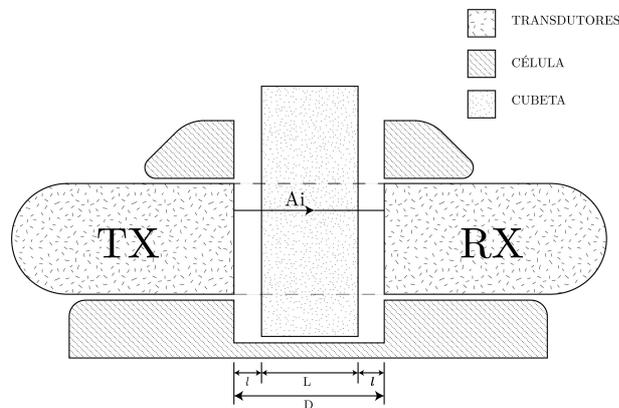
$$c = \frac{2d}{\Delta t}. \quad (2.5)$$

Sempre que um meio com impedância acústica diferente é encontrado, parte da energia do sinal emitido é transmitida e parte é refletida. Esse método de inspeção possui a vantagem de utilizar apenas um transdutor, mas como desvantagem, exige que o sinal se propague por, no mínimo, duas vezes pelo meio analisado (Meio 2). Para casos onde o líquido de interesse apresenta alta viscosidade, isso representa um aumento do coeficiente de atenuação, resultando em valor de amplitude menores para os sinais recebidos.

### 2.2.2 Método transmissão

No modo transmissão, são utilizados dois transdutores, como mostrado na Figura 10. A onda de pressão que se propaga através das camadas de água, paredes da cubeta e amostra de interesse é representada pelo sinal  $A_i$ .

Figura 10 – Método de inspeção por transmissão.



Fonte: Do Autor.

Com este método, assim como no método pulso-eco, pode-se calcular a variação da velocidade e o coeficiente de atenuação com base nas diferenças entre o sinal enviado e o sinal recebido. As desvantagens deste método é que para a realização de medições precisas, é necessário garantir um alinhamento adequado entre os dois transdutores. O custo do sistema também é um ponto que deve ser considerado, uma vez que dois transdutores são necessários.

Como vantagem, pode-se citar a redução dos efeitos do coeficiente de atenuação em líquidos viscosos, uma vez que o primeiro sinal recebido terá se propagado somente uma vez pelo meio de interesse. Esse fator permite que sejam utilizados métodos de medição

relativos, onde o primeiro sinal recebido após a propagação da onda por um líquido de referência (água destilada, por exemplo) é comparado ao primeiro sinal recebido após a onda se propagar pelo líquido de interesse. Nesses casos, é fundamental garantir um controle preciso de temperatura, uma vez que a velocidade de propagação e o coeficiente de atenuação no meio variam em função da temperatura.

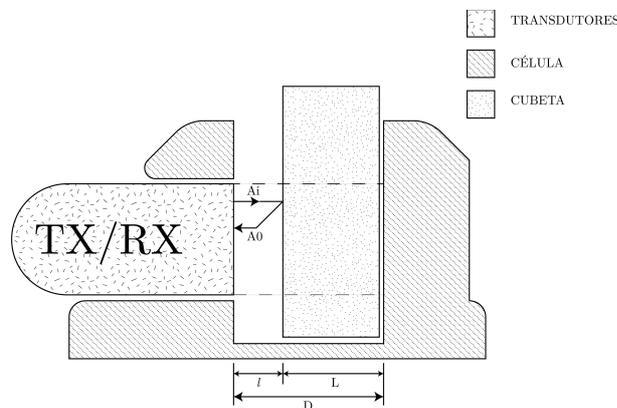
## 2.3 Métodos de medição

As propriedades dos líquidos de interesse podem ser determinadas usando sistemas de medição distintos, como citado anteriormente e, para isso, métodos de medição diferentes podem ser utilizados. Neste trabalho, serão descritos os métodos de reflexões relativas e de múltiplas reflexões. Esses métodos permitem que parâmetros como impedância acústica e densidade possam ser obtidos de forma indireta, a partir dos valores de velocidade de propagação e coeficiente de atenuação acústicos medidos.

### 2.3.1 Método de reflexões relativas

A Figura 11 apresenta um sistema em pulso-eco, com as mesmas características descritas anteriormente, usado para caracterizar amostras de líquido por ultrassom.

Figura 11 – Célula de medição com a cubeta preenchida com ar.



Fonte: Do autor.

O método de reflexões relativas é utilizado em situações onde deseja-se determinar a impedância acústica do meio em análise. Para isso, uma estratégia que costuma ser utilizada é realizar uma medição inicial de referência usando ar no lugar do líquido de interesse. Essa escolha é motivada pelo fato do ar apresentar valores de densidade e velocidade de propagação do som baixos ( $0,0012 \text{ kg/m}^3$  e  $330 \text{ m/s}$  a  $25^\circ\text{C}$ ), resultando num valor baixo de impedância acústica ( $0,0004 \text{ MRayls}$ ). Dessa forma, sabendo-se que

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}, \quad (2.6)$$

e que  $Z_1 \gg Z_2$ , tem-se

$$R \simeq -1. \quad (2.7)$$

A opção pela utilização do ar deve-se ao fato de que sua impedância acústica apresenta valores muito diferentes dos apresentados por líquidos e, devido a isso, praticamente toda a energia do sinal emitido será refletida ao encontrar a interface entre líquido e ar.

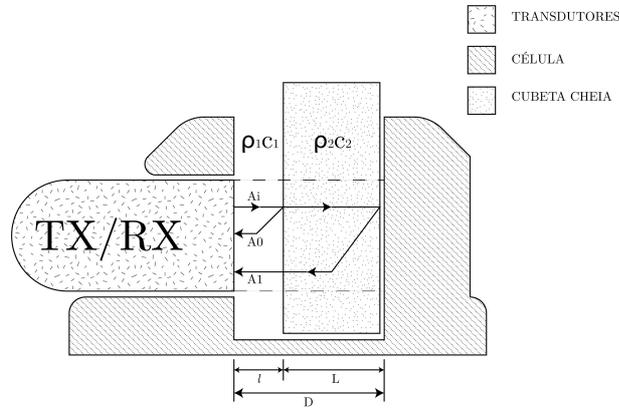
Considerando o material referente ao meio 2 como ar, pode-se estimar os valores do coeficiente de reflexão na parede da cubeta a partir da relação

$$R_{ar} = \frac{A_{0ar}}{A_i} \quad (2.8)$$

sendo  $R_{ar}$  o coeficiente de reflexão entre ar e parede da cubeta,  $A_i$  a amplitude incidente e  $A_0$  a amplitude do sinal refletido na interface entre os meios 1 e 2. Assumindo que  $R_{ar} \simeq -1$ , tem-se que  $A_{0ar} \simeq -A_i$ .

Após adquirir o sinal de referência usando ar, deve-se preencher a cubeta com o líquido de interesse e repetir o processo de medição. Os sinais utilizados nesta análise estão representados na Figura 12.

Figura 12 – Célula de medição com a cubeta preenchida com o líquido de interesse.



Fonte: Do autor.

Na Figura, o sinal  $A_0$  representa a parcela de energia da onda refletida na interface entre líquido de interesse e parede da cubeta, e o sinal  $A_1$  representa o sinal que se propaga pela amostra, é refletido ao encontrar a segunda parede da cubeta e retorna ao transdutor. É importante ressaltar que a título de simplificação, as reflexões de sinal que ocorrem nas paredes da cubeta não estão sendo representadas nas imagens.

Substituindo-se esses termos na expressão anterior, tem-se

$$R_{liq} = \frac{A_{0liq}}{A_i} \simeq -\frac{A_{0liq}}{A_{0ar}} \quad (2.9)$$

onde  $A_{0liq}$  representa a amplitude do sinal refletido na interface entre parede da cubeta e líquido de interesse.

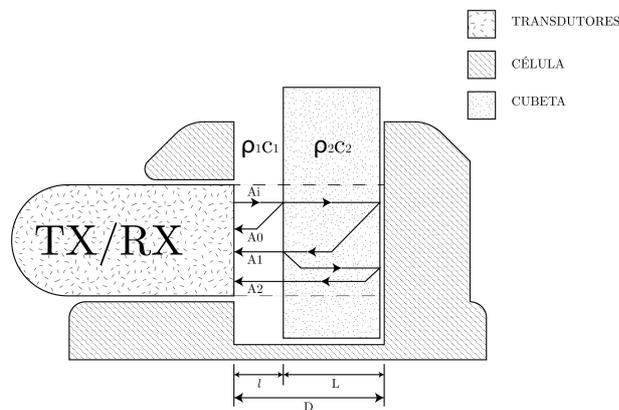
Dessa forma, assumindo que as propriedades acústicas do material usado para fabricar a cubeta são conhecidas, pode-se calcular o valor da impedância acústica do líquido de interesse. Essa informação poderia ser utilizada, por exemplo, para determinar a densidade da amostra.

### 2.3.2 Método de múltiplas reflexões

Este método é semelhante ao descrito na seção anterior, uma vez que relaciona as amplitudes dos sinais refletidos com a amplitude do sinal emitido. A diferença nesse caso é que não é necessário realizar uma medição prévia em ar como no caso anterior.

Nessa configuração, o transdutor envia um pulso de amplitude  $A_i$  que se propaga através das camadas. Uma parcela desse sinal é refletida na interface formada pela parede da cubeta e líquido de interesse (sinal  $A_0$ ), enquanto a outra parcela se propaga pela amostra até atingir a interface formada entre líquido e parede da cubeta. O sinal refletido se propaga novamente através do líquido até atingir a interface formada por líquido e parede da cubeta. Nesse instante, parte do sinal é transmitida até o transdutor (sinal  $A_1$ ) e parte é novamente refletida. Esse processo se repete até que a amplitude do sinal emitido seja totalmente atenuada (ADAMOWISKI et al., 2002). Para a análise proposta neste trabalho, serão utilizados os sinais  $A_1$  e  $A_2$ , representados na Figura 13.

Figura 13 – Método das múltiplas reflexões.



Fonte: Do Autor.

A análise da Figura mostra que o sinal  $A_0$  pode ser obtido a partir da expressão

$$A_0 = A_i R_{12} e^{-2\alpha_1 L_1}, \quad (2.10)$$

sendo  $A_0$  o sinal refletido na primeira interface,  $A_i$  o sinal emitido do transdutor,  $R_{12}$  o coeficiente de reflexão da interface,  $\alpha_1$  o coeficiente de atenuação do meio em que o sinal se propaga e  $L_1$  a distância de propagação.

De maneira análoga, a amplitude do sinal  $A_1$  pode ser obtida a partir da expressão

$$A_1 = A_i T_{12} R_{23} T_{21} e^{-2\alpha_1 L_1} e^{-2\alpha_2 L_2}, \quad (2.11)$$

sendo  $A_1$  o sinal refletido na segunda interface,  $T_{12}$  e  $T_{21}$  os coeficiente de transmissão,  $\alpha_1$  e  $\alpha_2$  os coeficientes de atenuação dos meios.

Finalmente, pode-se repetir este procedimento considerando o sinal  $A_2$ , de modo que

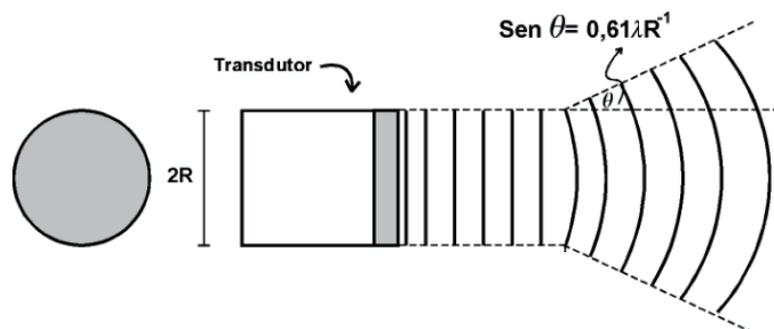
$$A_2 = A_i R_{21} T_{12} R_{23} R_{23} T_{21} e^{-2\alpha_1 L_1} e^{-4\alpha_2 L_2}. \quad (2.12)$$

Relacionando-se essas expressões, pode-se determinar o valor da impedância acústica do meio de interesse sem a necessidade de se realizar uma medição prévia em ar. Nesse caso, tem-se como vantagem o fato de se extrair essa informação usando uma única medição, mas em contrapartida, a desvantagem é que deve-se conhecer os valores dos coeficientes de atenuação dos meios que se deseja caracterizar. Esse pode ser um problema para sistemas que trabalham com transdutores de baixa frequência (0,5 MHz a 5 MHz) e líquidos com baixa atenuação, onde a tarefa de realizar medidas precisas dos coeficientes de atenuação se tornaria uma tarefa mais complexa.

## 2.4 Efeitos causados pela difração, paralelismo e temperatura

A difração está diretamente relacionada à abertura do feixe acústico produzido por um transdutor, que conforme apresentado na Figura 14, pode interferir na potência do sinal recebido caso o receptor apresente uma área reduzida ou esteja muito distante do transdutor emissor. Nessas condições, uma parcela do sinal emitido não chegaria ao transdutor receptor.

Figura 14 – Representação do campo acústico gerado por um transdutor.



Fonte: Adaptado de Dorabiatto (2007).

Esses efeitos estão relacionados a geometria dos transdutores e dos meios pelos quais as ondas mecânicas se propagam. Técnicas matemáticas podem ser utilizadas para

compensar esses efeitos, como as descritas por Adamowski et al. (1995), por exemplo. Como opção, pode-se utilizar um transdutor receptor de grande abertura, que por apresentar seção transversal maior do que a do transdutor emissor não sofrerá com os efeitos da abertura do feixe acústico.

A ausência de paralelismo entre transdutor e amostra, ou entre transdutores e amostra para o caso de medições em transmissão, pode causar erros significativos nas medições de velocidade e coeficiente de atenuação acústicos. A falta de alinhamento contribui para uma variação no caminho de propagação acústico dos sinais e, além disso, modificará os ângulos de incidência e reflexão das ondas emitidas e recebidas pelos transdutores.

A temperatura é outro parâmetro que afeta diretamente os valores de velocidade de propagação e coeficiente de atenuação do som. De acordo com a expressão apresentada por (Del Grosso; MADER, 1972), uma variação de temperatura de  $24 \pm 1^\circ\text{C}$  resultaria numa variação de velocidade de propagação de 3,02 m/s. De forma semelhante, Holmes, Parker e Povey (2011) apresentam uma expressão que relaciona o coeficiente de atenuação do som na água com a temperatura. Dessa forma, para que seja possível efetuar medições de velocidade de forma precisa, é essencial utilizar um sistema de controle térmico de alta precisão.

## 2.5 Cálculo da velocidade de propagação do som

Vários métodos diferentes podem ser utilizados para se determinar os valores de velocidade de propagação do som em líquidos, mas neste trabalho, optou-se por usar o método da fase espectral. Para iniciar a análise, deve-se considerar inicialmente dois sinais,  $A_0(t)$  e  $A_1(t)$  defasados no tempo, de modo que

$$A_1(t) = A_0(t - \Delta t) \quad (2.13)$$

sendo  $\Delta t$  a diferença de tempo entre  $A_0(t)$  e  $A_1(t)$ , chamada neste trabalho de tempo de voo.

Calculando a Transformada de Fourier dos sinais apresentados, obtém-se

$$A_1(f) = A_0(f) \cdot e^{-j \cdot 2\pi \cdot f \cdot \Delta t}. \quad (2.14)$$

sendo  $A_0(f)$  e  $A_1(f)$  a representação dos sinais  $A_0(t)$  e  $A_1(t)$  no domínio da frequência.

As fases dos sinais  $A_0(f)$  e  $A_1(f)$  podem ser representadas por

$$\phi_0(f) = \angle A_0(f), \quad (2.15)$$

$$\phi_1(f) = \angle A_1(f), \quad (2.16)$$

sendo  $\phi_0(f)$  e  $\phi_1(f)$  a representação das fases, em radianos, dos sinais  $A_0(f)$  e  $A_1(f)$ , em função da frequência.

Relacionando-se as fases dos dois sinais, pode-se calcular o tempo de voo entre os mesmos a partir da expressão

$$\Delta t(f) = \frac{(\phi_0(f) - \phi_1(f))}{2.\pi.f}. \quad (2.17)$$

Como observado, o valor de  $\Delta t$  encontrado varia em função da frequência. Conhecendo-se o valor da distância de propagação do som na amostra, pode-se calcular a velocidade de propagação em função da frequência relacionando os valores de  $L$  e  $\Delta t$ .

Para calcular a velocidade de propagação em um líquido muito atenuante, pode-se utilizar um material de propriedades conhecidas como referência como, por exemplo, a água destilada. Dessa forma, os cálculos podem ser feitos considerando apenas o primeiro sinal recebido em água e na amostra, reduzindo os efeitos do coeficiente de atenuação, das múltiplas reflexões e do alinhamento dos transdutores.

Pode-se calcular o tempo de voo usando um líquido de referência a partir da expressão

$$t_{\text{ref}}(f) = \frac{L}{c_{\text{ref}}(f)} \quad (2.18)$$

sendo  $c_{\text{ref}}(f)$  a velocidade de propagação do som no líquido de referência em função da frequência (m/s),  $L$  o caminho de propagação (m) e  $t_{\text{ref}}(f)$  o tempo de voo de referência (s).

Substituindo o líquido de referência por um líquido de interesse, e calculando-se o tempo de voo relativo entre o primeiro sinal recebido para o líquido de referência e o líquido de interesse, tem-se

$$t_{\text{voo}}(f) = t_{\text{ref}}(f) + \Delta t(f) = \frac{L}{c_{\text{ref}}(f)} + \Delta t(f) \quad (2.19)$$

sendo  $t_{\text{voo}}(f)$  o tempo de propagação do som na amostra de líquido de interesse em função da frequência (s).

A partir do valor calculado para  $t_{\text{voo}}(f)$  e sabendo que o valor de  $L$  é conhecido, pode-se calcular o valor da velocidade de propagação do som na amostra através da expressão

$$c(f) = \frac{c_{\text{ref}}(f)}{1 + \frac{c_{\text{ref}}(f)}{L} \Delta t(f)}, \quad (2.20)$$

onde  $c(f)$  representa a velocidade de propagação do som no líquido de interesse em função da frequência (m/s).

Este método será utilizado neste trabalho para calcular a velocidade de propagação do som nas amostras de leite com diferentes teores de gordura.

## 2.6 Cálculo dos coeficiente de atenuação

Como apresentado anteriormente, ondas mecânicas sofrem atenuação durante a propagação através de um meio, seja por divergência do sinal em relação ao eixo de propagação, absorção pelo meio ou por espalhamento do sinal. Esse parâmetro foi utilizada por (DUKHIN; GOETZ, 2002) para caracterizar as amostras de leite e seus derivados. Matematicamente, pode-se representar os efeitos do coeficiente de atenuação acústica a partir da expressão

$$A(f) = A_0(f) \cdot e^{-\alpha D}, \quad (2.21)$$

sendo  $A(0)(f)$  a amplitude do sinal emitido em função da frequência,  $A(f)$  a amplitude do sinal atenuado em função da frequência,  $\alpha$  o coeficiente de atenuação (Np/m) e  $D$  a distância de propagação do som (m).

O coeficiente de atenuação pode ser reescrito em função de um coeficiente auxiliar  $\alpha_0$ , a partir da expressão

$$\alpha = \alpha_0 \cdot f^n, \quad (2.22)$$

onde  $f$  representa a frequência e  $n$  um índice que, para líquidos, varia entre 1 e 2.

A determinação dos coeficientes de atenuação pode ser feita usando um método de medição relativo, assim como o descrito anteriormente. Para isso, considerando um sistema contendo um por par de transdutores operando em transmissão, deve-se coletar o primeiro sinal recebido após a propagação da onda por um líquido de referência e o primeiro sinal recebido após a propagação da onda pelo líquido de interesse.

Considerando o sistema de medição apresentado na Figura 10, onde utiliza-se água como líquido acoplante entre as paredes da cubeta e transdutores, e assumindo que inicialmente a cubeta seja preenchida com um líquido de referência, pode-se expressar a relação entre as amplitudes dos sinais emitido e recebido pelos transdutores como

$$A_{\text{ref}} = A_i \cdot T_{12} \cdot T_{2\text{ref}} \cdot T_{\text{ref}2} \cdot T_{21} \cdot e^{-2\alpha_1 L_1} \cdot e^{-2\alpha_2 L_2} \cdot e^{-\alpha_{\text{ref}} L}, \quad (2.23)$$

sendo  $A_{\text{ref}}$  a amplitude do sinal recebido considerando o líquido de referência,  $A_i$  a amplitude do sinal emitido,  $T_{12}$  e  $T_{21}$  os coeficientes de transmissão entre a camada de água de acoplamento e parede da cubeta (e vice-versa),  $T_{2\text{ref}}$  e  $T_{\text{ref}2}$  os coeficientes de transmissão entre a parede da cubeta e líquido de referência (e vice-versa),  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  e  $\alpha_{\text{ref}}$  os coeficientes de atenuação da água, material da parede da cubeta e líquido de referência, respectivamente, e  $L_1$  e  $L_2$  as distâncias de propagação do som na camada de água de acoplamento e parede da cubeta, respectivamente.

É importante ressaltar que os valores de amplitude e os coeficientes de transmissão variam em função da frequência, e não foram representados nas expressões para simplificar a notação. O mesmo critério será adotado nos passos descritos na sequência.

Ao substituir o líquido de referência pelo líquido de interesse, tem-se

$$A_{\text{liq}} = A_i \cdot T_{12} \cdot T_{2\text{liq}} \cdot T_{\text{liq}2} \cdot T_{21} \cdot e^{-2\alpha_1 L_1} \cdot e^{-2\alpha_2 L_2} \cdot e^{-\alpha_{\text{liq}} L}, \quad (2.24)$$

onde os sub-índices ref fora substituídos pelos sub-índices liq.

Assumindo que os líquidos de interesse e de referência apresentem valores de impedância acústica semelhantes, pode-se relacionar as duas expressões de forma simplificada, de modo que

$$\alpha_{\text{liq}} = \alpha_{\text{ref}} - \frac{A_{\text{liq}}}{L}. \quad (2.25)$$

Caso a água seja adotada como líquido de referência, pode-se calcular os valores de  $\alpha_{\text{agua}}$  em função da temperatura a partir da expressão apresentada por Holmes, Parker e Povey (2011), simplificando o processo de medição.

## 2.7 Considerações parciais

Este Capítulo apresentou uma revisão teórica abordando os principais conceitos necessários para compreender as análises realizadas ao longo deste trabalho. Inicialmente, foram descritos sistemas de medição acústicos compostos por transdutores operando em transmissão e pulso-eco, com sinais de excitação de onda pulsada. Na sequência, foram descritos os métodos de medição de reflexões relativas e múltiplas reflexões, que podem ser aplicados em situações onde se deseja determinar os coeficientes de reflexão e transmissão amostras de interesse.

Foram descritos os efeitos causados pelo descasamento de impedâncias, abertura do feixe acústico e problemas de alinhamento entre transdutor e amostras. Ao final, foram apresentados métodos para cálculo da velocidade de propagação e coeficiente de atenuação em função da frequência, e discutidos os efeitos da variação de temperatura nas medições destes parâmetros.

## 3 Metodologia

Neste capítulo, apresenta-se uma descrição da metodologia utilizada ao longo deste trabalho. Inicialmente, apresenta-se a célula de medição de alta-frequência utilizada para caracterizar as amostras de leite em função do teor de gordura. São descritas as principais características do sistema, bem como o procedimento que deve ser seguido para realizar os processos de calibração e, posteriormente, medição das amostras de interesse.

Na sequência, descreve-se o processo adotado para preparação das amostras analisadas e os critérios adotados para se definir o método de medição utilizado. Finalmente, apresenta-se um aplicativo desenvolvido ao longo do trabalho para simplificar a utilização do sistema.

### 3.1 Sistema de medição ultrassônico

A célula de medição utilizada neste trabalho foi desenvolvida por Tiago (2018). Essa célula foi projetada para trabalhar com amostras de pequeno volume(3 ml), manipuladas através da utilização de cubetas para espectrofotômetros. O corpo da célula foi construído em alumínio, e foram utilizados dois transdutores de 75 MHz( Olympus, modelo V3320) com linhas de retardo de quartzo de 19,5  $\mu s$ , operando em modo transmissão. Neste trabalho, foram utilizadas cubetas de quartzo, e o acoplamento acústico entre cubeta e transdutores foi feito usando uma pequena camada de água deionizada, com espessura de, aproximadamente, 0,5 mm.

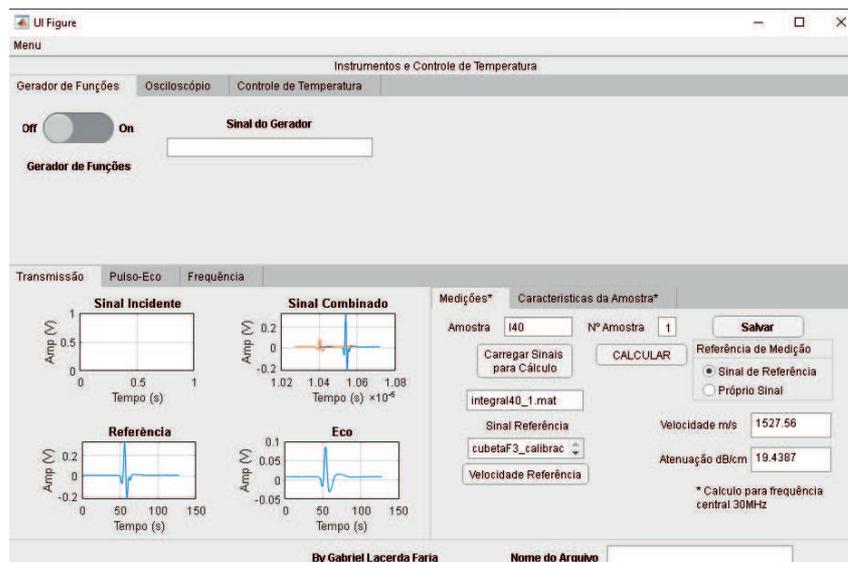
Para o controle térmico do sistema, foram utilizadas duas pastilhas de efeito Peltier (Danvic, modelo TEC-12706), posicionadas nas laterais do bloco de alumínio e acionadas eletronicamente por um circuito do tipo ponte H (Infineon, modelo BTS7960). Um microcontrolador (Espressif, modelo ESP32) foi utilizado para ajustar o módulo e sentido da corrente aplicada as células Peltier. A temperatura da amostra foi monitorada por um termômetro de precisão (Isotech, modelo Milik) com resolução de 1 mK, calibrado conforme o padrão ITS-90. Esse sistema de medição e controle de temperatura garante um erro em regime permanente menor que 0,01 °C.

Os transdutores foram excitados utilizando um pulsador programável (JSR, modelo DPR500) operando juntamente à um módulo pulsador/amplificador remoto (JSR, modelo RP-H2). Aplicou-se como sinal de excitação um pulso estreito, com amplitude de -300V e duração de 120 ns. Para adquirir os sinais, foi utilizada uma placa de aquisição (Signatec, modelo PX14400) com 14 bits de resolução e frequência de amostragem de 400 MHz.

Para controlar os equipamentos ao longo do processo de excitação e aquisição e, posteriormente, processar os sinais, desenvolveu-se um aplicativo em ambiente Matlab

capaz de gerenciar todas as informações relacionadas ao processo. Esse aplicativo permite que o usuário defina os parâmetros de configuração dos instrumentos, tais como valores de temperatura de medição, ganho do amplificador de recepção, tensão do pulso de excitação e ajuste das janelas de tempo usadas ao longo do processo de aquisição, entre outros. A Figura 15 apresenta a interface inicial do aplicativo desenvolvido.

Figura 15 – Tela principal do aplicativo desenvolvido.



Fonte: Do Autor.

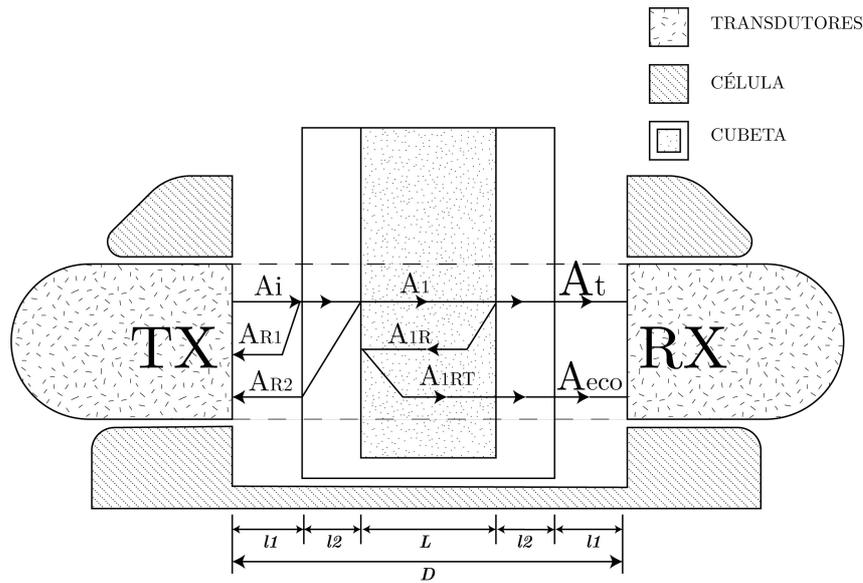
Numa aba secundária, o aplicativo oferece funções que podem ser utilizadas para realizar os cálculos de velocidade de propagação e coeficiente de atenuação das amostras analisadas, usando como referência as expressões matemáticas apresentadas no Capítulo anterior. Mais detalhes a respeito do *software* desenvolvido podem ser encontrados no apêndice.

## 3.2 Calibração do sistema e medição das amostras

As medições realizadas ao longo deste trabalho foram baseadas no método de medição relativo, onde os valores de velocidade e coeficiente de atenuação são calculados em relação a um líquido de referência com propriedades conhecidas. Água deionizada foi utilizada como líquido de referência, por apresentar propriedades físicas conhecidas e estabelecidas na literatura. Todas as medições foram realizadas com temperatura controlada a 25°C. A Figura 16 apresenta uma vista em corte da célula de medição, indicando os sinais utilizados ao longo do processo.

Por se tratar de um método de medição relativo, antes de iniciar de fato o processo de medição, é necessário calibrar o sistema usando o líquido de referência. As etapas de calibração e medição serão descritas na sequência.

Figura 16 – Vista em corte da célula de medição utilizada neste trabalho.



Fonte: Do Autor.

### 3.2.1 Calibração do sistema

O sistema desenvolvido neste trabalho pode ser utilizado tanto para medições diretas utilizando o primeiro sinal recebido e o primeiro eco, quanto para medições relativas à um líquido de referência. Em ambos os casos, ao longo do processo de calibração, devem ser adquiridos tanto o primeiro sinal recebido ( $A_t$ ) quanto o primeiro eco ( $A_{eco}$ ). A partir desses dois sinais, e assumindo que a velocidade de propagação do som no líquido de referência é conhecida, pode-se determinar o tamanho do caminho de propagação acústico a partir da expressão

$$L(T,f) = t_{ref}(T,f) \cdot c_{ref}(T,f), \quad (3.1)$$

onde  $t_{ref}$  representa o tempo de voo entre os sinais  $A_t$  e  $A_{eco}$  (s), e  $c_{ref}$  a velocidade de propagação do som na água,  $T$  representa a temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) e  $f$  a frequência (Hz).

Como já mencionado, a velocidade de propagação do som em líquidos depende da temperatura e varia em função da frequência. Para a água, os valores de dispersão (variação da velocidade em função da frequência) apresentados considerando a largura de banda utilizada neste trabalho (20 MHz a 80 MHz) são desprezíveis.

O alinhamento é um ponto importante que deve ser considerado durante o processo de calibração. Caso os transdutores estejam desalinhados, ou se a cubeta não estiver alinhada de forma paralela a face dos transdutores, os valores de  $L$  podem mudar e os ângulos de incidência do feixe acústicos podem ser diferentes dos previstos inicialmente. Neste trabalho, foram utilizados calibres de folga, posicionados nas laterais da cubeta, para alinhá-la em relação aos transdutores, e o mesmo processo foi repetido na etapa de

medição. Essa metodologia não garante um alinhamento ideal, mas garante um alinhamento repetitivo.

Após o término do processo de calibração, são armazenados num arquivo os sinais  $A_t$  e  $A_{eco}$ , os valores de  $L$ ,  $c_{ref}$  e  $T$ , além dos valores do coeficiente de atenuação da água em função da temperatura calculados a partir da expressão apresentada por (HOLMES; PARKER; POVEY, 2011).

### 3.2.2 Procedimento de medição

Após o processo de calibração, o líquido de referência deve ser substituído pelo líquido de interesse. Feito isso, o processo de excitação dos transdutores e aquisição dos sinais deve ser repedido, e o operador deve decidir se irá realizar uma medida direta ou relativa. Nos dois casos, o tamanho do caminho de propagação utilizado ( $L$ ) será o mesmo obtido na etapa de calibração, e a temperatura deverá ser ajustada com o mesmo valor usado durante a determinação de  $L$ .

Para medições diretas, os sinais  $A_{t,med}$  e  $A_{eco,med}$ , adquiridos a partir da amostra de interesse, serão aplicados nos cálculos de velocidade de propagação e coeficiente de atenuação. Para medidas relativas, serão utilizados os sinais  $A_{t,ref}$  e os sinais  $A_{t,med}$  para a realização dos cálculos.

É importante ressaltar que para minimizar os erros de medição e reduzir as incertezas experimentais, é necessário garantir que as condições de alinhamento e controle térmico usadas na etapa de calibração possam ser repetidas na etapa de medição. Sem essa reprodutibilidade, não seria possível relacionar os sinais obtidos a partir de medições diferentes.

Também é importante reforçar que a condição de contorno adotada neste trabalho leva em consideração que os líquidos utilizados para calibração e medição apresentam valor de impedância acústica semelhantes. Essa consideração simplifica o cálculo do coeficiente de atenuação, uma vez que pode-se desprezar as diferenças entre as perdas por transmissão nos dois experimentos. Entretanto, caso essa condição não seja atendida, seria necessário determinar os valores de impedância acústica dos líquidos de interesse antes de calcular os coeficientes de atenuação.

As análises foram feitas assumindo que as medições estão sendo realizadas na região do campo próximo dos transdutores. Dessa forma, foram considerados valores de difração (abertura do feixe acústico em função da distância de propagação percorrida) muito pequenos, que foram desprezados ao longo dos cálculos. Para medições envolvendo maiores distâncias de propagação, seria necessário utilizar os métodos de correção matemáticos para os cálculos de velocidade de propagação e coeficiente de atenuação apresentados por Adamowski et al. (1995).

### 3.3 Preparação das amostras

Para preparar as amostras, foram selecionadas caixas de leite UHT de uma mesma marca, nas variedades integral, semidesnatado e desnatado, compradas em um supermercado local. A fim de avaliar a repetibilidade das amostras, foram adquiridas três caixas de leite do mesmo lote para cada variedade proposta, totalizando nove caixas. Antes da utilização, as caixas foram mantidas fechadas num refrigerador por um período de 24 horas.

Além das três amostras de leite UHT citadas, foram preparadas misturas de leite integral e leite desnatado, para diferentes proporções. Para preparação das misturas, utilizou-se uma balança analítica com 4 casas decimais para definir proporções em massa de leite integral e desnatado.

As amostras foram preparadas utilizando as caixas de leite após o período de 24 horas no refrigerador. Após a abertura das caixas de leite, foram preparadas misturas com 20% de leite integral e 80% de leite desnatado, 40% de leite integral e 60% de leite desnatado, 60% de leite integral e 40% de leite desnatado e 80% de leite integral e 20% de leite desnatado. Cada amostra foi misturada com o auxílio de um agitador magnético, que permaneceu ligado por 5 minutos.

Para cada conjunto de caixas de leite integral e desnatado, preparou-se um novo conjunto de misturas, totalizando um total de três conjuntos de misturas diferentes. Após o processo de agitação, as amostras foram novamente depositadas num refrigerador, por um período de 1 hora. Esse período de repouso foi adotado para que possíveis bolhas de ar que poderiam ter sido formadas durante o processo de agitação das amostras fossem dissipadas. Somente após todo esse processo é que as amostras foram caracterizadas por ultrassom.

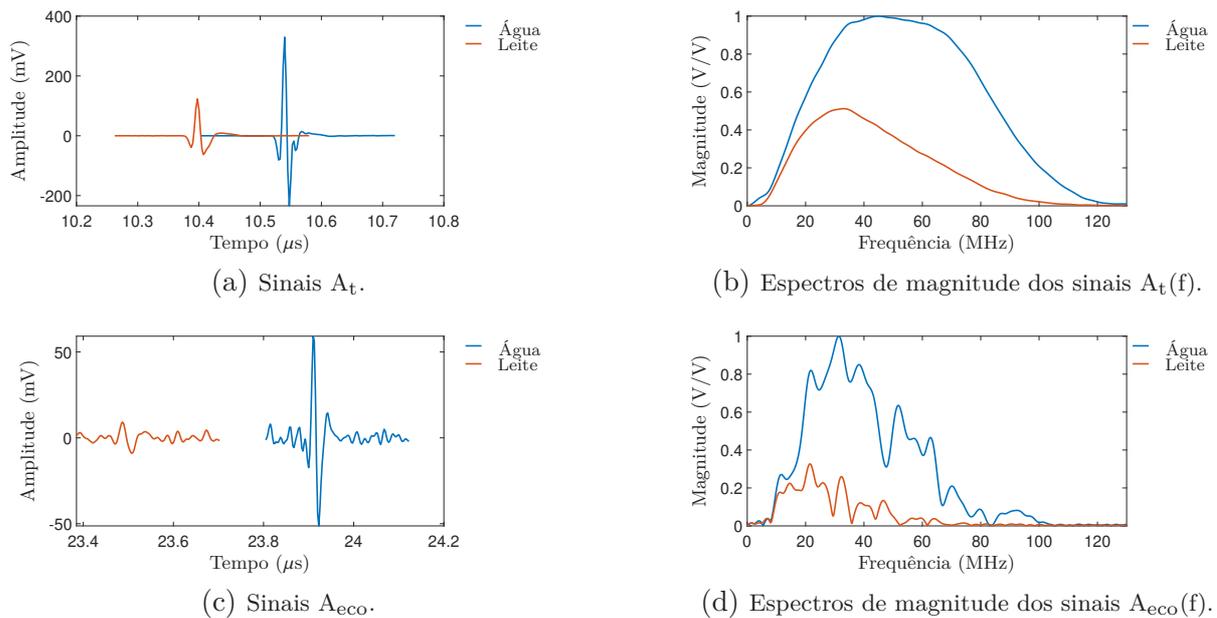
Antes de iniciar o processo de medição, as amostras foram retiradas do refrigerador uma a uma, e mantidas a temperatura ambiente (24°C) por um período de 5 minutos. Após esse período, alíquotas de leite foram separadas para que fossem medidas as densidades das amostras. Nessa etapa, um densímetro portátil (Anton Paar, modelo DMA35), com resolução de 0,0015 g/cm<sup>3</sup> foi utilizado.

O processo de medição usando a célula ultrassônica leva, aproximadamente, 5 minutos, de modo que as amostras de leite permaneceram fora do refrigerador por, no máximo 10 minutos. O cuidado com esses tempos é necessário para minimizar os riscos de contaminação das amostras. Foram realizadas três medições para cada amostra preparada, a fim de se minimizar os erros experimentais. Todas as medições foram realizadas no mesmo dia.

### 3.4 Definição do método de medição

A fim de se definir o método de medição mais adequado para a análise das amostras de leite, foram realizados testes iniciais considerando amostras de leite desnatado e leite integral retiradas diretamente das caixas de leite UHT. O resultado obtido a partir da análise realizada com leite desnatado pode ser visto na Figura 17.

Figura 17 – Sinais adquiridos a partir de amostras de água deionizada e leite desnatado, a uma temperatura de  $25 \pm 0,01^\circ\text{C}$ .



Fonte: Do Autor.

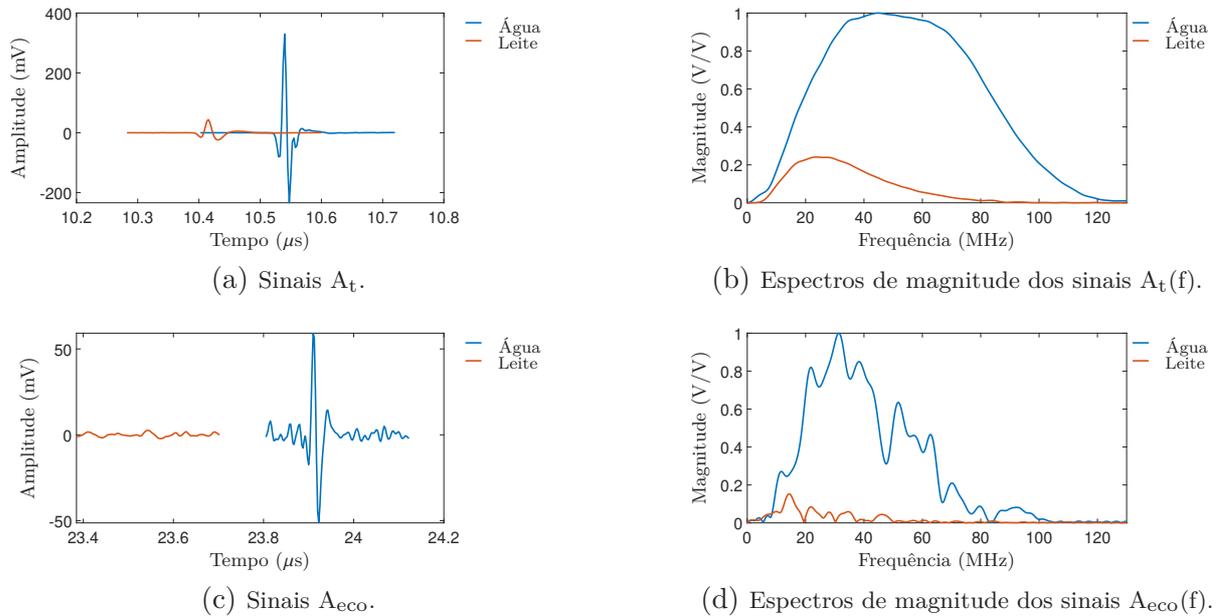
Nas imagens, são apresentados os sinais  $A_t$  e  $A_{\text{eco}}$  no domínio do tempo considerando as duas amostras analisadas. Pode-se observar que os sinais obtidos após a propagação das ondas por água apresentam maiores valores de amplitude do que os que se propagaram pelo leite desnatado. Essa variação de amplitude deve-se aos efeitos dos coeficientes de atenuação, que são maiores no leite desnatado do que na água. Além disso, observa-se que ao lado dos sinais de eco, há várias oscilações em torno do sinal de interesse. Essas oscilações representam os sinais provenientes das múltiplas reflexões que ocorrem nas camadas de água de acoplamento e nas paredes de quartzo da cubeta utilizada para depositar as amostras.

Ao analisar os sinais no domínio da frequência, observa-se que a largura de banda dos sinais referentes as ondas que se propagaram em água é maior do que a dos sinais que se propagaram no leite. Esse comportamento era esperado, pois como mencionado anteriormente, o coeficiente de atenuação aumenta em função da frequência.

Considerando somente a amostra de leite desnatado, já seria possível verificar que a opção pelo método de medição relativo seria mais indicada para a análise do leite, uma vez que a amplitude do sinal de eco em leite é muito menor e as reflexões presentes nesse

sinal geram grande distorção no espectro de magnitude dos sinais analisados no domínio da frequência. Mesmo assim, optou-se por repetir a análise, considerando uma amostra de leite integral, como pode ser observado na Figura 18.

Figura 18 – Sinais adquiridos a partir de amostras de água deionizada e leite integral, a uma temperatura de  $25 \pm 0,01^\circ\text{C}$ .



Fonte: Do Autor.

A análise dos sinais adquiridos a partir da análise de amostras de leite integral no domínio do tempo mostra que o sinal de eco é praticamente atenuado por completo, limitando a utilização do método de medição direto nesta situação.

O método de medição direto poderia ser uma alternativa para casos onde os sistemas de medição operam com transdutores de baixa frequência (entre 1 MHz e 10 MHz), mas mostrou-se pouco viável para análises usando transdutores de alta frequência. Dessa forma, todas as medições e resultados apresentados no próximo capítulo foram realizados usando o método de medição relativo, considerando água deionizada como líquido de referência.

### 3.5 Considerações parciais

Neste Capítulo, foram descritas as principais características do sistema de medição acústico utilizado no desenvolvimento deste trabalho, bem com as características dos sistemas de excitação e aquisição necessários para excitar os transdutores e adquirir os sinais. O controle dos instrumentos foi realizado de forma remota, a partir de um aplicativo desenvolvido através do *software* Matlab.

Foram descritos os procedimentos de calibração e medição de amostras de líquidos considerando o sistema de medição proposto, destacando-se o fato de a calibração seria necessária independentemente do método de medição escolhido pelo usuário.

Também foram apresentados os procedimentos adotados ao longo da etapa de preparação das amostras de leite, indicando os critérios adotados para preparação de misturas com diferentes teores de gordura e destacando-se os cuidados tomados em relação a refrigeração e período de repouso das amostras antes de sua utilização.

Finalmente, após um conjunto de análises preliminares, optou-se por utilizar o método de medição relativo, considerando água como líquido de referência. Essa opção deveu-se ao fato de as amostras de leite apresentarem valores elevados de coeficientes de atenuação, limitando a utilização dos sinais de eco para as faixas de frequência analisadas neste trabalho.

## 4 Resultados e discussões

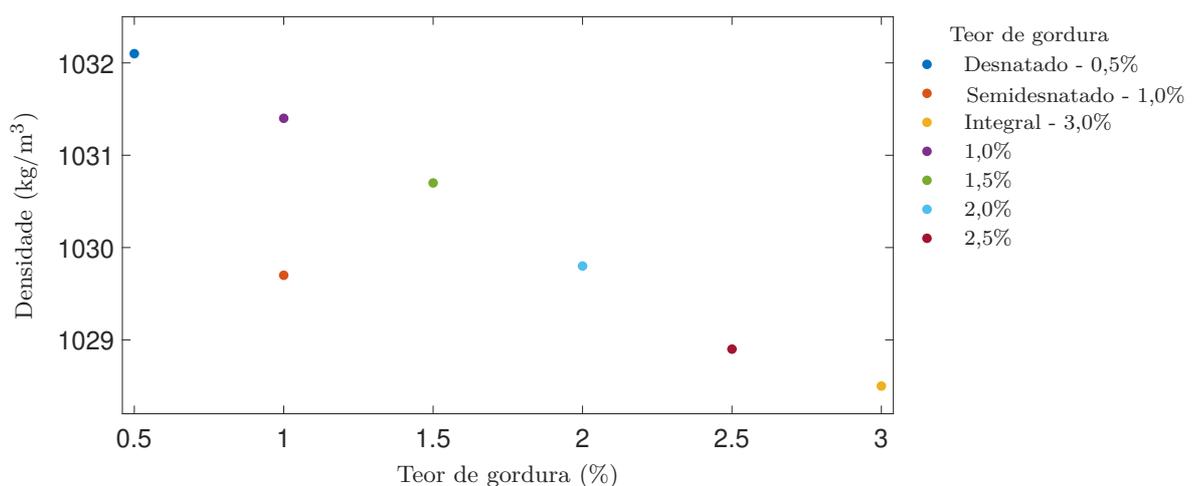
Neste Capítulo são apresentados os principais resultados obtidos ao longo deste trabalho. Inicialmente, apresentam-se os resultados das medições de densidade das amostras de leite analisadas, relacionando-se os valores alcançados a valores de referência encontrados na literatura.

Na sequência, são apresentados os resultados dos valores das velocidades de propagação e coeficientes de atenuação em função da frequência encontrados para cada amostra. Ao final, apresenta-se uma análise relacionando os efeitos do teor de gordura aos valores de dispersão e coeficiente  $\alpha_0$  encontrados.

### 4.1 Densidade das amostras de leite analisadas

Como mencionado, antes de iniciar o processo de medição das propriedades acústicas das amostras de leite, realizou-se a medição dos valores de densidade das mesmas. A Figura 19 apresenta os valores de densidade medidos, onde os pontos em azul descrevem a medição dos valores de densidade para os leites integral, semidesnatado, desnatado e as misturas de leite integral com desnatado. O ponto em laranja indica uma discrepância encontrada durante as medições, para a amostra de leite semidesnatado.

Figura 19 – Densidade das amostras de leite considerando diferentes teores de gordura. As medições foram realizadas a uma temperatura de 23,8°C.



Fonte: Do Autor.

Os valores de teor de gordura adotados ao longo do trabalho foram calculados considerando as informações nutricionais disponibilizadas no rótulo das caixas de leite UHT utilizadas. Essas informações indicavam que o leite desnatado apresenta um teor

de gordura de 0,5%, o leite semidesnatado 1,0% e o leite integral 3,0%. Considerando as proporções descritas no Capítulo anterior, foram estimados os teores de gordura das misturas preparadas usando leite desnatado e integral. Os resultados apresentados no gráfico representam o valor médio referente as medições de densidade dos três conjuntos de amostras analisados.

Ao analisar o gráfico, observa-se uma variação de densidade proporcional a variação do teor de gordura das amostras, exceto para o leite semidesnatado (ponto representado em laranja), que apresentou grande discrepância em relação aos demais pontos. Esse mesmo comportamento se repetiu nas medições de velocidade de propagação e coeficiente de atenuação, como será observado posteriormente. Isso indica que, possivelmente, o teor de gordura das amostras de leite semidesnatado utilizados não corresponde ao valor informado pelas informações nutricionais fornecidas pelo fabricante.

Para confirmar as informações dispostas nos rótulos das caixas de leite, e caracterizar as amostras preparadas em laboratório, seria necessário realizar uma análise química usando um método de referência ou utilizar um instrumento de medição comercial aprovado por um órgão regulamentador. Esse procedimento não foi realizado neste trabalho por falta de recursos econômicos.

A alternativa encontrada durante o desenvolvimento deste trabalho foi a de utilizar como referência as expressões apresentadas por Ueda (1999), que relaciona os valores de densidade e temperatura para amostras de leite integral e desnatado. O valor de densidade calculado considerando o leite desnatado a uma temperatura de 23,8°C foi de 1032,3 kg/m<sup>3</sup>, e o valor de densidade medido nessa mesma temperatura foi de 1032,1 kg/m<sup>3</sup>. Em relação ao leite integral, o valor de densidade calculado considerando uma temperatura de 23,8°C foi de 1027,9 kg/m<sup>3</sup>, enquanto o valor medido foi de 1028,5 kg/m<sup>3</sup>.

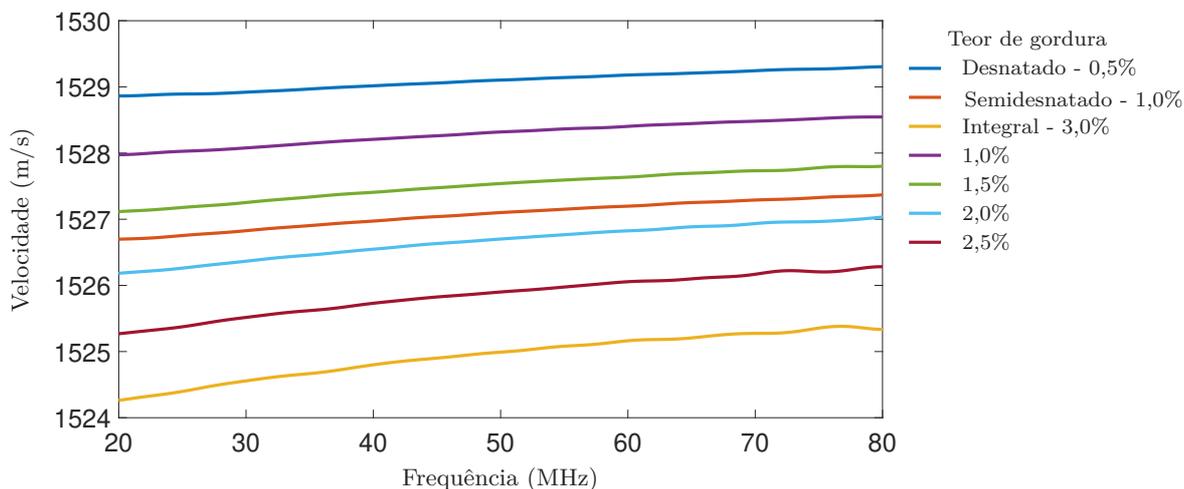
É possível que a diferença entre os valores calculados e medidos tenha sido causada por variações na temperatura da amostra, uma vez que o densímetro utilizado (DMA35) possui um sensor para medir a temperatura, mas não possui um sistema de controle térmico. Analisando novamente a Figura 19, nota-se que o valor da densidade medida para leite integral apresenta um valor mais elevado do que o esperado seguindo a tendência dos pontos anteriores. Isso indica que, possivelmente, o valor calculado para densidade do leite integral esteja mais próximo do valor que deveria ter sido medido experimentalmente.

## 4.2 Velocidade de propagação do som em amostras de leite

Após o processo de medição de densidade, as amostras foram depositadas numa cubeta de quartzo e posicionadas na célula de medição. A temperatura da célula foi ajustada em 25°C, e foram adquiridos os primeiros sinais recebidos. Estes sinais, juntamente com os sinais de referência adquiridos em água a uma mesma temperatura, foram utilizados para calcular os valores de velocidade de propagação do som nas amostras. Os

resultados obtidos são apresentados na Figura 20, que representa a variação de velocidade em função da frequência, considerando uma largura de banda entre 20 MHz e 80 MHz.

Figura 20 – Velocidade de propagação do som em função da frequência para amostras de leite com diferentes teores de gordura. As medições foram realizadas a uma temperatura de  $25 \pm 0,01^\circ\text{C}$ .



Fonte: Do Autor.

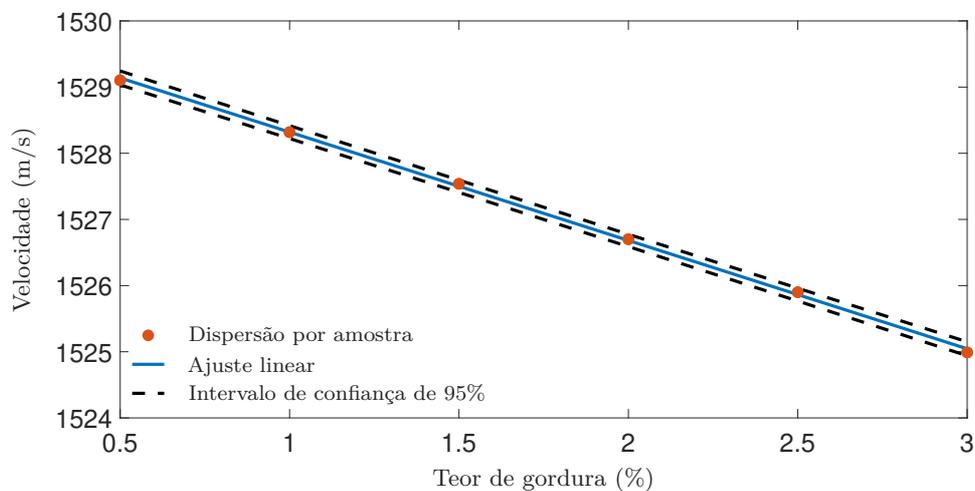
As curvas apresentadas na Figura 20 representam a média de nove aquisições realizadas, sendo 3 aquisições para cada amostra e três amostras para cada teor de gordura. Os resultados mostram que os valores de velocidade diminuem à medida que o teor de gordura das amostras aumenta, é possível notar também uma variação quase linear com a variação da frequência o que ficará mais visível com a análise de um ponto central de frequência.

Como comentado anteriormente, nota-se que os valores obtidos para a amostra de leite semidesnatado apresentam um comportamento diferente do esperado, considerando um teor de gordura de 1,0% como informado nas embalagens.

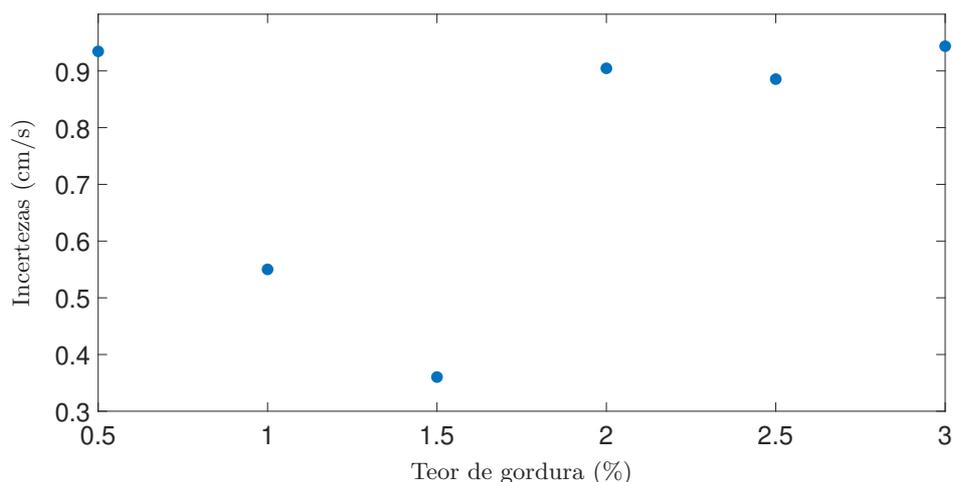
Tendo em vista essa aparente linearidade, analisamos um novo gráfico, considerando-se somente o ponto médio corresponde a frequência de 50 MHz, pode ser observado na Figura 21a. Na Figura 21b, pode-se observar também o resultado do cálculo das incertezas do tipo A obtidas a partir das medições realizadas. As curvas referentes as amostras de leite semidesnatado foram removidas deste gráfico, uma vez que não foi possível medir o valor correto de teor de gordura das amostras.

Os resultados mostram que a variação de velocidade em função do teor de gordura para a frequência de 50 MHz apresentam um comportamento que pode ser ajustado usando uma função de primeira ordem. O coeficiente angular obtido, que relaciona velocidade de propagação com % de teor de gordura, foi de  $-1,64 \text{ ((m/s)/\%)}$ . As incertezas experimentais obtidas estão de acordo com as características reportadas no trabalho de Tiago (2018), que indica uma resolução de 1 cm/s para a célula de medição empregada.

Figura 21 – Velocidade de propagação do som e incertezas padrão tipo A calculadas a partir de amostras de leite com diferentes teores de gordura, para a frequência central de 50 MHz.



(a) Velocidade de propagação em função do teor de gordura.



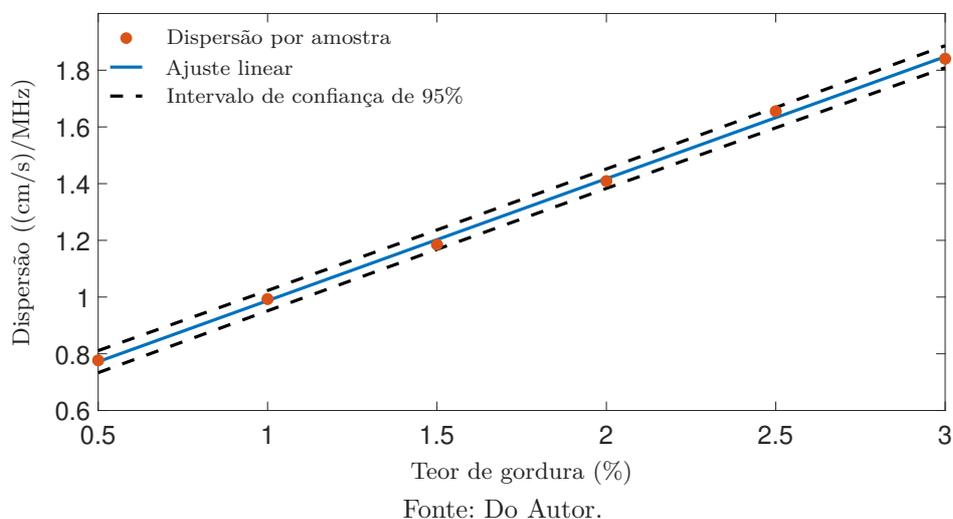
(b) Incertezas tipo A.

Fonte: Do Autor.

É importante ressaltar que esse valor de frequência foi escolhido por representar o centro da banda de frequências em análise, mas a análise poderia ser repetida considerando um valor de frequência diferente.

Finalmente, realizou-se uma análise da dispersão das curvas de velocidade apresentadas na Figura 22. Essa análise relaciona a variação de velocidade em função da frequência, considerando a faixa de frequências entre 20 MHz e 80 MHz. Para encontrar essa relação, realizou-se um ajuste linear para cada curva, e os coeficientes angulares de cada reta ajustada foram associados ao teor de gordura da amostra analisada. Novamente, as amostras referentes ao leite semidesnatado foram removidas desta avaliação. Os resultados obtidos podem ser observado na Figura 22.

Figura 22 – Dispersão das curvas de velocidade de propagação do som em função da frequência, considerando uma largura de banda entre 20 MHz e 80 MHz.



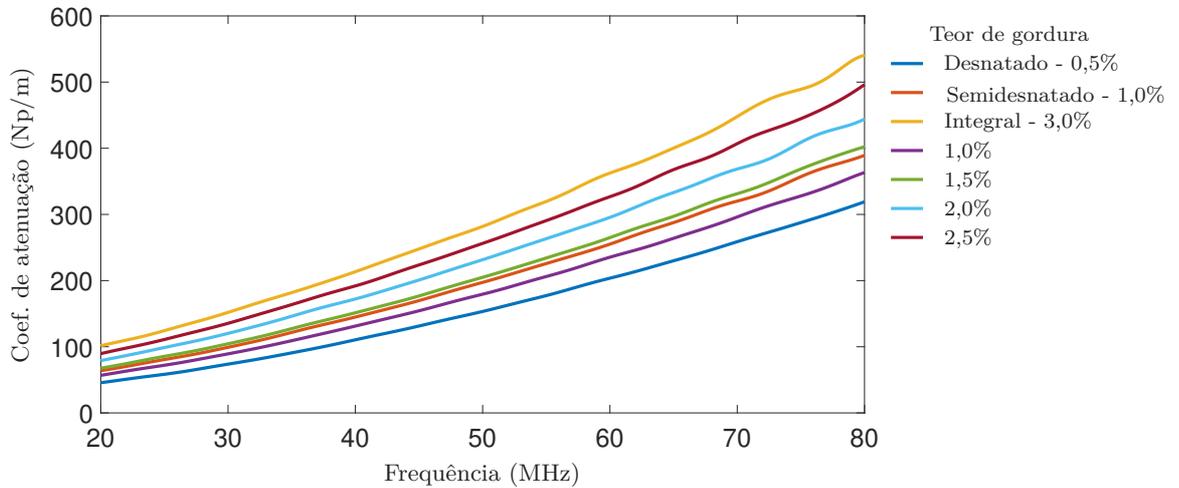
Os resultados apresentados mostram que diferentemente do que ocorre com as curvas de velocidade, onde os valores diminuem em função do aumento do teor de gordura, a dispersão aumenta em função do aumento da quantidade de gordura das amostras. Como pode ser observado, a variação dos valores de dispersão nas medidas de velocidade em relação ao teor de gordura das amostras pode ser aproximado para uma função de primeira ordem. Para as amostras analisadas neste trabalho, obteve-se uma variação de 0,43  $((\text{cm/s})/\text{MHz})/\%$ .

### 4.3 Coeficiente de atenuação acústico em amostras de leite

Os mesmos sinais utilizados nos cálculos de velocidade foram usados para calcular os coeficientes de atenuação das amostras. Assim como no caso anterior, definiu-se uma largura de banda entre 20 MHz e 80 MHz, e foram calculadas as médias das curvas referentes a cada conjunto de amostras com mesmo teor de gordura. Os resultados podem ser observados na Figura 23

Como esperado, os resultados obtidos a partir da análise do leite semidesnatado confirmam que o teor de gordura informado nas etiquetas das caixas adquiridas não está de acordo com o valor efetivamente medido. Convém ressaltar que mesmo não apresentando um teor de gordura de 1%, essas amostras ainda estariam de acordo com as normas vigentes definidas pelo Ministério da Agricultura do Brasil, que definem um alcance grande de variação para o leite semidesnatado, entre 0,6% e 2,9%. Os valores de coeficiente de atenuação medidos considerando as amostras de leite desnatado e integral estão de acordo com os apresentados por Dukhin e Goetz (2002). Para estas curvas de atenuação, nota-se que

Figura 23 – Coeficiente de atenuação acústica em função da frequência para amostras de leite com diferentes teores de gordura. As medições foram realizadas a uma temperatura de  $25 \pm 0,01^\circ\text{C}$ .



Fonte: Do Autor.

os valores aumentam conforme aumenta o teor de gordura e é possível verificar também que há uma maior dispersão entre as curvas de acordo com a variação na frequência.

Assim como na abordagem para a velocidade, um novo gráfico foi elaborado considerando apenas os pontos correspondentes a frequência de 50 MHz. Os resultados obtidos, assim como os valores de incertezas tipo A calculados, podem ser observados na Figura 24a.

Os resultados obtidos mostram que os coeficientes de atenuação aumenta em função do aumento do teor de gordura das amostras, como a dispersão é maior com o aumento da frequência essa análise poderia trazer informações mais visíveis para um valor de frequência maior, no entanto optamos por seguir o mesmo padrão de abordagem. A partir de uma aproximação linear, foi possível encontrar uma variação de, aproximadamente, 51,3  $((\text{Np/m})/\%)$ . na Figura 24b as incertezas calculadas também estão de acordo com as características do equipamento reportadas por Tiago (2018), que define uma resolução de 1 Np/m para o instrumento utilizado neste trabalho.

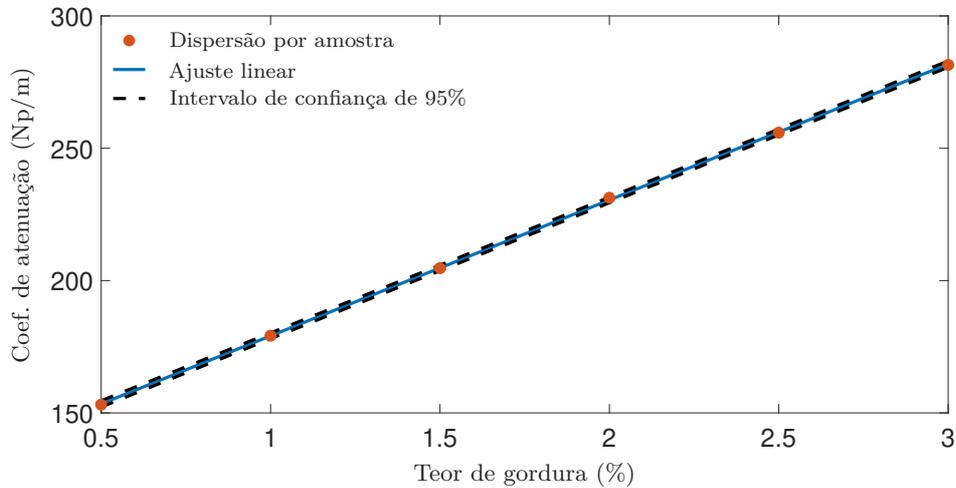
Finalmente, as curvas apresentadas na Figura 25 foram utilizadas para que fosse possível determinar os valores dos coeficientes  $\alpha_0$  para as diferentes amostras analisadas. Para isso, a partir da expressão

$$\alpha = \alpha_0 \cdot f^n, \quad (4.1)$$

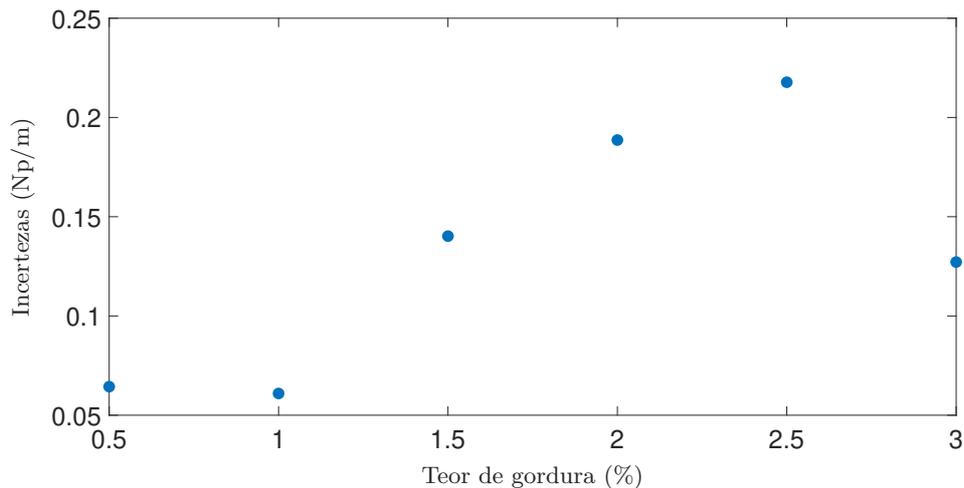
foram fixados os valores de  $n = 2$  e a representação dos valores de  $f$  foi definida em MHz.

A partir destas definições, e considerando uma largura de banda entre 20 MHz e 80 MHz, foram calculados os valores de  $\alpha_0$  apresentados na Figura 25.

Figura 24 – Coeficiente de atenuação do som e incertezas padrão tipo A calculadas a partir de amostras de leite com diferentes teores de gordura, para a frequência central de 50 MHz.



(a) Coeficiente de atenuação em função do teor de gordura.



(b) Incertezas tipo A.

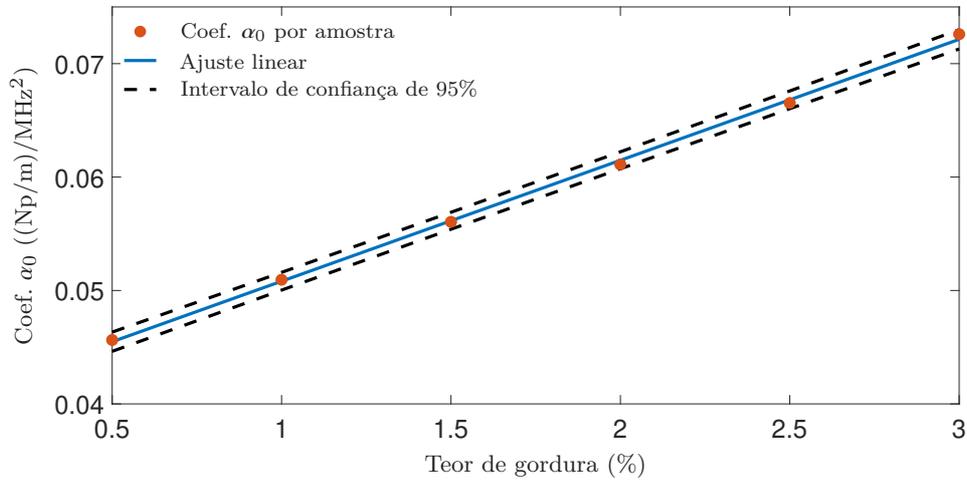
Fonte: Do Autor.

A análise do gráfico mostra que, como esperado, os valores de  $\alpha_0$  também aumentam em função do aumento do teor de gordura, numa taxa de 0,01 ( $((Np/m)/MHz^2)/\%$ ). Vale ressaltar que esse tipo de medição só foi possível pois o sistema de medição acústico utilizado neste trabalho opera em banda larga, haja vista que as variações de  $\alpha_0$  obtidas foram muito baixas.

#### 4.4 Considerações parciais

Neste capítulo, foram apresentados os principais resultados obtidos ao longo deste trabalho. Os valores de densidade medidos para as amostras de leite desnatado e integral

Figura 25 – Ajuste linear estimado a partir dos coeficientes  $\alpha_0$  obtidos a partir das curvas de atenuação acústica em função da frequência, considerando uma largura de banda entre 20 MHz e 80 MHz.



Fonte: Do Autor.

apresentaram uma variação em relação aos valores de referência, calculados a partir de expressões encontradas na literatura e apresentados na seção 4.1. Essa divergência pode ter sido resultado de variações térmicas entre o valor lido pelo sensor presente no densímetro e o valor real da temperatura das amostras.

Todas as análises realizadas mostraram uma discrepância entre resultados esperados e medidos para a amostra de leite semidesnatado. Isso indica que, possivelmente, o teor de gordura do leite informado nas caixas não representa o teor de gordura das amostras efetivamente analisadas. Ainda assim, é importante ressaltar que os valores medidos estão de acordo com as exigências do Ministério da Agricultura do Brasil.

Os valores de velocidade medidos apresentaram uma redução em função do aumento do teor de gordura das amostras. Considerando apenas medições realizadas a uma frequência de 50 MHz, essa redução foi de  $-1,64$  ((m/s)/%). Em contrapartida, a dispersão das medidas de velocidade aumentou em função do aumento do teor de gordura. Esse aumento foi de, aproximadamente,  $0,43$  (((cm/s)/MHz)/%) considerando uma largura de banda de 20 MHz a 80 MHz. Ressalta-se que esses valores poderiam ser diferentes caso a análise fosse repetida considerando outros valores de temperatura.

Finalmente, a análise das informações obtidas a partir dos coeficientes de atenuação mostra que, para uma frequência de 50 MHz, esses coeficientes aumentam numa relação de  $51,3$  ((Np/m)/%). De forma semelhante, os valores obtidos para  $\alpha_0$ , considerando-se  $f$  em MHz,  $n = 2$  e uma largura de banda entre 20 MHz e 80 MHz, apresentaram um aumento proporcional ao aumento do teor de gordura das amostras, numa relação de  $0,01$  (((Np/m)/MHz<sup>2</sup>)/%).

## 5 Considerações finais

Neste trabalho, foram apresentadas técnicas para caracterização de amostras de leite UHT em função de seu teor de gordura a partir de um sistema de medição ultrassônico. Descreveu-se o sistema de medição utilizado, bem como os sistemas de excitação, aquisição e controle térmico necessários para que o processo de medição seja realizado. O *software* Matlab foi usado como plataforma de controle para acessar remotamente os instrumentos e para processar os sinais adquiridos. Para simplificar essas tarefas, um aplicativo com interface gráfica foi desenvolvido, permitindo que o usuário pudesse selecionar as opções desejadas de forma iterativa.

Foram descritas as etapas de preparação das amostras de leite utilizadas ao longo do trabalho, destacando os cuidados que devem ser tomados a fim de se evitar problemas relacionados a contaminação das amostras. Além disso, foram descritas as etapas de calibração e medição dos líquidos de interesse a partir do sistema acústico apresentado. Optou-se por utilizar o método de medição relativo, pois as amostras de leite analisadas apresentaram valores de coeficiente de atenuação elevados, atenuando quase que por completo o sinal de eco que deveria ser empregado para realizar medições diretas.

Os valores de densidade das amostras de leite desnatado e integral apresentaram valores diferentes dos calculados a partir de expressões de referência encontradas na literatura. Essa diferença pode ter sido causada por erros na medição de temperatura das amostras, uma vez que o densímetro portátil usado neste trabalho não apresentava um sistema de controle térmico.

Observou-se uma discrepância nos resultados obtidos ao analisar as amostras de leite semidesnatado, seja considerando densidade, velocidade de propagação ou coeficiente de atenuação. Esse efeito pode ter sido causado por uma diferença entre os valores de teor de gordura informados pelo fabricante nas embalagens e os valores de teor de gordura efetivamente presentes nas amostras. Nesse caso, seria fundamental conferir esses valores através de um método químico de referência, preferencialmente um dos listados nas normas definidas pelo Ministério da Agricultura. Essas medições não foram realizadas ao longo deste trabalho por falta de recursos técnicos e financeiros.

A análise realizada mostrou que a velocidade de propagação do som diminui em função do aumento do teor de gordura das amostras, variando  $-1,64 \text{ ((m/s)/\%)}$  para uma frequência de 50 MHz, ao passo que a dispersão das amostras aumenta a medida que o teor de gordura cresce, variando  $0,43 \text{ (((cm/s)/MHz)/\%)}$  considerando uma banda entre 20 MHz e 80 MHz.

Os valores obtidos ao calcular os coeficientes de atenuação também aumentaram em função do aumento do teor de gordura das amostras, variando  $51,3 \text{ ((Np/m)/\%)}$  para uma frequência de 50 MHz. Além disso, os valores do coeficiente  $\alpha_0$ , obtidos considerando-

se  $f$  em MHz,  $n = 2$  e uma largura de banda entre 20 MHz e 80 MHz, apresentaram uma variação de 0,01 ( $((Np/m)/MHz^2)/\%$ ). Os resultados apresentados mostram que um sistema de medição acústico pode ser utilizado de forma eficiente para determinar o teor de gordura de amostras de leite.

## 5.1 Propostas para desenvolvimento de próximos trabalhos

Há uma série de parâmetros que não foram analisados, como o extrato seco e o extrato seco desengordurado, por exemplo. Para os próximos trabalhos, uma das propostas seria caracterizar amostras cujas propriedades físicas pudessem ser previamente determinadas a partir de outros métodos, de forma que fosse possível correlacionar os parâmetros acústicos com informações que não foram consideradas ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

Além disso, pode-se estudar métodos para cálculo da densidade dessas amostras através de métodos de medição relativos. Essa solução poderia eliminar a necessidade de se utilizar um densímetro para se caracterizar as amostras.

Finalmente, sugere-se o estudo de algoritmos para estimação de parâmetros e fusão sensorial com o objetivo de combinar as informações dos parâmetros obtidos a fim de extrair informações que não podem ser obtidas de forma direta a partir de medições ultrassônicas.

# Referências

- ADAMOWISKI, J. C. et al. *Caracterização de Líquidos por Ultrassom*. São Paulo: EPUSP, 2002. 1–51 p.
- ADAMOWSKI, J. C. et al. Ultrasonic measurement of density of liquids. *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 97, n. 1, p. 354–361, 1995.
- Alves D., J.; Goldschmidt A., F. Qualidade físico-química, higiênico-sanitária e composicional do leite cru. *Embrapa*, 2014.
- BARBANO, D. M.; CLARK, J. L. Infrared Milk Analysis — Challenges for the Future. *Journal of Dairy Science*, v. 72, n. 6, p. 1627–1636, 1989.
- Del Grosso, V. A.; MADER, C. W. Speed of Sound in Pure Water. *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 52, n. 5B, p. 1442–1446, 1972.
- DORABIATO, L. F. *SISTEMA DE ULTRA-SOM PARA CARACTERIZAÇÃO DE LEITE BOVINO*. Dissertação (Mestrado) — UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ, 2007.
- DUKHIN, A. S.; GOETZ, P. J. *Characterization of Liquids, Nano- and Microparticulates, and Porous Bodies Using Ultrasound*. 2nd. ed. [S.l.]: Elsevier Science, 2002. 518 p.
- FOSS. *MilkoScan FT1 Milk- Milk standardisation with in-built abnormality screening*. Denmark, 2018.
- HOLMES, J.; PARKER, G.; POVEY, W. Temperature dependence of bulk viscosity in water using acoustic spectroscopy. *Journal of Physics: Conference Series*, v. 269, n. 1, 2011.
- MAPA. *Instrução Normativa Nº 59/2019*. Brasília - DF, 2019. Disponível em: <<https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/instrucao-normativa-n-59-de-6-de-novembro-de-2019-226514335>>.
- MAPA. *Instrução Normativa Nº 55/2020*. Brasília - DF, 2020. Disponível em: <<https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/instrucao-normativa-n-55-de-30-de-setembro-de-2020-280529682>>.
- NAZÁRIO, S. et al. Characterization of bovine milk using ultrasound and artificial neural networks. *Controle y Automacao*, v. 20, n. 4, 2009.
- POVEY, M. J. W. *Introduction*. Cambridge, Massachusetts: Academic Press, 1997. 1–10 p.
- POVEY, M. J. W. *Water*. Cambridge, Massachusetts: Academic Press, 1997. 33–42 p.
- RESNICK, Robert; HALLIDAY, D. *Física. 3. ed. Livros Tecnicos e Científicos*. 1981. 348 p.

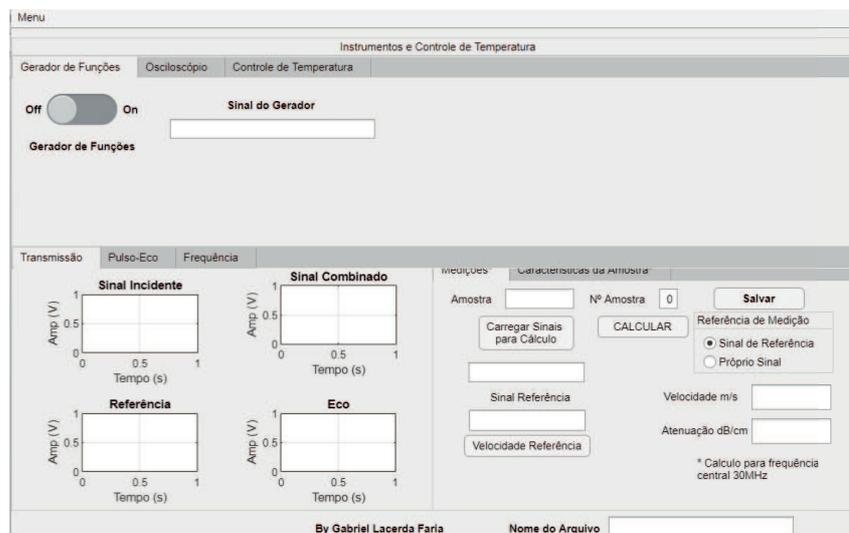
TIAGO, M. M. *Desenvolvimento de uma célula para medição de propriedades de líquidos por ultrassom com manipulação de amostras através de cubetas*. Tese (Doutorado) — UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO” FACULDADE DE ENGENHARIA CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA, 2018.

UEDA, A. Relationship milk temperature. Ottawa, Canada, p. 17–18, 1999.

# APÊNDICE A – Aplicativo

A seguir serão descritas de forma sucinta as funções disponíveis no aplicativo, além das funções a serem implementadas em projetos futuros. A Figura 26 apresenta a tela inicial do aplicativo desenvolvido.

Figura 26 – Interface inicial do aplicativo.



## A.1 Instrumentos

As funções relacionadas ao controle dos instrumentos incluem o gerenciamento remoto de um gerador de funções, aquisição de dados a partir de um osciloscópio digital, além do controle e medição de temperatura da amostra. A parte gráfica do *software* foi desenvolvida, mas para utilizá-la, é necessário adicionar os algoritmos de controle dos instrumentos.

Na aba gerador de funções, será possível carregar um sinal de referência para ser utilizado como sinal de excitação para os transdutores, além de permitir que o instrumento seja ligado ou desligado remotamente. Esta função requer conexão entre gerador de funções e computador, que pode ser feita usando uma porta de comunicação USB, por exemplo.

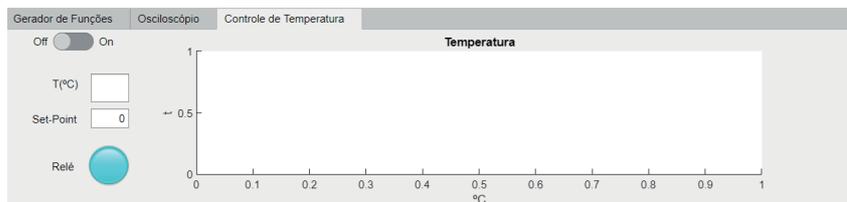
Na aba osciloscópio, o usuário pode controlar o período de amostragem, valor inicial de tempo, ganho de tensão e níveis de *trigger*. Para aquisições de sinais no domínio do tempo, muitas vezes é necessário que se faça o ajuste da janela de tempo do osciloscópio para cada nova amostra, a fim de detectar os ecos de propagação do sinal. Para eliminar a ação humana constante no experimento, o ajuste poderá ser feito através do aplicativo utilizando os botões para que *software* armazene as posições iniciais de cada sinal, desde que definidas previamente pelo usuário. A Figura 27 apresenta uma imagem desta aba.

Figura 27 – Interface da aba osciloscópio.



Finalmente, a partir da aba controle de temperatura, é possível monitorar a temperatura atual do sistema, além de definir valores de referência para o controlador. O controle de temperatura deve ser realizado por um sistema embarcado, que envia e recebe informações do aplicativo por meio de comunicação serial. A Figura 28 apresenta a interface desenvolvida com esta finalidade.

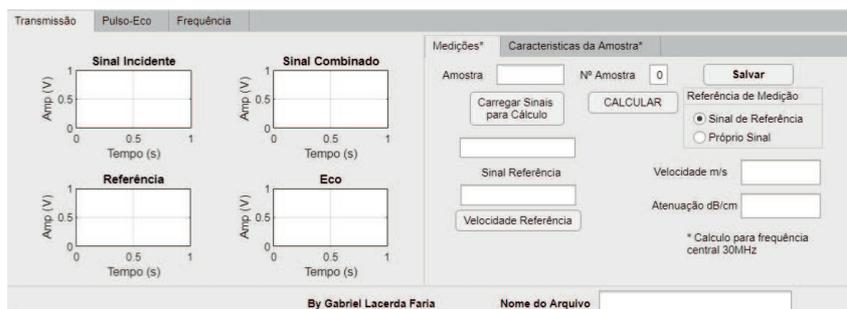
Figura 28 – Interface da aba temperatura.



## A.2 Configuração do sistema de medição

Nesta aba, pode-se definir o método de medição a ser utilizado (pulso-eco ou transmissão), como mostrado na Figura 29. Nesta etapa, pode-se definir as características do sinal de excitação que deverá ser utilizado em conjunto com os transdutores.

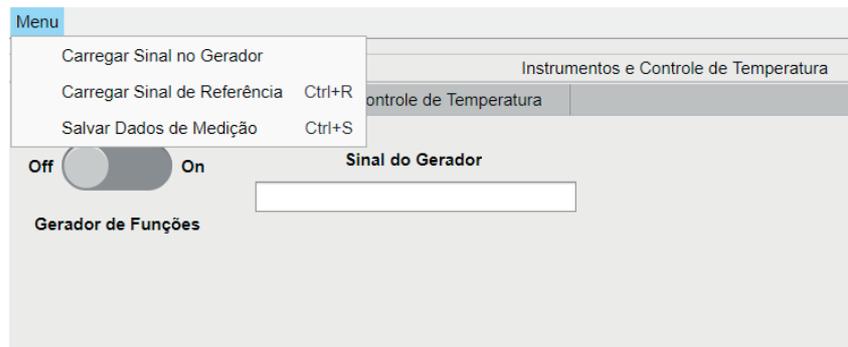
Figura 29 – Interface da aba transmissão.



Além disso, uma função adicional permite que dados provenientes adquiridos após a análise de amostras possam ser utilizados para os cálculos de velocidade e coeficiente de atenuação, conforme apresentado na Figura 30.

Para utilizar essas funções, inicialmente deve-se carregar o sinal de referência adquirido usando água deionizada. Em seguida, calcula-se o comprimento do caminho de propagação  $L$ , que será utilizado para os próximos cálculos. Ao clicar no botão velocidade

Figura 30 – Interface da aba carregamento.



referência, serão exibidas as formas de onda no domínio do tempo correspondentes aos sinais adquiridos, bem como os valores de velocidade e coeficiente de atenuação para a frequência central utilizada durante a medição.

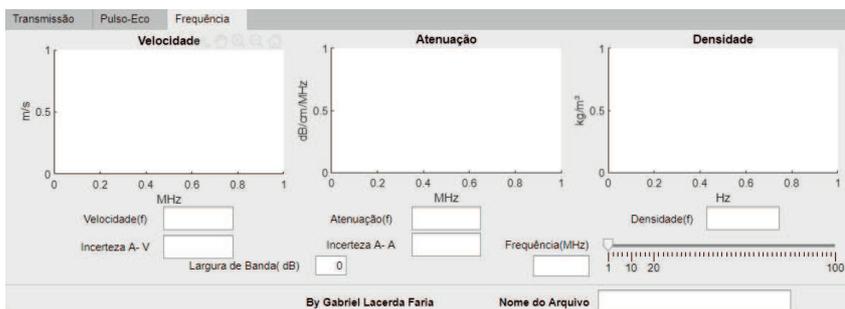
Em seguida, deve-se carregar o sinal da amostra que se deseja caracterizar e clicar na opção calcular. Será necessário informar o método de cálculo que será utilizado (direto ou relativo a água), além de informar o nome e número da amostra analisada.

A função de salvamento criará um arquivo com o nome inserido pelo usuário. Nesse arquivo, haverá uma separação de acordo com os nomes de amostras preenchidos na etapa anterior. Para cada novo arquivo, será necessário alterar o número da amostra (caso ainda esteja dentro do grupo) ou o nome da amostra, caso o tipo de material analisado tenha sido alterado. O arquivo salvo irá gerar uma estrutura, que contém as curvas com os coeficientes de atenuação e velocidade de propagação em função da frequência, assim como os vetores dos sinais amostrados.

A aba pulso-eco foi projetada com uma função extra, que deveria permitir o cálculo da densidade relacionando parâmetros de impedância acústica para medição indireta. Esta função não foi implementada e segue como objetivo para trabalhos futuros.

A aba frequência apresenta as curvas de velocidade e coeficiente de atenuação em função da frequência. Essa aba permite ao usuário utilizar uma barra de rolagem para selecionar frequências específicas, de modo a facilitar a relação entre valores medidos e frequência, como pode ser visto na Figura 31. Vale ressaltar que a curva de densidade não é demonstrada nessa versão do aplicativo devido a necessidade de novos métodos para cálculo deste parâmetro.

Figura 31 – Interface da aba frequência.









---

## TERMO DE RESPONSABILIDADE

O texto do trabalho de conclusão de curso intitulado “Determinação do teor de gordura em amostras de leite por ultrassom” 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, 15 de outubro de 2022.

  
\_\_\_\_\_  
Gabriel Lacerda Faria