



Laura Beatriz Alves

**Técnica de identificação de adulteração no leite  
via ultrassom e regras fuzzy**

Limeira, SP

2015





UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

FACULDADE DE TECNOLOGIA

Mestrado em Tecnologia

Laura Beatriz Alves

# **Técnica de identificação de adulteração no leite via ultrassom e regras fuzzy**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado da  
Faculdade de Tecnologia da Universidade Estadual  
de Campinas, como requisito para a obtenção do  
título de Mestra em Tecnologia.

Área de Concentração: Tecnologia e Inovação.

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO  
DEFENDIDA PELA ALUNA LAURA BEATRIZ ALVES E ORIENTADA PELA  
PROFA. DRA. ELAINE CRISTINA CATAPANI POLETTI E CO-ORIENTADA  
PELO PROF. DR. FRANCISCO JOSÉ ARNOLD.

---

Orientadora: Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Elaine Cristina Catapani Poletti (FT-UNICAMP)

Co-orientador: Prof<sup>º</sup> Dr Francisco José Arnold (FT-UNICAMP)

Limeira, SP

2015

iii

Ficha catalográfica  
Universidade Estadual de Campinas  
Biblioteca da Faculdade de Tecnologia  
Felipe de Souza Bueno - CRB 8/8577

Al87t Alves, Laura Beatriz, 1990-  
Técnica de identificação de adulteração no leite via ultrassom e regras fuzzy /  
Laura Beatriz Alves. – Limeira, SP : [s.n.], 2015.

Orientador: Elaine Cristina Catapani Poletti.  
Coorientador: Francisco José Arnold.  
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de  
Tecnologia.

1. Leite - Qualidade. 2. Modelagem de dados. 3. Lógica fuzzy. 4. Ultrassom. I.  
Poletti, Elaine Cristina Catapani, 1975-. II. Arnold, Francisco José, 1965-. III.  
Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Tecnologia. IV. Título.

Informações para Biblioteca Digital

**Título em outro idioma:** Identification technique of milk adulteration by ultrasound and fuzzy logic

**Palavras-chave em inglês:**

Milk - Quality

Data modeling

Fuzzy logic

Ultrasonics

**Área de concentração:** Tecnologia e Inovação

**Titulação:** Mestra em Tecnologia

**Banca examinadora:**

Elaine Cristina Catapani Poletti [Orientador]

Renata Zotin Gomes de Oliveira

Rangel Arthur

**Data de defesa:** 02-02-2015

**Programa de Pós-Graduação:** Tecnologia

---

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM TECNOLOGIA**  
**ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: TECNOLOGIA E INOVAÇÃO**

Técnica de identificação de adulteração no leite via ultrassom e regras fuzzy

**Laura Beatriz Alves**

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Dissertação:



---

Profa. Dra. Elaine Cristina Catapani Poletti  
FT-UNICAMP  
Presidente



---

Profa. Dra. Renata Zotin G. de Oliveira  
UNESP



---

Prof. Dr. Rangel Arthur  
FT-UNICAMP



# Agradecimentos

À Deus, primeiramente, pela força para não desistir. Agradeço à minha orientadora profa. Dra. Elaine pelo apoio em todas as fases do projeto, ao meu co-orientador prof. Dr. Francisco, a toda equipe da FT que de alguma maneira participaram do meu dia a dia. Agradeço imensamente ao prof. Dr. Eduardo Tavares Costa por ter cedido gentilmente o equipamento de ultrassom bem como o laboratório para a realização dos experimentos, além de tirar algumas dúvidas quando surgiam. Ao Laerthe Cassoli, da ESALQ de Piracicaba, que também colaborou muito ao dar sua opinião sobre a pesquisa e sanar minhas dúvidas. À profa. Dra. Vera Lúcia Nantes Button pela valiosas sugestões na qualificação do projeto. À profa. Dra. Renata Zotin Gomes de Oliveira pelas participações na qualificação e defesa, com suas sugestões, e também ao prof. Dr. Rangel Arthur por colaborar na banca de defesa. Agradeço aos produtores de leite da região de Limeira pelo fornecimento das amostras, espero realmente poder ajudá-los futuramente com esta pesquisa.

Ao Rocha e ao Gil pelo apoio e bom humor durante as coletas. Ao seu João do laboratório de Telecomunicações pela construção do suporte, ao Ximenes pela ajuda no laboratório e aos alunos de Telecomunicações que sempre me ajudaram no decorrer do projeto. A todas as amigas que fiz, e que deram tanto apoio emocional que é impossível imaginar essa caminhada sem as suas valiosas presenças, bom humor, festas, broncas e reuniões. Aos amigos antigos e toda a família, que compreenderam meu frequente sumiço pelas obrigações.

À minha mãe, que foi sempre compreensível e me ajudou de forma imensurável, presencialmente ou à distância. Às minhas irmãs também pelo apoio, ao me buscarem nas cansativas viagens semanais. Aos meus avós, pelo apoio e incentivo. Ao meu pai, que deve estar orgulhoso. À minha mãe postiça Fátima, que foi uma grande amiga e companheira. Agradeço à todos, a maior recompensa é o crescimento pessoal que vem embutido com o encerramento deste trabalho.

*Para meus pais e avós, com amor.*

# Resumo

A presente pesquisa propõe um modelo de avaliação e classificação de amostras de leite cru no tocante à sua regularidade, tendo em vista que, frequentemente, são constatadas alterações em amostras do produto comprometendo sua qualidade e sua composição. Sabido que tais adulterações, além de outras consequências, têm reflexos à saúde humana, objetivou-se desenvolver uma técnica de análise do leite sem riscos e sem interferência em suas propriedades físico-químicas. Assim, através de um equipamento de ultrassom e de um sistema de apoio à decisão, avaliou-se o coeficiente de atenuação e a velocidade de propagação de ondas do produto sob diversas diluições. Tais resultados alimentaram um sistema de apoio à decisão baseado em regras fuzzy que possibilitam o desenvolvimento de um método alternativo de análise e verificação de regularidade do produto. Com isso, foi possível confirmar a eficiência da técnica ao identificar que, com a adulteração progressiva da amostra, o coeficiente de atenuação aumenta e a velocidade de propagação diminui, desde que a amostra de referência seja a de leite cru puro.

**Palavras-chave:** Qualidade do Leite, Modelagem, Lógica Fuzzy, Propagação de ondas.

# ***Abstract***

*This research proposes an evaluation and classification model of samples of raw milk in regarding its regularity, taking into consideration that frequently found changes in product samples, affecting its quality and composition. Known that such adulteration, among other consequences, have an effect on human health, it was aimed to develop a technique milk analysis without risk and without interference in their physicochemical properties. Thus, through an ultrasound equipment and a system for decision support, the attenuation coefficient and the velocity of wave propagation of the product were evaluated in different dilutions. These results supplied a system of decision support based on fuzzy rules that enable the development an alternative method of analysis and product regularly check. Thus, it was possible confirm the efficiency technique to identify, with the sample progressive adulteration, the attenuation coefficient increases and the propagation speed decreases once the reference sample is a pure raw milk.*

**Keywords:** *Milk Quality, Modeling, Fuzzy Logic, Wave propagation.*

# Lista de Figuras

3.1	Método de experimentação pulso-eco. . . . .	10
3.2	Sinal recebido pelo ultrassom, com picos da emissão e da recepção. . . . .	11
3.3	Exemplo de sinal de referência e do sinal analisado, gerado pelo Matlab®. . . . .	14
3.4	FFT do sinal de referência e material analisado. . . . .	15
3.5	Gráfico do BUA com <i>fitting</i> . . . . .	16
4.1	Estrutura de um SBRF - Sistema Baseado em Regras Fuzzy [1]. . . . .	19
4.2	Sistema de inferência de Mamdani para duas entradas e uma saída [2]. . . . .	21
4.3	Exemplo de aplicação da base de regras e posterior defuzzificação com o método Centro de Gravidade [3]. . . . .	22
5.1	Diagrama em blocos do sistema . . . . .	24
5.2	Equipamentos utilizados no sistema de experimentação . . . . .	25
5.3	Esquema do sistema de experimentação . . . . .	26
5.4	Fluxograma do sistema desenvolvido . . . . .	27
5.5	Sistema de base de regras com as suas variáveis . . . . .	28
6.1	Exemplo de sinal de referência e do sinal analisado do experimento, gerado pelo Matlab® . . . . .	32
6.2	FFT do sinal de referência, à esquerda, e do sinal analisado do experimento, à direita . . . . .	33
6.3	Exemplo de Gráfico do BUA com <i>fitting</i> de um dos experimentos . . . . .	33
6.4	Função de pertinência para o coeficiente de atenuação . . . . .	36
6.5	Função de pertinência para a velocidade de propagação . . . . .	37
6.6	Função de pertinência para o grau de aceitabilidade . . . . .	38

6.7	Relação entre as variáveis de entrada e saída . . . . .	39
-----	---------------------------------------------------------	----

# Sumário

<b>Lista de Figuras</b>	<b>xi</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
<b>2 Leite</b>	<b>3</b>
2.1 Características Físicas . . . . .	5
2.2 Fiscalização . . . . .	6
2.3 Métodos eletrônicos de análises de líquidos . . . . .	7
<b>3 Ultrassom</b>	<b>9</b>
3.1 Velocidade de Propagação . . . . .	11
3.2 Coeficiente de Atenuação . . . . .	12
3.3 Atenuação em Banda Larga ( <i>Broadband Ultrasound Attenuation - BUA</i> ) . . . . .	13
<b>4 Teoria dos Conjuntos Fuzzy</b>	<b>17</b>
4.1 Lógica fuzzy e Sistema de Base de Regras Fuzzy - SBRF . . . . .	18
4.2 Fuzzyficação . . . . .	20
4.3 A Base de regras . . . . .	20
4.4 Inferência . . . . .	20
4.5 Defuzzyficação . . . . .	21
<b>5 Materiais e Métodos</b>	<b>23</b>
5.1 Sistema Ultrassônico . . . . .	24
5.1.1 Medição de velocidade de propagação e coeficiente de atenuação . . . . .	26

5.1.2	Determinação do BUA . . . . .	27
5.2	Caracterização dos experimentos . . . . .	27
5.3	Regras Fuzzy . . . . .	28
<b>6</b>	<b>Resultados e Discussões</b>	<b>31</b>
<b>7</b>	<b>Conclusão</b>	<b>41</b>
	<b>Referências bibliográficas</b>	<b>43</b>
	<b>Anexos</b>	<b>47</b>

# Capítulo 1

## Introdução

O leite é uma importante fonte de alimento do ponto de vista nutricional composto, basicamente, por proteínas, gorduras, sais minerais e água. A maior parte do leite atualmente comercializada no mundo é de origem bovina, bem como a grande maioria dos produtos lácteos. Trata-se de um alimento essencial à vida que movimenta bilhões de reais no mercado mundial.

O crescimento econômico do Brasil nos últimos anos impulsionou também o crescimento do setor agropecuário, e em especial, o setor lácteo. Entre 2000 e 2011, a oferta de leite no país cresceu 62,4%, ultrapassando a marca dos 32 bilhões de litros. Com isso, em 2013 o Brasil passou a ocupar a posição de um dos maiores produtores de leite de vaca do mundo, estando atrás apenas dos Estados Unidos, da Índia e da China. O significativo crescimento da produção de leite no Brasil é intenso, e esse avanço na produção pode ser explicado por dois fatores principais: rebanho e produtividade.

Assim como a Índia, o Brasil possui um amplo rebanho atrelado a um baixo nível de rendimento. Porém, mesmo com esse baixo nível, a redução do número de pequenos produtores e o aumento do rebanho mais especializado promoveram incrementos na produtividade brasileira ao longo dos anos. Este incremento se dá, também, devido aos esforços investidos pelo setor agropecuário, especialmente em termos de gestão das propriedades, de cuidados com o rebanho e com a qualidade do leite.

A qualidade do leite, que pode ser entendida em termos da conservação de sua integridade, é um dos desafios para o produtor e para o laticínio. Esta deve ser garantida e mantida até o consumo final do produto puro ou industrializado.

Além da satisfação do consumidor, pois quanto melhor a qualidade do leite, maior o pagamento

pelo litro produzido, a avaliação do produto envolve muitos fatores, como por exemplo: o pagamento por extrato seco extraído, a relação do índice de gordura/água do leite e, também, o volume total. Desta forma, toda a cadeia produtiva do setor preocupa-se em preservar e garantir a qualidade do leite, uma vez que as entidades fiscalizadoras possuem padrões de qualidade que devem ser atendidos.

Historicamente há diversos registros de adulterações no volume em lotes de leite com a adição de água, água oxigenada, soda cáustica e até mesmo ureia. Assim, de modo a analisar a qualidade do composto, algumas análises físico-químicas são exigidas pela ANVISA, Agência Nacional de Vigilância Sanitária. Tais análises, realizadas em laboratórios com tempo e capital investidos, são realizadas esporadicamente, por meio de amostragens, e podem identificar irregularidades, como por exemplo, no índice crioscópico que relaciona o ponto de congelamento do leite com a adição de alguma outra substância.

Assim sendo, esta pesquisa tem como objetivo o desenvolvimento de um método de análise da qualidade do leite cru com vistas à identificação de possíveis adulterações no composto. Para tanto, propõe-se a aplicação de técnicas de ultrassom para determinação do coeficiente de atenuação e da velocidade de propagação do líquido que associados à lógica fuzzy determinam um modelo de avaliação de amostras de leite. A proposta é de desenvolvimento de um método de análise não destrutivo, de baixo custo e maior viabilidade de análises, apresentando resultados sólidos instantâneos e, indicando possíveis irregularidades para análises mais rigorosas.

O texto está estruturado da seguinte forma: no capítulo 2 é abordado a importância do leite, suas características físicas, a fiscalização do setor produtivo e os métodos de análise existentes; no capítulo 3 são abordados o ultrassom e seus conceitos utilizados neste estudo; no capítulo 4 o tema é lógica fuzzy com a sua base teórica e especificações do sistema de base de regras utilizado na pesquisa; no capítulo 5 o equipamento e as técnicas utilizadas nas experimentações são apresentados; no capítulo 6 os resultados das experimentações e as discussões sobre a técnica utilizada são mostrados; no capítulo 7 as conclusões do projeto são apresentadas e, no capítulo 8, as referências bibliográficas.

# Capítulo 2

## Leite

O leite é um alimento que possui um alto valor nutritivo, constitui-se de um alimento complexo contendo água, carboidratos (basicamente lactose), gorduras, proteínas (principalmente caseína), minerais e vitaminas em diferentes estados de dispersão [4]. Segundo o RIISPOA, Regulamento de Inspeção Industrial e Sanitária de Produtos de Origem Animal, entende-se por leite cru o produto proveniente da ordenha completa, sem interrupção, de vacas sadias, bem alimentadas, descansadas, e com as exigências mínimas de higiene em todo o processo [5].

O setor leiteiro no Brasil, de acordo com o IBGE, cresce anualmente e desempenha um considerável papel na economia brasileira, tendo-se em vista a produção de um importante suprimento alimentar e a geração de renda e de empregos no setor que tem, com o leite, um dos produtos mais importantes da agropecuária no país [6]. De acordo com os dados da pesquisa de produção pecuária, o estado de Minas Gerais é o maior produtor de leite no país, participando com, aproximadamente, 28% da produção anual; já o estado de São Paulo possui o segundo maior parque industrial de laticínios do Brasil, com 356 empresas, incluindo 231 sob inspeção estadual e 125 sob inspeção federal [6].

A qualidade do leite está diretamente relacionada à sua integridade, ou seja, à isenção de adição de qualquer tipo de substância e/ou remoção de elementos, tanto de sua composição química como de suas características físicas, de sua deterioração microbiológica e da presença de patógenos. Além disso, a qualidade do leite também possui relação com as características organolépticas de odor, sabor e aspecto do líquido [7] [8].

Em janeiro de 2012 a Instrução Normativa 62 do MAPA, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, alterou a Instrução Normativa 51, estabelecendo um novo cronograma para os padrões de qualidade, preconizando que o leite deve ser analisado e estar de acordo com requisitos quanto aos padrões mínimos de composição, contagem de células somáticas (CSS), contagem bacteriana total (CBT) e presença de resíduos antibióticos [9] [10].

Tal alteração levou os produtores a se preocuparem mais com a qualidade do produto oriundo da fazenda, de modo que os teores de gordura e proteína do leite atendam a esses padrões mínimos estipulados.

Por serem os índices de gordura e de proteína os componentes do leite de maior valor econômico para os laticínios, o sistema de pagamento remunera os produtores adequadamente, de acordo com a qualidade do leite [11].

Os primeiros registros de adulteração no leite, encontrados na literatura em 1901, estão relacionados à adição de água para aumento do volume, nos Estados Unidos [12]. São constatadas adulterações com diversos componentes, dentre eles utilizando-se soda cáustica, água oxigenada, bicarbonato de sódio, entre outros [13].

A Operação Leite Compensado do Ministério Público identificou, em 2014, no Rio Grande do Sul, cerca de um milhão de litros de leite comercializados fora do padrão sanitário e contaminados com citrato e ureia que, adicionados à água em grandes volumes, têm a função de retardar ou até mesmo inibir o efeito “azedo” do leite, permitindo assim o comércio do produto em maior volume [14].

Uma forma de verificação de possíveis adulterações do leite é por meio do índice crioscópico do líquido que leva em consideração a temperatura de congelamento do leite [15]. Este método está relacionado com a identificação da concentração de solutos [16]. A qualidade do produto é garantida por meio de uma avaliação cuidadosa do leite na qual é possível detectar fraudes tais como a desnatação ou adição de água e/ou outros componentes, e prever o rendimento na produção da indústria de laticínios [17].

## 2.1 Características Físicas

O leite e seus derivados representam uma das principais fontes de proteína e cálcio na dieta da população brasileira, e o consumo mundial do produto está ligado aos costumes alimentares de cada país, sendo que os países com maior índice de produção de leite também têm um alto consumo interno, como na Índia, EUA e Brasil.

Quanto à composição do leite, [18] indica que a sua composição varia entre indivíduos e entre raças bovinas e sofre os impactos de fatores do meio ambiente e de genéticos. Porém, é possível definir uma composição percentual média do leite de vacas e de búfalas, apresentada na Tabela 2.1.

Tab. 2.1: Composição percentual média do leite de bovinos e bubalinos [18]

Constituintes	Bovinos	Bubalinos
Água	87,2	83
Proteína	3,5	3,8
Gordura	3,7	7,4
Lactose	4,9	4,9
Resíduo	0,71	0,78
Cálcio	0,121	0,18
Fósforo	0,095	0,12

Normalmente, o leite de búfala tem uma composição com maiores índices de gordura, proteínas, entre outros sólidos em suspensão, quando comparado ao leite de vaca. Entretanto, mesmo com a possível variação da composição do leite bovino, a legislação vigente do MAPA determina valores mínimos de seus componentes, considerando-se leite normal, o produto que apresente [5]:

- Teor de gordura mínimo de 3%;
- Lactose - mínimo de 4,3 %;
- Extrato seco total (Soma dos percentuais de gordura, proteínas, lactose e sais minerais) mínimo de 11,5%;
- Extrato seco desengordurado (Extrato Seco Total menos o teor de gordura) mínimo de 8,5%;
- Proteínas - mínimo de 2,9 g/100ml.

De acordo com [4], a composição do leite também pode sofrer alterações diárias influenciadas por diversos fatores, tais como: espécie, raça, indivíduo, idade da vaca, estágio da lactação, alimentação, estações do ano, estado de saúde da vaca, manejo, pressão intramamária, dentre outros.

## 2.2 Fiscalização

No tocante à fiscalização de regularidade do leite, o CQuali, Centro Integrado de Monitoramento da Qualidade dos Alimentos, é fruto de uma parceria da ANVISA, Agência Nacional de Vigilância Sanitária, do DPDC, Departamento de Proteção e Defesa do Consumidor, do Ministério da Justiça e do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, com o intuito de unir as ações dos órgãos envolvidos no controle de qualidade de alimentos e de consolidar medidas de prevenção e combate a problemas com a qualidade do leite e seus derivados, incluindo irregularidades e fraudes [4].

Uma das funções da CQuali Leite é o monitoramento das marcas de leite comercializadas no país. Para isso, os estados, por meio de seus órgãos de vigilância sanitária, junto aos Laboratórios Centrais de Saúde Pública, definem sua capacidade analítica de organização do cronograma de coletas de amostra de leite no mercado, de modo a analisar todas as marcas comercializadas. Ao Ministério da Agricultura, cabe a fiscalização dos estabelecimentos beneficiadores de leite ligados ao comércio interestadual e/ou internacional, bem como o registro atualizado dos estabelecimentos ativos e seus respectivos produtos [4].

O SNVS, Sistema Nacional de Vigilância em Saúde, é responsável pelo monitoramento do leite no comércio. A execução dessa ação é de responsabilidade dos órgãos de vigilância sanitária estaduais, distrital e/ou municipais, em articulação com os laboratórios oficiais de saúde. O Sistema Nacional de Defesa do Consumidor, por meio do Departamento de Proteção e Defesa do Consumidor (DPDC), é responsável pela formulação e manutenção do sítio eletrônico do CQuali Leite, no qual constam todas as informações e ações do Centro, além das ações específicas de proteção e de defesa do consumidor, incluindo apuração e punição às infrações à legislação das relações de consumo.

São várias as análises obrigatórias para uma granja leiteira. Estas podem ser realizadas em laboratório próprio ou terceirizado e cada uma possui sua periodicidade [9]:

- Gordura, Acidez Titulável, Densidade Relativa, Índice Crioscópico (Depressão do Ponto de

Congelamento), Sólidos Não Gordurosos, Alizarol: diária, tantas vezes quanto forem necessários.

- Contagem Padrão em Placas: média geométrica sobre um período de 03 (três) meses, com pelo menos 01 (uma) análise mensal, em Unidade Operacional da Rede Brasileira de Laboratórios para Controle da Qualidade do Leite, independentemente das análises realizadas na frequência estipulada pelo programa de controle de qualidade interno da granja leiteira.
- Contagem de Células Somáticas: média geométrica sobre um período de 03 (três) meses, com pelo menos 01 (uma) análise mensal em Unidade Operacional da Rede Brasileira de Laboratórios para Controle da Qualidade do Leite, independentemente das análises realizadas na frequência estipulada pelo programa de controle de qualidade interno da granja leiteira.
- Pesquisa de Resíduos de Antibióticos: pelo menos 01 (uma) análise mensal, em Unidade Operacional da Rede Brasileira de Laboratórios para Controle da Qualidade do Leite, independentemente das análises realizadas na frequência estipulada pelo programa de controle de qualidade interno da granja leiteira.

Dentre os laboratórios mais importantes está a Clínica do Leite da Esalq (Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" da Universidade de São Paulo), credenciada junto ao MAPA como um dos laboratórios integrantes da RBQL, Rede Brasileira de Laboratórios de Análise da Qualidade do Leite e recebe amostras de todo o país para análise [19] .

## **2.3 Métodos eletrônicos de análises de líquidos**

De acordo com [20], há no mercado diversas técnicas de medição e aparelhos diferentes: analisadores ultrassônicos (Lactoscan, Bulltech Ekomilk), analisadores com base em absorção de raios infravermelhos (Laktron LCF-980, Miris Dairy Milk Analyser) e analisadores que avaliam o índice crioscópico das amostras de leite (Laktron LK-7000), entre outros.

Dentre os equipamentos listados, há os que avaliam várias substâncias presentes em uma amostra de leite, dentre eles quantidade de gorduras, sólidos totais, água adicionada, proteínas, sais minerais,

porcentagens de conteúdo de água, temperatura, ponto de congelamento, pH, condutividade, lactose e densidade, enquanto outros analisam apenas um tipo de substância, mas com maior exatidão.

Algumas destas análises podem apresentar custos bastante elevados já que a maioria dos equipamentos de análises de leite está concentrada em laboratórios especializados que prestam serviços a produtores e laticínios. Assim sendo, algumas cooperativas ou produtores com maior poder aquisitivo podem manter um laboratório próprio para a realização das análises obrigatórias parciais ou totais.

Dentre as possibilidades menos onerosas, o ultrassom é uma opção para o desenvolvimento de um aparelho de medição com potencial, exato, pouco explorado e com custo menor. Ainda não há no mercado equipamentos que indicam a presença de adição de água de forma rápida, eficaz e barata, há apenas compostos químicos que podem identificar o aumento da acidez do leite - o que significa que não foi acondicionado corretamente ou houve algum tipo de contaminação. Com isso, há um intervalo de tempo em que a adição de água pode ser mascarada, bem como outros produtos que são adicionados para retardar esse efeito (ureia, água oxigenada, entre outros). Desta maneira, as vantagens do método utilizando-se o ultrassom levaram à escolha na experimentação, e o próximo capítulo traz informações a respeito da técnica de ultrassom utilizada na pesquisa e suas particularidades.

# Capítulo 3

## Ultrassom

O ultrassom é comumente utilizado em diversas áreas da ciência, desde aquelas relacionadas a processos químicos e industriais até situações em áreas terapêuticas. Basicamente, em processos não destrutivos, o ultrassom é utilizado com fins de detectar estruturas, medir propriedades, fazer diagnósticos, entre outros. Pesquisas recentes utilizam a mesma técnica de ultrassom utilizada no presente estudo para o diagnóstico de osteoporose, caracterização de leite e cremes, caracterização de materiais, entre outros [21] [22] [23] [24] [25].

Conceitualmente, o ultrassom consiste em uma onda mecânica cuja frequência está acima de 20kHz e tem como característica a indução das partículas que constituem o material e que conduz esse tipo de onda sonora à vibração. Desta forma, o sinal ocorre a uma frequência superior àquela que pode ser ouvida por um ser humano [26].

Um sinal ultrassônico diminui sua intensidade de acordo com a sua propagação em um meio e isto ocorre devido a vários fatores: divergência do sinal de ultrassom em relação ao eixo de propagação; absorção pelo meio, onde parte da energia é perdida em forma de calor; e pelo espalhamento do sinal, devido à não-homogeneidade do meio pelo qual se propaga.

Ao se propagar por um meio, uma amostra de leite no caso desta pesquisa, o sinal de ultrassom é atenuado, principalmente, devido à absorção pelo meio e ao espalhamento do sinal pelas partículas de gordura presentes. Ao mesmo tempo, a homogeneização do leite sem desnatado provoca uma substancial interferência na atenuação, que cresce à medida que o grau de homogeneização aumenta [27] [24].

As ondas ultrassônicas podem sofrer reflexão, refração ou difração quando o feixe entra em contato com outro meio com características diferentes. Desta maneira, dois métodos de experimentação são geralmente utilizados para caracterizar meios por ultrassom: o método transmissão-recepção e o método pulso-eco (reflexão). Ao combinar esses dois métodos, pode-se obter dados sobre a distância entre objetos, velocidade de propagação e atenuação de ondas ultrassônicas nos meios [27] [28].

O método transmissão-recepção é composto por dois transdutores: um transmissor e um receptor. Esses transdutores são alocados frente à frente, no qual o meio a ser analisado deve estar na região entre eles. Já o método pulso-eco é formado por apenas um transdutor que executa ambas as funções de emissão e recepção. Neste caso, para que o pulso seja coletado da melhor forma, o ideal é que haja uma superfície refletora de base plana e material maciço como o alumínio, disposto em um ângulo de  $90^\circ$  com o transdutor. Desta maneira, o pulso atravessa o meio e é refletido de volta para o receptor, trazendo apenas dados do meio analisado.

Ambas as técnicas são capazes de caracterizar líquidos [29] [24] [20] [30], entretanto o sistema utilizado nesta pesquisa é o de pulso-eco, conforme a Figura 3.1, pela facilidade de manuseio e de operação.

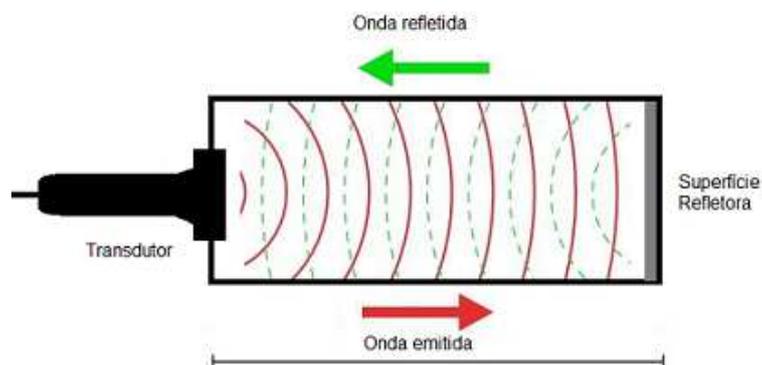


Fig. 3.1: Método de experimentação pulso-eco.

No caso do sistema pulso-eco, como pode ser observado na Figura 3.1, um pulso elétrico é aplicado ao transdutor que gera uma onda ultrassônica. Esta onda ultrassônica propaga-se através do meio analisado e assim que encontra a superfície refletora, parte da onda é refletida e outra parte se propaga através da superfície. Ao encontrar a interface do transdutor, novamente parte dessa onda é parte refletida e parte transmitida, e assim sucessivamente.

As ondas refletidas, captadas pelo transdutor, trazem informações das ondas e, ao serem coletadas e processadas, elas permitem estabelecer correlações com as características físicas do meio de propagação. Dentre essas características pode-se citar a velocidade de propagação e o coeficiente de atenuação.

### 3.1 Velocidade de Propagação

A velocidade de propagação é tida como a velocidade de um pulso de ultrassom que se propaga por um meio qualquer e pode ser entendida pelo conceito básico de velocidade: variação de espaço por distância.

Para o cálculo da velocidade de propagação, utiliza-se a técnica de detecção de picos, como pode ser visto na Figura 3.2 que mostra o sinal emitido e o sinal recebido pelo osciloscópio.

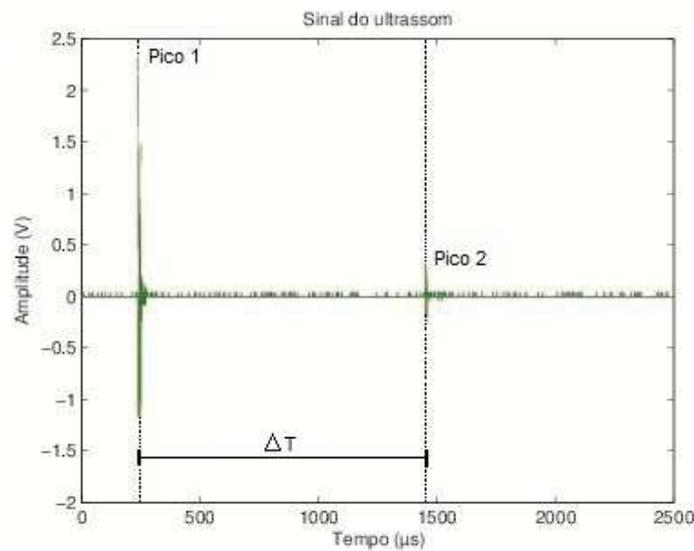


Fig. 3.2: Sinal recebido pelo ultrassom, com picos da emissão e da recepção.

Nessa técnica, calcula-se o tempo gasto na trajetória ( $\Delta T$ ) desde a identificação do pico do sinal de emissão (Pico 1) até o da chegada, no pico do sinal recebido (Pico 2). Como se trata de um sistema de transmissão pulso-eco, este intervalo de tempo é dividido por dois para que seja compatível com a distância de interesse.

Desta forma, a velocidade, por consequência, é resultado da divisão entre a distância do transdutor até à face refletora, dividida pelo tempo (Equação 3.1).

$$V = \frac{A_2}{\frac{\Delta T_{12}}{2}} \quad (3.1)$$

Assim, sendo a distância percorrida conhecida, pois equivale à distância do transdutor até a face refletora do equipamento utilizado, a velocidade de propagação é medida considerando-se a diferença de tempo ( $\Delta T_{12}$ ) existente entre o pulso emitido (Pulso 1) e o primeiro eco (Pulso 2), com o comprimento do reservatório onde se encontra a amostra,  $A_2$ . O valor encontrado que define a velocidade de propagação é uma das variáveis de entrada do sistema a ser analisado posteriormente.

## 3.2 Coeficiente de Atenuação

Com relação ao coeficiente de atenuação, ele é uma medida que corresponde ao decréscimo da intensidade do sinal em função da distância da fonte das ondas em um meio. Este efeito pode ocorrer por fatores geométricos (intervenção de superfícies refletoras, tamanho do transdutor, comprimento da onda, etc.) e pela absorção, que são característicos de cada meio [28] [31].

A atenuação também pode ser determinada pela divergência do feixe em relação ao eixo central, espalhamento pela não homogeneidade do meio, conversão em outros modos de vibração, relaxação, movimento relativo e bolhas de gás [30].

A dependência do coeficiente de atenuação é analisada, neste estudo, considerando-se as características físicas do leite, pois a perda da energia da onda acústica pode ser originada de perdas intrínsecas e perdas ligadas às partículas de gordura da substância. As perdas causadas pelas partículas são proporcionais à concentração de gordura presente na amostra [24].

A atenuação da onda ultrassônica obedece a lei exponencial mostrada na Equação 3.2 [31]:

$$I = I_0 e^{-\mu z} \quad (3.2)$$

Onde:

- $I$  é a amplitude da intensidade transmitida pelo ultrassom depois de ultrapassar uma distância

$z$ ;

- $I_0$  é a amplitude da intensidade incidente inicial quando  $z = 0$ ;
- $\mu$  é o coeficiente de atenuação com unidade em  $m^{-1}$  ou  $cm^{-1}$  e definido pela Equação 3.3,

$$\mu = -\frac{1}{z} \ln \left( \frac{I}{I_0} \right) = \frac{\ln(I_0) - \ln(I)}{z} \quad (3.3)$$

ou, então, expresso em dB/m ou dB/cm dependendo da unidade do  $\mu$  que é o coeficiente de atenuação, por meio da Equação 3.4 [28]:

$$\alpha = \mu 20 \log_{10} e = 8,686 \mu \quad (3.4)$$

Neste trabalho a unidade de medida escolhida para o coeficiente de atenuação é expresso em dB/m.

### **3.3 Atenuação em Banda Larga (*Broadband Ultrasound Attenuation - BUA*)**

O BUA, *Broadband Ultrasound Attenuation* ou Atenuação em Banda Larga, é um parâmetro de propagação muito utilizado, e pode ser entendido como a expressão da taxa de atenuação do sinal ultrassônico em uma faixa de frequências demarcada.

O BUA de um material pode ser definido pela comparação dos espectros de frequência dos sinais ultrassônicos de um material de referência e de um material sob teste na faixa de frequências desejada [21] [25]. Por exemplo, a água pode ser considerada o material de referência e o leite o material de teste; ambos são submetidos à coleta de dados do ultrassom com o mesmo tipo de pulso elétrico no emissor, e o cálculo é realizado com o espectro de frequência dos sinais obtidos na mesma faixa de frequências.

Há diversos estudos e aplicações diferentes para o BUA, como em [23] que trabalha com a medição deste parâmetro para a identificação de ossos cancerosos, diagnóstico de osteoporose, caracterização de líquidos, inclusive leite [21] [22] [28] [32].

Para extrair o BUA, usa-se o coeficiente angular de uma reta gerada à partir da diferença em base logarítmica da Transformada de Fourier aplicada ao sinal capturado e a um sinal de referência. Os espectros são determinados usualmente por algoritmos de FFT, *Fast Fourier Transform* ou Transformada Rápida de Fourier.

As Figuras abaixo exemplificam a técnica de medição do BUA aplicada à análise da qualidade do leite, e dizem respeito a sinais simulados, gerados por equações e são similares aos sinais resultantes de uma medição com água e leite. Na Figura 3.3 encontra-se os sinais gerados.

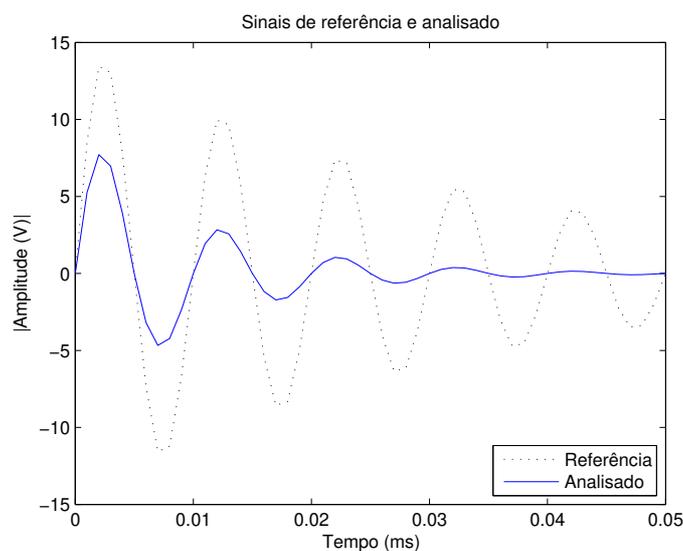


Fig. 3.3: Exemplo de sinal de referência e do sinal analisado, gerado pelo Matlab®.

A Figura 3.4 mostra a comportamento da Transformada de Fourier nos sinais gerados, a fim de alterar o domínio do tempo para o domínio da frequência.

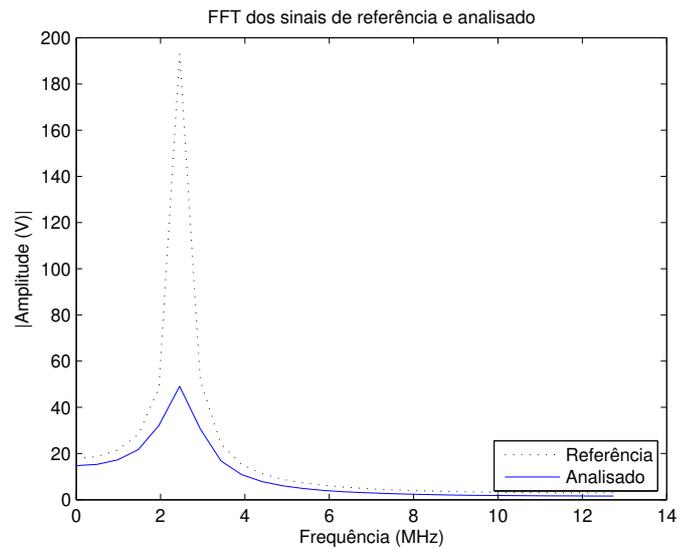


Fig. 3.4: FFT do sinal de referência e material analisado.

O resultado da diferença entre os espectros de frequência dos dois sinais, que é obtido por meio da Equação 3.5, resulta em uma região onde há uma relação aproximadamente linear (Figura 3.5), com unidade dB/MHz.

$$\alpha(f) = | 20 \log_{10} | V_r | - 20 \log_{10} | V_m | | \quad (3.5)$$

Onde:

- $V_r(f)$  é o valor absoluto do espectro de frequência do sinal de referência;
- $V_m(f)$  é o valor absoluto do espectro de frequência do sinal que se propagou no material.

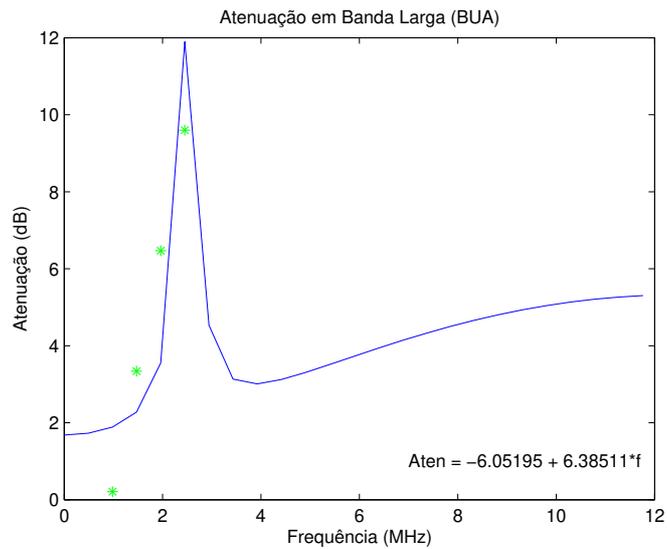


Fig. 3.5: Gráfico do BUA com *fitting*.

A Figura 3.5 apresenta o gráfico gerado pelo cálculo do BUA, que utiliza as FFTs do sinal de referência e do sinal analisado no seu cálculo, com destaque para o trecho que foi aplicado o método dos quadrados mínimos, ou *fitting*. O coeficiente angular da reta gerada neste trecho é o BUA da amostra analisada, que é uma das variáveis de entrada do sistema fuzzy chamada aqui de coeficiente de atenuação. Este é o único intervalo de interesse, o trecho após a inversão de sinal não é utilizado.

O próximo capítulo apresenta a fundamentação teórica dos conjuntos fuzzy, que possibilita o entendimento do processo de modelagem utilizada neste trabalho.

## Capítulo 4

# Teoria dos Conjuntos Fuzzy

Os conjuntos fuzzy compõem um ramo da Matemática cuja finalidade é possibilitar a modelagem e/ou representação de situações complexas cujas características extrapolam o escopo da Matemática Clássica. A origem da palavra fuzzy é inglesa e significa incerto, impreciso, subjetivo, nebuloso, etc [33] [34] [35] [36].

Diversos trabalhos se utilizam da lógica fuzzy na área de automação de sistemas até estudos de modelos epidemiológicos, dentre muitas outras aplicações [37] [38] [39] [40] [41] [42] [43].

Vista como uma técnica que possibilita a aproximação de problemas matemáticos à realidade com sua maior flexibilidade no tratamento de variáveis de um problema, a utilização desta metodologia é adequada à sistemas especialistas.

De acordo com [44], sistemas especialistas que utilizam lógica fuzzy em sua concepção têm sido aplicados com sucesso a problemas de decisão, controle, diagnóstico e classificação, isso justamente porque eles são capazes de gerenciar o raciocínio complexo intrínseco a essas áreas de aplicação. Devido ao desenvolvimento e as inúmeras possibilidades práticas dos sistemas fuzzy e o grande sucesso comercial de suas aplicações, a lógica fuzzy é considerada hoje uma técnica padrão e tem uma ampla aceitação na área de controle de processos industriais.

A Teoria dos Conjuntos Fuzzy foi formalizada por Zadeh [45], dando origem a diversas ramificações e aplicações, e se coloca como um complemento à Matemática Clássica de forma totalitária.

Assim, partindo do conceito já existente de lógica multivalorada, Zadeh [45] propôs a associação de funções de pertinência a conjuntos com “limites imprecisos” (denominados, a partir de então,

conjuntos fuzzy) possibilitando a pertinência de um elemento a um dado conjunto fuzzy com graus de verdade variando num intervalo de 0 à 1.

Contrapondo a lógica clássica de classificação: verdadeiro ou falso, pertencente ou não pertencente, a lógica fuzzy, por meio de suas funções de pertinência, possibilita a pertinência de um elemento a um conjunto de modo graduado. Dessa maneira, os conjuntos fuzzy, bem como suas fronteiras não têm limites muito bem definidos [46].

Essa abordagem dá a possibilidade de uma série de desenvolvimentos e desdobramentos que consideram variedades múltiplas, muitas vezes intrínsecas aos fenômenos considerados e favorecem dessa forma diversos estudos e modelamentos [39] [47] .

Matematicamente, pode-se dizer que em um determinado conjunto fuzzy  $F$ , subconjunto do conjunto universo  $U$ , possui uma função de pertinência  $\mu$  que associa cada elemento  $x$  de  $U$  um número  $\mu(x)$ , no intervalo  $[0, 1]$ , que é o grau de pertinência de cada elemento. Este conceito de pertinência de um elemento a um conjunto fuzzy assume o valor 1 quando indicado o grau máximo de pertinência, e 0 para total não pertinência ao conjunto.

Assim sendo, a função de pertinência  $\mu$  deve ser modelada de modo a representar claramente a característica dos elementos de  $F$ . Por exemplo, se duas pessoas com alturas de 1,90 m e 1,89 m são consideradas pertencentes ao conjunto das pessoas altas, é possível que a pessoa de 1,90 m tenha uma pertinência ao conjunto das pessoas altas com um grau de pertinência maior ao conjunto do que aquela pessoa que possui 1,89 m; entretanto ambas pertencem ao conjunto das pessoas altas, inclusive uma pessoa com 1,50 m, com um grau de pertinência menor.

## **4.1 Lógica fuzzy e Sistema de Base de Regras Fuzzy - SBRF**

De acordo com [48], a lógica refere-se ao estudo de métodos e princípios do pensamento humano, dentro deste contexto, a lógica clássica trabalha com proposições verdadeiras ou falsas e baseia-se na teoria clássica de conjuntos. Entretanto, a dicotomia: verdadeiro falso não é suficiente, muitas vezes, para representar um dado fenômeno. Nessas situações, a lógica fuzzy é útil, pois possibilita a tradução matemática de termos linguísticos, que se aproximam da realidade.

Assim como na lógica clássica, a lógica fuzzy tem como base a teoria de conjuntos fuzzy e

diversos estudos são realizados por meio de relações entre conjuntos e de conectivos, tais como “e”, “ou”, etc. Daí, quando se tem uma proposição fuzzy, tem-se algo do tipo: “Se  $x$  é  $A$  e  $y$  é  $B$ , Então  $z$  é  $C$  ou  $z$  é  $D$ ” falsa, ou verdadeira, mas com um certo grau.

Este sistema torna-se uma ferramenta com diversas possibilidades de exploração e de utilidade de modelamentos, que tem auxiliado diversas áreas do conhecimento principalmente ligado à tomada de decisão.

Uma forma de desenvolver as modelagens de situações problema cujas variáveis apresentam um grau de pertinência a diferentes conjuntos é pelo uso dos controladores fuzzy.

Os controladores fuzzy, de acordo com [47], se constituem de um sistema baseado em regras fuzzy, SBRF, e se utilizam da lógica fuzzy nos processos de modelagens onde algumas regras linguísticas, traduzidas por conjuntos fuzzy, descrevem uma base de conhecimento fundamental do processo.

Na Figura 4.1 expõe-se um controlador fuzzy onde é possível acompanhar as etapas desse raciocínio.

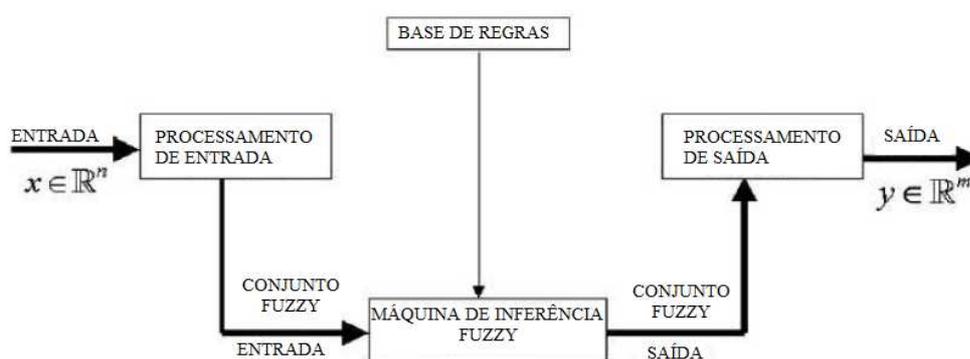


Fig. 4.1: Estrutura de um SBRF - Sistema Baseado em Regras Fuzzy [1].

Como pode ser observado, um controlador fuzzy é composto por quatro componentes: o processamento de entrada, a base de regras, a máquina de inferência e o processamento de saída.

O processamento de entrada está relacionado à fuzzyficação das entradas (números reais) e consiste em mapear estes valores numéricos (obtidos nas medições de grandezas, por exemplo) em graus de pertinência a um ou mais conjuntos fuzzy. A inferência é a etapa de combinação dos graus de pertinência por meio de uma base de regras previamente definidas que estão diretamente relacionadas ao problema em si a ser modelado.

A combinação produzida por meio dessas regras produz relações entre os conjuntos que, por meio

de um método de inferência fuzzy, deve devolver, no final do processo, um valor numérico compatível com as grandezas sob controle na defuzzyficação, daí, o processamento de saída. A seguir, cada uma destas quatro partes são mais detalhadamente abordadas.

## 4.2 Fuzzyficação

O processo de fuzzyficação é o estágio onde as entradas do sistema são modeladas por meio de conjuntos fuzzy, com as respectivas faixas de valores onde estão definidas. Estas faixas de valores estão relacionadas ao grau de aderência da variável a cada conjunto fuzzy.

Nesta etapa, o processo permite a efetiva ligação entre os termos linguísticos e suas funções de pertinência. Desta forma, o conhecimento técnico da área em questão é extremamente importante, principalmente na definição das variáveis envolvidas e da relação entre as mesmas.

## 4.3 A Base de regras

O sistema de base de regras é o processo que descreve o comportamento das variáveis e do fenômeno em si e é reconhecido pelo sistema SE-ENTÃO. Aqui cada regra é composta pelas proposições fuzzy SE “condição” ENTÃO “ação”, de acordo com as informações que se têm sobre as variáveis.

## 4.4 Inferência

O método de inferência é responsável por traduzir matematicamente as regras definidas na etapa anterior por meio das técnicas da lógica fuzzy, gerando, para cada regra, uma saída cuja combinação produz uma saída fuzzy do sistema.

Dentre os métodos de inferência, destaca-se aqui o método de Mamdani. O método de Mamdani agrega as variáveis de entrada e saída por meio de uma relação binária. Ele baseia-se na regra da composição de inferência Max-Min [46].

A Figura 4.2 ilustra de um sistema de inferência do tipo Mamdani, gerada a partir de duas entradas  $x$  e  $y$  reais e a regra de composição MAX-MIN.

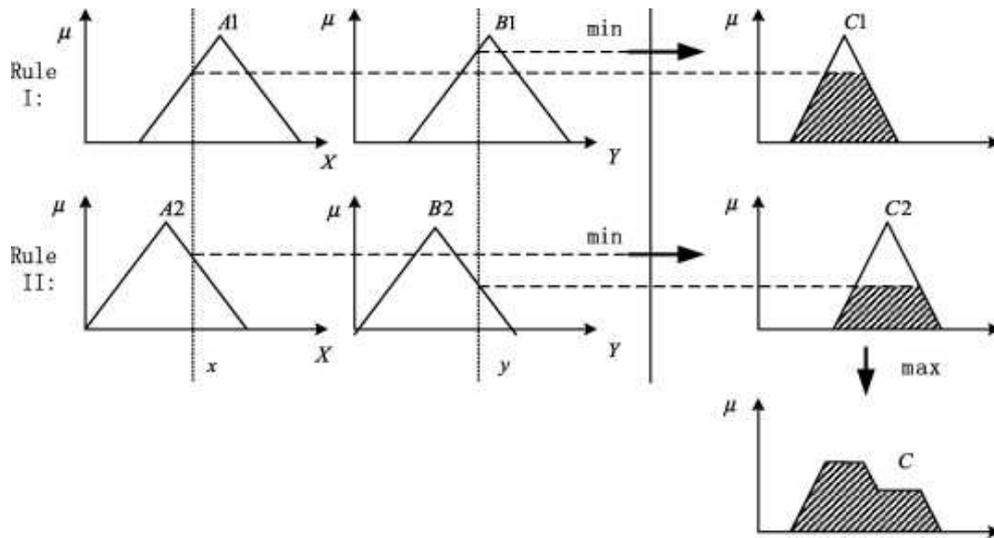


Fig. 4.2: Sistema de inferência de Mamdani para duas entradas e uma saída [2].

Para cada regra do sistema de base de regras disparada, numa dada aplicação específica, toma-se o mínimo relacionado ao conectivo “e”. Assim como ocorre na Figura 4.2 em “Rule I” em que tem-se: “SE  $x$  é  $A_1$  e  $y$  é  $B_1$  ENTÃO  $z$  é  $C_1$ ”, e toma-se o mínimo entre os valores considerados  $A_1$  e  $B_1$  e também em “Rule II”: “SE  $x$  é  $A_2$  e  $y$  é  $B_2$  ENTÃO  $z$  é  $C_2$ ”, tomando-se mínimo entre  $A_2$  e  $B_2$ .

Entretanto, a saída do controlador estará baseada numa operação de união, por meio da aplicação do conectivo lógico “ou”, conectando as diversas regras fuzzy associadas, tal como pode ser observado na Figura 4.2, a região  $C$  dada pela união de  $C_1$  e  $C_2$  [46].

## 4.5 Defuzzyficação

Finalmente, a defuzzyficação pode ser entendida como o processo em que o conjunto fuzzy inferido de controle é convertido em um valor numérico, isto é, um sinal de controle do sistema. Dessa maneira, o processo de defuzzyficação traduz a saída do sistema oriundo da base de regras em um valor numérico.

Dentre os métodos de defuzzyficação, o mais utilizado é o denominado Centro de Massa ou Centro de Gravidade.

A Figura 4.3 mostra graficamente o processo de defuzzyficação quando a saída escolhida é o Centro de Gravidade, indicado por  $C'$ .

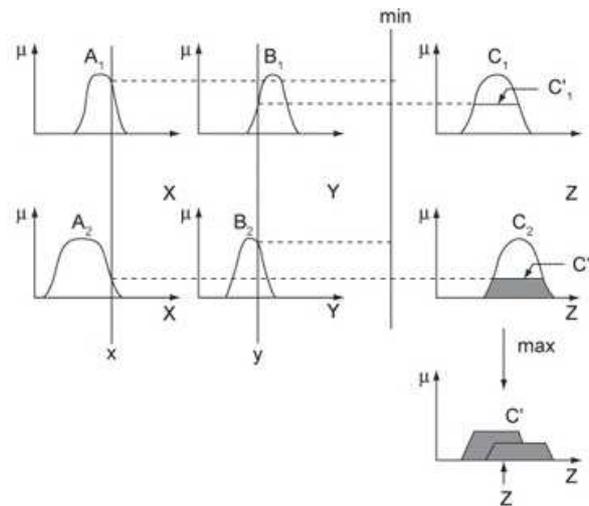


Fig. 4.3: Exemplo de aplicação da base de regras e posterior defuzzificação com o método Centro de Gravidade [3].

Esse método é semelhante à média ponderada para distribuição de dados, com a diferença que os pesos são os valores  $C(z_i)$  que indicam o grau de compatibilidade do valor  $z_i$  com o conceito modelado pelo conjunto fuzzy  $C$ . Em essência, o método de Centro de Gravidade indica a média das áreas de todas as Figuras que representam os graus de pertinência a um conjunto fuzzy [47].

Estes conceitos todos relacionados à teoria dos conjuntos fuzzy fundamentam os processos utilizados no modelamento e validação dos dados. No capítulo a seguir são apresentados os procedimentos adotados na pesquisa como forma de materiais e métodos.

# Capítulo 5

## Materiais e Métodos

O desenvolvimento do trabalho envolveu, além de estudos bibliográficos relacionados ao leite e à fundamentação teórica, uma parte experimental que baseou-se no uso de uma técnica ultrassônica com a qual se extraiu os dados que alimentaram um sistema de base de regras fuzzy com o intuito de se verificar possíveis adulterações em amostras de leite cru.

A experimentação foi realizada com amostras de leite cru refrigerado, ou seja, que não passam por nenhum tipo de alteração de suas características naturais.

A primeira elaboração das regras do programa contou com uma busca por trabalhos da literatura [20] [28] [30] [29] que alimentaram o sistema numa análise preliminar do relacionamento entre as variáveis do sistema fuzzy e uma prévia definição de seus comportamentos. Entretanto, com a elaboração dos testes, os limiares foram calibrados, já que os trabalhos referenciados utilizavam leite processado (pasteurizado, UHT ou com teor de gordura reduzido).

A Figura 5.1 apresenta um diagrama de blocos do aparato experimental empregado, incluindo o sistema ultrassônico (blocos 1 e 2), o sistema de aquisição (bloco 3) e o computador onde está armazenado o programa para processamento das regras fuzzy (bloco 4).

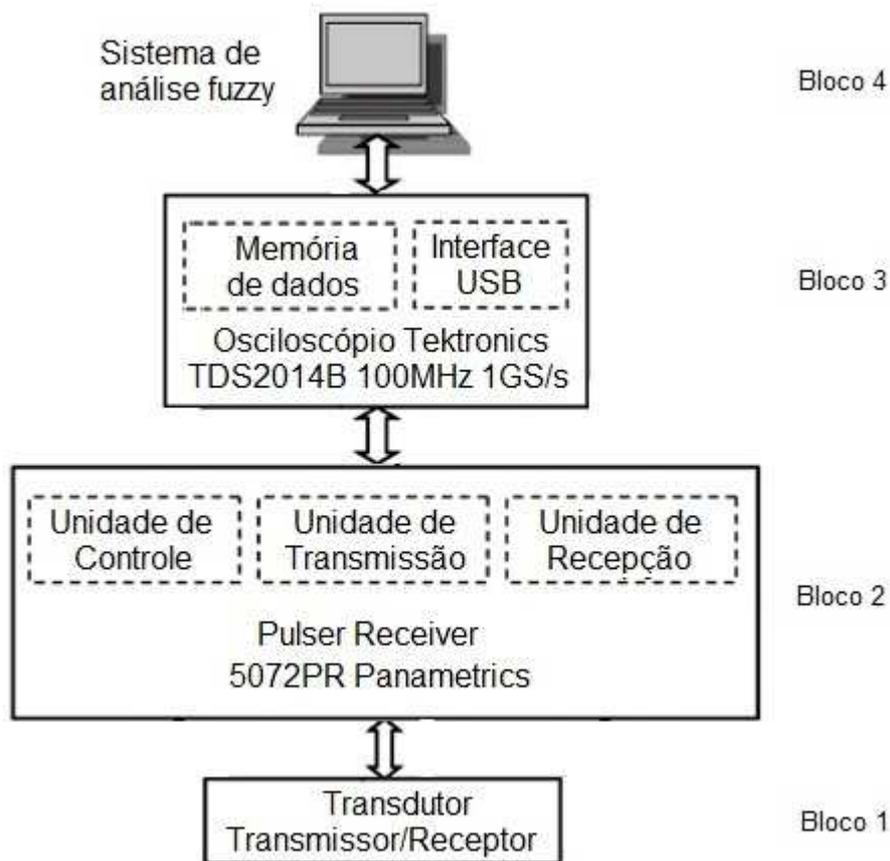


Fig. 5.1: Diagrama em blocos do sistema

O diagrama da Figura 5.1 apresenta o sistema montado: por meio do equipamento de ultrassom, os sinais são captados via cabeamento por um osciloscópio que faz a leitura dos dados e transfere para uma memória flash via USB os dados, transferidos para o computador para processamento. Esses dados alimentam um sistema de base de regras fuzzy que possibilita a tomada de decisão no tocante à qualidade do leite.

## 5.1 Sistema Ultrassônico

O transdutor é do modelo Funbec 5 MHz/6MM Fabricante MED. L.F. - apresentado na Figura 5.2. O transdutor está acoplado a uma ponteira, e é fixado a um tubo plástico onde a amostra de leite é inserida e caracterizada.



Fig. 5.2: Equipamentos utilizados no sistema de experimentação

A câmara de armazenamento possui 10 cm de altura por 5 cm de diâmetro externo, e comporta 180 ml do líquido. No fundo da câmara há uma superfície refletora de 5 mm de alumínio disposta de forma paralela ao transdutor. A ponteira onde o transdutor está acoplado é removível e isto dificulta o manuseio, visto que é preciso mantê-la a  $90^\circ$  da superfície refletora para que o sinal recebido não receba a interferência de outros possíveis ecos.

O transdutor funciona como emissor e receptor do sinal de ultrassom no meio e sua frequência de ressonância é de 5 MHz. Essa frequência foi escolhida pois o uso de transdutores com banda mais larga pode introduzir mais informação em outras frequências, sobretudo as maiores [29].

O aparato de medida foi cuidadosamente projetado de modo que o receptor/emissor tivesse contato direto com o meio e não sofresse interferências de outros materiais ou do meio externo, além de fechar por completo o suporte de PVC no qual o meio foi colocado, para evitar vazamentos.

O transdutor foi excitado por um emissor/receptor de sinal (*Pulser Receiver Panametrics modelo 5072PR*), que ao receber o sinal o transferia, via cabeamento, para um osciloscópio digital (Tektronix TDS2014B 100MHz 1GS/s) como apresentado na Figura 5.3.

Nesse sistema, o osciloscópio captura os sinais transmitido e recebido e gera um arquivo digital em formato .csv e que é enviado ao computador para processamento.

O emissor/receptor de sinal 5072PR teve a configuração definida para um ganho de 9dB, *damping* 2, *energy* 1, PRF 100Hz, com filtros passa baixa e passa alta ligados no automático. Essa configuração foi escolhida de maneira experimental, ao se buscar um sinal recebido de maior amplitude.

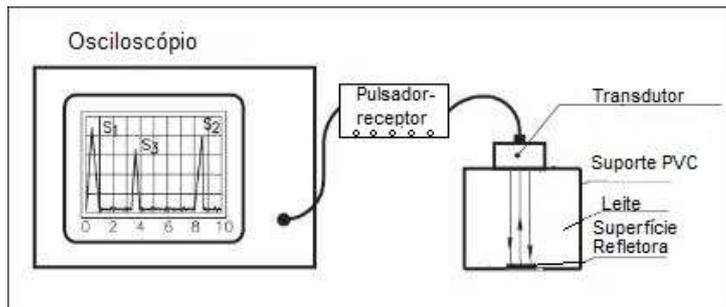


Fig. 5.3: Esquema do sistema de experimentação

### 5.1.1 Medição de velocidade de propagação e coeficiente de atenuação

O arquivo gerado pelo osciloscópio é enviado como uma entrada do programa desenvolvido em Matlab®. Primeiramente ao sinal é aplicado um algoritmo da FFT e uma equação de subtração que resulta no coeficiente angular de uma reta. Desse resultado, é possível extrair o BUA - denominado atenuação em banda larga, mas aqui chamado apenas de coeficiente de atenuação - que é uma das entradas do sistema fuzzy.

Outro parâmetro a ser medido é a velocidade de propagação da onda acústica no meio, também encontrada a partir do arquivo com os dados do sinal.

O sistema baseado em regras fuzzy, para a tomada de decisão no tocante à aceitação total, parcial ou a recusa das amostras avaliadas, conta com um controlador que recebe duas variáveis de entrada: o coeficiente de atenuação e a velocidade de propagação.

Tais variáveis, que estão diretamente relacionadas à presença de água e quantidade de gordura das amostras de leite, constituem-se em entradas de um novo sistema, onde são processadas utilizando-se um pacote específico do software e aplicando-se o método de inferência de Mamdani e de defuzzyficação de Centro de Gravidade.

Um fluxograma do processo é mostrado na Figura 5.4.

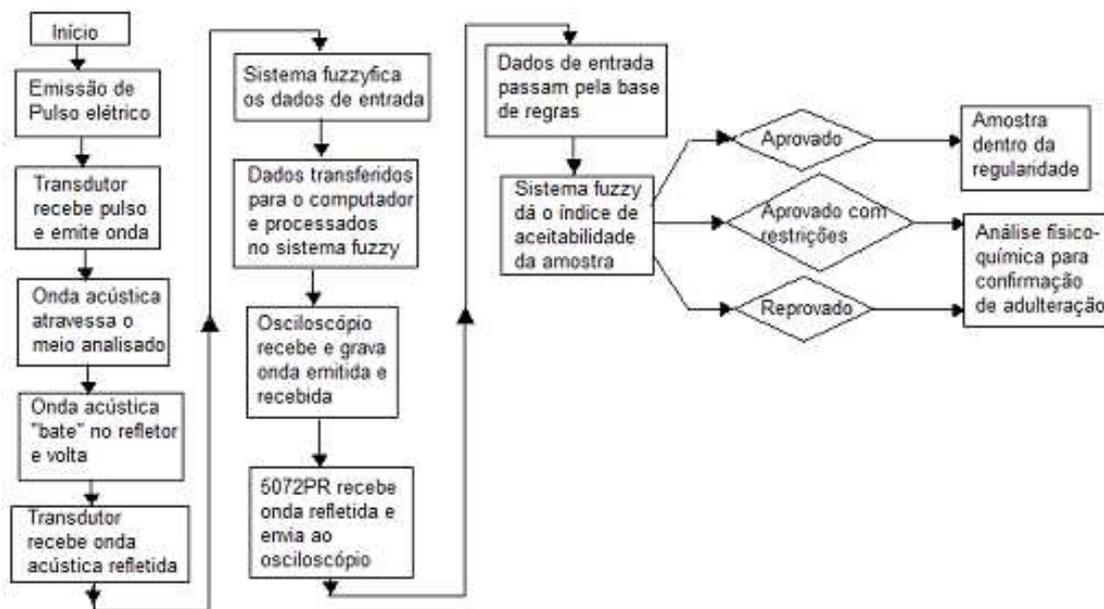


Fig. 5.4: Fluxograma do sistema desenvolvido

### 5.1.2 Determinação do BUA

O coeficiente de atenuação da amostra foi identificado de acordo com o BUA. Para encontrar o valor do coeficiente, primeiramente são comparados dois sinais: um sinal de referência e um sinal a ser analisado, com possíveis adulterações.

Nesses sinais, aplica-se a Equação 3.5, do Capítulo 3, para se determinar um terceiro sinal que possui uma região onde há uma relação aproximadamente linear. Ao aplicar o método dos mínimos quadrados nessa região, é possível extrair o coeficiente angular da reta gerada, que é o BUA.

## 5.2 Caracterização dos experimentos

O equipamento foi primeiramente testado com água desgaseificada, para verificar seu funcionamento, bem como o do sistema desenvolvido. Confirmados os dados, iniciou-se os ensaios com as amostras de leite puras e adulteradas. As adulterações consideradas foram de 3, 6, 10, 15 e 20% de adição de água no leite cru, com volume total de 180 ml.

Em cada amostra, esse procedimento foi aplicado em todos os testes de forma sistêmica, alterando-se apenas o índice de adulteração da amostra com água.

Foram realizados 139 experimentos com amostras de leite proveniente de pequenos produtores da região de Limeira - SP. O leite coletado foi acondicionado a 7°C de modo a manter suas características até o momento da análise. Os testes foram realizados com amostras mantidas em temperatura constante em 25°C. No total, foram 834 análises, considerando-se as 6 porcentagens de adulteração.

As análises eram realizadas no mesmo dia da coleta no laboratório do CEB (Centro de Engenharia Biomédica) localizado na Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação da Unicamp, na tentativa de ter o produto mais próximo da sua condição natural possível, e por meio dos experimentos, foi possível a extração das variáveis do sistema. Os dados completos encontram-se em anexo.

### 5.3 Regras Fuzzy

A Figura 5.5 apresenta o sistema de base de regras fuzzy modelado com duas variáveis de entrada: coeficiente de atenuação e velocidade de propagação; o controlador: responsável pelo processamento por meio do método de Mamdani e do processo de defuzzyficação por meio do método Centro de Gravidade; e o índice de aceitabilidade que é a variável de saída do sistema, a tomada de decisão.

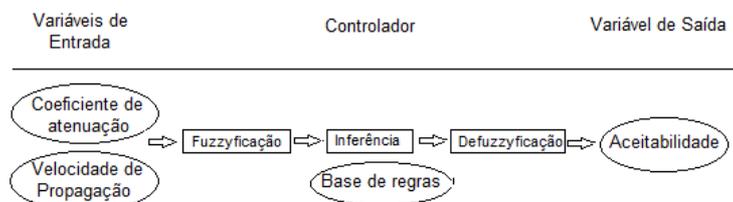


Fig. 5.5: Sistema de base de regras com as suas variáveis

Considerando-se que a gordura e a quantidade de água no leite possuem uma relação direta com os critérios de regularidade do leite, estabeleceu-se uma relação entre a velocidade de propagação e do coeficiente de atenuação. Definidos os limites estabeleceram-se as funções de pertinência das variáveis, como pode ser observado, no próximo capítulo onde estão apresentados os resultados da experimentação, bem como o modelamento fuzzy e algumas discussões.

Aqui foram apresentados todos os procedimentos adotados no modelamento utilizando-se o sis-

tema de ultrassom e de tomada de decisão baseados em lógica fuzzy.



## Capítulo 6

### Resultados e Discussões

Conforme mencionado anteriormente, todo o modelamento do sistema de base de regras teve como base parâmetros encontrados na bibliografia pesquisada [20] [28] [30] [29], abordando pesquisas semelhantes com leite e ultrassom.

Dessa forma, os preceitos assumidos inicialmente, baseados na literatura, compuseram um cenário que não pode ser validado experimentalmente com os ensaios laboratoriais, pois, diferentemente dos estudos encontrados, a pesquisa baseou-se em amostras de leite cru refrigerado.

Com o processo industrial, o leite sofre algumas transformações no tocante à sua homogeneidade e composição e algumas diferenças se constituem, então, entre o leite cru, o pasteurizado e o UHT.

Tais diferenças decorrentes desse processo estão diretamente relacionadas a um dos principais componentes avaliados que é a gordura.

Os diversos estudos encontrados na literatura foram realizados tomando-se por controle amostras de leite pasteurizado e UHT. Entretanto, amostras de leite cru possuem partículas de gordura relativamente maiores do que a do leite pasteurizado, o que interfere diretamente na velocidade de propagação e no coeficiente de atenuação da onda provocados com o pulso elétrico.

Durante os ensaios, replicou-se laboratorialmente experimentos da literatura para verificação de procedimentos e outras comparações. A partir disso, verificou-se que os resultados obtidos foram compatíveis com os estudos apresentados, indicando, desse modo, que os ensaios realizados, bem como os equipamentos utilizados, estavam calibrados e atendendo aos pressupostos de maneira confiável.

Tendo em vista a diferença de comportamento entre o leite cru, pasteurizado e o UHT, experimentações apontaram, então, para uma calibração dos limiares estabelecidos nas regras fuzzy, em relação aos índices de água e de gordura do elemento, o que possibilitou, então, a determinação dos parâmetros de velocidade de propagação e do coeficiente de atenuação.

Com a realização dos ensaios, foram obtidos os sinais decorrentes dos pulsos para a amostra de referência (controle), com o leite puro, e para as demais amostras adulteradas de leite.

A Figura 6.1 apresenta um sinal de referência de uma amostra do leite cru pura, juntamente com uma amostra adulterada com 10% de água.

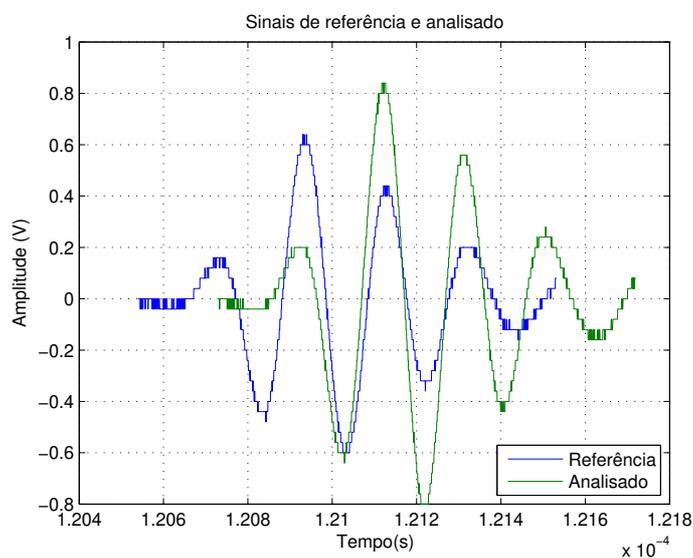


Fig. 6.1: Exemplo de sinal de referência e do sinal analisado do experimento, gerado pelo Matlab®

Como pode ser observado na Figura 6.1, um sinal de referência, uma amostra de leite cru pura apresenta a oscilação com os picos mais baixos de ondas, enquanto o sinal analisado, de leite cru adulterado com água na proporção de 10%, apresenta uma oscilação com picos mais altos de ondas.

Estes dados foram processados e gerados em ambiente Matlab e, iniciando o tratamento dos dados, aplicando-se a FFT tem-se os sinais da Figura 6.2.

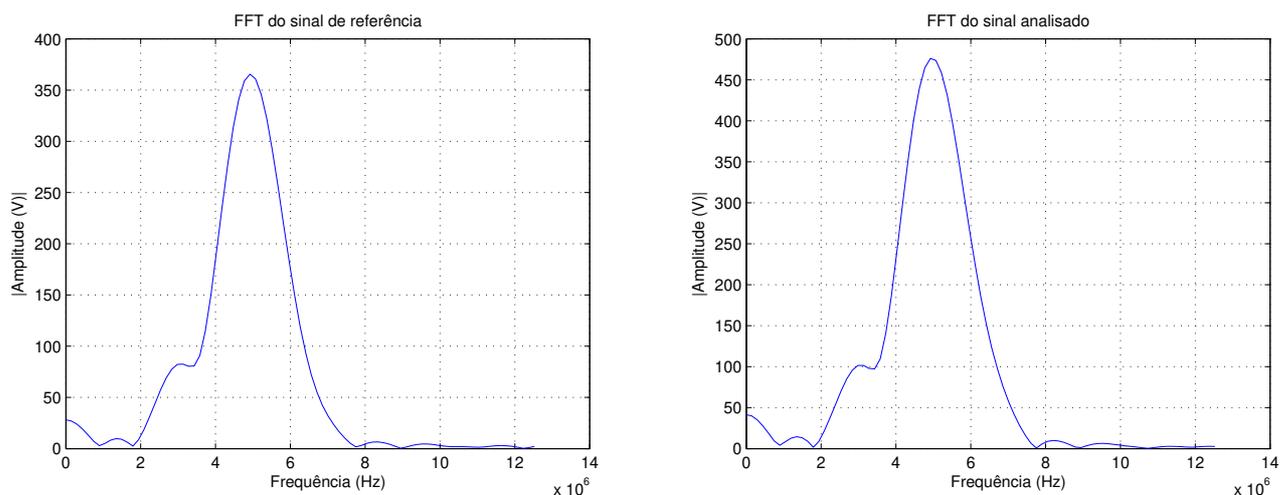


Fig. 6.2: FFT do sinal de referência, à esquerda, e do sinal analisado do experimento, à direita

Por meio da análise dos sinais apresentados na Figura 6.3, foi possível a determinação do BUA.

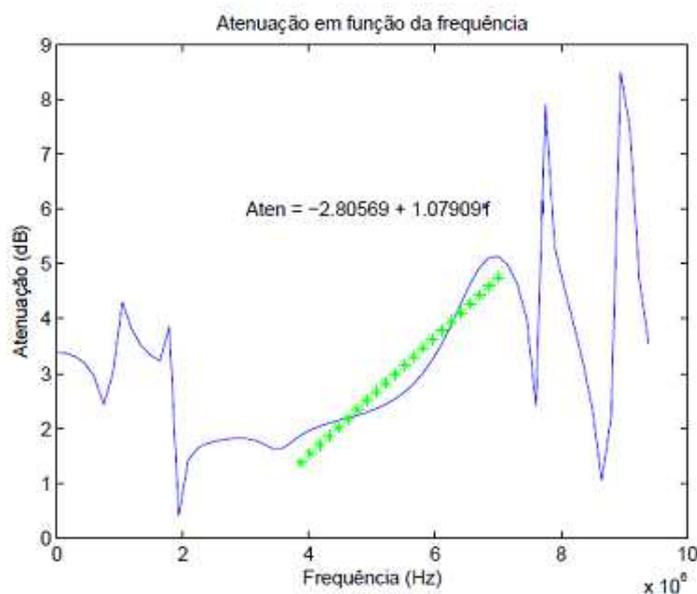


Fig. 6.3: Exemplo de Gráfico do BUA com *fitting* de um dos experimentos

O BUA - atenuação em banda larga, está fortemente ligado ao coeficiente de atenuação, portanto, é referenciado neste estudo por coeficiente de atenuação.

De acordo com o que foi avaliado em amostras de leite UHT desnatado tem-se os dados apresentados nas Tabelas 6.1 e 6.2 indicando os valores coletados para o coeficiente de atenuação e a velocidade de propagação conforme porcentagem de adulteração de amostras.

Tab. 6.1: Coeficiente de atenuação médio e desvio padrão do leite UHT desnatado adulterado com a porcentagem de água desgaseificada indicada, em dB/m/MHz

Adulteração	0%	3%	6%	10%	15%	20%
Média	2,5678069	2,4645795	2,3941987	2,1789954	2,0149105	1,8259842
Desvio Padrão	0,4028	0,3371	0,3430	0,3331	0,4797	0,3214

Tab. 6.2: Velocidade de propagação média e desvio padrão do leite UHT desnatado adulterado com a porcentagem de água desgaseificada indicada, em m/s

Adulteração	0%	3%	6%	10%	15%	20%
Média	1576,20	1574,93	1574,80	1569,28	1567,98	1567,48
Desvio Padrão	1,2416	1,1484	0,6515	1,2204	1,5610	1,0349

Assim, verifica-se a partir das Tabelas 6.1 e 6.2 que quanto mais água é adicionada às amostras, menor é a velocidade de propagação e menor o coeficiente de atenuação.

Entretanto, para o leite cru, ao considerar a amostra de leite pura como referência, é possível observar que quanto maior o índice de água adicionada, maior o coeficiente de atenuação da onda e menor a velocidade de propagação conforme são apresentadas as Tabelas 6.3 e 6.4.

Tab. 6.3: Coeficiente de atenuação médio do leite cru adulterado com a porcentagem de água desgaseificada indicada, em dB/m/MHz

Adulteração	3%	6%	10%	15%	20%
Média	2,7434	4,8443	5,1680	11,5705	14,1190
Desvio Padrão	0,1243	0,1304	1,4970	1,3233	0,4907

Tab. 6.4: Velocidade de propagação média do leite cru adulterado com a porcentagem de água desgaseificada indicada, em m/s

Adulteração	3%	6%	10%	15%	20%
Média	1577,04	1575,78	1572,78	1570,83	1568,80
Desvio Padrão	5,72	6,76	5,16	5,22	4,35

De acordo com os dados da Tabela 6.3, é possível observar a média  $\pm$  desvio padrão do coeficiente de atenuação medidos para cada índice de adulteração variando de  $2,7434 \pm 0,1243$  para 3% de água adicionada à amostra até  $14,1190 \pm 0,4907$  para 20% de adulteração com água. Já na Tabela 6.4, verificam-se média e desvio médio das velocidades de propagação coletadas com as experimentações,

de acordo com as porcentagens de adulterações realizadas, ou seja, uma variação que vai de  $1577,04 \pm 5,72$  para 3% de água na amostra até  $1568,80 \pm 4,35$  com 20% de água.

Conforme mencionado anteriormente, os testes foram realizados com amostras em temperatura constante, 25°C. Entretanto, de acordo com [29], o coeficiente de atenuação não está relacionado com a temperatura das amostras.

No tocante à homogeneização das amostras, [24] discute a dependência existente entre o coeficiente de atenuação com o nível de homogeneização das mesmas, pois quanto mais água é adicionada às amostras, maior a homogeneidade do líquido.

Desta forma, pode-se afirmar que o coeficiente de atenuação está diretamente relacionado à homogeneização das partículas como constatado por [24] e reforçados pelos dados apresentados na Tabela 6.3.

Além disso, por meio da Tabela 6.4, é possível observar que quanto mais água é adicionada na amostra, menor a velocidade de propagação da onda no meio. O conjunto de dados coletados segue em anexo ao trabalho para as verificações.

Assim, com a realização dos experimentos e do cálculo dos coeficientes, foi possível observar que ao considerar a amostra de leite cru como referência, quanto mais água adicionada, maior o coeficiente de atenuação e menor a velocidade de propagação. Assim sendo, foi possível o modelamento das funções de pertinência, bem como do sistema de base de regras que foi construído conforme apresentado a seguir.

A modelagem fuzzy foi desenvolvida utilizando-se o conjunto de ferramentas fuzzy do Matlab<sup>®</sup>.

Para o coeficiente de atenuação utilizou-se como pode ser observado na Tabela 6.5 as caracterizações de muito baixo, baixo, médio, alto e muito alto.

Tab. 6.5: Siglas, significados e limites dos conjuntos fuzzy para o coeficiente de atenuação

<b>Caracterização</b>	<b>Sigla</b>	<b>Limites</b>
Muito Baixo	MB	[0; 4]
Baixo	BB	[1; 7]
Médio	MD	[4; 10]
Alto	AA	[7; 13]
Muito Alto	MA	[10; 18]

Os limites adotados na Tabela 6.5 foram determinados em consonância com os dados apresentados na Tabela 6.3 e com as especificações de órgãos governamentais com base na IN62 [9] e possibilitam, então, o modelamento das funções de pertinência para o coeficiente de atenuação conforme apresentado na Figura 6.4.

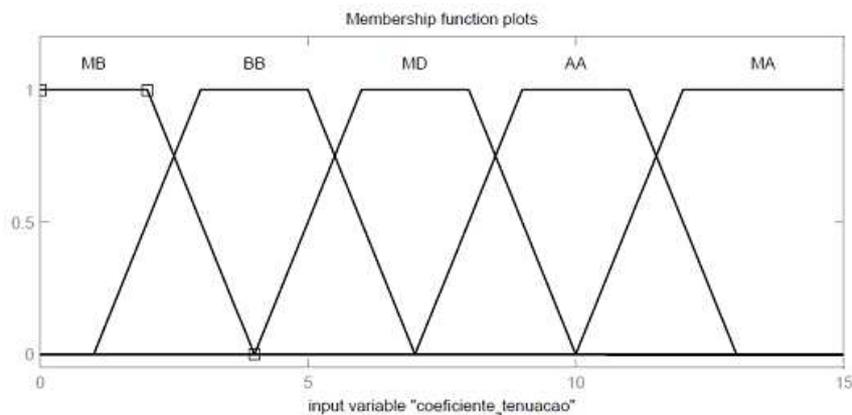


Fig. 6.4: Função de pertinência para o coeficiente de atenuação

Para o modelamento da velocidade de propagação, utilizou-se as caracterizações muito baixa, baixa, média e alta, conforme apresentado na Tabela 6.6.

Tab. 6.6: Siglas, significados e limites dos conjuntos fuzzy para a velocidade de propagação

Caracterização	Sigla	Limites
Muito Baixa	MB	[1464; 1510]
Baixa	BB	[1505; 1520]
Média	MD	[1515; 1535]
Alta	AA	[1530; 1610]

Como se constata na Tabela 6.6, tem-se os limites adotados para a velocidade de propagação das ondas de acordo com as experimentações para os devidos adteramentos considerados. Vale mencionar que a velocidade de propagação da água é 1500 m/s a 1550 m/s.

Dessa forma, a partir desses valores, foi possível a determinação das funções de pertinência para a velocidade de propagação conforme segue na Figura 6.5:

Ambas as variáveis (coeficiente de atenuação e velocidade de propagação), então, funcionaram como entradas do sistema fuzzy cuja saída estava relacionada aos limiares de aceitabilidade de uma amostra caracterizada por aceitável, aceitável com restrições e inaceitável. Ao identificar uma amostra

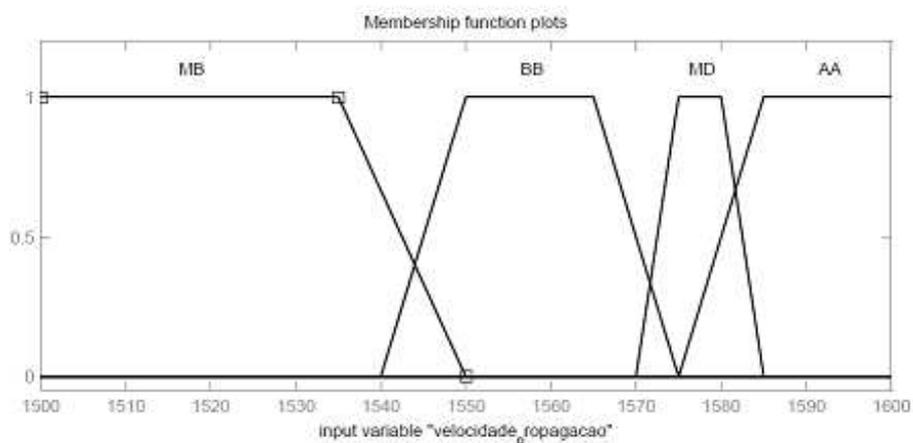


Fig. 6.5: Função de pertinência para a velocidade de propagação

como aceitável com restrições, o sistema está na realidade sugerindo uma análise físico-química para a confirmação da possível adulteração. O mesmo acontece com as amostras consideradas inaceitáveis.

A Tabela 6.7 apresenta essas caracterizações bem como os limites estabelecidos.

Tab. 6.7: Siglas, significados e limites dos conjuntos fuzzy para a aceitabilidade

<b>Caracterização</b>	<b>Sigla</b>	<b>Limites superior e inferior</b>
Inaceitável	IN	[0; 4]
Aceitável com Restrições	AR	[3; 5]
Aceitável	AC	[4; 10]

Ou seja, numa escala de 0 a 10, estimou-se intervalos para a tomada de decisão. As funções de pertinência modeladas são apresentadas na Figura 6.6.

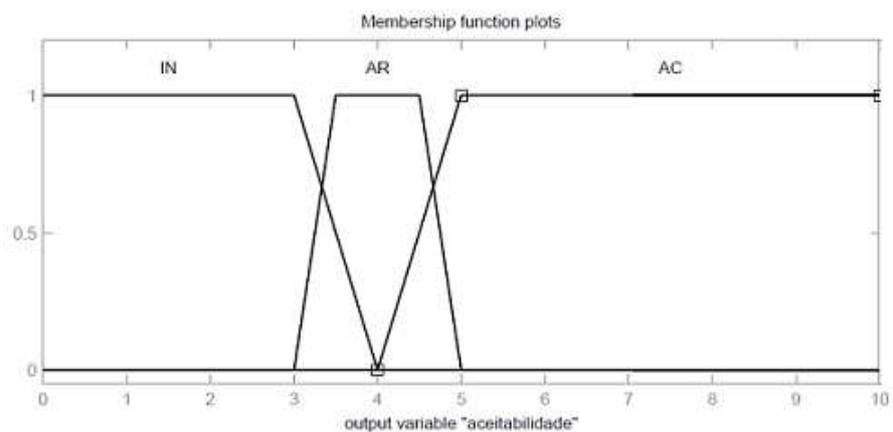


Fig. 6.6: Função de pertinência para o grau de aceitabilidade

Para o conjunto de base de regras, foi estabelecido com base nas experimentações e no relacionamento entre as variáveis conforme segue na Tabela 6.8:

Tab. 6.8: Base de regras do sistema

<b>Coefficiente de atenuação</b>	<b>Velocidade de propagação</b>	<b>Aceitabilidade</b>
BB	AA	AC
MA	BB	IN
MB	AA	AC
MA	MB	IN
AA	BB	IN
AA	MB	IN
MD	BB	IN
MD	MB	IN
MB	MD	AC
BB	MD	AC
AA	MD	IN
MD	MD	AR
MD	AA	AR
AA	AA	AR
MA	AA	IN
MA	MD	IN
BB	BB	AR
MB	BB	AR
MB	MB	AR
BB	MB	AR

No total, foram construídas 20 regras linguísticas que possibilitam o relacionamento entre as variáveis cuja regra mestre é dada por: “SE o coeficiente de atenuação é baixo e a velocidade de propagação é alta, ENTÃO a amostra é aceitável”. Desta máxima, considerada o cenário ideal, extrai-se todas as demais regras, de acordo com os limiares estabelecidos.

Assim, utilizando-se do método de inferência de Mamdani e do método de defuzzificação do Centro de Gravidade, é possível identificar que o comportamento do critério de aceitabilidade das 834 análises das amostras indicado na Figura 6.7.

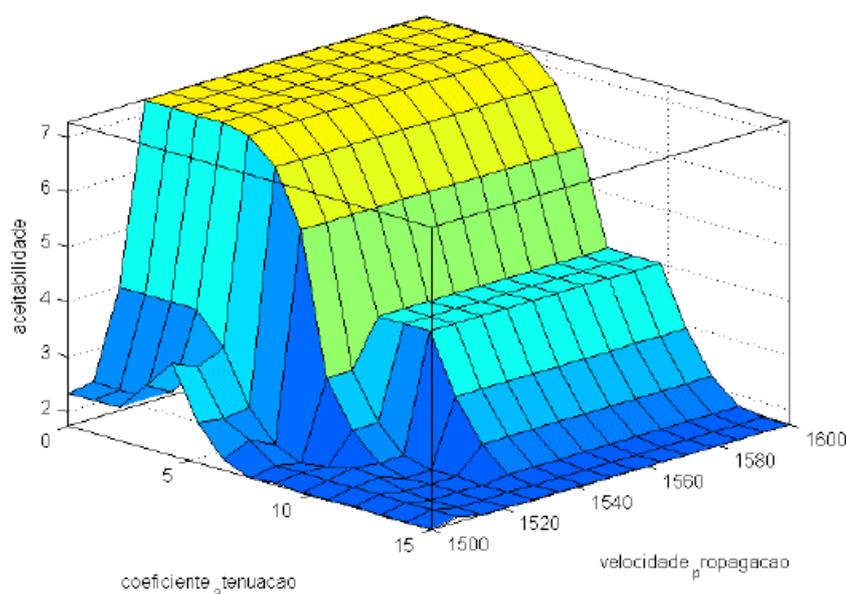


Fig. 6.7: Relação entre as variáveis de entrada e saída

Com este resultado, tem-se a confirmação que o nível de homogeneização da amostra - que influencia o tamanho dos glóbulos de gordura do leite - é o fator que interfere no coeficiente de atenuação [24], e a velocidade de propagação apresenta dependência com a temperatura do leite [29].

Cumpriu-se o objetivo do estudo de desenvolver uma técnica que obtenha os dados via ultrassom de amostras de leite, seguido da identificação de irregularidades por meio de adulterações assistidas. Com isso, de acordo com os resultados, verifica-se que a resposta do sistema fuzzy, após a calibração dos limiares, se mostrou adequada ao cenário, visto que foi adequada aos índices de adulterações assistidas juntamente com os limites mínimos de composição do leite estabelecidos pelos órgãos responsáveis. Os intervalos dos limiares foram definidos levando-se em consideração que as amostras também diferem entre si, em virtude da composição de extratos, teores de gordura, proteína, cálcio,

etc. Como é sabido, fatores como a alimentação, raça, idade, estágio da amamentação entre outros podem afetar a composição físico-química do leite.

# Capítulo 7

## Conclusão

Com a pesquisa desenvolvida foi possível chegar à conclusão que é possível unir os dados oriundos de um ultrassom e relacioná-los por meio de um conjunto de regras fuzzy para a identificação de possíveis adulterações em uma amostra de leite cru, em relação ao índice de água e gordura, com adulterações assistidas.

Pode-se afirmar que o transdutor de 5 MHz utilizado apresentou sensibilidade suficiente para caracterização das amostras, bem como o sistema de base de regras fuzzy também se mostrou adequado para o modelamento que envolve aos limiares estabelecidos em virtude das adulterações.

O ensaio não-destrutivo para caracterização de líquidos é uma alternativa não-invasiva, que associado ao sistema fuzzy fornece resultados consistentes, instantâneos, de baixo custo e além de uma maior viabilidade de análises das amostras.

Os dados oriundos da experimentação, velocidade de propagação e coeficiente de atenuação, tiveram um comportamento diferenciado com o uso do leite cru, comparado aos leites processados (UHT e pasteurizado) encontrados em outros estudos. Isto se deve ao fato da influência da homogeneização das amostras, ou seja, o tamanho das partículas de gordura presentes e não-homogeneizadas no leite cru influenciaram os resultados, bem como as adulterações assistidas.

Embora não substitua as análises regulares físico-químicas, a validação do método via experimentos laboratoriais permite a confirmação da eficiência da técnica, atrelado a um baixo custo, viabilidade que beneficiam o setor leiteiro, com destaque para o pequeno produtor e para o laticínio, de modo que análises possam ser realizadas instantaneamente *in loco* e com maior frequência.

No auxílio à tomada de decisão, no tocante à regularidade da amostra por adulterações com água, a técnica permite, dependendo dos valores obtidos, aceitar a amostra, aceitar com restrições (que sugere uma análise mais específica) e por fim a não aceitação da amostra.

Com relação aos trabalhos futuros, podem abordar a total portabilidade do equipamento, com uso da eletrônica com microprocessadores e identificação de adulterações por outros produtos, além da água. Para melhor adaptação do sistema de base de regras fuzzy e seus limiares, é possível utilizar o sistema com adulterações às cegas, para verificar seu funcionamento, bem como a possibilidade do uso de amostras de diferentes regiões, animais de diferentes raças e suplementações, entre outros.

## Referências Bibliográficas

- [1] R.M. JAFELICE, L. C. BARROS, R. C. BASSANEZI, F. GOMIDE. Fuzzy modeling in asymptomatic HIV virus infected population. *Bulletin of Mathematical Biology*, 19:1597–1620, 2004.
- [2] P. LI, G. LI, L. DAI, Z. LI. Fuzzy logic-based approach for identifying the risk importance of human error. *Safety Science*, 48(7):902–913, Agosto 2010.
- [3] R. J. S. JANG, C. T. SUN. Neuro-fuzzy modeling and control. *Proc. IEEE*, 83:378–405, 1995.
- [4] Centro Integrado de Monitoramento da Qualidade dos Alimentos (CQuali Leite). *CQuali Leite*, 2014.
- [5] MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO, Brasil. *RIISPOA 1952*, março 1952.
- [6] EMBRAPA Gado de Leite. *Panorama do leite*, 2013.
- [7] J. W. DÜRR, M. P. CARVALHO, M. V. SANTOS. *O compromisso com a qualidade do leite no Brasil*. Ed. Passo Fundo, 2004.
- [8] L.C. ROMA JR, J.F.G. MONTOYA, T.T. MARTINS, L.D. CASSOLI, P.F. MACHADO. Sazonalidade do teor de proteína e outros componentes do leite e sua relação com programa de pagamento por qualidade. *Arq. Bras. Med. Vet. Zootec.*, 61(6), 2009.
- [9] MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO, Brasil. *IN 62-2011*, dezembro 2011.
- [10] MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO - SECRETARIA DE DEFESA AGROPECUÁRIA, Brasil. *IN 51-2003*, setembro 2002.

- [11] F. H. MADALENA. Valores econômicos para a seleção de gordura e proteína do leite. *R. Bras. Zootec*, 29, 2000.
- [12] P. SOMMERFELD. *Methods for the examination of milk for chemists, physicians and hygienists*. Alex and Eger, 1901.
- [13] R. GASPARINI. Ministério da Agricultura interdita estabelecimentos que adulteravam leite. *Jornal Agrosoft*, 2014.
- [14] A. RODRIGUES and D. GRIESINGER. Cerca de 1 milhão de litros de leite adulterado foram colocados à venda, diz MP. *Jornal Agrosoft*, 2014.
- [15] C. S. BECCHI. Estudo do índice crioscópico do leite tipo b *in natura* produzido na bacia leiteira do vale do taquari, rs. Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2003.
- [16] INTERNATIONAL DAIRY FEDERATION, Bélgica. *ISO - IDF 5764 - 108*, 2002.
- [17] V. M. TRONCO. *Manual para inspeção da Qualidade do Leite*. Ed. Da UFSM, 2003.
- [18] M. A. GIANNONI, M. L. GIANNONI. *Gado de Leite: Genética e Melhoramento*. Giannoni, 1987.
- [19] Clínica do Leite - Esalq. *Clínica do Leite*, 2014.
- [20] L. F. DORABIATO. Sistema de ultrassom para caracterização de leite bovino. Mestrado, UTPFR, 2007.
- [21] E. T.; BUTTON V. L. S. N.; MARQUES NETO J. F. MAIA, J. M.; COSTA. BUA osteoporosis diagnostic with single position vs scanning systems: a comparative study. *The 2002 IEEE International Ultrasonics Symposium*, 1:1082 – 1085, 2009.
- [22] E. T. ; MARQUES NETO J. F.; BUTTON V. L. S. N. MAIA, J. M. ; COSTA. Broadband ultrasound attenuation in the calcaneal region: a comparative study of single-position versus scanning systems. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 55:64–73, 2008.

- [23] C. F. LANGTON, C. M.; NJEH. The Measurement of Broadband Ultrasonic Attenuation in Cancellous Bone - A Review of the Science and Technology. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 55:1546–1554, 2008.
- [24] C.A. MILES, D. SHORE, and K.R. LANGLEY. Attenuation of ultrasound in milks and creams. *Ultrasonics*, 28(6):394 – 400, 1990.
- [25] C. M.; BARKER S. HULL, J. B.; LANGTON and A. R. JONES. Identification and characterization of materials by broadband ultrasonic attenuation analysis. *Jornal of Materials Processing Technology*, 56:148–157, 1996.
- [26] J. C. FERNANDES. Acústica, Ruídos e Perda de Audição. *Proceedings of the 9th Brazilian Conference on Dynamics Control and their Applications*, 2010.
- [27] D. A. CHRISTENSEN. *Ultrasonic Bioinstrumentation*. Harper & Row, 1988.
- [28] A. A. ASSEF, J. M. MAIA, P. M. GEWEHR, H. R. GAMBA, E. T. COSTA, and V. L. S. N. BUTTON. Sistema para geração, aquisição e processamento de sinais de ultra-som. *Sba: Controle e Automação - Sociedade Brasileira de Automatica*, 20:145 – 155, 06 2009.
- [29] S. L. S. NAZARIO, C. KITANO, J. S. ISEPON, and R. T HIGUTI. Obtenção do teor de gordura do leite através de técnicas de ultra-som e redes neurais. *Brazilian Conference on Dynamics, Control and Their Applications*, 2006.
- [30] F. BACANELI. Determinação do teor de gordura no leite através de parâmetros acústicos. *Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente*, pages 609–614, 1999.
- [31] KINSLER, L. E.; FREY, A. R.; COPPENS, A. B.; SANDERS, J. V. *Fundamentals of Acoustic*. John Wiley & Sons, Inc., 2000.
- [32] ADAMOWSKI, J. C. ; FURUKAWA, C. M. ; HIGUTI, R. T. ; BUIOCHI, F. *Sensores: Tecnologias e Aplicações - Caracterização de Líquidos por Ultra-Som*. Nobel, 2004.
- [33] KERRE E. E. DESCHRIJVER, G. On the relationship between some extensions of fuzzy set theory. *Fuzzy Sets and Systems*, 133:227–235, 2003.

- [34] MARESCHALB B.; ALMEIDA A. D. CAMPOS, A. C. S. M. Fuzzy FlowSort: An integration of the FlowSort method and Fuzzy Set Theory for decision making on the basis of inaccurate quantitative data. *Information Sciences*, 293:115–124, 2014.
- [35] DONG M. C. LOU, C. W. Modeling data uncertainty on electric load forecasting based on Type-2 fuzzy logic set theory. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 25:1567–1576, 2012.
- [36] C.K.; MOK P.Y.; IP W.H. WONG, W.K.; KWONG. Optimizing fabric spreading and cutting schedules in apparel production using genetic algorithms and fuzzy set theory. *Optimizing Decision Making in the Apparel Supply Chain Using Artificial Intelligence (AI)*, pages 132–152, 2013.
- [37] L. C.; BASSANEZI R. C. JAFELICE, R. M.; BARROS. Study of the dynamics of HIV under treatment considering fuzzy delay. *Comp. Appl. Math.*, 33:45–61, 2014.
- [38] R. Z. G; LEITE M. B. F.; BASSANEZI R. C. BARROS, L. C.; OLIVEIRA. Epidemiological Models of Directly Transmitted Diseases: An Approach via Fuzzy Sets Theory. *International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems*, 22:769–781, 2014.
- [39] E. C. C. POLETTI, J. F. C. A. MEYER. Dispersão de Poluentes em Sistema de Reservatório: Modelagem Matemática via Lógica Fuzzy e Aproximação Numérica. *Biomatemática (UNICAMP)*, 19:57–67, 2009.
- [40] L. C.; YAMAKAMI A.; VENDITE L. L. CASTANHO, M. J. P.; BARROS. Fuzzy expert system: An example in prostate cancer. *Applied Mathematics and Computation*, 202:78–85, 2008.
- [41] OLIVEIRA A. G. F. JAFELICE R. S. M.; BUSTORFF-SILVA J. M.; UDELSMANN A. BASSANEZI, B. S. B. Postoperative vomiting in pediatric oncologic patients: prediction by a fuzzy logic model. *Pediatric Anesthesia*, 2012.
- [42] R. Z. G. OLIVEIRA. *Controle ótimo da aplicação de fungicidas na lavoura*. Doutorado, UNICAMP, 1999.

- [43] L. C. ; DIAS M. R. B. ; LEITE M. B. F. OLIVEIRA, R. Z. G. ; BARROS. Um estudo de controle ótimo usando base de regras fuzzy. *Anais do Congresso Brasileiro de Sistemas Fuzzy*, pages 132–152, 2010.
- [44] CASTILLO, O.; MELIN, P. *Type-2 Fuzzy Logic: Theory and Applications*. Springer, 2008.
- [45] L. A. ZADEH. *Fuzzy Sets*. Information and Control, 1965.
- [46] M. MISSIO, L. C. BARROS. Modelo probabilístico para uma variável fuzzy. *Biomatemática (UNICAMP)*, 19:25–38, 2009.
- [47] L. C. BARROS, M. S. PEIXOTO, R. S. M. JAFELICE, R. C. BASSANEZI. Introdução à Teoria dos Conjuntos Fuzzy. *Anais do Simpósio de Aplicações com Lógica Fuzzy*, 2007.
- [48] NERICI, I. G. *Introdução à lógica*. Livraria Nobel, 1976.

## Anexos

Tab. 7.1: Tabela com os coeficientes de atenuação coletados nos experimentos com leite cru sendo leite puro a referência, em dB/m/MHz.

<b>% de Adulteração</b>	<b>3%</b>	<b>6%</b>	<b>10%</b>	<b>15%</b>	<b>20%</b>
	-6,0439972	-1,9241547	-3,5895328	10,7524626	15,7773367
	3,2974902	5,6128886	0,8047239	8,6452441	18,0137429
	2,9151078	-1,3317745	-3,6975397	10,1737065	15,7718065
	6,0250198	7,7569440	-5,3817805	15,0544211	14,1416601
	4,7763440	0,7732832	-3,6983976	10,7874484	15,5267889
	6,2994197	1,7144747	-2,2316122	5,1382527	17,1128464
	7,7286607	1,7850025	-2,2092049	10,4155789	17,6087113
	8,6425176	-1,8798165	-3,4066490	15,2946169	16,6696566
	6,1559761	-2,0121901	-3,0096547	9,5962666	13,2924081
	5,3464733	0,2841504	-1,8209844	15,5043057	19,1117035
	0,9919776	3,1278649	1,4624869	15,8044823	20,8293564
	0,1909698	-0,5608689	4,2472957	13,6972638	23,0657626
	3,8435252	3,7202452	1,3544800	15,2257262	20,8238262
	7,9344813	-2,7049243	-0,3297608	20,1064407	19,1936798
	6,5445061	5,8253028	1,3536221	15,8394681	20,5788085
	5,9512331	6,7664944	2,8204074	10,1902723	22,1648661
	4,9832553	6,8370222	2,8428148	15,4675985	22,6607310
	7,7286607	3,1722032	1,6453707	20,3466366	20,8238262
	8,6425176	3,0398296	2,0423649	14,6482863	18,3444277
	-1,2530406	5,3361701	3,2310352	20,5563254	24,1637231
	7,7286607	5,8713671	10,6795318	15,8394681	29,4979986
	6,2412663	10,1524813	7,7867161	20,1294999	27,2560622
	-1,5022452	3,7273117	6,1024752	26,5386768	25,6259158
	-0,1122700	12,2575389	7,7858581	22,2717041	27,0110446

	0,4810029	13,1987304	9,2526435	16,6225084	28,1539123
	1,4489808	13,2692582	9,2750508	21,8998346	29,0929670
	2,8417382	9,6044392	8,0776067	26,7788726	28,5971021
	5,3282796	9,4720656	8,4746010	21,0805224	28,1539123
	5,1791955	11,7684061	9,6632713	26,9885614	30,5959592
	5,4402585	9,5601010	7,8947230	22,2367183	27,2615924
	2,8417382	5,8713671	10,6795318	21,0805224	29,4979986
	6,2412663	10,1524813	7,7867161	20,1294999	27,2560622
	-1,5022452	3,7273117	6,1024752	26,5386768	25,6259158
	-0,1122700	12,2575389	7,7858581	22,2717041	27,0110446
	0,4810029	13,1987304	9,2526435	16,6225084	28,5971021
	1,4489808	13,2692582	9,2750508	21,8998346	29,0929670
	2,8417382	9,6044392	8,0776067	26,7788726	20,8238262
	5,3282796	9,4720656	8,4746010	21,0805224	28,1539123
	5,1791955	11,7684061	9,6632713	26,9885614	30,5959592
	2,4193062	6,5391487	4,8737707	19,2157661	24,2406402
	3,2203140	2,8504148	7,6585795	17,1085476	26,4770463
	0,4322414	7,1315290	4,7657638	18,6370100	24,2351099
	4,5231975	0,7063595	3,0815229	23,5177245	22,6049635
	3,1332223	9,2365866	4,7649058	19,2507518	23,9900923
	2,5399494	10,1777781	6,2316912	13,6015561	25,5761499
	-1,5719715	10,2483060	6,2540985	18,8788823	26,0720147
	-0,1792141	6,5834869	5,0566544	23,7579203	25,1329600
	2,3073273	6,4511133	5,4536487	18,0595701	21,7557115
	2,1582432	8,7474538	6,6423190	23,9676091	27,5750069
	4,3447460	8,5765674	6,9111893	21,2531847	26,2780588
	4,4567248	4,8878335	9,6959982	19,1459662	28,5144650
	1,6051772	9,1689476	6,8031824	20,6744286	28,5144650

	-2,4857789	2,7437781	5,1189416	25,5551431	24,6423822
	-1,0958037	11,2740053	6,8023245	21,2881705	26,0275109
	-0,5025307	12,2151968	8,2691098	15,6389748	27,6135685
	0,4654471	12,2857246	8,2915172	20,9163010	28,1094334
	1,8582045	8,6209056	7,0940731	25,7953390	27,1703786
	4,3447460	8,4885320	7,4910674	25,7953390	23,7931301
	4,1956618	10,7848725	8,6797376	26,0050278	29,6124256
	5,9575000	4,7712000	8,3075000	6,3262000	9,0771100
	5,1495000	4,6097000	7,2546000	7,0110000	8,5683000
	5,2021000	2,1894000	4,9672000	7,1870000	5,2016000
	0,3034500	2,4585000	4,7431000	7,2244000	5,1655000
	1,2818000	4,4807000	5,7904000	8,7956000	8,7185000
	4,4490000	2,9722000	3,8341000	6,8393000	8,7041000
	3,6410000	3,6603567	2,7264057	10,7908691	8,7489000
	4,1002000	2,8149000	6,3512000	4,3699000	7,1148000
	3,1932000	2,6534000	5,2983000	5,0547000	6,6119000
	3,2458000	2,3309000	3,0109000	5,2306000	3,2453000
	-1,6529000	5,0219000	2,7867000	5,2681000	20,8238262
	-6,7455000	3,8341000	3,8341000	6,8392000	6,7622000
	0,2980045	1,3081895	2,7264057	4,8829000	6,7478000
	-6,1180912	4,7186519	1,2216130	6,3294540	6,7926000
	6,7889000	5,6026000	9,1390000	7,1576000	9,9025000
	5,9810000	5,4411000	8,0860000	7,8424000	9,3997000
	6,0335000	3,0209000	5,7986000	8,0184000	6,0331000
	1,1349000	3,2900000	5,5745000	8,0559000	5,9970000
	2,1132000	5,3122000	6,6219000	9,6270000	9,5500000
	2,0582925	4,5130671	10,7908691	7,6707000	9,5356000
	1,8509919	3,6847083	0,2685447	-3,5351243	9,5803000

	4,4490000	3,2627000	6,7990000	4,8177000	7,5626000
	3,6410000	3,1012000	5,7461000	5,5025000	7,0598000
	3,6936000	6,8090000	3,4587000	5,6784000	3,6931000
	-1,2051000	9,5000000	3,2346000	5,7159000	3,6570000
	-2,2674000	2,9722000	4,2819000	7,2871000	7,2100000
	-0,2980154	3,6603567	0,7457545	5,3307000	7,1956000
	0,1216729	2,4703622	10,3136593	6,7262000	7,2404000
	5,8440000	4,6581000	8,1945000	6,2131000	8,9580000
	5,0365000	4,4966000	7,1410000	6,8979000	8,4552000
	5,0890000	2,0764000	4,8541000	7,0739000	5,0886000
	1,9040000	2,3455000	4,6300000	7,1114000	5,0525000
	1,1687000	4,3677000	5,6774000	8,6825000	8,6055000
	0,2980045	0,4702163	11,2667277	6,7262000	8,5911000
	5,3560800	0,4702163	8,9146960	5,6784000	8,6358000
	6,4358809	6,4472909	10,0369026	9,5230615	10,4299831
	4,3386683	6,4846210	9,3627075	9,5931943	9,6628939
	4,8828936	4,7186519	6,1553893	9,5457349	9,6628939
	-1,5332022	6,2120966	5,2695538	8,9985759	8,9271100
	-0,7711910	5,8930785	7,9367403	11,5642998	9,6956503
	1,8509919	4,7186519	10,7908691	8,6102775	9,8496529
	0,2980045	5,8992294	6,1553893	9,2328677	9,7157748
	6,1230137	6,1344237	9,7240354	9,2101943	9,6956503
	4,0258011	6,1717539	9,0498404	9,2803272	9,3500267
	4,5700264	4,4057848	5,8425222	9,2328677	8,6520049
	-1,8460694	5,8992294	4,9566867	8,6857087	8,6142428
	-1,0840582	5,5802114	7,6238731	11,2514327	9,3827831
	4,3386683	4,7186519	5,2695538	8,2974104	9,5367857
	0,2980045	5,8992294	10,7908691	9,2328677	9,4029076

	1,8509919	1,8624019	5,4520136	4,9381724	5,8450941
	-0,2462207	1,8997320	4,7778185	5,0083053	5,0780048
	2,0582925	0,1337629	1,5705003	4,9608458	4,3799831
	1,8068169	1,6272076	0,6846648	4,4136868	4,3422210
	3,5449548	1,3081895	3,3518512	6,9794108	5,1107612
	2,5852213	4,7186519	5,2695538	4,0253885	5,2647638
	6,5383144	5,8992294	10,7908691	9,2328677	5,1308857
	6,7440907	-2,7185370	2,5190079	5,1190136	-1,3812734
	-1,3923189	-2,6802433	3,2217589	1,8699996	-0,8960987
	-2,3520524	-2,8261618	0,8697273	1,3490306	5,6449186
	1,6010407	0,4702163	2,2686905	4,3013220	3,9343718
	-1,5066544	0,4702163	2,7459004	0,9213422	6,1128280
	12,1034072	4,5130671	2,7264057	3,1188677	-3,3814193
	11,8519316	3,6847083	1,2216130	-0,1301462	-2,8962446
	-0,6519740	3,6603567	10,7908691	-0,6511153	3,6447728
	-0,2349055	2,4703622	0,2685447	2,3011762	1,9342260
	-3,5068002	3,5026989	0,7457545	-1,0788036	4,1126822
	11,5080605	4,1233362	10,3136593	3,7142144	-2,7860726
	11,2565849	3,5872378	1,8169597	0,4652004	-2,3008979
	-1,1056353	3,7637787	1,4021494	-0,0557686	4,2401194
	0,6885669	1,8750155	0,8638913	2,8965228	2,5295726
	-2,9114536	3,3207669	1,3411012	-0,4834570	4,7080288
	2,0582925	5,3264318	1,4021494	13,1639824	14,1577968
	1,8068169	5,3179620	11,2667277	9,9149684	11,9793406
	3,5449548	5,2188070	8,9146960	9,3939994	13,6898874
	2,5852213	7,5747524	10,3136593	12,3462908	11,9793406
	6,5383144	5,7766268	10,7908691	8,9663110	14,1577968
	6,9955662	0,3891580	-3,5351243	8,2267087	1,7264216

	6,7440907	0,3806883	6,3294540	4,9776947	2,2115963
	-1,3923189	0,2815333	3,9774223	4,4567257	8,7526137
	-2,3520524	2,6374787	5,3763856	7,4090171	7,0420669
	1,6010407	0,8393531	5,8535954	4,0290373	9,2205231
Média	2,7434098	4,8442921	5,1679854	11,5705194	14,1190375

Tab. 7.2: Tabela com os valores de velocidade de propagação coletados nos experimentos com leite cru, em m/s.

<b>% de Adulteração</b>	<b>3%</b>	<b>6%</b>	<b>10%</b>	<b>15%</b>	<b>20%</b>	
	1582,01	1576,76	1576,76	1575,46	1572,85	1570,25
	1583,33	1587,30	1572,85	1575,46	1571,55	1571,55
	1583,33	1578,07	1576,76	1574,15	1572,85	1570,25
	1583,33	1578,07	1588,63	1574,15	1572,85	1567,66
	1593,96	1578,07	1575,46	1575,46	1572,85	1570,25
	1580,70	1578,07	1588,63	1575,46	1570,25	1571,55
	1580,70	1576,76	1587,30	1574,15	1572,85	1568,95
	1578,07	1578,07	1587,30	1572,85	1572,85	1571,55
	1583,33	1575,46	1574,15	1572,85	1572,85	1571,55
	1582,01	1589,96	1575,46	1574,15	1574,15	1568,95
	1582,01	1576,76	1576,76	1575,46	1572,85	1570,25
	1583,33	1587,30	1572,85	1575,46	1571,55	1571,55
	1583,33	1578,07	1576,76	1574,15	1572,85	1570,25
	1583,33	1578,07	1588,63	1574,15	1572,85	1567,66
	1593,96	1578,07	1575,46	1575,46	1572,85	1570,25
	1580,70	1578,07	1588,63	1575,46	1570,25	1571,55
	1580,70	1576,76	1587,30	1574,15	1572,85	1568,95
	1578,07	1578,07	1587,30	1572,85	1572,85	1571,55
	1583,33	1575,46	1574,15	1572,85	1572,85	1571,55
	1582,01	1589,96	1575,46	1574,15	1574,15	1568,95
	1582,01	1576,76	1576,76	1575,46	1572,85	1570,25
	1583,33	1587,30	1572,85	1575,46	1571,55	1571,55
	1583,33	1578,07	1576,76	1574,15	1572,85	1570,25
	1583,33	1578,07	1563,79	1574,15	1572,85	1567,66
	1593,96	1578,07	1575,46	1575,46	1572,85	1570,25

	1580,70	1578,07	1563,79	1575,46	1570,25	1571,55
	1580,70	1576,76	1587,30	1574,15	1572,85	1568,95
	1578,07	1578,07	1587,30	1572,85	1572,85	1571,55
	1583,33	1575,46	1574,15	1572,85	1572,85	1571,55
	1582,01	1589,96	1575,46	1574,15	1574,15	1568,95
	1582,01	1576,76	1576,76	1575,46	1572,85	1570,25
	1583,33	1587,30	1572,85	1575,46	1571,55	1571,55
	1583,33	1578,07	1576,76	1575,46	1572,85	1570,25
	1583,33	1578,07	1574,15	1574,15	1572,85	1567,66
	1593,96	1578,07	1575,46	1575,46	1572,85	1570,25
	1580,70	1578,07	1574,15	1575,46	1570,25	1571,55
	1580,70	1576,76	1587,30	1574,15	1572,85	1568,95
	1578,07	1578,07	1587,30	1572,85	1572,85	1571,55
	1583,33	1575,46	1574,15	1572,85	1572,85	1571,55
	1582,01	1589,96	1575,46	1574,15	1574,15	1568,95
	1582,01	1576,76	1576,76	1575,46	1572,85	1570,25
	1583,33	1587,30	1572,85	1575,46	1571,55	1571,55
	1583,33	1578,07	1576,76	1574,15	1572,85	1570,25
	1583,33	1578,07	1588,63	1574,15	1572,85	1567,66
	1593,96	1578,07	1575,46	1575,46	1572,85	1570,25
	1580,70	1578,07	1588,63	1575,46	1570,25	1571,55
	1580,70	1576,76	1587,30	1574,15	1572,85	1568,95
	1578,07	1578,07	1587,30	1572,85	1572,85	1571,55
	1583,33	1575,46	1574,15	1572,85	1572,85	1571,55
	1582,01	1589,96	1575,46	1574,15	1574,15	1568,95
	1583,33	1566,36	1563,79	1562,50	1562,50	1562,50
	1583,33	1568,95	1563,79	1565,07	1562,50	1561,22
	1583,33	1567,66	1565,07	1562,50	1559,93	1559,93

	1593,96	1568,95	1565,07	1563,79	1558,65	1559,93
	1580,70	1567,66	1562,50	1563,79	1562,50	1559,93
	1580,70	1568,95	1563,79	1575,46	1562,50	1561,22
	1578,07	1568,95	1575,46	1575,46	1572,85	1562,50
	1583,33	1568,95	1567,66	1563,79	1562,50	1562,50
	1583,33	1567,66	1567,66	1563,79	1561,22	1562,50
	1583,33	1565,07	1575,46	1565,07	1562,50	1562,50
	1593,96	1567,66	1563,79	1563,79	1562,50	1561,22
	1580,70	1566,36	1565,07	1565,07	1562,50	1562,50
	1580,70	1567,66	1575,46	1563,79	1572,85	1562,50
	1578,07	1571,55	1570,25	1570,25	1567,66	1566,36
	1578,07	1571,55	1570,25	1570,25	1567,66	1566,36
	1572,85	1571,55	1570,25	1570,25	1568,95	1566,36
	1572,85	1572,85	1570,25	1570,25	1568,95	1567,66
	1572,85	1571,55	1571,55	1570,25	1566,36	1567,66
	1593,96	1571,55	1570,25	1570,25	1567,66	1567,66
	1580,70	1571,55	1570,25	1570,25	1567,66	1567,66
	1580,70	1571,55	1570,25	1570,25	1568,95	1566,36
	1578,07	1572,85	1570,25	1570,25	1568,95	1567,66
	1583,33	1571,55	1563,79	1570,25	1566,36	1567,66
	1582,01	1571,55	1563,79	1570,25	1567,66	1566,36
	1582,01	1571,55	1563,79	1570,25	1567,66	1566,36
	1583,33	1571,55	1570,25	1570,25	1568,95	1566,36
	1582,01	1572,85	1570,25	1570,25	1568,95	1567,66
	1583,33	1571,55	1571,55	1570,25	1566,36	1567,66
	1583,33	1571,55	1570,25	1570,25	1567,66	1566,36
	1583,33	1571,55	1570,25	1570,25	1567,66	1566,36
	1593,96	1571,55	1570,25	1570,25	1568,95	1566,36

	1580,70	1572,85	1570,25	1570,25	1568,95	1567,66
	1580,70	1571,55	1570,25	1570,25	1566,36	1567,66
	1578,07	1571,55	1570,25	1570,25	1567,66	1566,36
	1583,33	1571,55	1570,25	1570,25	1567,66	1566,36
	1582,01	1571,55	1563,79	1570,25	1568,95	1566,36
	1582,01	1572,85	1563,79	1570,25	1568,95	1567,66
	1583,33	1571,55	1563,79	1570,25	1566,36	1567,66
	1582,01	1576,76	1576,76	1575,46	1572,85	1570,25
	1583,33	1587,30	1572,85	1575,46	1571,55	1571,55
	1583,33	1578,07	1576,76	1574,15	1572,85	1570,25
	1583,33	1578,07	1588,63	1574,15	1572,85	1567,66
	1593,96	1578,07	1575,46	1575,46	1572,85	1570,25
	1580,70	1578,07	1588,63	1575,46	1570,25	1571,55
	1580,70	1576,76	1587,30	1574,15	1572,85	1568,95
	1578,07	1578,07	1587,30	1572,85	1572,85	1571,55
	1583,33	1575,46	1574,15	1572,85	1572,85	1571,55
	1582,01	1589,96	1575,46	1574,15	1574,15	1568,95
	1582,01	1576,76	1576,76	1575,46	1572,85	1570,25
	1583,33	1587,30	1572,85	1575,46	1571,55	1571,55
	1583,33	1578,07	1576,76	1574,15	1572,85	1570,25
	1583,33	1578,07	1588,63	1574,15	1572,85	1567,66
	1593,96	1578,07	1575,46	1575,46	1572,85	1570,25
	1580,70	1578,07	1588,63	1575,46	1570,25	1571,55
	1580,70	1576,76	1587,30	1574,15	1572,85	1568,95
	1578,07	1578,07	1587,30	1572,85	1572,85	1571,55
	1583,33	1575,46	1574,15	1572,85	1572,85	1571,55
	1582,01	1589,96	1575,46	1574,15	1574,15	1568,95
	1582,01	1576,76	1576,76	1575,46	1572,85	1570,25

	1583,33	1587,30	1572,85	1575,46	1571,55	1571,55
	1583,33	1578,07	1576,76	1574,15	1572,85	1570,25
	1583,33	1578,07	1563,79	1574,15	1572,85	1567,66
	1593,96	1578,07	1575,46	1575,46	1572,85	1570,25
	1580,70	1578,07	1563,79	1575,46	1570,25	1571,55
	1580,70	1576,76	1587,30	1574,15	1572,85	1568,95
	1578,07	1578,07	1587,30	1572,85	1572,85	1571,55
	1583,33	1575,46	1574,15	1572,85	1572,85	1571,55
	1582,01	1589,96	1575,46	1574,15	1574,15	1568,95
	1582,01	1576,76	1576,76	1575,46	1572,85	1570,25
	1583,33	1587,30	1572,85	1575,46	1571,55	1571,55
	1583,33	1578,07	1576,76	1575,46	1572,85	1570,25
	1583,33	1578,07	1574,15	1574,15	1572,85	1567,66
	1593,96	1578,07	1575,46	1575,46	1572,85	1570,25
	1580,70	1578,07	1574,15	1575,46	1570,25	1571,55
	1580,70	1576,76	1587,30	1574,15	1572,85	1568,95
	1578,07	1578,07	1587,30	1572,85	1572,85	1571,55
	1583,33	1575,46	1574,15	1572,85	1572,85	1571,55
	1582,01	1589,96	1575,46	1574,15	1574,15	1568,95
	1582,01	1576,76	1576,76	1575,46	1572,85	1570,25
	1583,33	1587,30	1572,85	1575,46	1571,55	1571,55
	1583,33	1578,07	1576,76	1574,15	1572,85	1570,25
	1583,33	1578,07	1588,63	1574,15	1572,85	1567,66
	1593,96	1578,07	1575,46	1575,46	1572,85	1570,25
	1580,70	1578,07	1588,63	1575,46	1570,25	1571,55
	1580,70	1576,76	1587,30	1574,15	1572,85	1568,95
	1578,07	1578,07	1587,30	1572,85	1572,85	1571,55
	1583,33	1575,46	1574,15	1572,85	1572,85	1571,55

	1582,01	1589,96	1575,46	1574,15	1574,15	1568,95
	1583,33	1566,36	1563,79	1562,50	1562,50	1562,50
Média	1582,84	1577,04	1575,78	1572,78	1570,83	1568,80

Tab. 7.3: Tabelas com os coeficientes de atenuação coletados nos experimentos com leite UHT Desnatado, sendo água a referência, em dB/m/MHz.

Adulteração	0%	3%	6%	10%	15%	20%
	2,1412944	2,4321122	2,6557489	2,5149135	1,6334611	2,1974235
	2,2301566	2,0768807	2,4333908	2,3354001	1,7349163	1,7462079
	2,5176026	2,3395678	2,5389975	2,1959679	2,4775027	1,4622688
	2,6600823	2,9136874	1,8525877	1,5736306	2,1176920	1,6632713
	3,1698112	2,0674724	2,8435252	2,2092045	4,5386768	1,4770463
	2,0809180	2,3717358	2,5953725	2,4545370	1,5730846	2,1370471
	2,1697801	2,0165043	2,3730143	2,2750236	1,6745399	1,6858314
	2,4572262	2,2791914	2,4786210	2,1355914	2,4171262	1,4018924
	2,5997059	2,8533110	1,7922113	1,5132541	2,0573156	1,9885614
	3,1094348	2,3354335	3,0149467	1,8798168	2,5177245	1,5959592
	2,7668886	3,0577064	3,2813431	3,1405076	2,2590552	2,8230177
	2,8557507	2,7024749	3,0589849	2,9609942	2,3605105	2,3718020
	3,1431968	2,9651620	3,1645916	2,8215620	3,1030968	2,0878630
	3,2856765	3,5392816	2,4781818	2,1992247	2,7432862	1,5750069
	3,7954053	2,1456785	2,5679957	1,6051772	2,2540985	1,5025307
	1,9572476	2,2480654	2,4717021	2,3308666	1,4494143	2,0133767
	2,0461097	1,8928339	2,2493439	2,1513533	1,5508695	1,5621611
	2,3335558	2,1555210	2,3549507	2,0119210	2,2934558	1,2782220
	2,4760355	2,7296406	1,6685409	1,3895838	1,9336452	1,6423822
	2,9857644	1,9043624	2,0193745	1,5736305	2,3598468	1,0958037
	1,8802108	2,1710286	2,3946653	2,2538298	1,3723774	1,9363399
	1,9690729	1,8157971	2,1723071	2,0743164	1,4738327	1,4851242
	2,2565190	2,0784842	2,2779138	1,9348842	2,2164190	1,2011852
	2,3989987	2,6526038	1,5915041	1,3125469	1,8566084	2,2780588
	2,9087276	2,3434653	1,8536843	2,1332223	1,2483060	1,7788726
Média	2,5678069	2,4645795	2,3941987	2,1789954	2,0149105	1,8259842

Tab. 7.4: Tabelas com a velocidade de propagação coletadas nos experimentos com leite UHT Desnatado, em m/s.

Adulteração	0%	3%	6%	10%	15%	20%
	1576,76	1575,46	1574,15	1568,95	1566,36	1566,36
	1574,15	1574,15	1575,46	1568,95	1566,36	1567,66
	1576,76	1575,46	1575,46	1571,55	1568,95	1568,95
	1576,76	1572,85	1574,15	1567,66	1570,25	1568,95
	1574,15	1576,76	1575,46	1568,95	1568,95	1566,36
	1576,76	1575,46	1574,15	1568,95	1566,36	1566,36
	1574,15	1574,15	1575,46	1568,95	1566,36	1567,66
	1576,76	1575,46	1575,46	1571,55	1568,95	1568,95
	1576,76	1572,85	1574,15	1567,66	1570,25	1568,95
	1578,07	1576,76	1574,15	1571,55	1566,36	1566,36
	1576,76	1575,46	1574,15	1568,95	1566,36	1566,36
	1574,15	1574,15	1575,46	1568,95	1566,36	1567,66
	1576,76	1575,46	1575,46	1571,55	1568,95	1568,95
	1576,76	1572,85	1574,15	1567,66	1570,25	1568,95
	1574,15	1576,76	1575,46	1567,66	1566,36	1566,36
	1576,76	1575,46	1574,15	1568,95	1566,36	1566,36
	1574,15	1574,15	1575,46	1568,95	1566,36	1567,66
	1576,76	1575,46	1575,46	1571,55	1568,95	1568,95
	1576,76	1572,85	1574,15	1567,66	1570,25	1568,95
	1574,15	1576,76	1574,15	1571,55	1568,95	1566,36
	1576,76	1575,46	1574,15	1568,95	1566,36	1566,36
	1574,15	1574,15	1575,46	1568,95	1566,36	1567,66
	1576,76	1575,46	1575,46	1571,55	1568,95	1568,95
	1576,76	1572,85	1574,15	1567,66	1570,25	1568,95
	1574,15	1576,76	1575,46	1568,95	1566,36	1566,36
Média	1576,20	1574,93	1574,80	1569,28	1567,98	1567,48